DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES
À la croisée des Sciences

Sous la direction d'Hervé LE TREUT

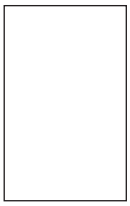
Les impacts du changement climatique en Aquitaine



Les impacts du changement climatique en Aquitaine

Un état des lieux scientifique

Couverture :



Vue aérienne de la partie est du Banc d'Arguin après la tempête Xynthia - 26 février 2010, où le sable recouvre les parcs à huîtres en exploitation (© Julien Haas, Fédération Départementale des Chasseurs de Gironde).

4e de couverture :

1 La façade de la ville de Bordeaux au niveau de la place de la Bourse (© Teddy Auly, Université de Bordeaux 3).

2 Vue aérienne d'un étang médocain (© Julien Haas, Fédération Départementale des Chasseurs de Gironde).

3 Les falaises littorales du Pays Basque (© Bérengère Clavé-Papion, Observatoire de la Côte Aquitaine).

4 La source karstique d'Uza croise le système karstique du Neez, alimentant la ville de Pau en eau potable (© Teddy Auly, Université de Bordeaux 3).

5 Crue de la Garonne le 26 janvier 2009 à Marmande, deux jours après la tempête Klaus (© Julien Matthys).

6 Vue de la Vallée d'Ossau et de l'ombilic Bielle-Castet depuis le versant sud de la crête de Lazerque (© Teddy Auly, Université de Bordeaux 3).

7 Les plages aquitaines, commune de Lacanau, hiver 2009 (© Teddy Auly, Université de Bordeaux 3).

8 Agriculture dans le marais de Reysson, Médoc (© Teddy Auly, Université de Bordeaux 3).

9 Cabane tchanquée au coeur du Bassin d'Arcachon, près de l'Île aux Oiseaux (© Anne-Marie Meyer, Université de Bordeaux 3).

Secrétariat et coordination pré-éditoriale : Emilie Bourdenx, UMR 5805 EPOC
Secrétariat de rédaction et d'édition, maquettes intérieure et de couverture, cartographie et infographie : Teddy Auly, Presses Universitaires de Bordeaux
Secrétariat de rédaction, relectures : Sylvie Barbeyron, Presses Universitaires de Bordeaux
Préparation de copie : Annelise Pottier, Presses Universitaires de Bordeaux

Presses Universitaires de Bordeaux / LGPA-éditions
Université Michel de Montaigne-Bordeaux 3
Domaine universitaire
33607 PESSAC Cedex - France
Courriel : pub@u-bordeaux3.fr

© Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, 2013
© LGPA-éditions, Pessac, 2013
ISBN : 978-2-86781-874-5

DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES
À la croisée des Sciences

Les impacts du changement climatique en Aquitaine

Un état des lieux scientifique



Sous la direction d'Hervé LE TREUT

PRESSES UNIVERSITAIRES DE BORDEAUX

LGPA-ÉDITIONS



Le sud de l'Aquitaine, entre océan et montagne, vue depuis la Rhune, en Pays Basque (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).



SOMMAIRE

I

Contexte et enjeux du climat pour l'Aquitaine

II

Défis pour les ressources, les activités et la qualité de vie en Aquitaine

III

Éléments de synthèse

Chapitre 1 : Du climat global au climat régional 19
Hervé LE TREUT

Chapitre 2 : Du climat du passé au climat du futur 41
Francis GROUSSET

Chapitre 3 : Enjeux sociétaux : vulnérabilités face au changement climatique 61
Denis SALLES

Chapitre 4 : Enjeux économiques : évaluation des impacts du changement climatique 89
Jean-Christophe PERREAU

Chapitre 5 : Agriculture et forêts 107
I- Les activités agricoles — Nathalie OLLAT
II- Les forêts — Antoine KREMER

Chapitre 6 : Estuaires et domaine côtier 155
I- Modification du littoral — Philippe BONNETON
II- Biodiversité marine — Benoit SAUTOUR
III- Ressources exploitées par la pêche et l'ostréiculture — Nathalie CAILL-MILLY, Patrick PROUZET

Chapitre 7 : La montagne 211
Frank D'AMICO

Chapitre 8 : L'air et l'eau 235
I- Qualité de l'air — Eric VILLENAVE
II- Qualité de l'eau — Hélène BUDZINSKI
III- Disponibilité des eaux de surface — Henri ETCHEBER
IV- Disponibilité des eaux souterraines — Alain DUPUY

Chapitre 9 : Risques sanitaires 287
Isabelle BALDI

Chapitre 10 : Bilan de l'étude : enjeux, questionnements et recommandations 305

Glossaire/Acronymes 319

Références bibliographiques 328

Les auteurs 363

Préface

Plus personne ne conteste que la terre connaît un changement climatique profond. Depuis une vingtaine d'années toutes les études témoignent de sa réalité et de sa rapidité. Sous l'effet de l'activité humaine le climat change et un défi majeur est posé à l'humanité – peut-être le plus important depuis des millénaires.

Le changement climatique va profondément modifier notre activité.

De ce constat est né en Aquitaine le projet d'étudier les conséquences du changement climatique à l'échelle d'une région. Quelles vont être les répercussions à l'échelle de notre territoire d'un phénomène qui ignore les frontières ? Quel sera l'impact d'une élévation des températures sur notre mode de vie ? Sur notre modèle de développement économique ? Sur notre environnement ? Comment en prédire les effets ? Comment les anticiper ?

Nul mieux qu'Hervé Le Treut ne pouvait mener à bien ce travail d'éclaireur voulu par le Conseil régional. Climatologue de réputation internationale, il est l'une des personnalités du GIEC, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Le résultat présenté dans cet ouvrage par Hervé Le Treut et les équipes interdisciplinaires qui ont travaillé avec lui est impressionnant. Il faut que les Aquitains lisent le fruit de plusieurs mois d'enquête et se l'approprient. Ils découvriront au fil des pages que la hausse locale des températures – jusqu'à 10 °C en moyenne estivale à la fin du siècle – va nous contraindre à repenser nombre de nos habitudes qu'il s'agisse de la gestion de l'eau, de l'agriculture, des modes de transport…

Le travail d'investigation mené par Hervé Le Treut et tous ceux qui ont travaillé avec lui ne se conclut pas par un catalogue de mesures, une sorte de boîte à outils dans laquelle il suffirait de piocher pour trouver la solution. Il est tout sauf un « livre rouge ». Si des recommandations sont faites – que la Région suivra –, c'est avant tout à un travail de veille permanente qu'il nous convie. « Il faut se préparer à penser différemment par rapport à un grand nombre de situations, lit-on dans le document. Il faut intégrer cette idée d'un futur différent dans un grand nombre de secteurs. Et il faut le faire avec une réelle réactivité […]. »

Pour nous et les générations futures nous allons nous atteler à cette tâche. Avec un sentiment d'urgence.

Alain Rousset,
Président du Conseil régional d'Aquitaine.

Les auteurs

(cf. p. 363)

S. Abadie, G. Abril, D. Amouroux, X. Arnauld De Sartre, I. Auby, L. Augusto, G. Bachelet, I. Baldi, V. Banos, A. Bardonnet, J. Baron, M. Baudrimont, M.L. Begout, Y. Bérard, V. Bernard, C. Bernard, M. Berroneau, P. Bertran, G. Biais, G. Blanc, P. Boet, P. Bonneton, A. Borja, C. Boschet, C. Bouisset, D. Breysse, N. Brisson†, Y. Brunet, H. Budzinski, N. Caill-Milly, C. Cassou, I. Castège, B. Castelle, A. Chaalali, G. Chust, S. Clarimont, B. Clavé-Papion, A. Colin, D. Compagnon, E. Corcket, B. Coupry, G. Coureau, A. Coynel, F.X. Cuende, F. D'Amico, J. D'Elbée, J.C. Dauvin, V. David, B. De Grissac, X. De Montaudouin, M.N. De Casamajor, J. Dehez, Y. Del Amo, S. Delzon, B. Denoyes, M.L. Desprez-Loustau, P. Deuffic, M.H. Devier, L. Doyen, J.C. Duplessy, A. Dupuy, H. Etcheber, J. Favennec, I. Garcia de Cortazar-Atauri, E. Garnier, G. Gault, D. Genty, E. George-Marcepoil, O. Girardclos, N. Goñi, P. Gonzalez, J.P. Goutouly, P.Y. Guernion, F. Grousset, V. Hanquiez, F. Hissel, F. Huneau, D. Idier, G. Irichabeau, H. Jactel, M. Jarry, R. Kantin, M. Kleinhentz, A. Kremer, V. Laborie, E. Lamaud, G. Largier, M. Launay, S. Lavaud, S. Lavorel, Y. Le Bagousse Pinguet, G. Le Cozannet, H. Le Treut, M. Leandri, N. Lenôtre, M. Lepage, T. Leurent, F. Levrault, M. Lissardy, L. Londeix, D. Loustau, C. Lucas, J.P. Maalouf, J.J. Malfait, C. Mallet, D. Malvy, P. Marchet, P. Maron, J.C. Martin, S. Mathoulin-Pelissier, J. Maugein, D. Maurer, N. Mazella, P. Mazellier, C. Meredieu, R. Michalet, O. Mora, G. Morandeau, V. Moreaux, S. Morin, T. Oblet, N. Ollat, J.-C. Péreau, E. Perraudin, P. Pieri, D. Piou, S. Planton, P. Point, P. Prouzet, J.C. Quéro, C. Raherison, T. Rambonilaza, J.P. Rebillard, P. Régnacq, M. Regolini, T. Renault, A. Ribes, E. Rochard, N. Rocle, P. Rolland, R. Salamon, D. Salles, F. Sanchez, M.F. Sanchez-Goñi, E. Sauquet, B. Sautour, J. Schäfer, B. Seguin, G Simonet, A. Sota, A. Sottolichio, J.P. Tastet, J.P. Terreaux, B. Touzard, P. Trichet, J.P. Urcun, C. Van Leeuwen, S. Vaucelle, F. Verdin, E. Villenave, V. Vles, S. Zaragosi.

Au delà des coordinateurs de chapitre, cet ouvrage est le résultat du travail d'un très grand nombre de contributeurs, venant d'une grande variété d'organisations. Leur rôle plus précis est détaillé en introduction des différents chapitres.

Avant-Propos

Le travail présenté dans ce rapport a été commencé en 2011, à l'initiative du Conseil régional d'Aquitaine et de son président, Alain Rousset, que je tiens à remercier pour l'intérêt personnel qu'il y a porté.

La nature de ce projet est collective, et il aurait été impossible de le réaliser sans la mobilisation progressive d'un grand nombre de scientifiques. Francis Grousset, directeur de recherche au CNRS, qui était alors le directeur de l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers a joué un rôle fondamental dans l'accrétion progressive de rédacteurs aux compétences très diverses, issus pour la plupart des Universités et des grands établissements de recherche de la région. Très vite nous avons pu nous appuyer sur un comité de suivi qui a assuré la coordination de l'ouvrage : découpage en chapitres, relecture des textes… nous laissons aux lecteurs le soin de juger la qualité du travail final, mais il a beaucoup bénéficié des discussions animées auxquelles ont ainsi participé Antoine Kremer (INRA), Denis Salles (IRSTEA), Éric Villenave (CNRS, le successeur de Francis Grousset à la direction de l'OASU). Tous sont impliqués dans le Laboratoire d'Excellence COTE dont Antoine Kremer (INRA) est co-directeur, avec Hélène Budzinski (CNRS). La dynamique du « LabEx » COTE, qui fédère une partie des recherches aquitaines sur l'environnement a ainsi beaucoup favorisé l'écriture de ce document.

Les réunions éditoriales, elles-aussi très stimulantes, ont le plus souvent réuni l'ensemble des responsables de chapitre – qui ont eux-mêmes œuvré pour s'entourer de différents contributeurs. La liste des 162 auteurs qui ont signé ce document permet de constater qu'ils appartiennent à plus d'une cinquantaine d'établissements de recherche différents. Une conséquence en est que ce texte, qui paraîtra très long à certains, aurait pu l'être beaucoup plus encore. Tous les auteurs méritent en fait d'être remerciés pour l'effort de concision et de vulgarisation apporté à leur contribution : ce sont souvent beaucoup d'années de recherches qui sont réduites en quelques phrases.

Les services du Conseil régional, et en premier lieu Olivier Degos, directeur-général adjoint du Pôle Agriculture, Développement Durable, et Tourisme, ont assuré un suivi très attentif du projet. Une aide clé a été le recrutement d'Émilie Bourdenx, qui a assuré la préparation au travail éditorial : organisation et comptes rendus des réunions, relance des auteurs, mise en forme, iconographie, références… ce livre aurait été impossible sans elle, et je lui transmets les remerciements très chaleureux de tous.

Une des conclusions de ce travail est qu'il demande à être étendu, poursuivi, partagé. Le souhait de mettre à la disposition d'un public large les connaissances nombreuses produites par la recherche publique nous a incités à publier ce rapport sous la forme d'un livre, un défi que les Presses Universitaires de Bordeaux et le Laboratoire de Géographie Physique Appliquée (Equipe EEE-Bordeaux 3) ont accepté de relever. Distribuer en librairie et à destination du grand public un rapport scientifique parfois un peu ardu implique un risque majeur, celui d'être mal compris. Mais nous sommes persuadés que l'affection que tous les Aquitains portent à leur région les aidera à aborder avec la patience nécessaire le regard sur celle-ci que propose cet ouvrage : un regard complexe, mais un regard nécessaire face aux évolutions en cours.

Hervé Le Treut,
Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace,
membre de l'Académie des Sciences.



À la suite de la tempête Xynthia (26 février 2010), les parcs à huîtres sur la rive est du banc d'Arguin sont recouverts par les sables emportés par les vents (© Julien Haas, Fédération Départementale des Chasseurs de Gironde).

Introduction

La région Aquitaine, son histoire, ses paysages, son économie, qui font sa richesse et sa personnalité, est le produit d'un climat et d'une géographie aux caractéristiques bien marquées. Ce vaste espace sédimentaire qui s'abrite au pied des Pyrénées et des premiers contreforts du Massif Central est bordé par une zone littorale sableuse immense et superbe se terminant à l'extrême sud par une côte rocheuse, la côte basque. Cet ensemble ne s'ouvre véritablement aux activités de la mer que grâce à l'estuaire de la Gironde, au bassin d'Arcachon, à l'estuaire de l'Adour et aux ports situés entre Capbreton et Hendaye. Cet espace abrite également la plus grande forêt cultivée d'Europe, une zone viticole que les Bordelais ne sont pas seuls à désigner comme la première au monde, une agriculture riche et variée, et une très grande variété d'écosystèmes naturels.

En quoi une région dont l'identité s'est construite de manière aussi forte en lien avec ses paysages et ses ressources naturelles peut-elle être vulnérable à une évolution des conditions climatiques qui serait provoquée par l'homme ? Cette question prend une importance croissante dans un contexte où les émissions de gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter, malgré les messages d'alerte et les réunions internationales. Cet ouvrage tente d'y répondre de la manière la plus factuelle et précise possible, en mobilisant les connaissances issues de la recherche publique dans un grand nombre de disciplines telles que : physique et chimie de l'atmosphère, des océans, des eaux continentales, des systèmes littoraux et estuariens, écologie des écosystèmes naturels comme des systèmes agricoles. Nous avons aussi été attentifs à intégrer à cette réflexion l'apport capital des sciences humaines et sociales car la vulnérabilité d'un territoire est indissociable des capacités d'adaptation des sociétés qui y vivent.

Cette approche multidisciplinaire est nécessaire pour surmonter la dimension passionnelle inévitable qui accompagne toujours les débats relatifs aux problèmes environnementaux, tant nos liens avec la nature sont aussi des liens culturels, affectifs, spirituels parfois. Dans le contexte du changement climatique et des changements environnementaux, les décisions à prendre demandent des arbitrages complexes qui doivent composer avec des incertitudes et des controverses scientifiques et techniques, avec des impératifs contradictoires, et avec des intérêts divergents. Les incitations politiques relatives aux biocarburants en sont un bon exemple : favoriser le recyclage du carbone atmosphérique en utilisant des ressources végétales pour produire l'énergie constitue *a priori* une des méthodes les plus directes et évidentes pour limiter l'usage des hydrocarbures fossiles producteurs de gaz à effet de serre ; mais cela ne peut pas se faire en compétition avec les besoins d'alimentation de la population mondiale, ou au mépris de la sauvegarde de la biodiversité. Le rôle de l'expertise scientifique dans ce cas n'est pas de remplacer le processus de décision démocratique qui appartient aux citoyens et à leurs représentants élus, mais bien d'essayer de les informer de la manière la plus précise possible, et c'est l'ambition de ce texte.

Un parti pris de notre travail a été de ne rien inventer, mais de s'appuyer sur des connaissances à caractère universitaire, reposant principalement sur des articles publiés dans la littérature scientifique à comité de lecture. Notre démarche est similaire sur ce point à celle du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution sur le climat) au niveau international. Nous avons cherché à rassembler des contributions d'un large ensemble d'experts, réunis au sein d'un groupe appelé « Changement Climatique en Aquitaine ». Nous avons pu constater qu'il existe un très large éventail de compétences disponibles dans les laboratoires aquitains, avec des équipes qui ont une reconnaissance nationale et internationale très forte, et ce travail a été rendu possible par la réponse positive et active des personnes sollicitées. Plutôt que de multiplier les références à des travaux très spécifiques encore en phase d'émergence et de valorisation, les chercheurs impliqués ont été invités à relire des travaux aux résultats souvent bien établis, en les confrontant à la problématique « changement climatique ». Ces experts ont travaillé sur le domaine

géographique couvert par la région Aquitaine, même s'il a parfois été nécessaire d'élargir cette échelle, les forçages climatiques exercés sur les régions limitrophes et même sur l'ensemble de la planète conditionnant aussi les changements en Aquitaine. L'ouvrage est découpé en chapitres indépendants, sous la coordination de responsables différents, et son élaboration a été ponctuée de réunions qui ont permis d'en organiser la structure et – plus partiellement – d'en uniformiser le langage. L'objectif des textes présentés est ambitieux : parvenir à exposer les différents messages scientifiques sans en affaiblir le contenu, mais en les rendant accessibles à un public beaucoup plus large que la seule communauté scientifique. Il n'a cependant pas été possible d'éliminer tout usage de « jargon » scientifique – ce vocabulaire spécialisé est ce qui permet au scientifique d'être précis, et cette précision est toujours indispensable. Les chapitres sont introduits par un résumé d'abord plus simple, entrecoupés d'encadrés explicatifs, accompagnés par un glossaire, et ils s'appuient sur des références bibliographiques listées à la fin de l'ouvrage. Nous invitons le lecteur à ne pas se laisser rebuter par la difficulté de tel ou tel paragraphe, chaque chapitre pouvant être lu indépendamment.

La structure de ce rapport fait écho à deux grandes démarches, qui expliquent son plan. La première nous a conduits des grandes échelles d'espace et de temps vers l'Aquitaine d'aujourd'hui. Le climat de l'Aquitaine est dépendant à la fois du climat de l'ensemble de la planète, et d'une histoire très longue qui a laissé sa marque dans les paysages et les sociétés. Le lien entre le climat aquitain et le climat mondial est particulièrement important au niveau des enjeux. L'évolution économique de l'Aquitaine s'écrit par exemple aussi dans l'évolution climatique des autres régions céréalières ou viticoles ailleurs dans le monde. La seconde démarche entreprise dans ce document va des grands enjeux vers l'étude de problèmes plus sectoriels ou focalisés. Nous avons voulu illustrer dès le début le contexte de nos études. On ne peut pas parler de changement climatique sans parler de santé, d'aménagement du territoire, de pollution ou de respect de la biodiversité. Mais nous avons cherché à cadrer notre propos, en nous limitant à un regard centré sur la contribution aux émissions de gaz à effet de serre et à la vulnérabilité aux changements climatiques. Nous avons aussi cherché, chaque fois que les références scientifiques disponibles le permettaient, à nous référer à deux types d'évolution climatique possibles d'ici la fin du siècle. L'une, modérée, correspondant à un réchauffement global de 2 °C environ à la surface de la planète – valeur qui sert de référence pour les négociations internationales. L'autre plus importante, correspondant à un réchauffement global de 4 ou 5 °C. L'observation des données accumulées depuis le premier rapport du GIEC (1990) amène malheureusement à penser que ce second scénario est désormais plus plausible.

Malgré tous nos efforts, nous sommes cependant bien conscients que notre approche ne comblera pas toutes les attentes. Du fait de la qualité des experts mobilisés, le rapport se réfère exclusivement à des travaux de nature « académique ». Nous avons pourtant conscience qu'une part des connaissances et des capacités d'adaptation dans le domaine environnemental sont associées à des expériences et pratiques professionnelles, aux actions de différentes agences publiques, d'Organisations Non Gouvernementales ou d'associations indépendantes : c'est particulièrement vrai dans le domaine de la conservation des espèces en danger, dont le lien avec le changement climatique est difficile à préciser. Nous n'avons pas non plus cherché à documenter plusieurs problèmes liés à des enjeux technologiques qui auraient nécessité des compétences additionnelles difficiles à rassembler à ce stade. C'est par exemple le cas des contraintes qu'un réchauffement important apporterait au développement des zones urbaines. C'est aussi le cas, et de manière très notable, de l'analyse de l'impact des changements climatiques sur les diverses filières de production d'énergie en Aquitaine : hydroélectricité – qui dépend du remplissage des barrages –, évolution de la ressource éolienne, du bois et des bioénergies, fonctionnement des installations nucléaires en réponse à une hausse du niveau de la Gironde (centrale du Blayais) ou à une difficulté de refroidissement en cas de canicule et sécheresse (Golfech).

En dépit de ces limites, ce rapport pose un regard inédit sur le changement climatique à l'échelle de la région Aquitaine. Mais il doit être envisagé comme un point de départ plutôt que comme un point d'arrivée. Il propose une méthode de travail, une première liste d'interrogations, il met en lumière des domaines qui devront nécessiter une vigilance particulière et continue. C'est la manière dont les citoyens et les décideurs voudront s'en saisir, et la volonté de créer une veille plus permanente sur les enjeux climatiques en Aquitaine, qui lui donneront tout son sens.



L'Aquitaine et ses paysages







Contexte et enjeux du climat pour l'Aquitaine





Ciel d'orage progressant sur la Communauté Urbaine de Bordeaux (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 1 :

Du climat global au climat régional

Coordination : *Hervé Le Treut*
Rédacteurs : *Vincent Bernard, Christophe Cassou, Iker Castège, Aurélie Chaalali, Déborah Idier, Gonéri Le Cozannet, Hervé Le Treut, Serge Planton, Aurélien Ribes*

Le climat de la planète ou celui d'une région est défini comme la statistique sur quelques décennies des états successifs de l'atmosphère et des autres milieux qui définissent notre environnement : océans, rivières, nappes d'eau souterraines, faune et flore. Des éléments tels que l'apport d'énergie par le soleil ou la rotation de la Terre organisent la diversité des climats à l'échelle de la planète. Parce que certains gaz à effet de serre restent plusieurs décennies ou plusieurs siècles dans l'atmosphère, et qu'ils ont donc le temps de s'y mélanger et de se répartir à la surface du globe, leur croissance en réponse aux activités humaines a la capacité de modifier le climat de la planète. Les dernières décennies ont été marquées globalement par des augmentations de température, plus fortes en Arctique et sur les continents, par une intensification des précipitations en région équatoriale et aux moyennes latitudes, par des sécheresses plus fréquentes dans les régions subtropicales, par une fonte accélérée du Groënland, de la banquise Arctique et des glaciers de montagne, par un relèvement général du niveau de la mer à un taux de plus de 3 mm par an. Tous ces éléments sont en accord avec les modélisations réalisées depuis plus de trente ans dans les laboratoires de recherches pour caractériser l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre. Comme cette augmentation se poursuit à un taux accéléré, une intensification importante des évolutions climatiques dans les décennies à venir apparaît désormais inévitable. Définir des méthodes d'adaptation préventive à des situations qui seront très largement nouvelles est donc nécessaire.

Cette adaptation serait grandement aidée par une caractérisation et une quantification précise de des évolutions climatiques futures à l'échelle régionale. Celle-ci n'est cependant que partiellement possible. L'action publique doit donc s'appuyer sur d'autres éléments que les seules prévisions issues de modèles numériques pour conduire son action, tels que l'étude de la vulnérabilité des systèmes socio-économiques ou des écosystèmes aux changements climatiques, la définition de politiques résilientes face à des aléas qui restent imparfaitement caractérisés, ou encore l'importance accordée à la lecture des événements climatiques passés.

I- Quelques définitions

Le climat de l'Aquitaine est la composante régionale d'un système beaucoup plus vaste, de dimension planétaire. Il est habituel d'expliquer « le temps qu'il fait » sur l'Aquitaine, que l'on peut encore désigner comme « la situation météorologique » de l'Aquitaine, par des événements lointains, tels qu'un renforcement de l'anticyclone des Açores, le développement de tempêtes atlantiques ou l'arrivée d'air arctique. La notion de « climat », qui fait l'objet de cet ouvrage, est alors le plus souvent définie comme la statistique des différentes situations météorologiques qui se succèdent pendant plusieurs dizaines d'années. Les deux notions de « temps » et de « climat » sont donc très différentes mais elles partagent une caractéristique importante : il n'est pas de prévision météorologique sans connaissance de

la circulation atmosphérique de l'ensemble du globe, et de la même manière il est impossible d'anticiper ce que peut devenir le climat de notre région sans se placer dans le contexte de la planète tout entière.

Pour préciser ces notions, il faut revenir à quelques définitions. Le mot « climat » signifie « inclinaison » en grec, et aux temps de la science antique, il a d'abord fait référence à la rotondité de la Terre. Celle-ci implique que les rayons du soleil arrivent au sol avec une inclinaison qui dépend de la latitude, en modulant la température locale, plus forte près de l'Équateur, plus faible en se dirigeant vers les Pôles. Cette notion de climat a beaucoup évolué et il est désormais plus facile de définir ce qu'est le « système climatique ». On appelle ainsi le milieu dans lequel nous vivons, notre « environnement », c'est-à-dire l'ensemble des composantes très différentes que sont l'atmosphère, les océans, la surface continentale, ainsi que toutes leurs interactions, physiques, chimiques et biologiques. Le mot « climat » dépasse alors la définition strictement atmosphérique que nous avons donnée : il désigne les caractéristiques du système climatique en un lieu donné, caractéristiques établies sur une période qui est souvent de 30 ans. Un large ensemble de paramètres permet de décrire le climat d'une région, par exemple la température, le vent, l'humidité de l'air, ou encore le contenu en eau du sol, l'état des rivières, la composition de l'atmosphère, ou la salinité de l'océan. Ces paramètres sont analysés le plus souvent au travers de moyennes, annuelles aussi bien que mensuelles ou saisonnières. Mais caractériser le climat c'est aussi décrire des événements plus rares et irréguliers, tels que des tempêtes violentes, des sécheresses persistantes. Aux moyennes latitudes, où se trouve l'Aquitaine, un élément essentiel est de décrire statistiquement le passage de dépressions ou d'anticyclones venant de l'Ouest. La fréquence des « blocages », ces épisodes qui voient un anticyclone s'installer de manière durable sur nos régions, en provoquant de grands froids l'hiver et de fortes chaleurs l'été, constitue aussi un élément essentiel de notre climat. Il en va de même du temps de retour des grandes tempêtes hivernales, qui ont une importance parfois dramatique, comme cela a été le cas au cours des dernières décennies. Au total si la notion de climat est moins immédiatement visible que celle « du temps qu'il fait », elle n'en demeure pas moins une notion très concrète. C'est bien le climat d'une région qui détermine comment on s'habille, où l'on vit, comment on construit nos maisons et nos villes, ce que sont nos ressources en eau ou en aliments.

Les climats de la planète s'organisent à grande échelle : chacun sait qu'il existe par exemple des climats équatoriaux, tropicaux ou de moyennes latitudes. La première classification de ces climats, encore enseignée dans les écoles, remonte aux travaux du scientifique russo-allemand Wladimir Peter Köppen. Elle fut publiée sous sa forme définitive en 1936 (Köppen avait 90 ans !) dans un ouvrage très célèbre qui est l'aboutissement de 40 ans de travail et de recueil de données [1]. La classification de Köppen reflète les particularités physiques et écologiques de chacune des régions du globe. Ces régions sont différentes pour des raisons qui tiennent à leur localisation : elles reçoivent plus ou moins de rayonnement solaire et sont plus ou moins éloignées de l'axe de rotation de la Terre. Mais là ne s'arrêtent pas les facteurs de différentiation. Le système climatique, *via* les mouvements de l'atmosphère et des océans, transfère aussi constamment de l'eau, de l'énergie, et du mouvement atmosphérique ou océanique d'une région à une autre : ces interactions complexes façonnent également les climats de la planète. En conséquence, comprendre comment le climat de la Terre peut changer dans le futur, comprendre par exemple le rôle que peut avoir l'augmentation des gaz à effet de serre en superposant ses effets aux fluctuations naturelles du climat, tout cela doit d'abord s'appréhender à l'échelle de la planète, avant de focaliser le regard sur une région telle que l'Aquitaine.

II- Des premières alertes aux premiers diagnostics : la structuration de la communauté scientifique

Même si l'on fait souvent référence au travail du prix Nobel suédois Svante Arrhénius, qui avait en 1896 anticipé l'impact possible d'une croissance du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique [2], c'est surtout après la Seconde Guerre mondiale que l'impact des activités humaines sur le climat de la planète a suscité une inquiétude croissante. Les émissions atmosphériques de CO_2 ont fortement augmenté depuis cette époque : elles

étaient d'un milliard de tonnes de carbone par an environ au début des années 1950, et elles sont désormais proches de 9 milliards, un chiffre auquel il faut ajouter la part de la déforestation (10 à 20 %). Cette même accélération se retrouve dans l'émission des autres gaz à effet de serre tels que le méthane, ou le protoxyde d'azote.

Dans les années 1950, des scientifiques américains ont posé de manière insistante le problème de l'augmentation possible du CO_2 atmosphérique en réponse à l'usage croissant de charbon, de pétrole et de gaz naturel. L'article très célèbre de Revelle et Suess (1957) montrait que l'océan pourrait se révéler incapable de reprendre en temps réel les quantités de gaz émises dans l'atmosphère [3]. Ces interrogations ont donné lieu à un suivi régulier de la teneur atmosphérique en CO_2, initié dès la même année à Hawaï, au sommet du volcan Mauna Loa.

Le résultat est sans équivoque : depuis 1957 cette teneur en CO_2 est passée d'une valeur de 290 ppm (parties par million) à près de 400 ppm, alors que les mesures réalisées dans les bulles d'air des glaciers montrent qu'elle n'avait pas dépassé 300 ppm au cours des 10 000 dernières années.

Ces mesures ont permis d'acquérir dès les années 1970 la certitude qu'une fraction importante du CO_2 émis se stocke durablement dans l'atmosphère. On estime plus précisément que la part qui n'est pas immédiatement reprise par l'océan ou la végétation, à une durée de vie atmosphérique d'une centaine d'années. D'autres gaz ont aussi une durée de vie atmosphérique longue : une dizaine d'années pour le méthane, une centaine d'années pour le protoxyde d'azote, plusieurs dizaines ou centaines d'années également pour les différents fréons. Il est donc rapidement devenu clair que les émissions de gaz à effet de serre engageaient le futur, et ceci d'autant plus qu'il a très vite été possible de calculer des ordres de grandeurs des conséquences attendues. Dès 1979, le rapport présenté par le très célèbre scientifique Jule Charney à l'Académie des Sciences américaine [4] permettait d'estimer qu'un doublement du CO_2 atmosphérique conduirait à augmenter la température de surface moyenne de la planète de 1,5 °C à 4,5 °C, des valeurs très inquiétantes si on les rapporte à l'amplitude estimée des fluctuations naturelles du climat pendant les derniers milliers d'années (quelques dixièmes de degrés) ou si l'on prend la dernière déglaciation comme référence. Il y a 20 000 ans, en effet, quand l'Europe et l'Amérique du Nord, étaient couvertes de glaciers de plusieurs kilomètres d'épaisseur, la température globale de la planète était 5 à 6 degrés plus froide que maintenant – ce qui témoigne de l'ampleur d'une perturbation globale de plusieurs degrés.

Les résultats présentés dans le rapport Charney [4] se fondaient en premier lieu sur des calculs complexes de spectroscopie, qui permettent une estimation assez précise de la variation du rayonnement terrestre associée à l'augmentation des gaz à effet de serre. Cet impact radiatif provoque un réchauffement à la surface de la Terre, qui est ensuite amplifié par des phénomènes de rétroaction. La vapeur d'eau, par exemple, qui est un gaz à effet de serre puissant, voit sa teneur atmosphérique augmenter avec la température, ce qui tend à créer un effet de serre additionnel qui double la réponse climatique. La fonte de la neige ou des glaces a aussi un effet amplificateur, un peu moindre. Le rôle des nuages est beaucoup plus complexe. Cet effet n'était pas pris en compte explicitement à l'époque de Charney : c'est l'un des facteurs qui interdit de mieux préciser l'amplitude de la réponse climatique et qui fait que le réchauffement simulé par les modèles actuels pour un doublement du CO_2 s'inscrit toujours dans la même fourchette allant de 1,5 °C à 4,5 °C environ.

La mise en évidence de ces ordres de grandeurs s'est accompagnée très vite d'une autre estimation, indiquant qu'une stabilisation du CO_2 atmosphérique réclame de ne pas dépasser un seuil approximatif de 3 ou 4 milliards de tonnes de carbone émis chaque année, soit environ une demi-tonne par habitant. Rapporté aux émissions actuelles ce seuil implique de diminuer par plus de 10 les émissions de CO_2 d'un américain, par 4 environ celles d'un Européen, et par 2 déjà celles d'un Chinois (des chiffres qui sont souvent extrapolés à l'ensemble des gaz à effet de serre). Le problème des gaz à effet de serre s'est donc très tôt présenté comme un problème difficile, à la fois par ses conséquences potentielles, et par l'ampleur des efforts qui sont nécessaires pour les éviter.

C'est la convergence de ces éléments qui a amené, en 1980 et 1988 respectivement, les créations successives du Programme Mondial de Recherche sur Climat (PMRC) et du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), qui restent après plus de vingt ans deux piliers essentiels des études sur le climat. Le PMRC (établi sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, une émanation de l'ONU, du Comité Océanographique International de l'UNESCO et du Conseil International des Unions Scientifiques) a pour mission d'organiser les recherches menées dans les différents laboratoires de la planète : c'est lui qui permet de coordonner les mesures en mer ou par satellite, et qui a établi des projets collectifs de développement et d'utilisation des modèles climatiques. Le GIEC (qui dépend des mêmes tutelles) a été instauré pour permettre, là aussi au niveau international, une traduction des résultats de ces recherches à l'attention du grand public, des décideurs, ou des citoyens. La démarche du GIEC est de synthétiser les publications déjà parues dans les revues à comité de lecture de la communauté scientifique. Elle s'appuie sur le travail bénévole de plusieurs centaines d'auteurs dont les textes sont lus et critiqués au travers de trois relectures successives par l'ensemble des scientifiques qui le souhaitent, et résumés dans des textes plus courts qui sont approuvés à l'unanimité par des experts scientifiques nommés par les différents gouvernements.

III- Des outils indispensables pour se projeter dans le futur : les modèles climatiques

Les modèles climatiques jouent un rôle clé dans l'estimation des variations climatiques futures, mais ils demeurent des objets inconnus et incompréhensibles pour les non-spécialistes. Une image utile est peut-être de considérer un modèle climatique comme une sorte de maquette numérique de la planète Terre. Le climat de cette planète numérique n'est pas exactement celui de la planète réelle, mais au fil des années il s'en est suffisamment rapproché pour que l'on puisse utiliser le modèle pour tester de manière rapide ce qui pourra se produire beaucoup plus lentement dans le monde réel.

Les modèles s'appuient sur les lois de la mécanique des fluides pour reconstruire numériquement les grands traits de la dynamique de l'atmosphère et/ou de l'océan. Ils répondent ainsi à un défi scientifique majeur, qui remonte aux travaux pionniers de l'Anglais Lewis Fry Richardson, publiés en 1922 [5]. Les avancées scientifiques réelles sont venues après la Seconde Guerre mondiale, avec le développement des calculateurs numériques. La question a d'abord été d'essence théorique : était-il possible de recréer une image suffisamment réaliste de notre planète en se fondant sur des équations physiques ? La réponse positive s'est appuyée sur des études théoriques dont beaucoup ont été initiées avant le développement des modèles eux-mêmes. Elle renvoie aussi à un fait d'observation absolument flagrant, à savoir que malgré la présence d'une composante imprévisible et chaotique qui limite leur prévision détaillée, les écoulements atmosphériques et océaniques présentent des éléments d'organisation très forts. Un coup d'œil à n'importe quelle image satellitaire montre la circulation atmosphérique organisée sous forme de structures spirales de plusieurs milliers de kilomètres associées aux dépressions des moyennes latitudes. Les premiers modèles atmosphériques globaux se sont développés en utilisant une grille de résolution dont le pas spatial était de 500 kilomètres environ et dès les années 1970, il était déjà possible de décrire les grands traits des circulations atmosphériques par des modèles numériques. Le gain en puissance de calcul des dernières décennies a été utilisé pour améliorer les modèles de plusieurs manières : pour affiner la résolution géographique des simulations, pour en augmenter la durée (de quelques mois à quelques siècles de temps simulé), pour augmenter le contenu des modèles (passer de modèles atmosphériques à des modèles couplés océan/atmosphère par exemple) et enfin pour développer des approches probabilistes au travers de simulations multiples. Le développement d'un modèle est une entreprise de grande envergure, qui réclame le travail de plusieurs dizaines de personnes pendant plusieurs décennies. Une vingtaine d'instituts développent des modèles destinés à l'étude des climats futurs. Le PMRC a mis en œuvre depuis plus de 20 ans des programmes d'évaluation et de comparaison des modèles. C'est ainsi que les projets AMIP (*Atmospheric Model Intercomparison Programme*), puis CMIP (*Coupled Model Intercomparison Programme*) ont mis en place toute une série d'exercices collectifs menés à l'échelle internationale, pour

évaluer la capacité des différents modèles à reproduire, par exemple, les climats du passé ou les variations interannuelles du climat, et pour comparer leurs projections climatiques futures.

IV- De la météo au climat : coexistence des variabilités naturelles et forcées

L'évolution d'un signal climatique observé peut s'interpréter comme le résultat de la combinaison de deux sources de variabilité souvent difficiles à dissocier : l'une dite *forcée* induite par des changements tels que les modulations de l'activité solaire, le volcanisme ou encore les perturbations liées aux activités humaines, l'autre dite *intrinsèque* ou *interne,* reflétant la mobilité naturelle du système climatique, hors de toute action qui s'exerce sur lui. Cette variabilité interne, naturelle, s'exprime à toutes les échelles de temps, parce qu'elle met en jeu des composantes du système climatique aux caractéristiques très différentes : atmosphère, océan, sol continental. Aux échelles de temps plutôt longues (saisonnières à décennales), la variabilité interne est pilotée par les échanges d'énergie et d'eau entre milieux et le couple océan-atmosphère joue un rôle prépondérant qui structure la géographie régionale des modes de variabilité. Aux échelles journalières à mensuelles, la situation est dominée par le « chaos » atmosphérique. L'atmosphère est capable de générer seule sa propre variabilité et celle-ci est responsable de l'alternance plus ou moins aléatoire, que nous vivons à nos latitudes, d'épisodes de précipitation, de périodes de grand calme ou encore de vagues de froid extrême etc., c'est-à-dire de la météo quotidienne ou hebdomadaire.

Cependant le temps qu'il fait à un endroit donné (en Aquitaine), n'est pas décorrélé de celui qui se produit ailleurs, en Europe du Nord par exemple. La variabilité interne atmosphérique prend la forme de circulations spécifiques organisées spatialement à l'échelle du bassin océanique Atlantique Nord et du continent européen ; on parle de régimes de temps. Ils dépendent de la géographie des contrastes entre océan et atmosphère, ou encore de la présence des barrières orographiques, telles que les Montagnes Rocheuses qui, en aval, incurvent la circulation moyenne d'Ouest jusqu'à l'Europe. La déflection du flux par ces montagnes est en partie à l'origine des centres d'action sur l'Atlantique que sont l'Anticyclone des Açores et la Dépression d'Islande. Les régimes de temps correspondent selon ce schéma à des fluctuations naturelles de cette circulation moyenne et donc de ces centres d'action. Ils sont particulièrement marqués en hiver et on en dénombre quatre principaux sur la région Nord Atlantique/Europe.

Ils sont présentés en **Figure 1**, d'abord sous forme d'anomalie de pression atmosphérique. Le premier régime **(Figure 1a)** correspond à un creusement de la dépression d'Islande et un renforcement simultané de l'Anticyclone des Açores. On parle de « régime zonal » car les gradients méridiens de pression sont renforcés, induisant une accélération des vents moyens d'Ouest sur tout l'Atlantique Nord et l'Europe. Cette circulation est aussi désignée par « régime NAO + » pour « phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique ». La NAO, de manière simple, se définit par la différence de pression entre Islande et Açores ou Portugal. Le second régime **(Figure 1b)** correspond à l'affaiblissement simultané de la dépression d'Islande et de l'Anticyclone des Açores, que l'on désigne donc aussi logiquement comme un régime NAO-. Il se caractérise par une diminution de la circulation dominante d'Ouest. Le troisième régime, dit de Dorsale Atlantique **(Figure 1c)**, se distingue par une extension vers le Nord de l'Anticyclone des Açores recouvrant alors tout le bassin océanique, avec des anomalies négatives concomitantes sur l'Europe. Le quatrième et dernier régime **(Figure 1d)** présente de fortes anomalies positives de pression sur l'Europe du Nord alors que des valeurs négatives dominent en Mer du Labrador et sur l'ouest du bassin Atlantique en général. Ce régime dit de « blocage » interrompt totalement la circulation d'ouest pénétrante sur l'Europe, voire la renverse. Si l'on considère les 60 derniers hivers pour établir une statistique, la probabilité d'occurrence de ces quatre régimes est à peu près la même. Autrement dit, les circulations journalières se partageant de manière équiprobable entre ces quatre types de circulation.

Ces régimes peuvent être considérés comme les briques élémentaires de la variabilité atmosphérique des moyennes latitudes. Ils ont une durée de vie de l'ordre de la semaine et les changements météo quotidiens ou quasi-quotidiens peuvent s'interpréter par les transitions d'un régime vers un autre. En effet, chaque régime, par le biais de la circulation atmosphérique induite, se caractérise par des conditions de surface spécifiques en température et en précipitation. En hiver, le régime NAO+,

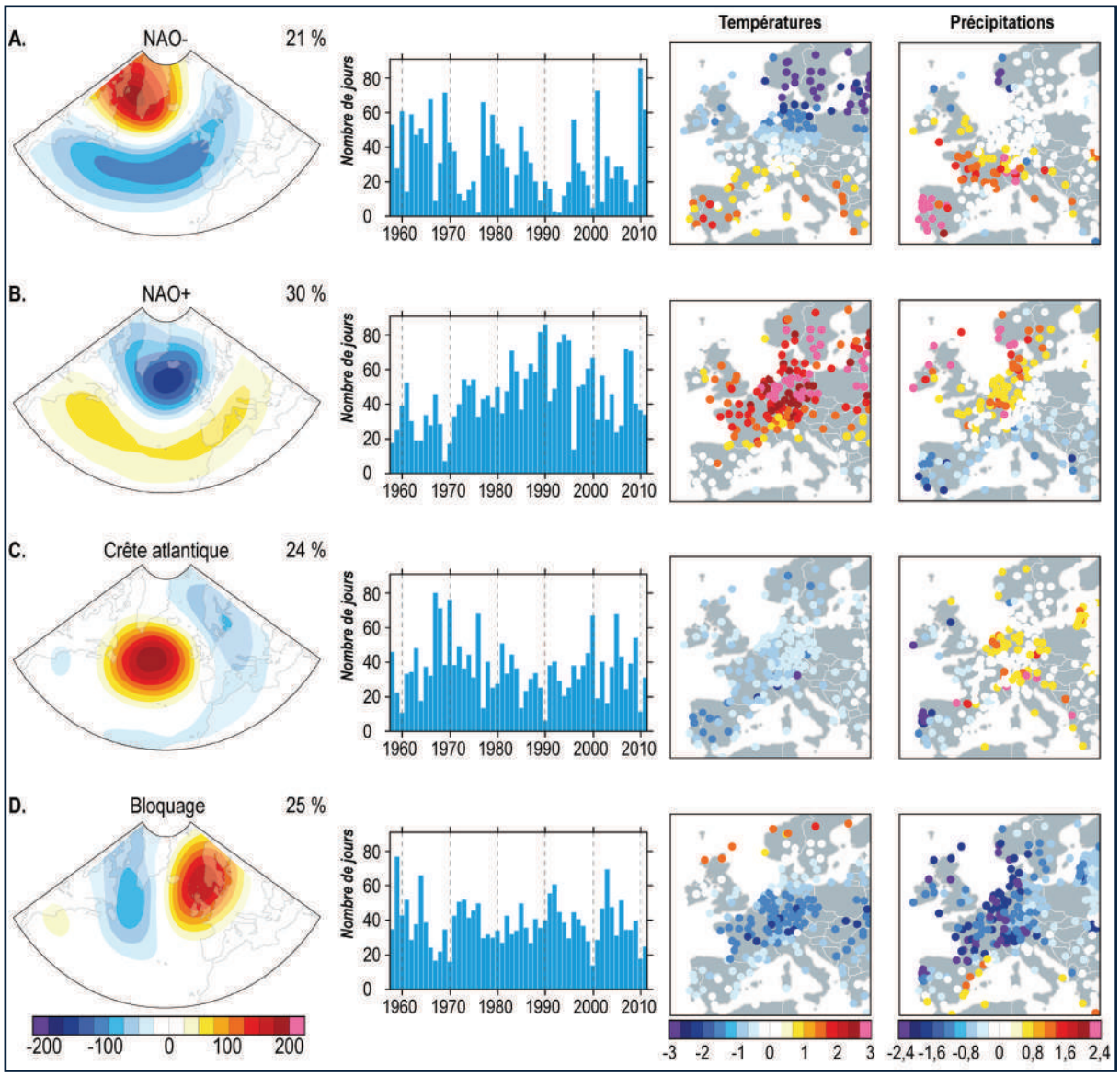


Figure 1 : *Les différents régimes climatiques (tels que décrits dans le texte) : la première colonne donne les anomalies en termes de pression au niveau de la mer, la deuxième montre l'évolution de la fréquence d'apparition de chacun des modes, les troisièmes et quatrièmes colonnes les variations associées de température et de précipitations.*

par sa circulation d'ouest plus marquée, est associé à des températures plus chaudes que la normale sur l'ensemble de l'Europe, excepté le pourtour méditerranéen. Les précipitations sont également plus marquées au Nord du parallèle 45°N, alors que des conditions plus sèches dominent au Sud. L'Aquitaine se situe « au zéro » des anomalies.

En NAO-, les températures sont plus froides que la normale au Nord du parallèle 45°N et plus douces au Sud. En termes de précipitation, elles sont renforcées sur la France, Aquitaine comprise, sauf sur le piémont pyrénéen par effet orographique. En effet, le régime NAO- privilégie les flux de Sud/Sud-Ouest induisant un effet de foehn[1] local sur le Sud de la région. Le régime de dorsale par son flux de Nord/Nord Ouest induit des conditions plutôt fraîches sur l'Europe et des précipitations conformes à la normale sauf sur le Nord de l'Allemagne et le Benelux et de nouveau sur le piémont pyrénéen et alpin. Un blocage orographique se met en place sur les versants Nord des massifs avec des précipitations renforcées. Les chutes de neige les plus importantes sont ainsi associées sur l'Ouest de la Chaîne pyrénéenne à ce régime. Le blocage est quant à lui responsable des conditions froides et très sèches sur l'Europe. Les vents

1. Effet de foehn : Phénomène météorologique créé par la rencontre de la circulation atmosphérique et du relief quand un vent dominant est entraîné au-dessus d'une chaîne montagneuse et redescend de l'autre côté après l'assèchement de son contenu en vapeur d'eau.

viennent de l'Est de l'Europe et advectent de l'air froid et sec de Sibérie occidentale, parfois jusqu'en Aquitaine pour les plus forts blocages.

Au-delà de ces conditions moyennes, les régimes de circulation de grande échelle favorisent certains événements extrêmes locaux. La probabilité de vague de froid intense sur l'Aquitaine est ainsi plus grande lorsque les régimes de blocage sont excités. Les grands épisodes de neige sont plus probables en régime NAO- alors que leur occurrence en régime NAO+ est quasi nulle. Les coups de tabac aquitains sont favorisés dans les deux régimes NAO alors qu'ils se développent très peu en Dorsale et Blocage.

Si les changements météo s'expliquent dans ce cadre par la transition plus ou moins aléatoire entre les régimes, les fluctuations interannuelles, i.e. d'un hiver sur l'autre, s'expliquent par la plus ou moins grande occurrence de certains régimes au cours de la saison. De même, les fluctuations décennales, i.e. d'une décennie sur l'autre. Les hivers chauds de la décennie 1990 s'expliquent par l'occurrence privilégiée de régimes NAO+ au détriment des régimes NAO- **(Figure 1)**. L'hiver froid et neigeux de 2009-2010 se comprend par l'excitation marquée des régimes NAO- tout au long de la saison au détriment de tous les autres etc. Les fluctuations climatiques (de la saison à la décennie) peuvent ainsi s'interpréter, en particulier à nos latitudes, comme l'intégration temporelle de ce qui se passe à l'échelle météo où la variabilité interne est dominante.

Selon cette vision dynamique du climat, le changement global induit par les forcages anthropiques, pourrait être considéré comme un « tricheur ». Il modifierait la probabilité d'occurrence de certains régimes. L'image du dé à quatre faces est souvent utilisée. Le climat naturel correspond au tirage aléatoire de ce dé, le climat perturbé pipant le dé pour favoriser une face. On comprend bien ici que même si le climat se réchauffe, même si les régimes chauds sont privilégiés, l'apparition dans un climat globalement plus chaud, d'une vague de froid associée aux régimes froids n'est en aucun cas exclue, même aux horizons lointains tels que 2050-2100. Le défi des projections et prévisions climatiques est ainsi d'arriver à estimer le sens et le niveau de la « tricherie » et ses conséquences. Aujourd'hui les conclusions sont peu robustes et le consensus difficile. Certains modèles privilégieraient plutôt les régimes NAO+ alors que d'autres ne projettent aucun changement. La région Nord-Atlantique/Europe est un domaine où la variabilité interne est dominante en hiver. Notons cependant que l'absence de changement de probabilité d'occurrence de régimes de temps hivernaux n'implique cependant pas l'absence de changement en termes de température. Ainsi, un régime NAO+ qui transporte de l'air chaud et humide de l'Atlantique vers l'Europe transportera de l'air plus chaud du fait du réchauffement des océans. De même un régime de blocage qui transporte de l'air froid continental de Sibérie, transportera de l'air moins froid, le réchauffement étant très marqué aux latitudes subarctiques. De plus, cet air aura survolé une Europe centrale avec moins de neige au sol qu'aujourd'hui, ces conditions de surface lui assurant le maintien de ses propriétés polaires au cours de son parcours. Ces changements de relations entre les régimes de circulation et les températures observées sont déjà détectables depuis la fin des années 1990 et seront très probablement amplifiés dans le futur. Les signaux sont en revanche moins clairs sur les précipitations.

Ces conclusions portent sur l'hiver. En été, les régimes sont un peu différents et portent des conséquences différentes : le régime NAO+ amène des sécheresses péri-méditerranéennes, le blocage des sécheresses continentales. Par ailleurs le poids du chaos atmosphérique dans la variabilité interannuelle à décennale diminue ; la perturbation radiative directe due à l'augmentation des gaz à effet de serre devient prépondérante. Les régimes chauds d'été sont aujourd'hui plus chauds que leur référence climatologique (1970-2000) et semblent durer plus longtemps, même si la statistique sur la persistance des régimes est complexe et encore peu significative car la période d'observation est trop courte. Ces modifications sont en tout cas cohérentes avec le fort réchauffement et l'assèchement progressif observé en particulier au Sud de 45°N depuis les trois dernières décennies.

V- Quels scénarios pour les évolutions futures ?

Les modèles ont fourni dès les années 1970 ou 1980 les traits essentiels de ce que pourrait être l'évolution climatique globale en réponse à l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre et ce diagnostic général a remarquablement peu évolué depuis, malgré la sophistication croissante des modèles. Dans les simulations de cette époque déjà, le réchauffement se développe progressivement sur l'ensemble de la planète, même si certaines régions peuvent initialement se refroidir du fait de la variabilité naturelle du climat. Ce réchauffement est plus intense sur les continents et dans les régions polaires, principalement en Arctique. Globalement la pluie tend aussi à augmenter, mais les changements de précipitations ont une structure géographique plus complexe. Elle est marquée par une tendance à l'augmentation dans les zones déjà pluvieuses (parce que le réchauffement autorise plus d'eau à rester dans l'atmosphère), avec au contraire un assèchement des zones de descente de l'air atmosphérique – qui sont déjà souvent les zones arides ou semi-arides. D'abord prévues par les modèles, ces anticipations se sont révélées cohérentes avec les évolutions mesurées par la suite dans le monde réel. Elles s'expliquent aussi par des arguments physiques simples. Par exemple, le réchauffement augmente le niveau de saturation de l'air en vapeur d'eau et autorise l'eau à transiter plus massivement par l'atmosphère dans les régions humides.

En résumé, même si les premiers modèles des années 1970 et 1980 constituaient des images encore très simplifiées de la planète Terre, ils reposaient sur des approximations soigneusement maîtrisées des lois physiques et ils ont permis de décrire les traits essentiels de l'évolution climatique globale en réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre, traits qui ont été confirmés par les différents rapports du GIEC. Le premier de ces rapports, en 1990 [6], a fourni un argumentaire fort pour le premier sommet de la Terre de Rio en 1992, alors que les rapports suivants en 1995, 2001 et 2007 [7][8][9] ont vu se développer une convergence entre résultats simulés et observations indiquant les premiers signes d'un changement climatique. Le prochain rapport du GIEC est attendu en 2013/2014.

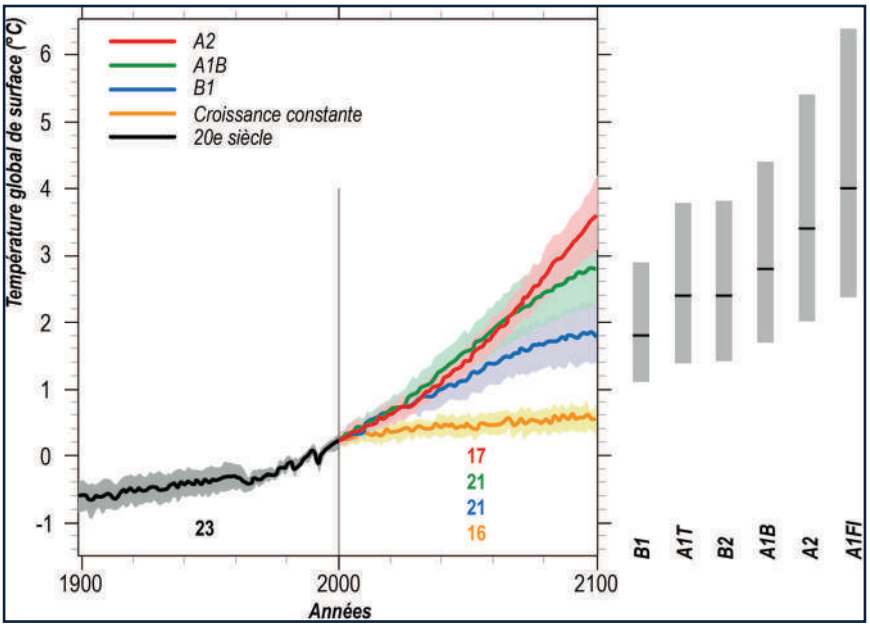


Figure 2 : *L'évolution des températures globales de la planète pour 3 scénarios du SRES et un scénario correspondant à la limitation immédiate des gaz à effet de serre à leur niveau actuel (en jaune) (rapport du GIEC [9]). Les barres sur la droite étendent ces résultats à 6 scénarios, nous conduisant à une fourchette de réchauffement qui va d'un peu moins de 2 °C à plus de 6 °C de réchauffement. Dans les conditions du scénario jaune, la température du globe gagnerait encore un demi-degré environ.*

Les dernières décennies ont donc apporté des indices croissants que les prévisions des années 1970 et 1980 commencent à se réaliser. Il faut comprendre la chronologie particulière de ces évolutions : le seuil de 3 à 4 milliards de tonnes de carbone émises chaque année a été dépassé depuis les années 1970 et l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère a commencé à devenir très significative depuis cette date. Le réchauffement climatique est toutefois retardé par l'inertie thermique des océans et ce n'est que depuis les années 1990 que l'on peut espérer discerner (et que l'on discerne effectivement) les premiers effets de ces changements, se superposant à la variabilité naturelle du climat. La fonte des glaciers, le relèvement du niveau de la mer actuellement observés sont autant de signes cohérents avec ce qui était attendu.

Comment les choses vont-elles se poursuivre ? Un premier changement dans la démarche scientifique est venu en 2000 : le GIEC, en s'appuyant sur des études démographiques, sociales ou économiques, a établi un certain nombre de scénarios de référence. On fait souvent référence à ces scénarios nommés A1, B1, A2 et B2 sous le nom de scénarios « SRES », car ils ont été publiés dans un « Special Report on Emission Scenarios » [10]. Ils ont servi de référence pour les simulations du climat futur présentées dans les rapports 2001 et 2007 **(Figure 2)** du GIEC. Il s'agit de scénarios décrivant un certain nombre d'évolutions futures reposant chacune sur un ensemble cohérent d'hypothèses. Au moment de leur élaboration aucun de ces scénarios n'était jugé plus probable qu'un autre – mais nous nous écartons depuis des scénarios les plus optimistes, et nos émissions nous situent même au-delà des scénarios les plus pessimistes.

Les scénarios d'émissions des gaz à effet de serre des rapports 2001 et 2007 du GIEC [8][9]

Les différents scénarios du GIEC s'efforcent de décrire des évolutions socio-économiques futures nettement différenciées, sans essayer de déterminer quelle est la plus probable. Leur succession depuis le scénario le plus optimiste (B1), jusqu'au plus pessimiste (A1FI) s'écrit de manière un peu complexe à lire : B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI, parce qu'ils correspondant à des critères assez différents, que nous résumons dans ce tableau.

Les scénarios A1 sont des scénarios de croissance démographique maîtrisée mais de croissance économique rapide, reposant sur un usage important de l'énergie. Les différents scénarios A1 se distinguent selon le type d'énergie utilisé. Ainsi le scénario A1FI correspond à un usage intensif de l'énergie fossile : c'est le scénario qui génère le plus de gaz à effet de serre (une multiplication des émissions par près de 3 ou 4 en fin de siècle), alors que le scénario A1T, qui fait appel à des technologies nouvelles pour favoriser des énergies décarbonées, correspond au contraire à des émissions modérées. Le scénario A1B est intermédiaire (« balancé »).

Le scénario A2 décrit un monde fragmenté, où le développement est caractérisé par de fortes différentiations régionales, génératrices d'émissions importantes. Le scénario B1 voit à la fois une maîtrise de la démographie et la capacité à développer des techniques sobres en énergie. C'est le plus favorable des scénarios du SRES, qui voit les émissions de gaz à effet de serre revenir en fin de siècle à ce qu'elles étaient en 1990. Enfin le scénario B2 est lui aussi caractérisé par l'usage de bonnes pratiques environnementales, mais dans une économie peu convergente au niveau international, comme pour le scénario A2.

Seul le scénario B1 permet de maîtriser les **émissions** atmosphériques, mais aucun de ces scénarios ne permet de stabiliser la **teneur** atmosphérique en gaz à effet de serre : il faudrait diviser pour cela les émissions globales par un facteur désormais plus proche de 3 que de 2, ce qui est l'objectif qui a été recherché sans succès dans les négociations internationales récentes. Sans une relance majeure de l'action internationale, qui n'a pour le moment pas lieu, les scénarios les plus modérés du SRES, pourtant insuffisants, deviennent difficilement crédibles. Les émissions de gaz à effet de serre sont pour le moment plus rapides que celles du scénario le pire, A1FI.

En résumé les scénarios du SRES ne prétendent pas représenter des évolutions minimales et maximales de gaz à effet de serre dans l'avenir. Elles proposent surtout des repères (on a parlé de scénarios « marqueurs ») destinés à construire des représentations possibles du futur, en fonction des politiques qui seront ou ne seront pas menées. Dans ce rapport on présentera, quand c'est possible au vu des expériences réalisées, les conséquences de changements climatiques modérés en faisant référence aux scénarios B1, A1T et B2, et les conséquences de changements climatiques plus importants en faisant surtout référence aux scénarios A1B, A2 et A1FI.

La distance entre la diminution des émissions, recherchée dans les négociations internationales, et les évolutions réelles s'est agrandie au fil des années, et les simulations numériques du projet CMIP5 sur lesquelles s'appuiera le prochain rapport du GIEC, ont suivi un concept différent, consistant à définir des objectifs à atteindre. À un objectif donné on peut associer une ou plusieurs trajectoires d'émissions (et éventuellement le coût associé des réductions d'émissions), ainsi que leurs conséquences en termes d'impact (permettant d'estimer cette fois le coût des conséquences du changement climatique). Les résultats de ce projet deviennent peu à peu disponibles mais nous avons préféré les ignorer à ce stade, car leur analyse, encore très incomplète, ne semble pas modifier les conclusions exposées ici. Nous pouvons donc retenir que les scénarios « SRES » conduisent à un réchauffement global allant d'un peu moins de 2 °C à un peu plus de 6 °C en 2100 – cette fourchette large reflétant dans une proportion à peu près égale les différences entre scénarios d'émission et les incertitudes scientifiques. Comme nous l'avons vu, la valeur de 6 °C est considérable au regard de l'histoire passée de notre planète.

VI- Des évolutions globales aux évolutions régionales

La résolution spatiale des modèles climatiques, initialement de 500 km environ, est progressivement descendue à 100 km environ pour un nombre restreint de modèles globaux. Il est possible de descendre à des échelles plus petites, mais les contraintes de calcul font que des résolutions d'une dizaine ou d'une

vingtaine de kilomètres ne sont atteintes de manière régulière que sur des domaines limités à une région ou un continent.

Des approches mixtes sont alors nécessaires : on calcule l'évolution du climat à l'échelle de l'ensemble de la planète avec des modèles qui permettent un niveau de détail limité, et on affine les résultats sur un domaine spécifié. Ces modèles sont pilotés par les résultats du modèle de grande échelle, mais sont capables de prendre en compte de manière beaucoup plus fine les variations du relief, le tracé des régions littorales, ou encore la distribution des différents types de végétation sur la région d'intérêt. Une spécificité française a été de développer (à Météo-France, à l'IPSL) des approches « zoomées » où cette transition entre modèles globaux et modèles régionaux est réalisée à l'aide d'un maillage variable (voir le détail en **Figure 3**). Cette approche impose une hypothèse limitative, à savoir que les équations valables à grande échelle (pour la formation des nuages, les échanges avec le sol) conservent une validité régionale, mais elle assure par contre une compatibilité complète entre la simulation des circulations atmosphériques globales et régionales.

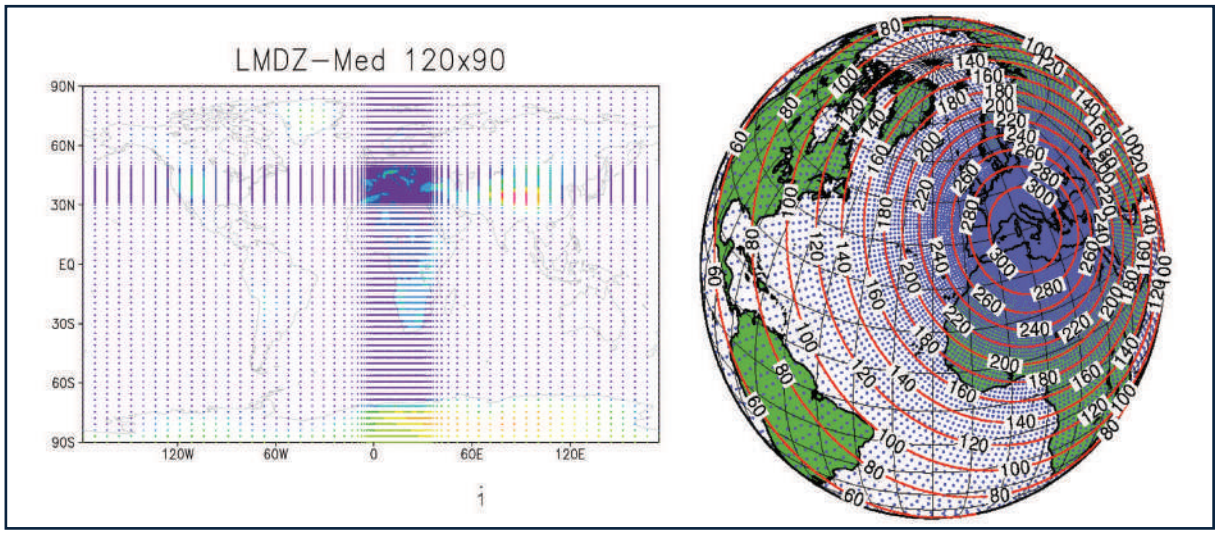


Figure 3 : *La géométrie des deux modèles « zoomés » français.*

Les résultats montrés dans la **Figure 3** correspondent à des simulations réalisées dans ces conditions par le modèle Arpège de Météo-France et par le modèle LMDZ de l'IPSL. Pour Arpège la résolution varie de 50 km au centre de la Méditerranée à 450 km dans le Pacifique Sud, assurant une résolution d'au moins 60 km sur la France. Pour LMDZ, la résolution spatiale est plus modérée, d'environ 160 km en France. Les deux modèles ont réalisé des simulations correspondant à un scénario B2 (changement relativement modéré, cf. paragraphe précédent) et le modèle Arpège a aussi réalisé des simulations correspondant à un scénario A2 (changement plus important).

Cette augmentation de la résolution numérique permet d'affiner les conséquences régionales du changement climatique, mais elle ne supprime pas les incertitudes qui viennent des échelles plus grandes, pour lesquelles la dispersion des résultats issus des différents modèles de la communauté scientifique reste importante. Quels que soient les efforts de recherche actuels, les scénarios régionaux sont affectés d'incertitudes qui reflètent soit des difficultés d'ordre fondamental qui resteront irréductibles (tous les aspects du climat et du changement climatique ne sont pas nécessairement prévisibles), soit une qualité encore insuffisante des modèles, soit probablement les deux. On peut citer deux sources majeures d'incertitude. Nous avons déjà évoqué le rôle encore difficile à évaluer des nuages qui conditionne l'amplitude globale du changement climatique à venir. Dans ce domaine on attend beaucoup des mesures satellitaires renforcées sans savoir jusqu'à quel progrès précis elles conduiront. Les évolutions climatiques régionales dépendent aussi de l'évolution combinée de toute une série de modes de fluctuations qui seront affectés de manière différente par le réchauffement. Selon les régions du monde, on peut ainsi citer l'Oscillation

Nord-Atlantique (en anglais : NAO), les alternances irrégulières entre les phénomènes El-Niño ou La-Niña qui s'inscrivent dans le phénomène plus large de l'ENSO (*El Niño Southern Oscillation* en anglais), les fluctuations intrasaisonnières ou interannuelles des différents régimes de mousson, et les corrélations qui lient en permanence ce qui se passe dans diverses régions (les téléconnexions). Là aussi la recherche a du mal à réduire les incertitudes, et on ne sait pas vraiment jusqu'à quel point le monde réel est prévisible.

Il est cependant important de comprendre ces incertitudes comme une information et pas comme une ignorance. Il en va de même que pour la sismicité d'une région, ou le caractère avalancheux d'une vallée, qui définissent des zones de risques prises en compte dans l'aménagement du territoire. Tous les processus climatiques extrêmes, quand ils sont plausibles, et même si leur occurrence précise est difficile à prévoir, participent à l'évaluation du risque attaché à certains aménagements.

Mieux établir ces risques, mieux évaluer la capacité de les anticiper, tout cela fait bien sûr l'objet de recherches coordonnées entre différents instituts, à la fois au niveau européen et plus largement international. Les résultats d'un modèle donné doivent être systématiquement confrontés aux modèles des autres instituts, si l'on veut éviter de réduire trop fortement le champ des risques, ce qui serait potentiellement dangereux s'agissant de définir des politiques d'adaptation aux changements climatiques. Il est bien sûr aussi tentant d'essayer de quantifier des impacts climatiques à plus petite échelle encore, impacts « locaux » plutôt que « régionaux » : par exemple des changements hydrologiques qui seraient spécifiques d'une vallée pyrénéenne. Il est possible d'obtenir des informations utiles, en utilisant par exemple des techniques mathématiques dites de désagrégations statistiques, qui permettent en particulier de traduire des effets de différences systématiques qui peuvent exister entre le fond d'une vallée et les sommets environnants. Mais là aussi, il faut se souvenir qu'ils sont toujours tributaires des simulations initiales, c'est-à-dire des simulations globales, à l'échelle de la planète, et de leurs incertitudes – c'est pourquoi les auteurs des rapports cités au paragraphe suivant ont fait attention à montrer les résultats de deux ou trois modèles, en attendant de pouvoir exploiter un ensemble encore plus large de résultats. Le portail « DRIAS »[2] mis en place par Météo-France en partenariat avec l'IPSL et le CERFACS permet désormais au grand public d'accéder à ces simulations.

VII- Comment interpréter les résultats pour l'Aquitaine : l'exemple des sécheresses estivales ?

Nous voulons dans ce paragraphe montrer quelques exemples de ce que ces scénarios climatiques apportent à l'étude de l'Aquitaine. Les résultats des deux modèles « zoomés » français ont été présentés de manière très détaillée dans deux rapports établis à l'intention du Programme National d'Adaptation [11][12], et désormais aussi sur le portail Drias. Les personnes intéressées trouveront facilement ces cartes aux adresses Internet indiquées en référence.

Certains paramètres sont plus faciles à anticiper que d'autres. Une situation de sécheresse, par exemple, dépend de deux séries de processus : la diminution des précipitations, et l'augmentation des températures, qui s'accompagne d'une évapotranspiration accrue des sols et des plantes. On peut ainsi distinguer des sécheresses « météorologiques » (plus de pluie), « hydrologiques » (plus d'eau dans les nappes ou les rivières) ou « agricoles » (générant une difficulté de croissance des plantes). L'Aquitaine va être confrontée à un réchauffement systématique s'accompagnant de vagues de chaleur plus intenses, particulièrement en été, et donc de situations d'évapotranspiration des sols également plus intense. Les cartes ne sont pas montrées ici, car elles sont simples à analyser : l'Aquitaine est une des régions de France où le réchauffement risque d'être le plus fort. Mais la complexité de l'information peut être parfois plus grande et difficile à décoder. Nous avons choisi de montrer ici plus en détail et à titre d'exemple un autre indicateur de sécheresse estivale, défini comme le nombre de jours consécutifs en été où la précipitation reste en dessous d'1 mm, ainsi que la modification de cette statistique à différentes échéances au cours du XXI^{e} siècle.

2. http://www.drias-climat.fr/

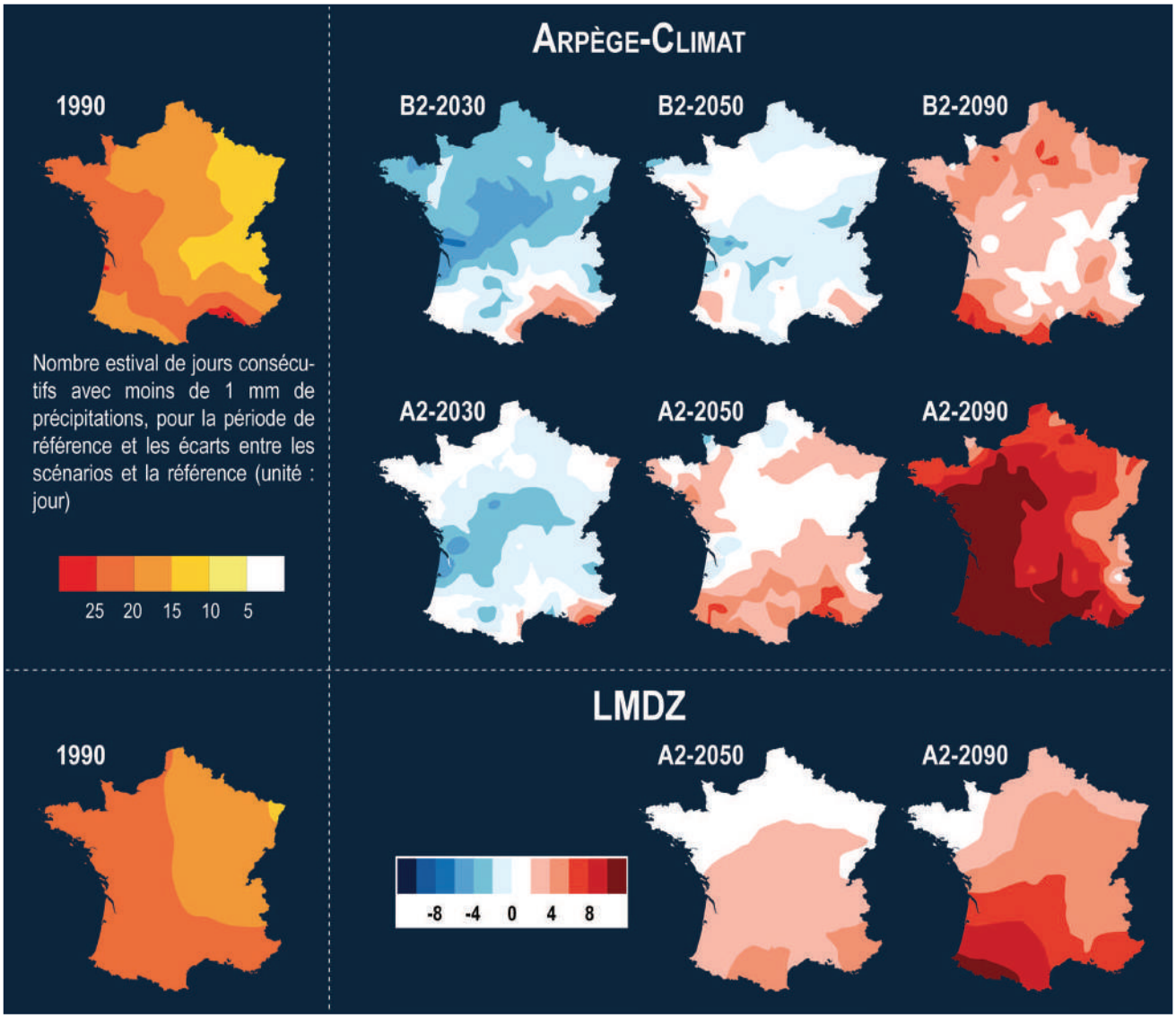


Figure 4 : *Un exemple de diagnostic de changement climatique issu de deux modèles climatique avec résolution améliorée (« zoomée ») sur la France. La variation estivale du nombre de jours consécutifs inférieur à 1 mm montre un risque de sécheresse, qui pour le modèle Arpège et sur le Sud-Ouest de la France, est surtout marqué en milieu et fin de siècle (Peings et al. [11]). Les cartes de gauche montrent la valeur de référence simulée par les deux modèles français. Les cartes suivantes montrent les différences avec cette référence pour les différents modèles et scénarios, exprimées en nombre de jours de sécheresse, comme indiqué sur l'échelle du bas. En fin de siècle les différents modèles et scénarios montrent des jours de sécheresse en plus (couleur rouge), mais dans les simulations du modèle Arpège qui sont montrées ici, cette tendance ne s'établit que tardivement, le début du siècle étant plutôt marqué par des jours de sécheresse en moins.*

Le premier ensemble de cartes présente les résultats des modèles régionaux zoomés de Météo-France et de l'IPSL **(Figure 4)**. Le deuxième utilise des techniques de descente en échelle à partir de 3 modèles régionaux français (aux deux précédents s'ajoute le modèle MAR développé au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, à Grenoble). Ces trois modèles fournissent des détails supplémentaires aux échelles régionales **(Figure 5)**. Le rapport définit des indices pour 5 régions françaises dont le Sud-Ouest.

Comment utiliser une telle information ? Tout d'abord il faut la replacer dans un contexte général : les changements climatiques à nos latitudes, pendant les prochaines décennies tout au moins, ne modifieront pas fondamentalement la nature des anomalies météorologiques, mais avant tout leur fréquence. C'est bien ce qu'essaie d'analyser l'indice retenu. Nous nous attacherons donc à extraire des éléments statistiques de ces résultats – aussi mais cela ne sera pas montré ici, à essayer de caractériser si les évolutions simulées peuvent résulter d'effet de hasard ou si elles sont significatives.

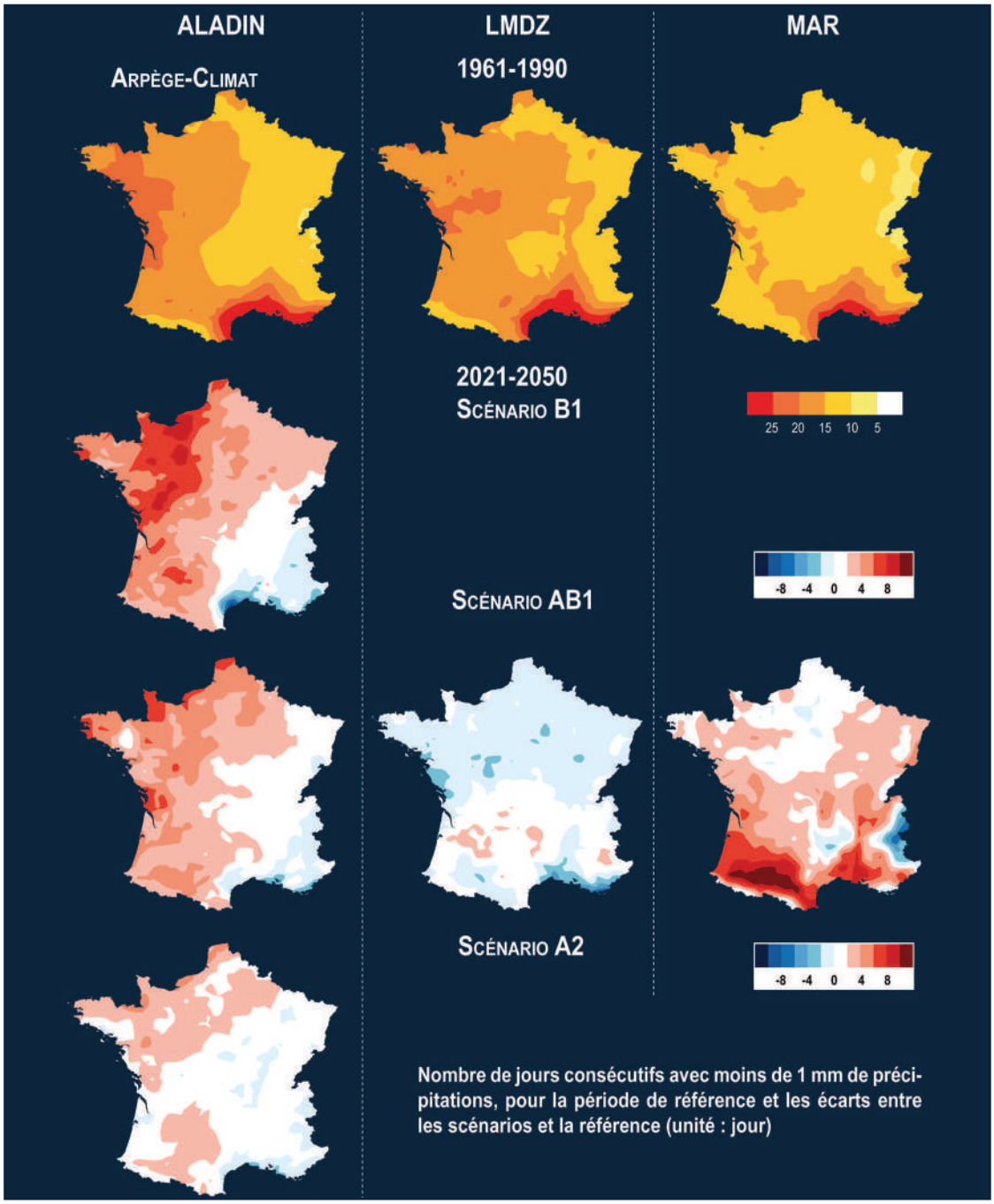


Figure 5 : *Un diagnostic similaire utilisant des techniques statistiques de descente en échelle (appliqué à des scénarios un peu différents, et utilisant un troisième modèle régional, MAR développé au LGGE, à Grenoble) permet d'affiner les détails géographiques de ces risques de sécheresse – mais reste tributaire de l'évaluation des changements climatiques à grande échelle, avec une appréciation des risques de sécheresse qui varie de modèle à modèle. Première ligne : référence actuelle, décrivant le nombre de jours consécutifs avec moins d'1 mm de précipitation. Lignes suivantes : différences attendues entre la période (2021-2050) et la période de référence (1960-1990) (Peings et al. [12]). La ligne 2 montre le seul modèle Aladin pour un scénario B1, la ligne 3 les 3 modèles pour le scénario A1B, la ligne 4 le seul modèle Aladin pour le scénario A2. Le Sud-Ouest apparaît en rouge, le plus souvent, manifestant un risque majoritaire de sécheresse.*

SUD-OUEST				
1961-1990		18	18	14
2021-2050	B1	0/8 (-6/27)		
	A1B	0/6 (-5/15)	-2/3 (-7/10)	3/7 (-3/16)
	A2	-2/5 (-8/26)		
2071-2100	B1	4/11 (-4/19)		
	A1B	5/12 (-5/24)	-1/5 (-4/13)	2/5 (-6/11)
	B2	8/16 (3/32)		

Le petit diagramme ci-contre permet de comprendre un peu mieux ce que veulent dire les variations d'indices de sécheresses pour le Sud-Ouest, et le soin qu'il faut apporter à leur utilisation.

La première ligne nous montre le nombre de jours de sécheresse que diagnostiquent les 3 modèles quand on les place dans les conditions climatiques des années 1960-1990, soit respectivement 18,18 et 14 jours en moyenne chaque été.

Les scénarios futurs montrent que ce chiffre, considéré en moyenne sur 30 ans a généralement tendance à augmenter. Prenons par exemple la dernière ligne qui correspond à l'évaluation du modèle Aladin pour un scénario A2. On obtient de 8 à 16 jours de plus par an, en moyenne sur 30 ans – il s'agit de la fourchette de valeur qui n'est pas entre parenthèses. Mais si l'on considère les années individuelles, l'augmentation du nombre de jours de sécheresse se situe dans une fourchette plus large (de 3 à 32 jours, valeurs entre parenthèses) puisque certaines années peuvent être affectées par des conditions météorologiques exceptionnelles. Si l'on regarde les autres scénarios ou les autres modèles on constate que beaucoup indiquent qu'il y aura bien dans le futur des années marquées par des jours de sécheresse pluviométrique en moins, comparé à la moyenne des années 1960-1990.

Ces résultats restent par ailleurs dépendants des incertitudes affectant les modèles de grande échelle. L'assèchement estival du Sud de l'Europe, auquel se rattache la tendance similaire diagnostiquée sur l'Aquitaine, constitue un résultat robuste, partagé par la plupart des modèles et associé à un renforcement de l'anticyclone des Açores dans un climat plus chaud. Mais ce n'est pas une anticipation exclusive : des années humides restent possibles et même probables.

En conclusion, il faut être précis dans l'interprétation de tels chiffres. Le Sud-Ouest fera face à un risque réel de sécheresses estivales récurrentes dans les décennies à venir, sécheresses qui accompagneront un réchauffement général marqué par des vagues de chaleur plus nombreuses. Ces résultats doivent être compris comme des évolutions plausibles, que l'on doit absolument prendre en compte dans un effort de prospective. Mais il s'agit de risques, qui ne sont pas les seuls risques possibles. Des vagues de sécheresse n'interdisent pas des situations orageuses et d'autres résultats montrent aussi un accroissement possible des épisodes de pluie intense en été.

Il faut donc s'adapter préventivement à des situations de sécheresses, mais certainement pas en faire l'horizon unique auquel l'Aquitaine sera confronté.

VIII- Les contours possibles du climat futur de l'Aquitaine

Les résultats des modèles climatiques, qu'il est impossible de tous montrer dans ce texte, permettent d'anticiper les traits généraux des évolutions climatiques sur l'Aquitaine, pour une série large de paramètres, en prenant à chaque fois les mêmes précautions consistant à rappeler qu'il s'agit de risques fortement étayés, mais pas de prévisions certaines, encore moins de prévisions datées.

Au-delà des tendances déjà signalées sur la température et les précipitations, les évolutions moyennes sont généralement caractérisées par :

- Des vents hivernaux moins violents. L'Aquitaine a souffert de deux tempêtes dévastatrices. Martin en Décembre 1999, et Klaus en Janvier 2009. Il n'y a pas d'indices clairs pouvant rattacher ces tempêtes à des manifestations du réchauffement de la planète – même s'il est également difficile de l'exclure complètement. Mais le mécanisme qui ferait le lien n'est pas identifié et on sait que des tempêtes importantes ont eu lieu dans le passé grâce au travail des historiens [13]. On s'attend au contraire à un léger ralentissement des dépressions ou anticyclones de moyennes latitudes, parce que la différence de température entre Pôle et Équateur a tendance à diminuer dans un réchauffement de la planète.

- Des vents d'été éventuellement plus violents car associés à des tempêtes d'origine convective. À la différence des situations hivernales, le mécanisme qui peut amplifier les circulations atmosphériques d'été est bien connu : il s'agit de la condensation de la vapeur d'eau, vapeur d'eau dont la concentration

atmosphérique peut être très importante, car le seuil de saturation s'élève rapidement avec la température

Il est aussi important de rappeler que l'Aquitaine, avec sa très longue façade maritime, ses activités économiques en zones inondables (dans le bassin d'Arcachon, le long de la Gironde), est particulièrement sensible au relèvement moyen du niveau de la mer. Un relèvement de quelques dizaines de centimètres est anticipé pour la fin de ce siècle (nous y reviendrons plus loin).

De manière générale, la mémoire du passé est une dimension essentielle permettant de guider l'adaptation aux anomalies climatiques futures : ce qui s'est déjà produit dans le passé peut se produire à nouveau, même si l'impact des gaz à effet de serre peut moduler la fréquence de ce retour, son ampleur, ou sa localisation précise.

Que peut-on dire des changements climatiques récents ?

Peut-on d'ores et déjà dire que le climat a changé ? Et, si oui, quelles sont les causes de ce changement ? Telles sont les deux questions au centre des études dites de détection et d'attribution.

Dans l'analyse du passé climatique récent, une question naturelle consiste à se demander si les variations observées traduisent simplement la variabilité interne du climat (c'est-à-dire des fluctuations climatiques « normales », sans réel changement), ou bien si elles témoignent d'un changement plus profond, en lien avec une modification des forçages externes. Répondre à ce type de question nécessite d'utiliser des outils statistiques, en prenant soin de bien évaluer, au préalable, ce que peuvent être les variations d'origine interne.

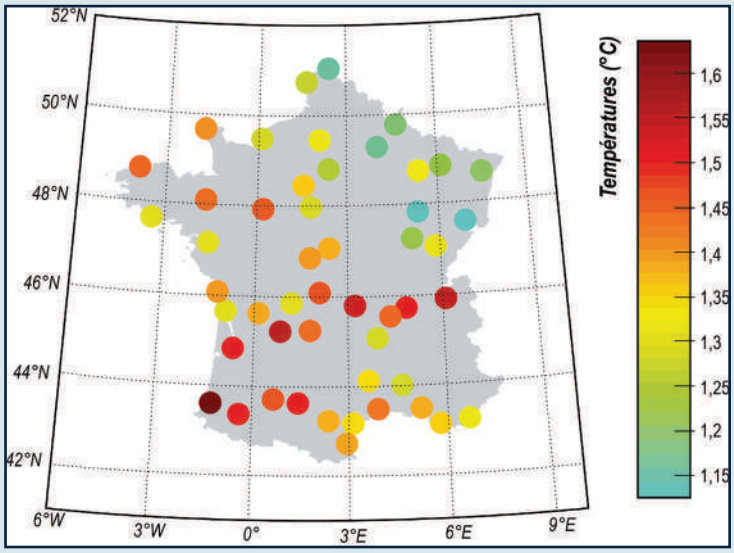


Figure 6 : *Changement climatique estimé en France au cours de la période 1900-2006, en différents sites de mesure, sur la base des observations homogénéisées produites par Météo France.*

Des études de ce type ont tout d'abord été menées à l'échelle de la planète entière (notamment via l'étude de la température moyenne globale, dans les années 1990), et sont maintenant réalisées à des échelles spatiales plus fines. En France, ce type d'étude a été réalisé sur une période allant du début du XX^{e} siècle à nos jours, période au cours de laquelle on dispose de relevés météorologiques réguliers et suffisamment nombreux. Il faut noter à ce propos que l'étude précise du climat du passé (les changements recherchés sont de l'ordre du degré) nécessite un pré-traitement des données observées, afin de les « homogénéiser », c'est-à-dire d'en retirer les ruptures métrologiques les plus nettes (ruptures dont les causes peuvent être diverses : changement d'appareil de mesure, déplacement du lieu de mesure, modification de l'environnement du site, du protocole de mesure, etc.). Les résultats de cette étude indiquent qu'au cours de la période 1900-2006, l'élévation de température observée ne peut pas s'expliquer seulement par la variabilité interne, et témoigne donc d'un changement réel [14]. Le réchauffement estimé entre ces deux dates, aux différents sites de mesure, se situe entre 1.1 et 1,65 °C **(Figure 6)**. Très grossièrement, ce réchauffement est plus marqué au Sud que dans le quart Nord-Est, et on peut remarquer que les valeurs estimées en Aquitaine sont plutôt dans le haut de la fourchette. En outre, le caractère non uniforme du réchauffement à l'échelle du pays est robuste. La mise en évidence statistique d'un changement pour d'autres variables climatiques, comme les précipitations, est souvent plus difficile car les changements attendus sont généralement moins marqués au regard de la forte variabilité interne.

Une deuxième question importante concerne l'étude des causes pouvant expliquer les changements observés. Historiquement, le débat s'est dans un premier temps attaché à déterminer si les variations observées pouvaient s'expliquer par des causes naturelles (mais non internes, telles que des variations de l'intensité du rayonnement solaire, ou encore des éruptions volcaniques importantes). Les études menées à ce sujet se sont plutôt concentrées sur les échelles globale et continentale, et ont permis d'aboutir à une des conclusions fortes du dernier rapport du GIEC : « l'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^{e} siècle est très probablement dû

à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques ». Désormais, d'autres questions plus fines sont étudiées, par exemple afin de distinguer, dans les changements liés aux activités humaines, ceux dus aux émissions de gaz à effet de serre, et ceux dus à d'autres perturbations anthropiques, telles que les émissions d'aérosols (particules solides en suspension dans l'atmosphère qui tendent à réfléchir une partie du rayonnement solaire), ou autres.

IX- L'évolution du domaine littoral : des liens directs avec les changements globaux

Le domaine littoral aquitain, très étendu, exposé aux effets de l'océan, constitue l'exemple d'un milieu qui répond de manière directe aux modifications (naturelles ou anthropiques) des conditions climatiques globales. Il est difficile de faire des prévisions détaillées de ces évolutions, mais il est possible d'analyser ce qui s'est produit au cours des dernières décennies. Deux faits dirigent cette évolution. Le relèvement du niveau de la mer s'est poursuivi à un rythme moyen de plus de 3 mm par an, à l'échelle globale. Mais surtout, les évolutions climatiques observées depuis 25 ans sont caractérisées par une orientation vers des conditions à dominante anticyclonique ([15][16]; **Figure 7**), avec des conséquences marquées sur plusieurs paramètres : température et salinité de l'océan, vents, vagues...

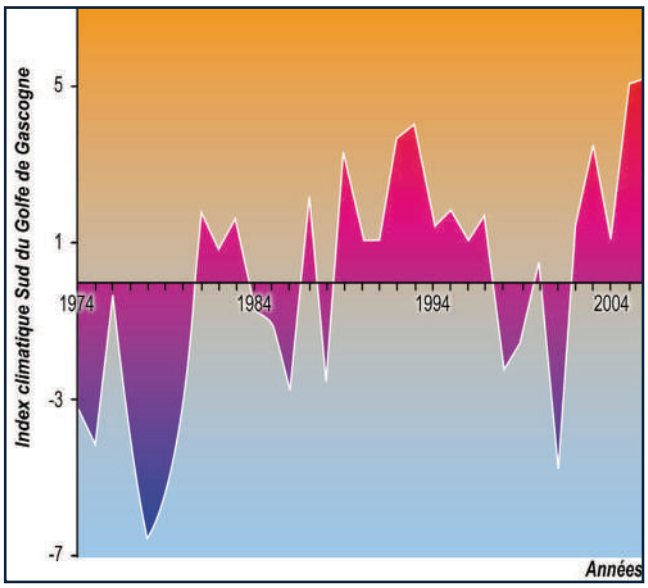


Figure 7 : *Évolution de l'index climatique multivarié SBC (Southern Biscay Climate index), calculé sur onze paramètres (température de l'air et de surface de la mer, état d'agitation de la mer, pression atmosphérique, précipitations, vent..., [15]). Les valeurs négatives correspondent aux années avec des conditions dépressionnaires dominantes particulièrement en hiver (précipitations importantes et mer forte). Les valeurs positives indiquent la prédominance au cours de l'année de conditions anticycloniques (pression supérieure à la normale, température atmosphérique élevée, forte insolation et mer calme). D'après Castège et al. [16].*

Modification du cycle de l'eau

Parmi les facteurs physiques directement impactés : le cycle de l'eau. Les modifications actuelles vont dans le sens d'une diminution globale des précipitations (avec une distribution saisonnière modifiée). Ceci a une répercussion directe sur les temps de renouvellement des masses d'eau littorales, les apports en eau douce et en composés dissous.

Les évolutions observées dans les zones littorales pour les 30 dernières années sont, de ce point de vue, sans appel [17] avec une élévation de la salinité (≈ 2 p.s.u.) de l'estuaire de la Gironde **(Figure 8)**.

On serait tenté de voir au travers de cette marinisation du système estuarien un effet direct du climat, se manifestant au travers d'une diminution de la pluviométrie, mais la relation de cause à effet reste à préciser, car il y a aussi une interférence avec l'impact des prélèvements d'eau en amont. De plus, si cette tendance à la marinisation sur le long terme est avérée [17][18], une accélération du processus a récemment été mise en évidence, associée à un changement abrupt d'état de l'écosystème de la Gironde à la fin des années 1980 (~1987) se répercutant sur la physico-chimie de l'estuaire [19]. Cette tendance

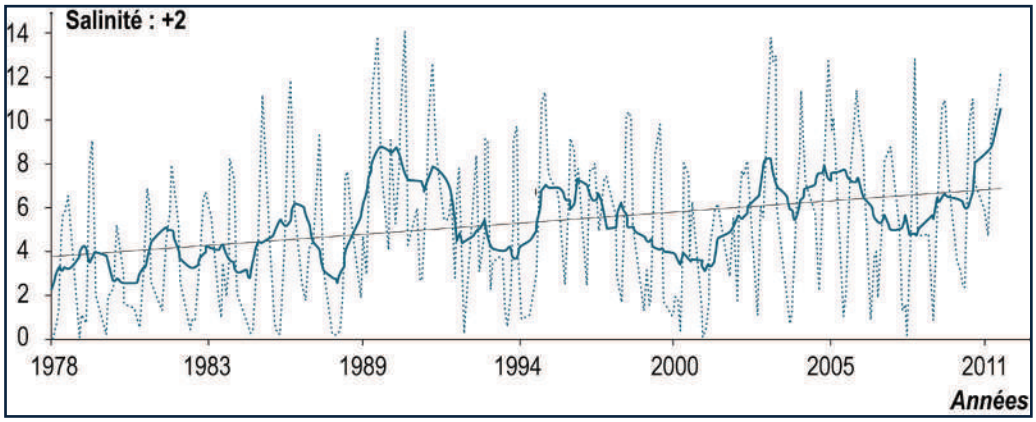


Figure 8 : *Évolution de la salinité de la zone mésohaline de l'estuaire de la Gironde : 1978-2009 eaux de fond, pK 52 (aval Pauillac). En pointillés la séries de données brutes, en bleu la tendance. Données SOMLIT et IFREMER, d'après Chaalali et al. [18].*

pourrait également avoir été exacerbée par un changement de régime des précipitations au début des années 2000.

Outre cette marinisation globale des systèmes littoraux, les caractéristiques saisonnières des apports en eau douce sont aussi modifiées notamment avec un écrêtage des crues et une modification partielle de leur saisonnalité en relation avec la diminution de 10 à 15 % de la couverture des glaciers [20]. Ceci est, en partie, à rapprocher des changements thermiques printaniers actuels, qui sont détaillés un peu plus loin dans ce texte. Ceux-ci ont une incidence marquée sur la période d'apparition et l'intensité des crues nivales, dans la Gironde, comme dans l'Adour, et donc sur les caractéristiques spatiales et temporelles des panaches fluviaux dans le golfe de Gascogne.

Température de l'eau

Dans l'hémisphère Nord, le réchauffement global en cours est particulièrement manifeste en Atlantique [21] avec des tendances régionales très différentes au sud de 40°N et au nord de 50°N, avec des phases successives de refroidissement et réchauffement dans un cas et au contraire de réchauffement et refroidissement dans l'autre, entre 1950 et 2005 [22][23]. Ainsi, le golfe de Gascogne se situe-t-il dans une zone de transition dont les limites ont fluctué au cours du temps et pour laquelle les conditions de température restent globalement peu étudiées à une échelle régionale. Les travaux disponibles concernent essentiellement les eaux de surface (jusqu'à 100 m de profondeur) et les zones littorales. A l'échelle des 140 dernières années on observe à la fois des phases de réchauffement et de refroidissement des eaux du golfe : diminution de 0,01 °C an^{-1} entre 1867 et 1910, augmentation de 0,02 °C an^{-1} jusqu'en 1945, diminution de 0,01 °C an^{-1} jusqu'en 1974 et enfin augmentation de 0,02 °C an^{-1} jusqu'en 2007 [24]. Ces évolutions sont très proches de ce qui a été observé au Pays Basque pour la période 1947-2008 [25][26][27] mais des schémas différents ont aussi été mis en évidence au sein du golfe de Gascogne marqué, par exemple, par un réchauffement plus fort dans la partie sud (0,03 °C an^{-1} : [28]). La résolution spatiale des études et la relative hétérogénéité spatiale du milieu sont avancées pour expliquer ces différences.

Les évolutions observées pour les 30 dernières années, sont marquées par une phase d'accélération : l'élévation de la température est de l'ordre de 0,07 C an^{-1} en zone littorale ([17] ; **Figure 9**) et de 0,06 °C an^{-1} pour la zone sud-est du golfe [29][30]. À cette échelle récente, le réchauffement n'est pas linéaire mais marqué par deux phases d'accélération distinctes : vers 1987 et 1996 [18].

Ces variations de température affectent aussi les eaux profondes. Ce n'est que récemment que l'évolution de la température des couches profondes (0-800 m) a été caractérisée pour une période couvrant les années 1960 à 2000 [21][28]. À partir de données de mesures *in situ* et du modèle Bobyclim, il est possible de diagnostiquer une tendance au réchauffement dans le golfe de Gascogne jusqu'à environ 500 m de profondeur. Pour les 200 premiers mètres, les variations sont beaucoup plus marquées et présentent un décalage de 2-3 ans sur le

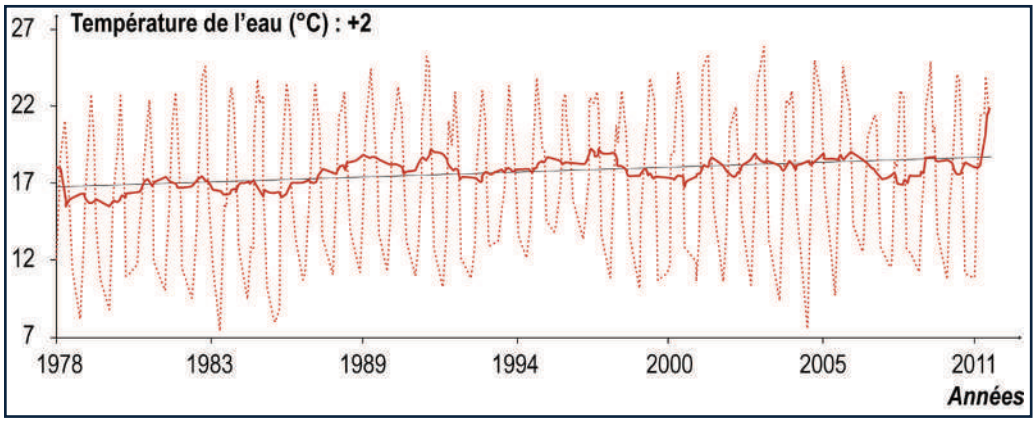


Figure 9 : *Évolution de la température de la zone mésohaline de l'estuaire de la Gironde : 1978-2011, eaux de fond, pK 52 (aval Pauillac). En pointillés la série de données brutes, en bleu la tendance. Données SOMLIT et IFREMER, d'après Chaalali et al. [18].*

réchauffement observé en surface. Ces modifications sont à mettre en relation avec une modification probable, non documentée actuellement, de la thermocline (c'est-à-dire de la zone de transition qui sépare les eaux chaudes de surface et les eaux profondes plus froides).

Les modifications liées au climat se font aussi sentir en termes de variabilité saisonnière. Celle-ci est marquée par une augmentation des minima hivernaux et un allongement de la « période chaude » [17][31] : en zone littorale, les températures de l'eau actuellement relevées en mai sont celles qui étaient observées en juillet il y a 30 ans.

Élévation du niveau marin

En premier lieu, le changement climatique cause une élévation du niveau marin moyen. Au-delà des constats menés à une échelle globale, il est nécessaire de disposer de données marégraphiques et géodésiques pour effectuer un constat régional. Les marégraphes actuellement disponibles sont ceux de Port Bloc (Le Verdon sur mer), Arcachon, Boucau-Bayonne et Saint-Jean-de-Luz (*cf.* www.sonel.org). Seul le marégraphe de Saint-Jean-de-Luz est co-localisé avec un signal GPS permanent. L'existence d'un tel GPS est nécessaire pour quantifier les éventuels mouvements de subsidence ou de surrection qui peuvent amplifier ou limiter les effets des variations du niveau marin d'origine climatique. Chust *et al.*, dans une étude régionale portant sur le Pays Basque [32], annoncent des taux d'élévation du niveau marin de 2,09 +/- 0,42 mm/an à Saint-Jean-de-Luz sur la période 1942-2006. Ces tendances sont cohérentes avec les mesures effectuées dans le Pays Basque et la côte Cantabrique espagnols voisins [33].

Concernant les projections, les scénarios globaux ne permettent pas aujourd'hui de faire des projections fiables en raison des incertitudes concernant les dynamiques de fonte des calottes polaires. Les moyennes indiquant un relèvement moyen en fin de siècle allant de 0,18 m à 0,59 m, qui sont celle de l'exercice 2007 du GIEC [20], sont souvent désormais considérées comme trop restrictives, compte tenu des taux de fonte récents du Groënland et de l'Antarctique. Ce sont souvent des valeurs dépassant 0,5 m, voire 1 m, qui sont retenues pour 2100. Ces incertitudes se reportent bien sûr sur l'échelle régionale, qui est en outre tributaire de processus plus particuliers (circulation océanique, ajustements isostatiques aux redistributions de masses passées et actuelles, modifications associées du champ gravitationnel dues aux redistributions de masses, processus de subsidence ou de surrection locaux [34]). Chust *et al.* ont estimé des variations du niveau marin basées sur trois modèles climatiques sous les scénarios A1B et A2 dans le golfe de Gascogne [35]. Leurs estimations varient selon les modèles et les scénarios de 0,28 à 0,48 m pour l'élévation du niveau marin de 2001 à 2099. Mais en pratique on peut noter que pour les estimations des effets potentiels du changement climatique en zone côtière, ce sont désormais aussi souvent des valeurs de référence telles que 0,5 m ou 1 m qui sont retenues à l'horizon 2100 (voir par exemple ONERC [36]). Par ailleurs Hulme [37] recommande d'ajouter 50 % aux prévisions globales pour les études de risque locales afin de prendre en compte la variabilité régionale de l'élévation du niveau marin.

Les vagues

Les vagues correspondent au forçage côtier pour lequel les études sont les plus nombreuses. Ainsi, Butel *et al.* [38] et Abadie *et al.* [39] ont étudié la variabilité des caractéristiques de la houle sur plusieurs décennies. Dupuis *et al.* [40], Dodet *et al.* [41], Le Cozannet *et al.* [42] et Charles *et al.* [43] ont mis en évidence que cette variabilité des vagues peut être reliée, au moins partiellement, à des variations atmosphériques à l'échelle du bassin atlantique, notamment l'oscillation atlantique nord **(Figure 10)**. Charles *et al.* [44] ont présenté des projections du champ de vagues dans le golfe de Gascogne pour la fin du XXI^{e} siècle. Ces résultats indiquent une baisse de l'énergie des vagues et un décalage vers le nord de leur orientation en été. Ainsi, l'origine moyenne des vagues (296° en été soit dans le cadran NO) pourrait être décalée de 5,1° dans un scénario A2 (6,1° dans un scénario A1B) au niveau de la bouée Gascogne. Même si la réfraction bathymétrique a pour effet de réduire l'angle de propagation des vagues par rapport à la normale au littoral, le changement d'orientation des vagues pourrait avoir un effet significatif sur la morphodynamique côtière [45][46].

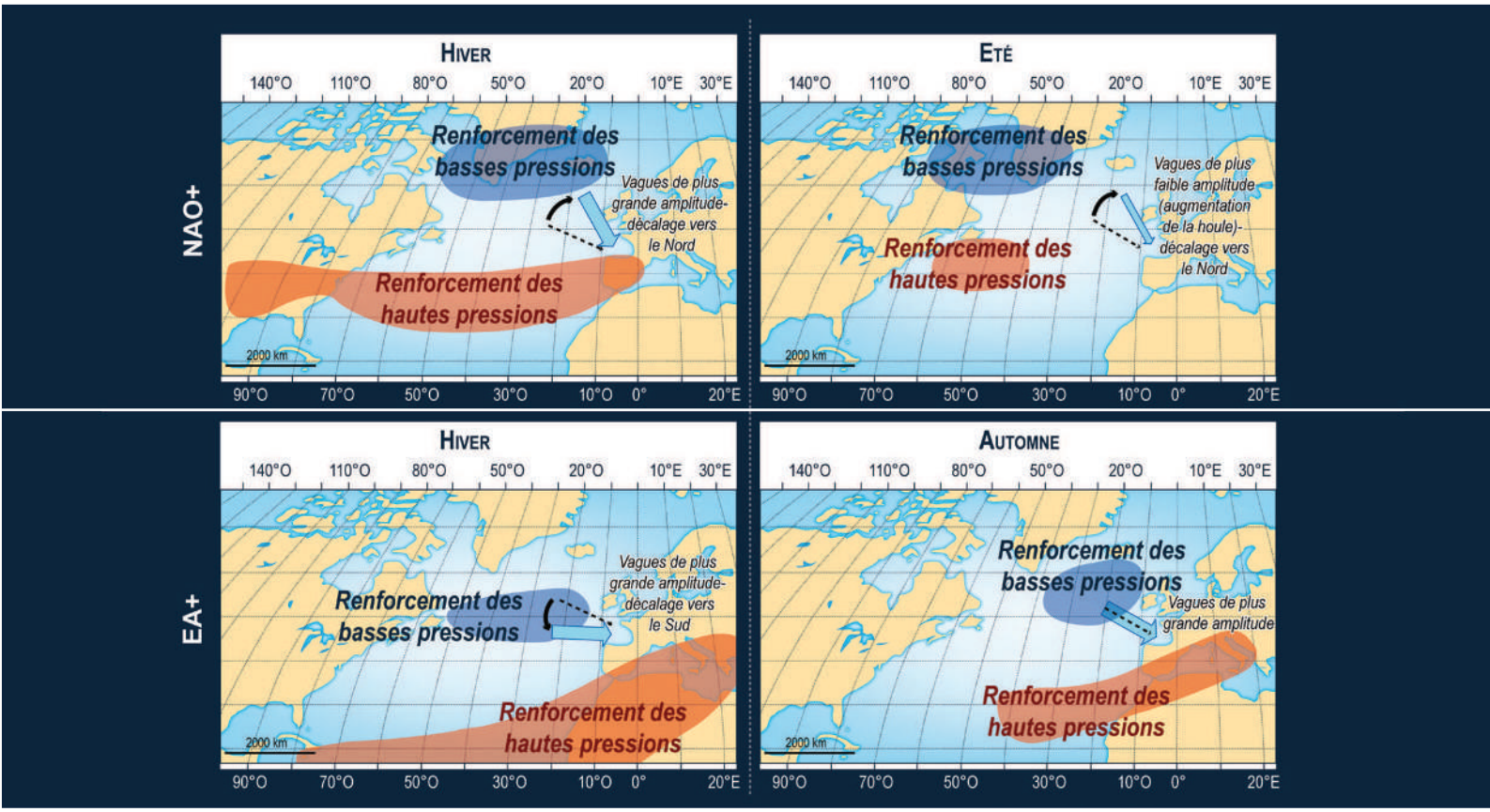


Figure 10 : *Cartes saisonnières des anomalies climatiques (hauteur de géopotentiel 500-mb standardisées pour les phases positives des figures de téléconnection NAO - Oscillation Atlantique Nord - et EA - Atlantique Est-) et changements de conditions de vagues associés dans le golfe de Gascogne. Les flèches en pointillé indiquent la direction moyenne des vagues pendant la saison tandis que les flèches bleues indiquent les modifications de direction (pas à l'échelle) et leur épaisseur indique l'évolution la hauteur de vagues. D'après Charles et al. [43].*

Niveau d'eau et surcotes

Les niveaux moyens d'élévation des eaux marines (la moyenne est effectuée sur une durée d'une dizaine de minutes) résultent principalement de la marée et de la surcote. Cette dernière est composée d'une surcote atmosphérique, correspondant à l'action directe des vents et de la pression sur l'écoulement, et du *set-up*, c'est-à-dire la surélévation induite par le déferlement des vagues, qui dépend entre autres de la pente de plage et des caractéristiques de vagues au large [47]. Sur la côte aquitaine (Truc Vert), pendant les événements énergétiques, le *set-up* est de l'ordre de 1/5 à 1/12 de la hauteur significative des vagues

au large, selon les événements. Les marégraphes mesurent un niveau d'eau total incluant la marée, la surcote atmosphérique et parfois le *set-up*. En termes de surcotes, d'après les analyses du SHOM-CETMEF (2008), les surcotes de pleine mer annuelle et décennale seraient de 0,4 m et 0,6 m à Socoa et 0,7 m et 0,9 m à la pointe de Grave (Verdon). Cette surcote résulte principalement de la surcote atmosphérique, mais comporte aussi une signature du *set-up*. Il n'existe pas à ce jour de technique permettant de dissocier sans ambiguïté ces deux contributions à partir d'un signal unique de niveau d'eau mesuré. Aussi, du fait d'un *set-up* généralement plus faible dans les ports que le long des littoraux exposés aux intempéries, les surcotes obtenues à partir des mesures marégraphiques situées dans les ports de la côte aquitaine sont plutôt à considérer comme une limite inférieure des valeurs pouvant affecter le littoral aquitain. Le long des littoraux exposés, quelques travaux ont été réalisés visant à estimer le *set-up*. Ainsi, pour la plage du Truc Vert directement exposée aux vagues, Idier *et al.* [48] indiquent par exemple que le *set-up*, pendant les événements Johanna (mars 2008), Quentin (février 2009) et Xynthia (février 2010) est globalement du même ordre de grandeur que la surcote atmosphérique avec des valeurs comprises entre 45 et 90 cm, pour des surcotes atmosphériques comprises entre 50 et 90 cm, selon l'événement considéré. Enfin, nous n'avons pas eu connaissance de travaux portant sur les tendances ou la variabilité ou les évolutions possibles de régimes de surcotes spécifiquement sur la façade atlantique française. Toutefois, on peut noter les travaux de Wang *et al*. [49] centrés sur la mer d'Irlande, par modélisation couvrant le golfe de Gascogne. Aussi, en Mer d'Irlande, ils prédisent une augmentation des événements de surcotes, sauf le long des côtes irlandaises, ainsi qu'une augmentation significative des hauteurs de surcotes extrêmes, le long des côtes est et ouest.

Les régimes de vents

Les modifications enregistrées entraînent une répercussion sur les caractéristiques environnementales des masses d'eau littorales en relation avec les apports marins et continentaux (modification récente en 2010 : [50]), sur la distribution des panaches des fleuves (influence sur les zones littorales adjacentes, ex. : Adour et bassin d'Arcachon) et probablement sur les up-wellings temporaires de la côte landaise (l'impact démontré par ailleurs n'a pas été identifié dans le golfe de Gascogne).

Le vent local est également un forçage morphodynamique lorsqu'il transporte les grains de sable de la plage aérienne et de la dune. Ces processus de transport éolien deviennent importants lors des tempêtes. Cependant, de nombreux travaux de modélisation (par exemple ceux de Déqué *et al*. [51]) n'indiquent pas d'évolutions significatives de la fréquence et de l'intensité des tempêtes avec le changement climatique en France métropolitaine.

X- De la disciplinarité à l'interdisciplinarité : quelques perspectives générales

Les incertitudes quantitatives globales ou régionales sur le réchauffement à venir affectent à leur tour la capacité à préciser les risques de changement pour des paramètres qui seront affectés de manière directe ou indirecte par l'augmentation des températures, tels que le relèvement du niveau de la mer, l'hydrologie de surface, les régimes de vent, la qualité de l'air ou de l'eau mais aussi l'ensemble des paramètres liés au monde vivant, tant sur les continents que les océans, ou encore les conditions du développement économique, des politiques de transports, de développement urbain.

Prendre en compte l'ensemble de ces paramètres sur un domaine régional comme celui de l'Aquitaine n'implique pas seulement un travail numérique sur un domaine géographique plus fin, mais aussi d'avancer dans le domaine de l'interdisciplinarité. Les modèles ont commencé à exister dans les années 1960 aux États-Unis : ils représentaient au début essentiellement la circulation générale de l'atmosphère fondée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, mais ils se sont ensuite étendus aux océans, aux glaces de mer, à des processus tels que le rôle des nuages, de la végétation, du relief montagneux. Cette extension pose des problèmes scientifiques encore nombreux. Elle est d'abord incomplète : la dynamique de grands glaciers comme le Groënland est encore absente des modèles, alors

que l'apport d'eau douce qui pourrait résulter de leur fonte est susceptible de modifier les circulations et la température de l'océan Atlantique Nord à l'échelle du siècle à venir, avec des incidences possibles sur le territoire français. Elle demande aussi à être étendue à des domaines scientifiques entièrement nouveaux qui n'obéissent pas de la même manière à des équations fondamentales. La prise en compte de la chimie atmosphérique dans les modèles climatiques est nécessaire pour prendre en considération trois séries de processus : 1) l'évolution des gaz à effet de serre à durée de vie longue ; 2) l'évolution des gaz à durée de vie courte, souvent toxiques et tributaires d'une chimie très active ; 3) la distribution des aérosols, c'est-à-dire des particules atmosphériques naturelles ou émises par les activités humaines, qui contribuent à inhiber partiellement et transitoirement le réchauffement de la planète. Cette chimie atmosphérique se situe à la charnière entre les problèmes climatiques et leurs incidences en termes de santé, et sa prise en compte dans les scénarios de changement climatique ne peut s'appuyer que sur des équations simplifiées, tant est grand, par exemple, le nombre d'espèces et de réactions chimiques qui entrent en jeu. Des progrès ont été faits dans ce domaine, mais beaucoup reste à faire. On pourrait dire la même chose du domaine du vivant : représenter le cycle du CO_2 dans les modèles c'est prendre en compte l'évolution de la végétation continentale, mais aussi de la vie aquatique, marine ou d'eau douce. Il s'agit d'un espace de travail qui s'est ouvert il y a une dizaine d'années, et les équipes de l'IPSL ont été parmi les toutes premières à réaliser des simulations climatiques incluant une représentation cohérente de l'ensemble de ces processus.

Quand on les rapporte à ces perspectives on peut dire que les projections climatiques actuelles, celles dont le GIEC a rendu compte en 2001 et 2007, s'inscrivent dans le cadre de modélisations plutôt « linéaires » du système climatique, où les acteurs sont avant tout l'atmosphère, l'océan, l'hydrologie de surface, des partenaires dont on retient surtout la contribution moyenne, pour essayer avant tout de comprendre l'évolution du climat à l'échelle de quelques décennies. Une double extension de ce travail est nécessaire. Aux petites échelles de temps, il est essentiel de mieux comprendre la statistique des événements extrêmes qui sont à la source des impacts climatiques les plus importants. À plus long terme, dès qu'entrent en jeu des partenaires comme l'océan profond, les grands glaciers, les grands systèmes hydrologiques ou végétaux (forêts) – sans même parler des systèmes socio-économiques – le comportement du système climatique devient plus chaotique, avec des possibilités de transitions brutales qui sont pour le moment difficiles à évaluer. Tous ces domaines réclament une recherche fondamentale importante, en protégeant l'articulation forte qui s'est développée entre modèles, observations et théories

L'étude du changement climatique futur est donc un champ scientifique bouillonnant mais marqué d'incertitudes nombreuses. Il est impossible de s'appuyer sur les modèles seuls pour conseiller les décideurs publics et privés. Il est aussi nécessaire de développer une démarche inverse prenant en compte les vulnérabilités d'un territoire donné au changement climatique, dans toutes ses composantes, physiques, chimiques, écologiques ou socio-économiques. C'est d'ailleurs cette démarche qui peut permettre au citoyen de s'insérer dans un débat souvent très technique et c'est celle qui sera développée dans les chapitres qui viennent.



Grotte de Lascaux (Dordogne), Fresque des Taureaux, cheval brun à crinière noire entre les deux grandes représentations d'aurochs de la paroi de gauche (détail, cliché © N. Aujoulat-MCC).

Chapitre 2 :

Du climat du passé au climat du futur

Coordination : *Francis Grousset*
Rédacteurs : *Pascal Bertran, Bérangère Clavé-Papion, Anne Colin, Emmanuel Garnier, Dominique Genty, Francis Grousset, Sandrine Lavaud, Maria-Fernanda Sanchez-Goñi, Jean-Pierre Tastet, Florence Verdin*
Contributeurs : *Jean-Claude Duplessy, Olivier Girardclos, Laurent Londeix, Jacques Maugein, Sébastien Zaragosi.*

Avant d'entrer dans le détail de la description des impacts du changement climatique en cours ou à venir sur l'environnement aquitain, – impacts qui seront examinés dans les prochains chapitres –, nous avons souhaité décrire le climat que l'Aquitaine a connu avant le début de l'ère industrielle, soit jusqu'au milieu du XIX^e^ siècle.

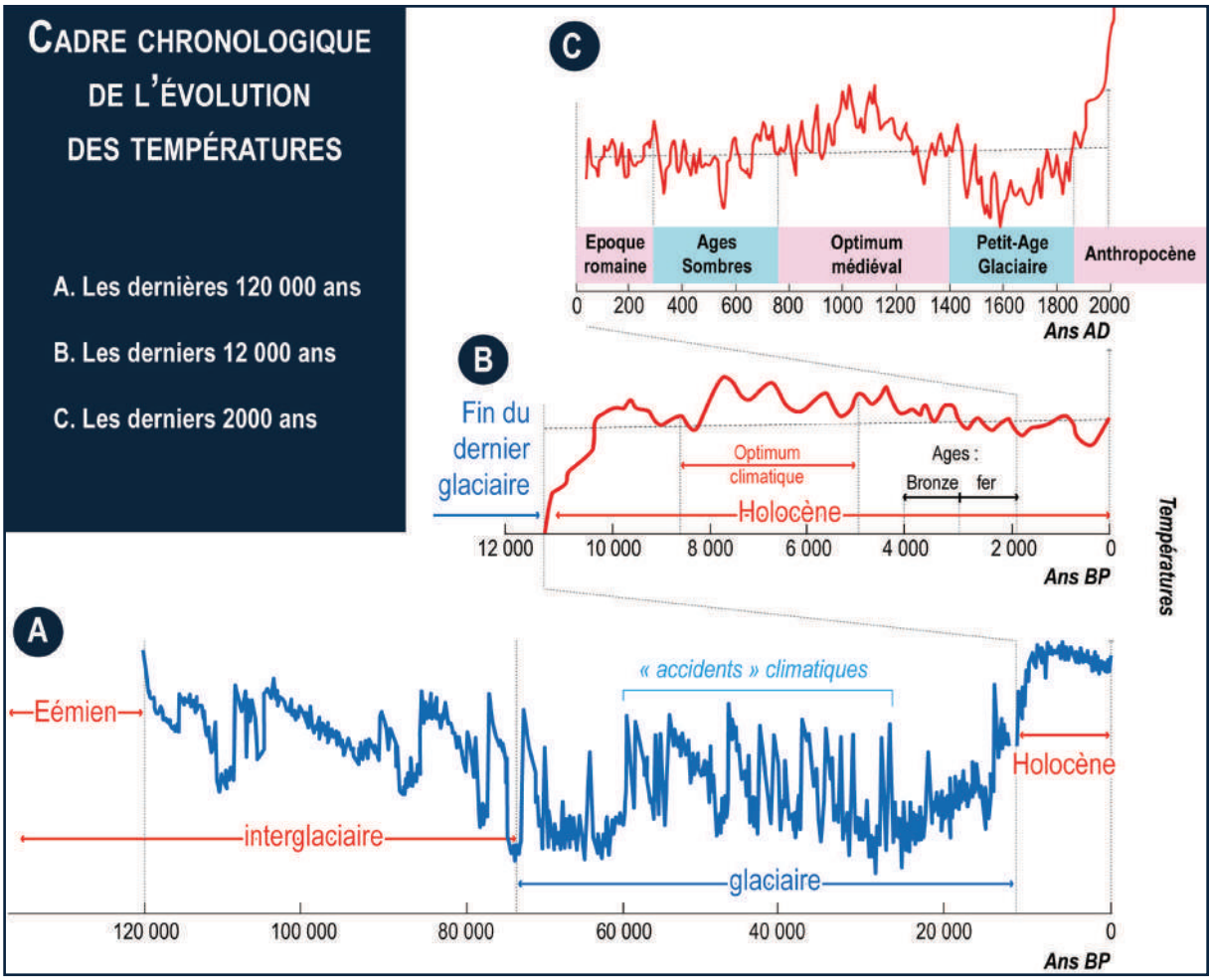
Ce chapitre décrit donc l'histoire du climat aquitain. Certains milieux de l'environnement aquitain ont gardé la mémoire de cette histoire climatique ancienne : les scientifiques savent désormais décrypter une grande partie des messages contenus dans nombre de témoins endormis : sédiments, pollens, cernes des arbres, traces archéologiques, écrits historiques, etc. Leur étude révèle que depuis plus de 100 000 ans, tout comme partout ailleurs sur la planète, le climat a oscillé naturellement entre des périodes « froides » et souvent sèches et des périodes « chaudes » et souvent humides. Ces cycles lents, naturels, ont été aussi interrompus par des accidents climatiques brefs mais intenses. Durant ces périodes, les populations locales – les chasseurs-cueilleurs paléolithiques, puis l'homme moderne –, ont dû s'adapter à des changements qu'ils subissaient sans pouvoir en infléchir le cours.

En reconstituant l'histoire de la variabilité climatique régionale de l'Aquitaine, nous avons rencontré des situations extrêmes : parmi elles, certains épisodes chauds peuvent servir d'analogues du climat vers lesquels nous pourrions bien évoluer durant le XXI^e^ siècle.

Introduction

Pourquoi introduire un chapitre sur le climat passé de l'Aquitaine, dans un ouvrage qui traite du climat futur ? De nombreux experts, dont en particulier ceux du GIEC, considèrent que les perturbations du climat liées à l'activité humaine ont débuté vers 1850, au moment de l'initiation de la révolution industrielle. Auparavant, la variabilité du climat était seulement induite par des facteurs naturels, d'origine essentiellement astronomique. Ainsi, examiner le climat passé de l'Aquitaine peut nous donner une idée de l'intensité des extrêmes climatiques froids ou chauds, secs ou humides, qui ont prévalu dans notre région de manière tout à fait naturelle. La Terre a connu des périodes chaudes, ou interglaciaires, l'avant dernière vers 125 000 ans B.P.[1] et la dernière ayant débuté vers 11 000 ans B.P. Elles ont alterné avec des périodes glaciaires, le dernier maximum de glace ayant été atteint vers 21 000 ans B.P. Ces grandes tendances naturelles ont été ponctuées par des accidents climatiques rapides.

1. Au lieu de dire « il y a 125 000 ans », on dit par convention « 125 000 ans B.P. » (*Before Present*).



Dans l'environnement aquitain, il existe des témoins de cette histoire climatique ancienne : le pollen dans les sédiments marins et lacustres, les stalactites des grottes, les anneaux des arbres, les traces archéologiques, les écrits historiques, etc., qui représentent autant de sources d'information au sein de cette vaste « bibliothèque ». Les scientifiques, dans une démarche semblable à celle de Champollion face à la pierre de Rosette, savent déchiffrer les messages climatiques que contiennent ces témoins endormis.

Dans ce chapitre, nous décrivons l'état de la connaissance sur le climat passé de l'Aquitaine en tentant de préciser l'amplitude de sa variabilité naturelle, qui prévalait avant l'intervention de l'homme. Le plan utilisé consiste à débuter l'histoire il y a ~125 000 ans, durant l'avant dernière période chaude qu'à connue l'Aquitaine, puis à avancer progressivement jusqu'à nos jours, en traversant la dernière période glaciaire dans laquelle l'Aquitaine a plongé jusqu'à il y a ~18 000 ans, pour décrire enfin la sortie de la glaciation et la période « tempérée » actuelle appelée Holocène. Chaque fois que cela est possible, nous tentons de préciser quels ont été les impacts sur les populations établies dans la région.

I- L'avant-dernier interglaciaire en Aquitaine (de ~125 000 B.P. à ~75 000 ans B.P.), une période «chaude»

L'avant-dernière période interglaciaire[2] (de ~125 000 B.P. à ~75 000 ans B.P.) a été une période globalement chaude, entrecoupée de deux périodes plus froides. Durant cet interglaciaire, la période la plus chaude a duré ~5000 ans (de ~130 000 B.P. à ~125 000 ans B.P.) : elle est dénommée Eémien par les spécialistes.

2. La dernière période interglaciaire est l'Holocène : elle a débuté il y a un peu plus de 11 000 ans.

Durant l'Eémien, en été, le climat de l'Atlantique Nord était plus chaud que maintenant et sous l'effet d'une fonte substantielle d'une partie du Groënland et de l'Antarctique [1] le niveau marin était plus élevé de quelques mètres à l'échelle du globe, probablement de 6 m [2]. A l'échelle globale, la température moyenne aurait été 3 à 5 °C plus élevée qu'à l'actuel, ce qui fait de cette période un bon analogue du climat vers lequel on pourrait se diriger. En Aquitaine, il ne reste plus de témoins directs de cette surélévation, qui l'a pourtant vraisemblablement affectée : des observations faites dans les zones côtières atlantiques de la Péninsule Ibérique révèlent des niveaux marins plus élevés qu'actuellement.

Quel était alors le climat de l'Europe, en particulier en Aquitaine ? Le climat de l'Aquitaine peut être reconstruit à partir de l'étude des sédiments accumulés dans le golfe de Gascogne, car ils ont gardé la mémoire des événements successifs qui ont caractérisé cette région. L'étude d'une séquence sédimentaire récupérée dans les fonds marins localisés à ~150 km au large du littoral aquitain, a révélé la présence de plusieurs indicateurs climatiques terrestres tels que les pollens ou les micro-charbons, ou planctoniques marins notamment des organismes unicellulaires calcaires (les foraminifères) ou des algues unicellulaires (les dinoflagellés). Leur analyse a permis de reconstituer les changements de la végétation et du climat de cette région et des températures des eaux de surface qui baignaient les rivages. En particulier, les grains de pollen amenés surtout par voie fluviatile et par les vents, se font l'écho de la végétation qui s'est développée principalement dans les bassins de l'Adour, de l'ensemble Dordogne/Garonne et de la Loire.

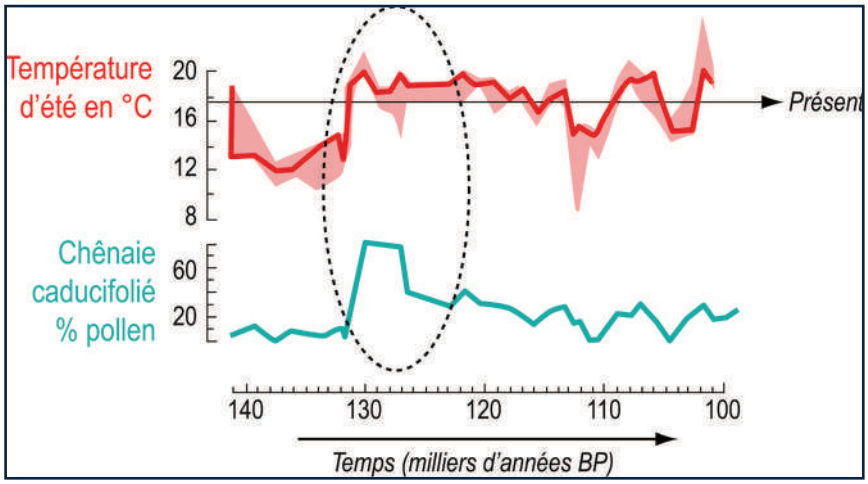


Figure 1 : *Durant l'Eémien (de ~130.000 à ~125.000 ans B.P.), la température de l'Aquitaine était plus élevée de 2 à 3°C par rapport à l'actuelle. Les forêts étaient largement composées de chênes à feuillage caduc (~50 % ; [3], modifié).*

Cette étude montre que durant l'Eémien, le Sud-Ouest de la France était dominé par une forêt tempérée à feuillage caduc (ex. : chênes, noisetiers), impliquant des températures estivales plus chaudes de ~2 °C qu'à l'actuel **(Figure 1)** et des précipitations bien réparties au cours de l'année, atteignant ~150 mm durant les étés [3]. En été, les températures des eaux de surface du golfe de Gascogne atteignaient des valeurs semblables aux valeurs actuelles, de l'ordre de ~20 °C. À la différence de l'Eémien, les simulations des modèles climatiques pour la fin du siècle révèlent des sécheresses estivales importantes en Aquitaine, avec ~25 % de précipitations en moins. Or, cette sécheresse sera probablement responsable de la colonisation de cette région par des espèces méditerranéennes (avec une prépondérance du chêne vert), ainsi que cela est simulé par les modèles de végétation de l'INRA [4] (voir chapitre 5.2).

Il est important de souligner que, bien que le climat de l'Eémien soit souvent considéré comme un analogue du climat actuel et à venir, les causes du réchauffement Eémien et celles du réchauffement en cours sont très différentes : l'insolation durant l'Eémien et l'excès de CO_2 anthropique[3] actuellement. Ainsi, leurs effets ne sont pas les mêmes en chaque point de la planète, ce qui explique que l'Eémien ne soit pas un analogue parfait du climat futur.

3. CO_2 = dioxyde de carbone (usuellement : gaz carbonique).

La palynologie (science des pollens)

L'analyse des grains de pollen et spores des séquences sédimentaires anciennes est le meilleur moyen pour reconstituer l'histoire de la végétation. Chaque plante produit un type caractéristique de grain de pollen ou spore. Ces grains se déposent dans les sédiments où ils se conservent grâce à leur résistance à la corrosion. Extraits à l'aide de techniques de laboratoire sophistiquées ces grains sont identifiés au microscope optique. Les spectres polliniques fossiles, c'est-à-dire la fréquence des grains de pollen et spores des différentes espèces végétales dans un échantillon donné, sont interprétés en termes de végétation en s'appuyant sur la représentation pollinique des formations végétales (biomes) actuelles. Les différents biomes actuels étant distribués selon des paramètres climatiques, il est possible de remonter de l'assemblage pollinique fossile au climat du passé et à l'estimation des paléo-températures et paléo-précipitations : on fait alors de la paléo-palynologie.

II- De 75 000 à 15 000 ans B.P., l'Aquitaine s'enfonce lentement dans un climat glaciaire

Les Néandertaliens et les hommes anatomiquement modernes ont traversé la dernière période glaciaire caractérisée par un fort développement de calottes polaires et par des zones englacées qui couvraient la quasi-totalité du nord de l'Europe et des îles britanniques. On sait désormais que cette longue période n'a pas été uniforme du point de vue climatique. Elle a été marquée par des changements thermiques très rapides et de forte amplitude, pouvant atteindre par exemple entre ~6 et ~16 °C dans l'atmosphère du Groënland. Ces changements, appelés *les cycles de Dansgaard-Oeschger* d'après les noms de leurs découvreurs, ont donné lieu à une quarantaine de pulsations climatiques très rapides [5]. À ces phases sont associées des variations de la température des eaux de surface de l'Atlantique Nord [6] et des changements du climat sur le continent européen **(Figure 2)** [7]. Ces pulsations ont duré quelques millénaires et le passage d'un épisode froid (stade) à un épisode tempéré (interstade) semble avoir été très rapide, de l'ordre de quelques décennies, parfois moins ! Certains de ces épisodes froids ont été accompagnés d'une arrivée massive d'icebergs dans le golfe de Gascogne, en provenance de la calotte de glace qui recouvrait le Canada. Ces débâcles d'icebergs, *les événements d'Heinrich*, ont été brutales : chacune aurait duré de l'ordre du siècle [8], voire quelques millénaires.

L'étude des sédiments du golfe de Gascogne a permis de montrer que chaque événement d'Heinrich est synchrone du développement rapide (<100 ans), d'une steppe à graminées de « type Europe centrale » au détriment de la forêt de pins [9]. On estime qu'au cours de ces événements la température moyenne du mois le plus froid était dans cette région de ~10 à ~15 °C plus basse que l'actuelle et que les précipitations annuelles ont diminué de 50 %. La température de l'eau de surface de la mer était également très basse : ~10 °C de moins qu'actuellement. Les épisodes tempérés et humides intercalés entre les phases froides ont vu, au contraire, le développement de la pinède et en moindre mesure du bouleau et du chêne caducifolié. La végétation en Aquitaine a répondu rapidement aux changements climatiques du Groënland et de l'Atlantique Nord. Par conséquent, les ressources végétales et animales associées ont été bouleversées de façon répétée, ainsi que certainement les stratégies de subsistance de nos ancêtres paléolithiques et leur démographie.

Ces variations rapides du climat sont également reconstituées par le traceur indépendant qu'est la composition isotopique des concrétions des grottes que sont les stalagmites. En effet, les proportions d'atomes lourds et légers du carbone et de l'oxygène de la calcite qui les constituent sont liées à la température, à l'humidité et à la densité de la végétation au-dessus de la grotte. Ces variations peuvent être replacées sur une échelle chronologique précise grâce aux datations U-Th[4]. Le site de la grotte de Villars (Dordogne) est un des rares sites d'Aquitaine à avoir fourni des courbes paléo-climatiques détaillées pour les derniers ~90 000 ans [10][11][12]. Les stalactites et le pollen permettent d'identifier deux réchauffements très intenses dans cette région vers ~55 000 ans B.P. (GI 14) et ~45 000 ans B.P. (GI 12) et deux périodes de refroidissement et de sécheresse, marquées par l'absence de dépôt de calcite et datées entre ~61 000 et ~67 000 ans B.P. et entre ~30 000 et ~16 000 ans B.P.

4. U-Th : âges dérivés de la mesure des proportions relatives des isotopes de l'uranium et du thorium.

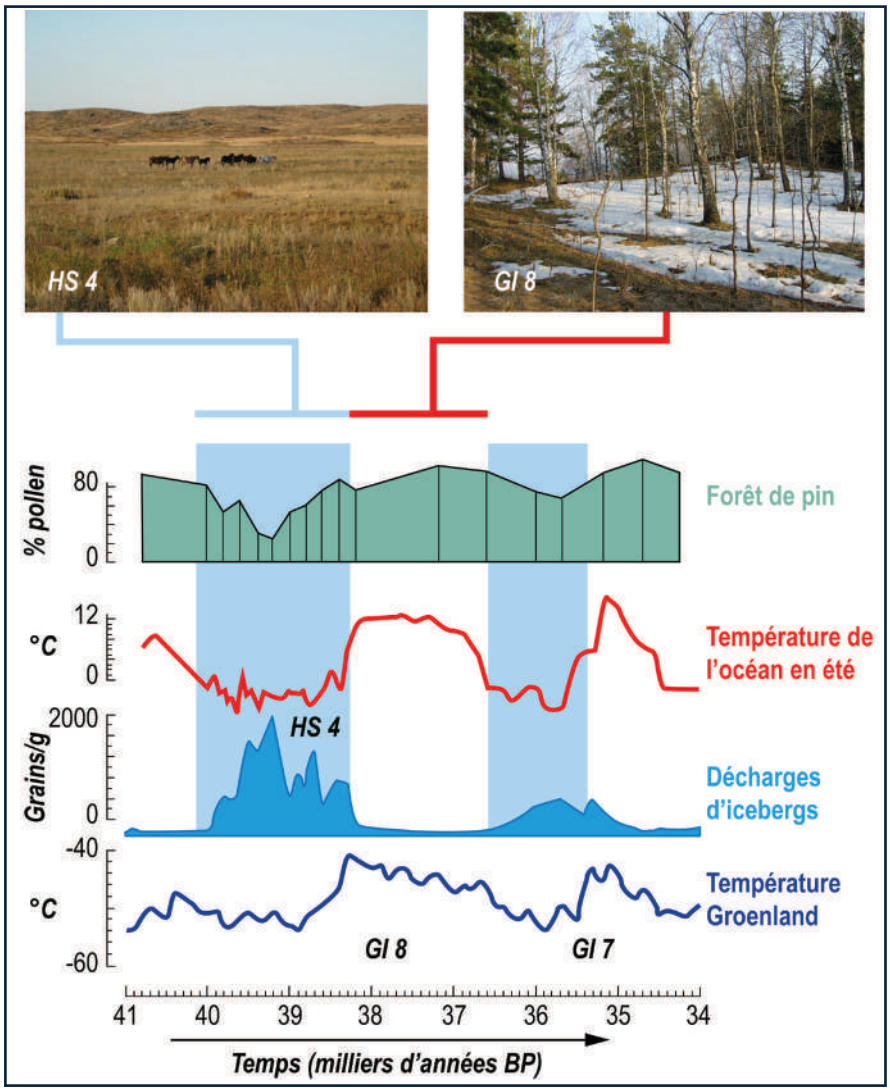


Figure 2 : *Dans une carotte sédimentaire prélevée dans le golfe de Gascogne, on observe qu'en Aquitaine, durant l'intervalle ~41 000-34 000 ans B.P., deux phases climatiques froides (photo de gauche et bandes bleues) ont alterné avec trois phases tempérées (photo de droite et bandes blanches). Les phases froides marquées par la réduction de la forêt de pins et de bouleaux coïncident avec l'arrivée dans le golfe de Gascogne d'icebergs provenant du Canada [9].*

L'extremum glaciaire (entre ~25 000 et ~ 15 000 ans B.P.)

Au moment du dernier maximum glaciaire, la calotte polaire arctique recouvrait le nord de l'Europe, les glaciers des Alpes descendaient jusqu'à Lyon et ceux des Pyrénées jusqu'à Arudy (Pyrénées-Atlantiques). Le niveau de la mer était à environ 120 m en dessous du niveau actuel et le rivage était repoussé à ~50 km au large. Dans le sud de l'Aquitaine, la déglaciation de la haute montagne pyrénéenne a dû s'achever il y a environ 15 000 ans [13][14].

Durant le dernier épisode glaciaire **(Figure 3)**, les Landes étaient une vaste étendue sableuse parsemée de champs de petites dunes en croissants de hauteur métrique. Au-delà de la Garonne vers l'est et de l'Adour vers le sud, les particules plus fines (lœss) entraînées à haute altitude par les tempêtes **(Figure 4)** se sont déposées pour former des accumulations sur les reliefs où une végétation steppique s'est alors développée.

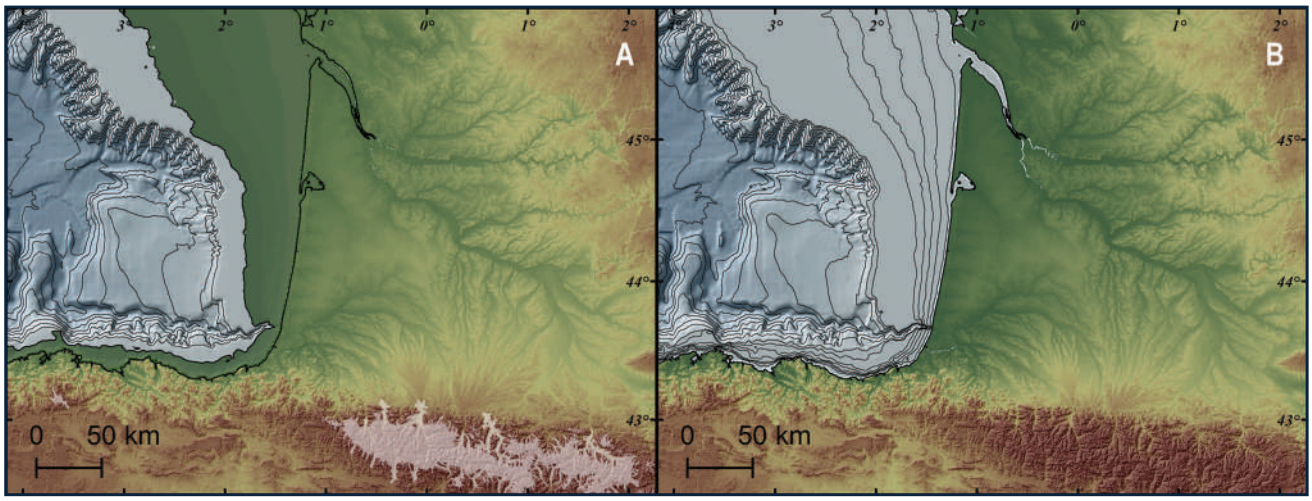


Figure 3 : *A- L'Aquitaine au dernier maximum glaciaire ; outre la présence d'une calotte de glace sur les Pyrénées, on note que le rivage aquitain était situé 50 à 100 km plus au large, du fait de la baisse du niveau marin (~120 m) ; nos ancêtres chasseurs-cueilleurs y côtoyaient cerfs et bisons. B- L'Aquitaine actuelle.*



Figure 4 : *Tempête de sable actuelle en Syrie (photo E. Nicoud), semblable à celles qui affectaient l'Aquitaine pendant le dernier maximum glaciaire.*

La datation par la méthode OSL[5] [15] des épandages sableux indique que le désert a été principalement actif entre environ ~15 000 et ~25 000 ans B.P., c'est-à-dire *grosso modo* pendant le dernier maximum glaciaire **(Figure 5)** [16]. La documentation archéologique montre qu'à cette époque, les Landes étaient à peu près complètement désertées par les chasseurs-cueilleurs paléolithiques.

Quel était le climat au temps de la grotte de Lascaux ? Malgré la difficulté d'attribuer une chronologie à l'occupation humaine de la grotte de Lascaux, la datation ^{14}C de la couche archéologique a livré un âge de ~17 000 ans B.P. Cette datation suggère que les artistes de Lascaux ont réalisé au moins une partie des peintures préservées dans ce sanctuaire paléolithique lors du dernier maximum glaciaire [17]. L'étude de la répartition des pollens révèle une forte réduction de la végétation en Europe **(Figure 6)**.

5. OSL : Luminescence Stimulée Optiquement.

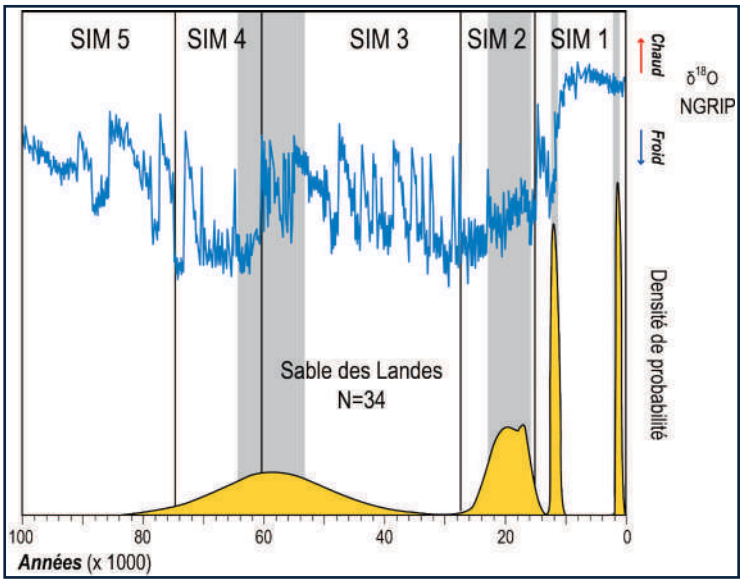


Figure 5 : *Datations du Sable des Landes (leur enveloppe est soulignée en jaune). Ces dates regroupent : 1) des dates obtenues par la technique du radiocarbone ($^{14}C^{8}$) appliquée à des charbons de bois, qui donnent l'âge des périodes pendant lesquelles une végétation ligneuse se développait dans les Landes. 2) des dates obtenues sur les grains de sable (technique OSL), qui donnent l'âge de la mise en place des édifices dunaires ou du remplissage des fentes de gel. Les périodes tempérées sont indiquées en gris, les périodes froides en blanc ([16], modifié). Pour comparaison, la courbe climatique livrée par la carotte de glace NorthGRIP (Groënland) est reportée en bleu*

Cette période, caractérisée par une extension maximale des calottes polaires scandinaves et américaines n'est pas bien connue du point de vue climatique en Aquitaine à cause de la rareté des enregistrements paléoclimatiques. Ces enregistrements proviennent surtout des Pyrénées occidentales et montrent la dominance de formations steppiques [18]. Les modèles climatiques simulent des températures et précipitations bien inférieures aux actuelles. Les températures moyennes des mois les plus froids étaient de ~10 °C inférieures aux températures hivernales actuelles [19]. Les précipitations qui oscillaient autour de ~75 mm en été, ont permis néanmoins la présence de quelques zones refuge pour des arbres caducifoliés tolérants au froid [20].

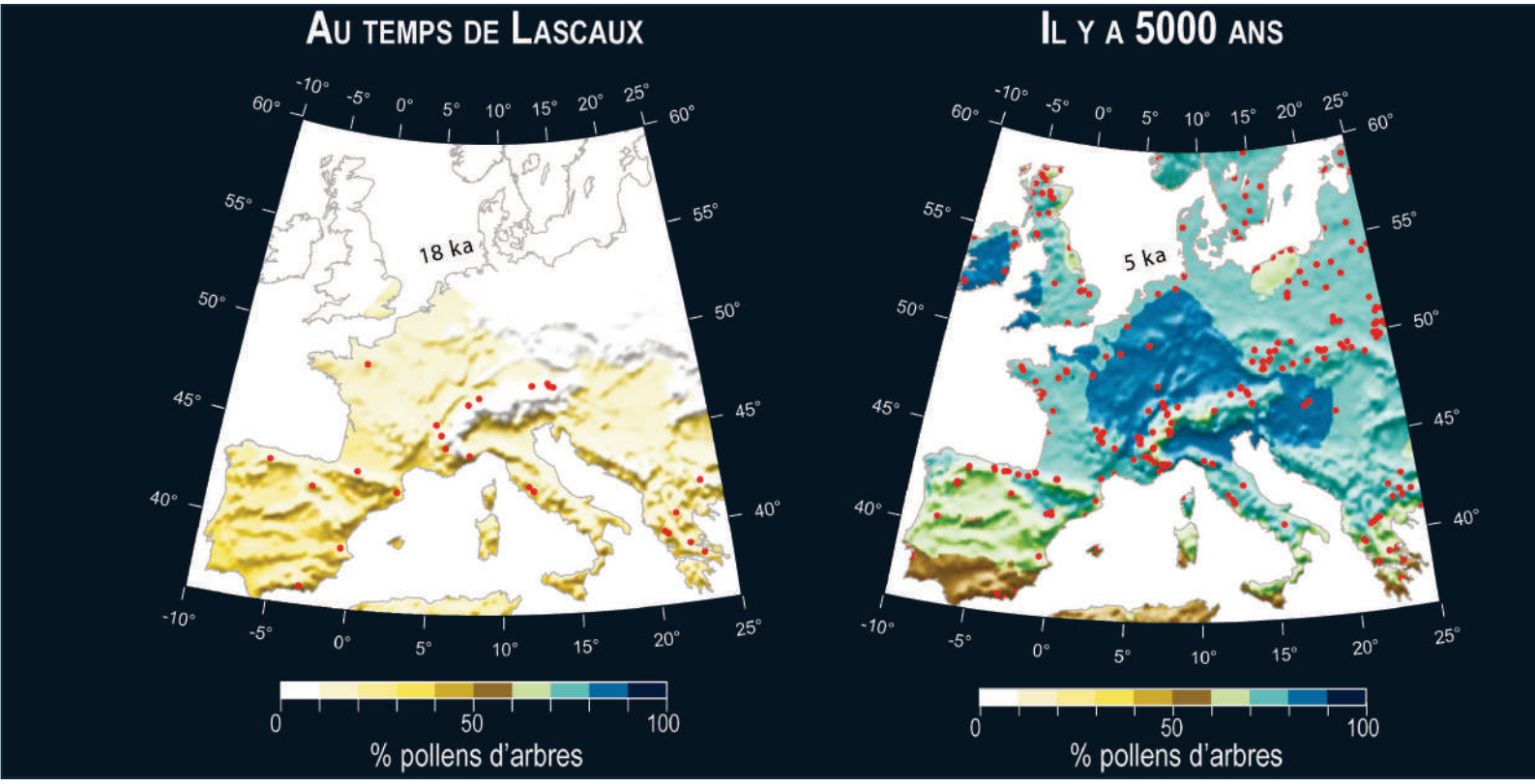


Figure 6 : *Comparativement à la période actuelle Holocène, on observe que la végétation au temps de Lascaux était extrêmement réduite, ainsi qu'en témoigne la faible abondance des pollens.*

III- Entre ~15 000 et ~11 000 ans B.P., l'Aquitaine sort lentement du climat glaciaire

La fin de la dernière glaciation est marquée par une série d'oscillations climatiques brutales, alternativement tempérées et froides, liées aux perturbations de la circulation océanique provoquée par la vidange de gigantesques lacs glaciaires accompagnant le retrait de la calotte nord-américaine. Cette période, dite Tardiglaciaire, reste relativement mal connue en Aquitaine. Deux enregistrements paléoclimatiques obtenus dans des tourbières, l'un en Dordogne [21], l'autre dans les Pyrénées occidentales [22], montrent que le premier millénaire de cette période voit le développement des prairies et de quelques arbres pionniers (pins, genévriers, bouleaux). Les températures reconstituées à partir des faunes de coléoptères indiquent que les températures hivernales restent basses et comprises entre -5 et -10 °C pour le mois le plus froid, tandis que les températures estivales augmentent de manière significative par rapport au maximum glaciaire et atteignent ~15 à ~20°C en Dordogne. Le millénaire suivant marque la première véritable recolonisation du paysage par la forêt, encore largement dominée par le pin. Cette recolonisation est momentanément interrompue vers 12 500 ans B.P. par un épisode froid qui dure environ un millénaire, – le Dryas récent –, marqué par une chute des températures estivales de ~5 à ~7°C [22]. Dans les Landes, des dunes « en croissant » se développent alors autour des rivières (Leyre, Ciron).

Par comparaison avec la situation qui prévalut pendant le maximum glaciaire, les archives archéologiques montrent que les Landes sont recolonisées vers 14 000 ans B.P. par les chasseurs-cueilleurs de la fin du Paléolithique, la zone sableuse ne semblant plus exercer de contrainte sur le peuplement **(Figure 7)**. Cette période voit en effet le développement de la forêt sur l'ensemble de la région, qui selon les analyses de charbons de bois retrouvés dans les sols [16] et de pollens tombés dans les tourbières [23] est dominée par les pins sylvestres.

IV- L'Aquitaine durant la période « chaude » actuelle (Holocène)

A- L'Aquitaine à l'Holocène inférieur (de ~11 000 à ~5000 ans B.P.)

Les informations climatiques sur cette période sont obtenues à partir d'enregistrements variés : séries sédimentaires marines, de marais littoraux, de stalactites des grottes de Dordogne, ou de séries polliniques conservées dans les tourbières des piedmonts pyrénéens.

L'étude de l'évolution des pollens contenus dans les dépôts sédimentaires lacustres et les tourbières du sud aquitain, permet de reconstituer l'évolution des peuplements végétaux au cours de l'Holocène ; ainsi, l'installation du chêne dans les Pyrénées aurait débuté vers 10 000 à 12 000 ans B.P. [24], avant celle du hêtre qui remonterait à seulement ~4 à 5000 ans B.P. À partir de ~9000 ans B.P., un réchauffement atmosphérique progressif avec une augmentation de l'humidité s'est produit en domaine côtier comme en domaine continental de plaine [25], ainsi que dans les Pyrénées, comme en témoignent une augmentation des chênes et des noisetiers [26] et une intensification de la fréquence des incendies naturels [27]. L'étude de dépôts carbonatés de la grotte de Lascaux révèle qu'un climat particulièrement humide s'est mis en place durant cette période [28], confirmant une tendance observée en Europe [29] et surtout autour de la Méditerranée [30].

Durant cet optimum climatique holocène, la température aurait été plus élevée de ~2 °C que durant notre ère en Europe du nord et en zone montagneuse ; il semblerait qu'un radoucissement moins marqué a concerné la plaine Aquitaine [31]. Hormis sur la bande côtière, les sables landais sont alors à peu près totalement fixés par la végétation pendant l'Holocène. C'est à cette époque que le niveau de la mer atteint une altitude proche de l'actuelle. Dans certaines régions du globe le niveau de l'océan a pu atteindre un niveau plus élevé de ~1 à 2 m [32]. Toutefois, en Aquitaine il ne semble pas que,

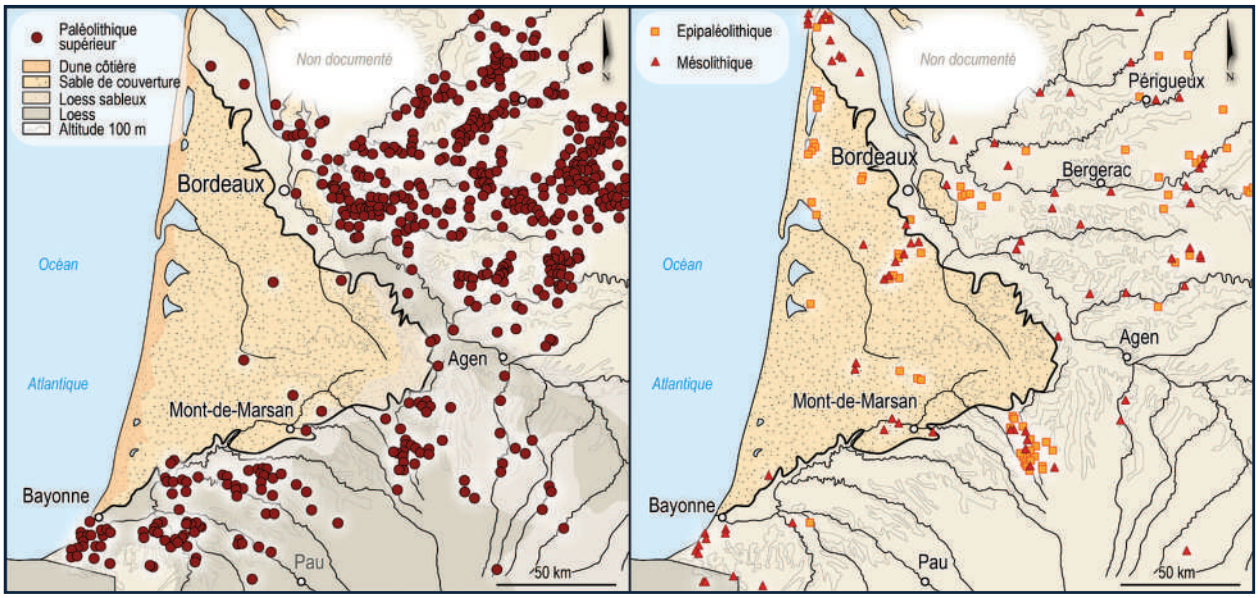


Figure 7 : *a. Distribution des sites du Paléolithique supérieur (~35000 - 13 000 ans B.P.) en Aquitaine ; b. Distribution des sites de l'Épipaléolithique et du Mésolithique (~13000 – 8 000 ans B.P.) en Aquitaine, d'après la base de données Patriarche élaborée par le Service Régional de l'Archéologie : les populations humaines recolonisent les Landes qui reverdissent.*

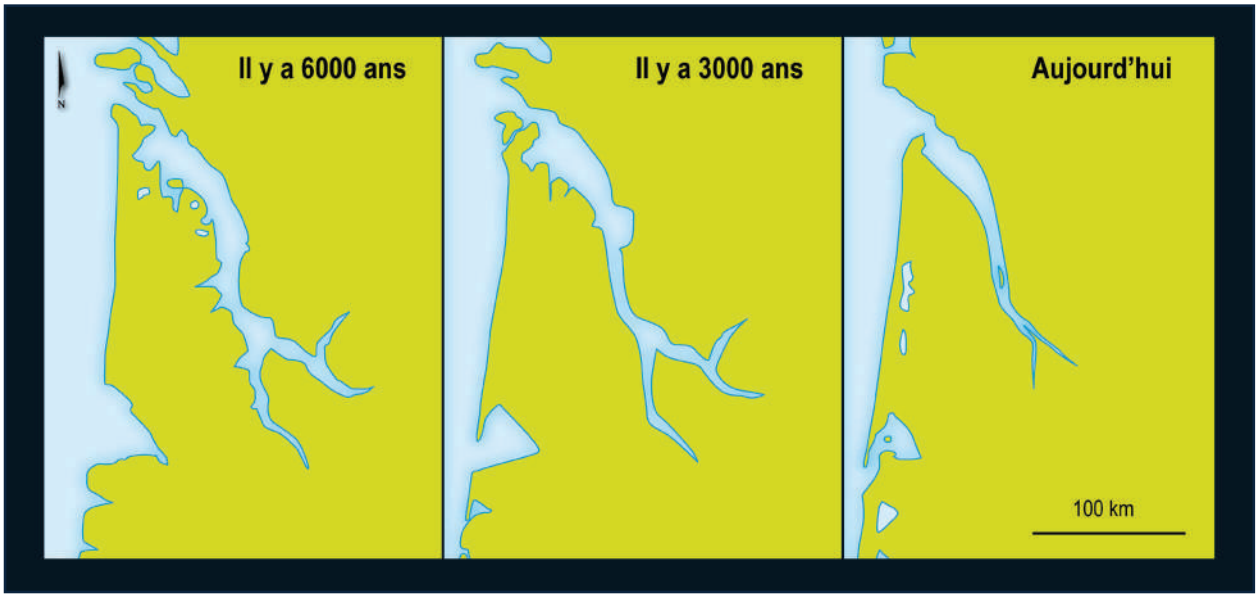


Figure 8 : *Évolution probable de l'estuaire de la Gironde au cours des derniers millénaires. Il y a ~6000 ans, les eaux envahissaient davantage les vallées anciennes ; par la suite, l'envasement progressif de ces vallées a entraîné leur comblement et leur colonisation progressive par des activités agricoles.*

malgré la déglaciation, le niveau marin ait dépassé le niveau actuel. Les vallées latérales à l'estuaire de la Gironde et les dépressions côtières étaient alors ennoyées, donnant à l'estuaire un aspect d'embouchure très découpée de type ria. C'est à partir de cette période que les baies latérales ont commencé à être colmatées par les apports sédimentaires fluviatiles, créant sur leurs rives les palus et les mattes. Ces baies autrefois ennoyées se continentalisent alors et la forme de l'estuaire évolue, prenant progressivement sa configuration actuelle en entonnoir **(Figure 8)**.

B- Le climat de l'Aquitaine durant les derniers millénaires[6]

Que nous apprennent les sédiments continentaux (marais, tourbières) ?

L'analyse des carottes sédimentaires des marais de l'Aquitaine nord montre que vers ~3000 ans av. J.-C. [33] **(Figure 9)**, les baies latérales de l'estuaire étaient plus ou moins comblées et les sédiments apportés en suspension par la Garonne et la Dordogne étaient expulsés en mer, notamment à la faveur des forts coefficients de marée. Ces apports, composés de particules fines argileuses, sédimentaient sur le plateau continental dans ce qu'il est convenu d'appeler les vasières « ouest- et sud-Gironde ». Une quantité non négligeable de particules en suspension restait cependant à l'intérieur de l'estuaire, sédimentant le long des rives et l'encombrant de nombreuses îles. Il faut noter que depuis plusieurs millénaires, l'estuaire n'expulse plus de sable vers l'océan, dont les plages non « réalimentées » subissent désormais une intense érosion (cf. chapitre 6.1).

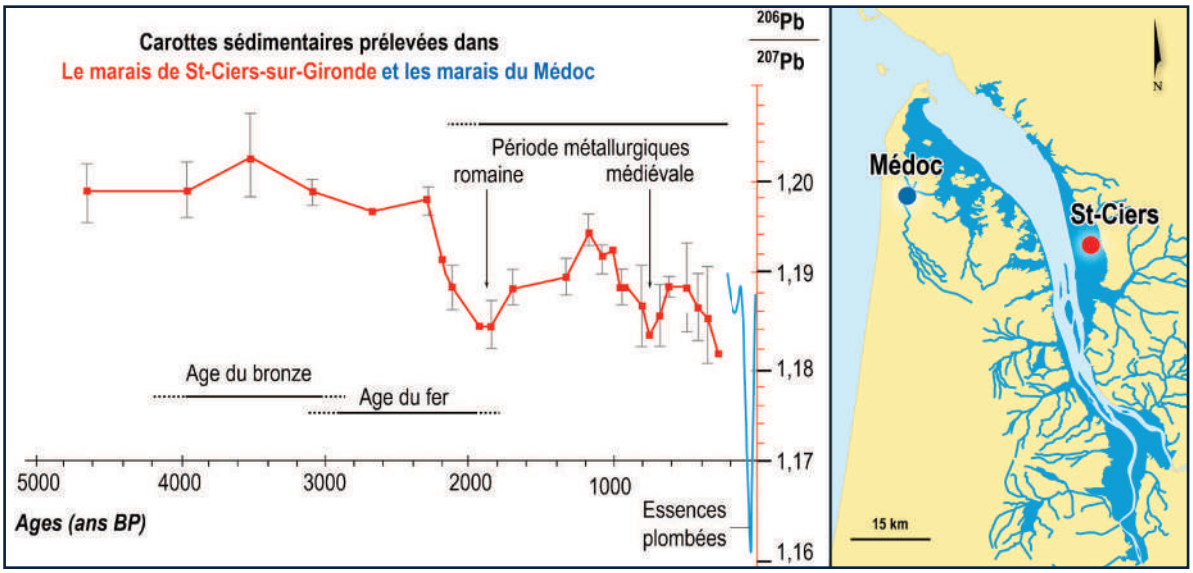


Figure 9 : *L'étude de la composition isotopique du plomb contenu dans les sédiments des marais estuariens (Saint-Ciers et La Perge) a permis de dater ces accumulations sur les cinq derniers millénaires et de replacer alors dans un contexte temporel régional, l'histoire climatique qu'elles recèlent.*

Que nous apprennent les dunes et les paléosols ?

Les études récentes sur le cordon des dunes côtières, qui séparent les lacs de l'Océan [34][35][36], ont permis de dater les périodes de leur mobilité et donc de reconstituer les différents climats qui ont jalonné l'Aquitaine au cours des 2 000 dernières années.

- À Grayan-et-l'Hôpital, le site archéologique de la Lède du Gurp a permis de reconstituer la transformation d'un milieu lagunaire en marécage vers ~8000/6000 ans av. J.-C. (Mésolithique) et l'évolution de celui-ci jusqu'à l'époque romaine (I^{er}-III^{e} siècles) [25]. Trois grandes phases d'ensablement ont été identifiées, la première datée vers ~3500 ans av. J.-C. (le Néolithique moyen), la seconde vers ~2200/1800 ans av. J.-C. (le Chalcolithique), la dernière vers ~800 ans av. J.-C., entre la fin de l'âge du Bronze et le début de l'âge du Fer.

- Sur la face au vent de la dune du Pilat, alternent des niveaux de sables mis en place par le vent, et des sols fossiles – paléosols – témoins d'un développement de la végétation. Le sable mobilisé, les dunes se mettent alors en place au cours de périodes ventées et froides. Au contraire, les paléosols, reflètent

6. À partir de ce paragraphe, par convention on exprimera les dates par rapport à l'an zéro (antérieures à l'an zéro : « av. J.-C. », ou postérieure à l'an zéro : « ap. J.-C. »).

des conditions climatiques humides et des températures relativement douces [38]. La chronologie des périodes de végétalisation et des périodes de retour du sable a pu être reconstituée avec précision **(Figure 10)**.

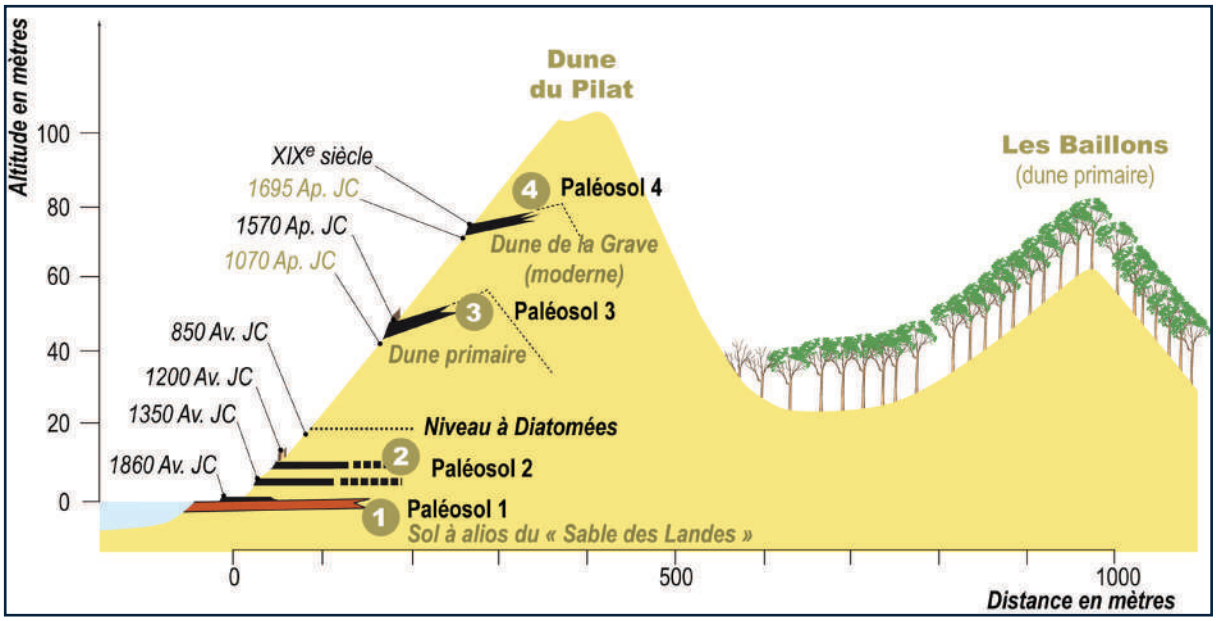


Figure 10 : *Coupe synthétique de la dune du Pilat. La face au vent de la dune exposée à l'océan révèle des discontinuités (en noir) qui sont des sols anciens. Ceux-ci témoignent de périodes de développement de la végétation (prairies ou forêts) ; ils alternent avec des phases d'accumulation du sable. 1. vers 1860 ans av. J.-C., le Paléosol 1 est recouvert de sable pour la première fois ; 2. pendant la fin des temps préhistoriques, plusieurs niveaux sableux alternent avec des périodes de développement de la végétation (Paléosol 2) ; 3. durant la période historique, trois générations de dunes vont se superposer. Une dune primaire s'installe pendant la Période Sombre Médiévale (entre 500 et 1000 ans ap. J.-C.) ; elle se termine par le Paléosol 3, qui se développe entre 1000 et 1500 ans ap. JC ; 4. durant le Petit Âge Glaciaire, une dune moderne, la « dune de La Grave », se met en place (à partir de 1500 ans ap. J.-C.). Des semis de pins opérés à partir de l'année 1801, date du décret du Premier Consul Bonaparte ordonnant leur fixation [37], fixent alors la dune (Paléosol 4) ; 5. enfin, la dune du Pilat actuelle dérive de la dune de la Grave, qui s'est remise en mouvement vers la deuxième moitié du XIXe siècle. Ces résultats témoignent de la forte concordance entre les données des datations des dunes et des paléosols et les données archéologiques et historiques concernant le climat au cours des 4000 dernières années. Les âges indiqués en noir sont une moyenne d'âges ^{14}C obtenus sur les paléosols et les âges indiqués en rouge ont été obtenus par LIRS[1] sur des grains de sable (J.-P. Tastet).*

1. IRSL : Luminescence Stimulée par Infra-Rouge.

Enfin, dans les Landes, quelques dunes isolées ont pu être remobilisées au Petit Âge Glaciaire, mais pour partie en raison de l'impact anthropique sur la végétation.

Que nous apprennent les données archéologiques, du Néolithique au Moyen Âge (entre ~5000 ans av. J.-C. et ~500 ans ap. J.-C.) ?

L'archéologie peut apporter sa contribution à la connaissance des épisodes climatiques car les sociétés agro-pastorales qu'elle étudie présentent généralement une forte réactivité aux changements climatiques, en particulier dans des milieux « extrêmes » telles que les zones de montagne. Les cartes de répartition des sites reflètent l'évolution du peuplement, faisant apparaître selon les époques des vides ou au contraire des zones de densité qui peuvent être mises en relation – entre autres – avec le milieu environnant. D'autre part, même si l'action de l'homme, à partir du Néolithique, tend à occulter graduellement les effets des changements climatiques sur le paysage, des recherches interdisciplinaires associant archéologues et environnementalistes (ex. géomorphologues, sédimentologues, palynologues etc.) peuvent révéler des phénomènes tels que les modifications de la végétation, les effets de crue, l'élévation ou la baisse du niveau fluvial ou marin. Quelques-unes de ces recherches ont été menées ou sont en cours, dans la partie nord de l'Aquitaine, les Landes et les Pyrénées. À ce stade, il est cependant difficile de tirer des conclusions générales en termes d'évolution climatique.

Les lacs littoraux

Les recherches menées dans le lac de Sanguinet ont permis de dater différentes étapes de la remontée du plan d'eau depuis une période comprise entre ~2500 et ~1000 av. J.-C., où celui-ci se situait à +5 m NGF[7] jusqu'à aujourd'hui où il culmine à +21 m. Cet exhaussement, dû à la mise en place de la barrière des dunes côtières qui a encombré, puis fermé, l'embouchure de La Gourgue, petite rivière qui aujourd'hui se jette dans le lac [39]. Les plus anciens témoins archéologiques tels que des pirogues et des habitats ont été découverts sous l'eau, à 15 m de profondeur. Des habitats de l'Âge du Fer, les cabanes du Put-Blanc (VIII^{e}-IV^{e} s. av. J.-C.), se trouvent à ~13 m de profondeur tandis que le village fortifié de l'Estey du Large (IV^{e}-I^{er} s. av. J.-C.) est à ~8 m de profondeur. Enfin, à ~5 m de profondeur, se trouve la petite agglomération romaine de Losa (I^{er}-III^{e} s. apr. JC). Le lac de Biscarosse-Parentis, moins bien étudié, semble avoir connu une évolution analogue **(Figure 11)**.

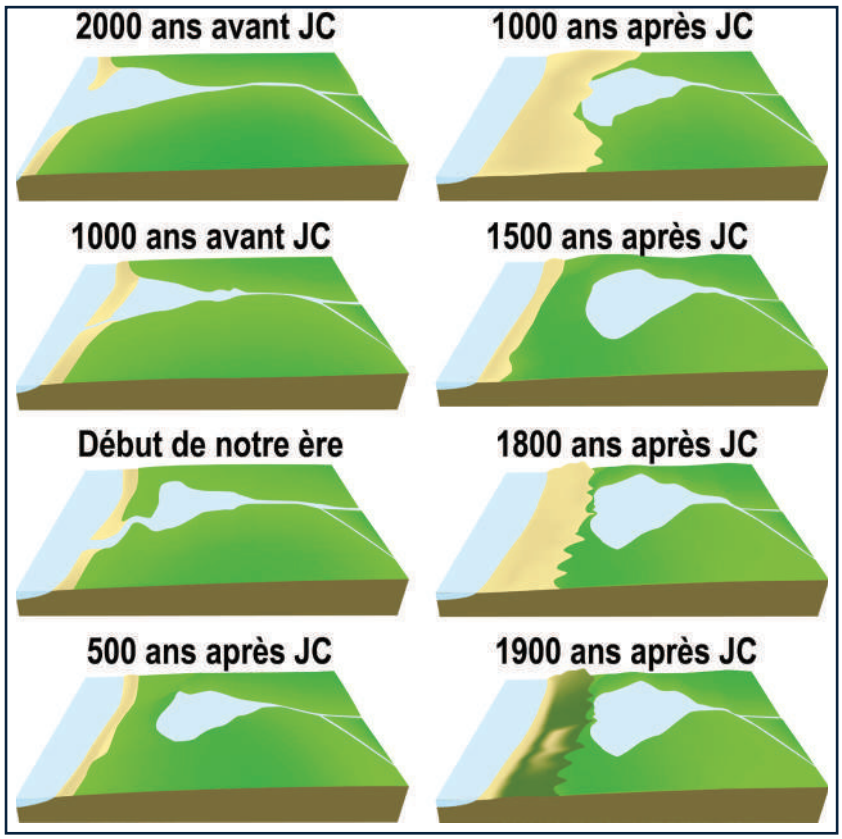


Figure 11 : *Évolution du lac de Sanguinet. Vers 2000 ans av. J.-C. une lagune dont la « pointe » orientale se situait au plus profond du lac actuel, était largement ouverte sur l'océan. Ce n'est qu'après le début de la période historique que cette lagune s'est fermée pour donner naissance à un lac. Le niveau de ce lac s'est progressivement élevé, en particulier par suite de la mise en place des dunes côtières. Une première génération de dunes, dites primaires, a été mobile durant la période sombre médiévale (entre ~500 et ~1000 ap. J.-C.), avant de se couvrir naturellement d'une forêt, qui deviendra la « forêt usagère » durant l'optimum climatique médiéval (entre 1000 et 1500 ap. J.-C.). Une deuxième génération de dunes, dites modernes, envahie les dunes primaires durant le « petit âge glaciaire » (à partir de 1500 ap. J.-C.). Ces dernières ont été fixées par semis de pins à partir du début du XIX^{e} siècle, donnant ainsi naissance à la « forêt domaniale » (J-P. Tastet, UB1).*

L'estuaire et la basse vallée de la Garonne

Dans le Médoc, la carte des sites archéologiques de l'Âge du Fer et de l'époque romaine (VIII^{e} siècle av. J.-C. - VI^{e} siècle ap. J.-C.) montre une répartition privilégiée sur des points plus ou moins élevés mais toujours en dehors des anciens marais estuariens. Si les recherches géo-archéologiques sont moins développées que sur la rive droite, il semble cependant que le comblement de ceux-ci était achevé avant l'époque romaine (I^{er} siècle), voire même dès l'Âge du Bronze entre ~2200 et ~800 ans av. J.-C. [40]. Ces terres inoccupées étaient peut-être encore saisonnièrement ennoyées **(Figure 12)**.

En rive droite, le marais du Blayais, comblé de tourbes, attire de nombreuses implantations dès le Néolithique, entre ~3500 et ~2000 ans av. J.-C. [41]. Entre le Bronze final et le second Âge du Fer, de ~2000 à ~500 ans av. J.-C., le marais est envahi par l'eau. À la fin de l'Âge du Fer (II^{e}-I^{er} siècle av. J.-C.), de nombreux établissements spécialisés dans la production du sel s'installent. C'est le début d'un processus de colmatage qui se poursuit jusqu'à assèchement complet au XVII^{e} s.

7. NGF = Nivellement Général de la France.

Les travaux sur la Garonne sont encore très peu nombreux et les informations, partielles, délicates à interpréter. À Bordeaux, si l'archéologie a mis en évidence l'élévation de la plate-forme portuaire de près de ~1,10 m entre le XII^{e} et le XIV^{e} siècle, on ne sait si cela résulte d'une hausse du niveau relatif des plus hautes mers de vives eaux, comme le propose une étude récente [42], ou plutôt d'un envasement de la Garonne qui aurait provoqué localement la remontée de son niveau moyen. De même, le village de l'Isle-Saint-Georges situé à ~15 km au sud de Bordeaux, très exposé aux crues du fleuve, a connu depuis son installation, au début du I^{er} millénaire av. J.-C., des phases d'expansion et de repli. À ce jour, on ne peut pas encore distinguer quelle est la part, dans ce processus, des épisodes de dégradation ou d'amélioration climatique telles que des fluctuations des zones humides en fonction de crues plus ou moins fréquentes, ou de marées plus ou moins fortes, de celle des phénomènes purement socio-économiques **(Figure 13)**.

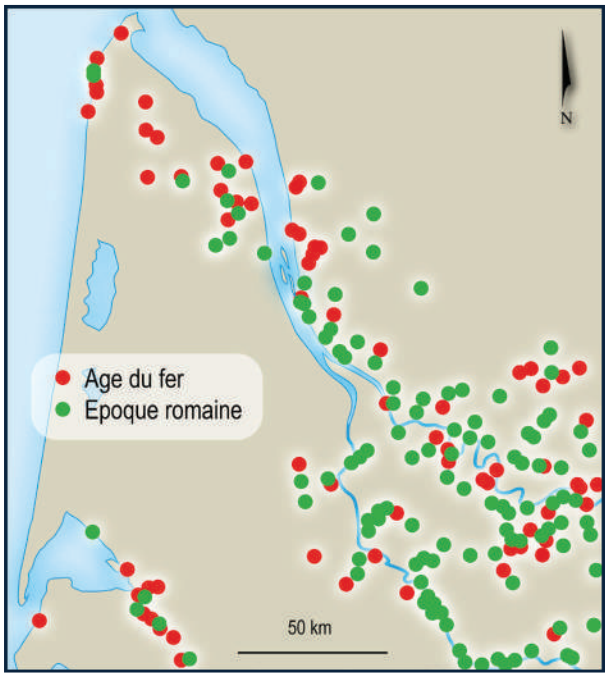


Figure 12 : *Cartographie des sites archéologiques de l'Âge du Fer (cercles rouges) et de l'époque romaine (cercles verts) dans le Médoc et aux abords de l'estuaire de la Gironde et de l'Entre-deux Mers : le fond coloré est la carte géologique régionale.*

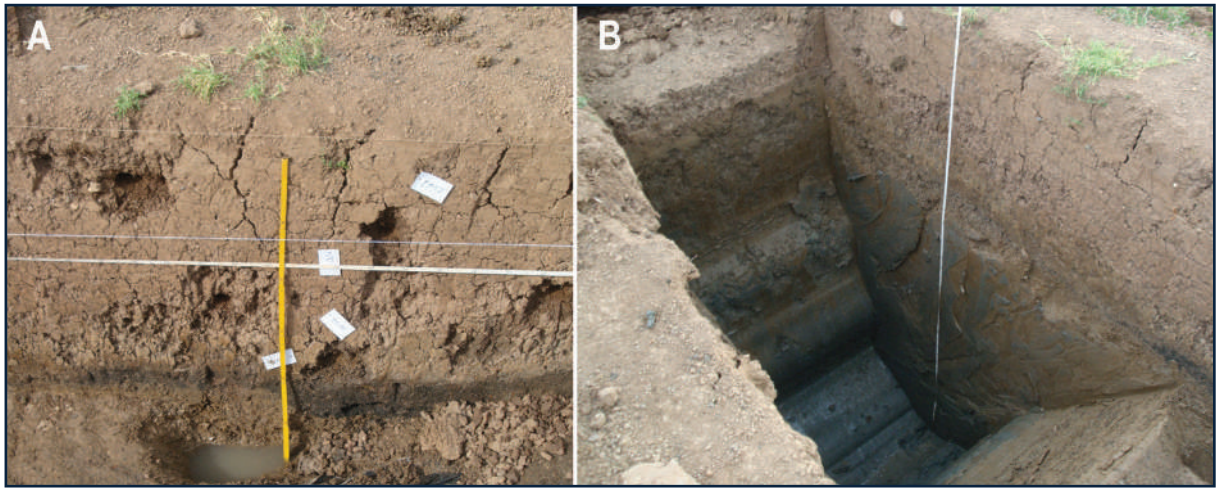


Figure 13 : *Sondage géomorphologique réalisé en 2010 à Isle-Saint-Georges (33). A. Des échantillons de sédiments sont prélevés dans les couches archéologiques au sommet du sondage. B. Cette opération a permis de mettre en évidence un ancien chenal de la Garonne (vraisemblablement actif au milieu du premier millénaire av. J.-C.) et complètement colmaté avant le début de notre ère (Clichés de S. Lescure).*

Que nous apprend l'histoire sur le climat des 2 000 dernières années[8] ?

L'introduction du climat comme objet d'histoire amorcée par l'ouvrage d'Emmanuel Le Roy Ladurie [43], de même que le développement récent de l'histoire environnementale ont accompagné les avancées des sciences de la nature. L'historien privilégie les rapports entre paramètres climatiques et processus économiques et sociaux mais, pour mettre en évidence ces relations causales et fonctionnelles, il ne dispose, pour les périodes antérieures au XIX^{e} siècle, que de données lacunaires et dispersées, qu'elles soient des indices matériels tels que des données dendrochronologiques, palynologiques, avancée ou recul des glaciers ou bien anthropogènes, telles que des données textuelles phénologiques (récoltes,

8. À partir de ce paragraphe, les dates sont toutes exprimées « ap. J.-C. ».

prix, crises de subsistance, épidémies, observations des chroniqueurs). Les sources textuelles colportent, le plus souvent, les événements météorologiques extraordinaires au détriment des données régulières et précises.

A l'échelle globale, il existe un consensus large pour distinguer plusieurs phases climatiques majeures durant la période historique.

- Après une période gallo-romaine chaude, succède, du IV^{e} au VIII^{e} siècle une détérioration générale du climat, marquée par la fraîcheur et l'humidité. Grégoire de Tours, principal chroniqueur de la période mérovingienne, fait état de famines et d'épidémies consécutives aux mauvaises récoltes, que les découvertes anthropologiques ont confirmées. Un retournement de cette mauvaise conjoncture climatique s'amorce dès la seconde moitié du VII^{e} siècle.

- Du VIII^{e} siècle jusque vers l'an 1300, c'est l'« Optimum Climatique Médiéval », une période chaude scandée de phases plus courtes ; en l'Europe du Nord, ce sont des hivers rudes avant 1160, puis un climat hivernal moyennement froid jusqu'en 1350, des étés secs de 1200 à 1310 encadrés par des phases de pluviosités abondantes. Elle est marquée par un remarquable essor démographique et agricole, dont l'apogée se situe au XIII^{e} siècle, avant que n'intervienne une brusque dégradation climatique sensible dès les premières décennies du XIV^{e} siècle.

- Les crises de la fin du Moyen Âge sont un préambule au « Petit Âge Glaciaire » qui débute vers 1450 et perdure jusqu'à la première moitié du XIX^{e} siècle. Cette période climatique froide est concomitante d'une avancée des glaciers. Elle est marquée par une baisse des températures et des hivers rudes dont l'optimum se situe dans la seconde moitié du XVII^{e} siècle avec des famines et des épidémies.

Comment le climat Aquitain s'inscrit dans ce cadre général ?

Les avancées de l'histoire du climat n'ont pas véritablement été suivies d'effets en Aquitaine et n'ont pas jusqu'à présent généré de programme de recherche. Seuls des relevés ponctuels dans les archives textuelles ont été faits sans donner lieu à un recensement systématique ni à une analyse approfondie des données climatologiques. Celles-ci peuvent être mentionnées dans des sources de toute nature : actes fonciers, comptabilités, registres du Parlement, délibérations municipales, etc., mais aussi chroniques ou sources narratives **(Figure 14)**. Ces informations n'y apparaissent sous forme de mentions éparses, au moins jusqu'au XVIII^{e} siècle. Les premiers relevés pour l'Aquitaine ont été effectués et synthétisés dans la thèse de F. Mouthon [44]. Cet apport des textes doit être confronté aux données archéologiques et dendrochronologiques dans une perspective comparatiste. Reconstruire l'histoire du climat en Aquitaine nécessite la mise en œuvre de bases de données permettant le recensement de l'ensemble des mentions récoltées et toujours alimentées par de nouveaux apports. Ce récolement doit porter sur la longue durée et intégrer des faits dûment localisés et avérés ; cependant, la prise en compte de l'incertitude ainsi que les interprétations des chercheurs doivent pouvoir y figurer. Une telle base de données apparaît comme le seul outil apte à dégager des évolutions et des tendances sur la longue durée.

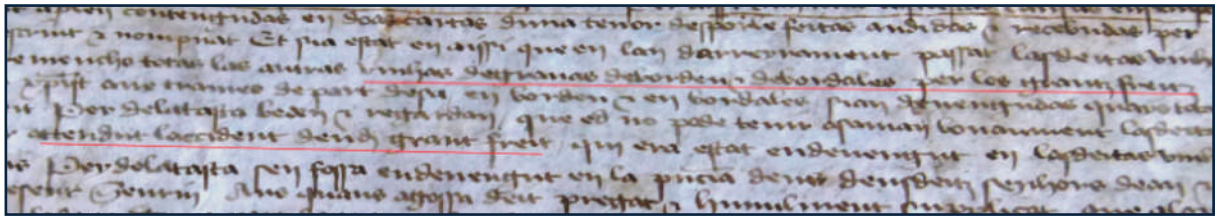


Figure 14 : *Acte de diminution de redevance, consentie par le chapitre Saint-Seurin de Bordeaux en faveur de Pey deu Tasta, vigneron de la paroisse Saint-Rémi de Bordeaux, en raison des grands froids de l'an passé (hiver 1445-1446) qui ont fait mourir les vignes des Graves de Bordeaux et du Bordelais (AD 33, G 1160, f° 58, 21 mars 1446 (ns), photographie : S. Lavaud).*

Il est toutefois un domaine où les informations sont relativement abondantes et variées, c'est celui des sources phénologiques, où l'on trouve pêle-mêle les bans de vendanges, les dates de moissons, les récoltes de fruits (olives, pommes, etc.)[9]. Souvent continues au plan chronologique et homogènes au niveau du contenu, elles autorisent la constitution de bases de données inscrites dans la durée, comprises *grosso modo* entre les années 1450 et 1900. Depuis la réalisation, des équipes d'historiens et les méthodes ont été constituées autour de projets nationaux[10] [45]. Concernant la culture de la vigne, les archives historiques traitant du climat aquitain des ~500 dernières années sont assez complètes (Garnier *et al.*, *non publié*) et il a été ainsi possible de reconstruire l'évolution des dates des bans de vendanges dans le Bordelais **(Figure 15)**.

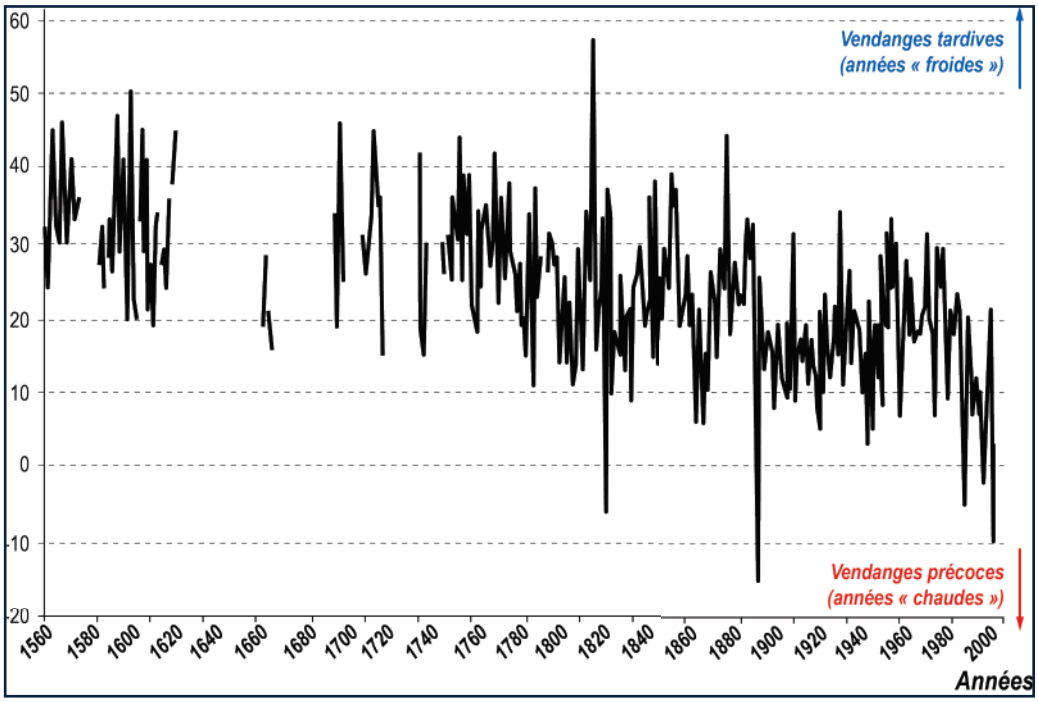


Figure 15 : *Évolution du nombre de jours compris entre la date du ban des vendanges en Bordelais et le 1er septembre, de 1560 à nos jours. Ces informations proviennent d'archives religieuses et privées telles que des journaux intimes ou des chroniques.*

Outre une chronologie longue de ~450 ans, ces sources textuelles donnent une idée relative des fluctuations climatiques ayant affecté la région. D'emblée, on observe une tendance inexorable à une précocité accrue des dates de vendanges entre ~1560 et ~2007. De cette étude préalable qui ne porte que sur les cinq derniers siècles, il ressort que les vendanges les plus avancées (avant le 1er septembre) s'observent uniquement après 1800, avec des épisodes très chauds et/ou secs en 1822 (24 août), 1893 (15 août), 1989 (25 août) et 2003 (20 août). Pour autant, il est difficile d'établir un lien systématique entre ces deux phénomènes comme en témoignent les sécheresses-canicules de 1948-1949 et de 1976 qui n'ont pas entraîné de vendanges exceptionnellement précoces.

In fine, depuis le XVIe siècle, aucune année n'a été aussi chaude en Aquitaine que l'année 2003. Néanmoins l'interprétation de ce type de données reste difficile : par exemple, les cépages ont-ils changé au cours du temps ? Elle nécessiterait de développer une modélisation régionale liant climat et dates de vendanges en Aquitaine, à l'instar du travail déjà réalisé en Bourgogne [47].

9. Cette démarche phénologique bénéficie d'une reconnaissance certaine de la part de la communauté scientifique ; toutefois certains lui reprochent de ne pas suffisamment prendre en compte certains paramètres anthropiques fondamentaux [46].
10. Projet de recherche Ophélie financé par l'ANR, dans le cadre du GIS CES Renasec.

Que nous apprennent les données dendrochronologiques ?

La dendrochronologie consiste à mesurer la largeur des anneaux de croissance – les cernes – successifs d'un arbre. Cette largeur est, entre autres, largement influencée par la température moyenne annuelle et la pluviosité. Ainsi, l'évolution de l'épaisseur des cernes permet de reconstituer l'évolution de la température et donc de retracer l'histoire climatique d'un lieu. Schématiquement, à un cerne étroit correspond une année froide et/ou humide, et à un cerne épais correspond une année chaude et/ou sèche. On dispose de très peu de longues séries de mesure en Aquitaine, contrairement à d'autres régions du monde [48]. La seule longue série connue a été obtenue avec des hêtres du Pays Basque (forêt d'Iraty), qui ont mémorisé l'évolution climatique régionale des cinq derniers siècles [49].

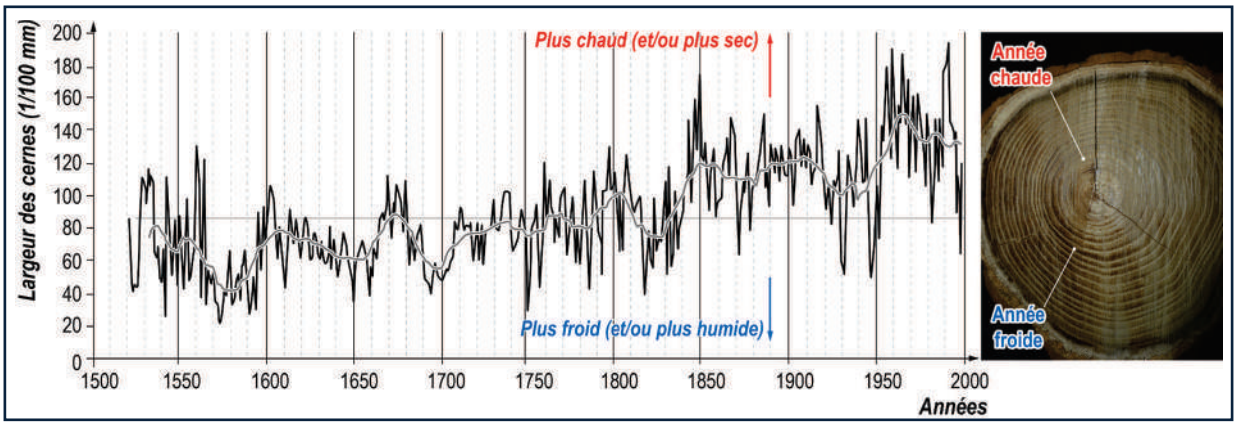


Figure 16 : *Évolution de la largeur des anneaux de croissances de hêtres de la forêt d'Iraty, de laquelle on peut déduire l'évolution de la température du Pays Basque depuis cinq siècles [49]. Les chênes des Pyrénées centrales révèlent une évolution similaire [50]. Cette courbe de températures rappelle très fortement celle des dates de vendanges (cf. Figure 15).*

Dans les sédiments des rias espagnoles [51], l'étude des pollens semble suggérer une augmentation de l'activité agricole (deux fois plus de pollens de céréales, de prairies, d'arbres cultivés) durant l'optimum climatique médiéval (de ~950 à ~1350). Ensuite, on observe clairement un climat plus froid de ~1500 à ~1820, le « Petit Age Glaciaire », suivi à partir de ~1850 par un réchauffement qui se poursuit jusqu'à l'heure actuelle : c'est l'Anthropocène **(Figure 17)**. D'autres informations concordantes sont fournies par l'étude de séries polliniques conservées dans les tourbières du Pays Basque [52]. Cette tendance est observée ailleurs en Europe de l'ouest.

« Événements climatiques extrêmes »

Tempêtes historiques

Comme partout ailleurs en France, l'historien peut compter sur les archives administratives pour lui offrir continuité chronologique (généralement depuis le XV^e^ siècle) et homogénéité de l'information. Les fonds urbains de Bordeaux et d'autres cités aquitaines contiennent des données de première main comme les délibérations municipales et les comptes des villes au sein desquelles le volet météorologique est omniprésent. *De facto*, tout événement extrême avait un impact sur les infrastructures (ponts, moulins, canaux) et le fragile équilibre socio-économique de la ville. Pour ce qui est des tempêtes, continentales ou maritimes, les archives produites par l'Amirauté de Guyenne et la Maîtrise des Eaux et Forêts de Bordeaux[11] livrent des informations inédites et extrêmement précises. Il apparaît que la tempête n'est en aucun cas un événement nouveau, loin s'en faut, puisque l'Aquitaine a connu au moins huit catastrophes éoliennes dont trois antérieures à 1850, autrement dit avant la fin du Petit Âge Glaciaire [53]. Pour la période plus récente, les tempêtes de 1893 et de 1915 furent particulièrement sévères au regard des données météorologiques de l'époque, en revanche, leur impact social fut nettement moins perceptible. Ainsi, entre la fin du XIX^e^ siècle et la tempête Klaus (1999), l'Aquitaine avait opéré une profonde mutation paysagère en passant d'une lande faiblement arborée à une forêt totalement artificialisée et peu résiliente. En conclusion, il importe, lorsque l'on étudie les fluctuations climatiques en histoire, de ne pas confondre le risque avec la vulnérabilité croissante de nos sociétés modernes.

Crues historiques

De très nombreuses crues des rivières Garonne/Dordogne/Adour sont signalées dans la littérature, dès les VI^e^ siècle (Grégoire de Tours) et VII^e^ siècle (Frégédaire). Elles sont toujours relatées comme des événements dévastateurs. Signalons les plus importantes : en 1435 la côte 12,5 m est atteinte à Agen, puis 1764, en 1770 la côte

11. Source : sous-série 6 B et série 8 B des archives départementales de Gironde.

12,57 m est atteinte à Bordeaux et 6,80 m à Dax, puis ce sont les crues de 1784, 1843, 1875, 1930 [54][55]. Ces crues interviennent en particulier durant l'époque du « Petit Âge Glaciaire », entre 1500 à 1850, car les Pyrénées et le Massif Central devaient se couvrir de glace en hiver et délivrer beaucoup d'eau lors de leur fonte. Au XX^{e} siècle, ces crues deviennent de plus en plus exceptionnelles, en partie du fait de la mise en œuvre de barrages régulateurs sur les zones amont des rivières. Récemment, lors de la tempête de 1999, la conjonction de forts débits, de forts coefficients de marée et de vent d'ouest tempétueux provoqua une crue exceptionnelle à Bordeaux (surcote de 2 m), mais généra peu de dégâts du fait des endiguements mis en place. Les quais de Bacalan furent envahis par ~90 cm d'eau. Certains points bas de la Communauté Urbaine de Bordeaux se situent un à plusieurs mètres en deçà de la cote des endiguements mis en place, tant rive droite à la Bastide, que rive gauche au nord des Quinconces [56][12]. Ils ne doivent leur salut qu'à la capacité de résistance de ces ouvrages, dont l'exhaussement devra être inévitablement envisagé dans les décennies à venir.

Vagues de chaleur

Durant l'optimum climatique médiéval, soit entre l'an ~900 et l'an ~1300, un réchauffement pouvant atteindre 0,5 °C est observé dans certaines régions de l'hémisphère nord, mais à aucun moment durant cette période, et ce malgré une activité solaire comparable, les températures moyennes n'ont atteint les niveaux atteints à partir des années ~1980 [48]. Au cours du XX^{e} siècle, seulement deux vagues de chaleur ont été signalées : 1928 et 1976, des vagues d'une intensité toutefois moindre que celle de la canicule de 2003.

V- Le climat aquitain durant l'Anthropocène (depuis ~1850)

L'Anthropocène, néologisme proposé par le journaliste Andrew Revkin en 1992, désigne « une époque climatique, qui aurait débuté à la fin du XIX^{e} siècle avec la révolution industrielle (on le fait débuter conventionnellement vers 1850), période à partir de laquelle l'influence de l'Homme sur le système climatique serait devenue prédominante ». Durant l'Anthropocène, les travaux du GIEC permettent d'évaluer l'élévation de la température globale à ~1 °C. À Bordeaux, l'élévation moyenne de la température est estimée par Météo-France à ~1,2 °C **(Figure 17)**, ce qui est conforme à la moyenne mondiale évaluée par le GIEC : ~1 °C. Une conséquence du réchauffement global est la dilatation de l'océan et l'accélération de la fonte des glaciers continentaux. La combinaison de ces deux phénomènes induit une élévation du niveau de la mer.

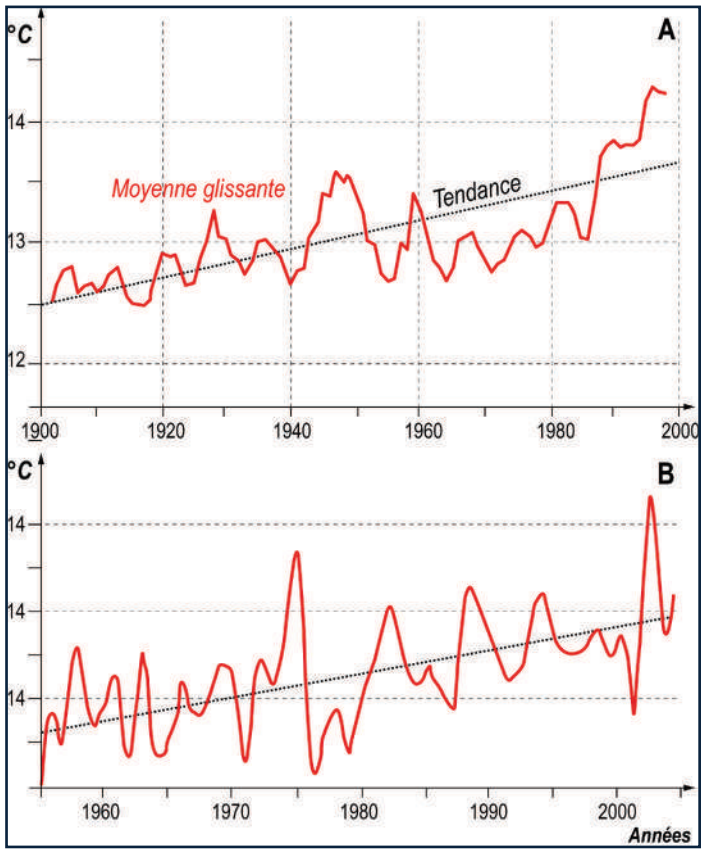


Figure 17 : *A. Depuis 1900, l'élévation de la température moyenne annuelle de l'atmosphère à Bordeaux est estimée à 1°C. B. Mais depuis 50 ans, on observe à l'échelle de l'Aquitaine une élévation de la température moyenne estivale de près de 3°C (données Météo-France).*

Sur la côte aquitaine, les mesures des marégraphes auxquelles s'ajoutent depuis 25 ans des mesures de satellites altimétriques, montrent que depuis ~1900, l'élévation moyenne du niveau de l'océan a été de ~3 mm par an, ce qui a généré une hausse totale de ~30 cm, valeur semblable à la hausse moyenne mondiale [57]. Les observations de terrain montrent que le niveau actuel de l'océan n'a jamais été atteint dans nos régions durant les deux derniers millénaires (cf. chapitre 6.1).

12. www.cartes-topographiques.fr/Bordeaux.html

Conclusion

Lorsque l'on porte un regard sur le passé en examinant les indices que le climat a laissé en Aquitaine depuis plusieurs millénaires, il faut remonter ~125 000 ans en arrière pour retrouver des températures plus élevées que les valeurs moyennes actuelles (+2 °C). Mais dans l'état actuel des connaissances, cette période ne semble pas avoir laissé d'indices qui pourraient nous aider à comprendre comment nos ancêtres se sont adaptés. Ce regard révèle aussi que durant la période glaciaire qui a suivi, des accidents climatiques courts (de l'ordre du siècle) et rapides sont régulièrement intervenus : on a pu démontrer que les populations locales avaient pâti de ces accidents et qu'elles s'étaient probablement déplacées alors vers des territoires moins désertifiés. Bien que depuis ~10 000 ans, l'Aquitaine connaisse enfin une période climatique relativement stable et chaude (l'Holocène), nous sommes en train de la perturber gravement à très grande vitesse. Nous devons désormais faire face à un climat nouveau, caractérisé par une surchauffe d'une intensité inédite au cours d'un interglaciaire. Comment les écosystèmes, les paysages, les milieux, les sociétés vont s'adapter au changement que nous connaissons actuellement ? Voilà le défi nouveau qui va se poser à la viticulture, à la sylviculture, à la pêche, aux gestionnaires de l'eau et des milieux (littoral, montagne, ville), et de manière générale à tous les décideurs aquitains.



Usine d'incinérations industrielles, Bec d'Ambès (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).



Enrochements et épis sur la plage centrale de Lacanau-Océan (Gironde). L'érosion littorale et la montée du niveau marin : un enjeu sociétal d'importance pour les communes littorales fortement urbanisées (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 3 :

Enjeux sociétaux : vulnérabilités face au changement climatique

Coordination : *Denis Salles*
Rédacteurs : *Vincent Bernard, Jeoffrey Dehez, Philippe Régnacq, Nicolas Rocle, Denis Salles, Sandrine Vaucelle*
Contributeurs : *Vincent Banos, Christophe Boschet, Christine Bouisset, Denis Breysse, Sylvie Clarimont, Philippe Deuffic, Marc Jarry, Thierry Oblet, Guillaume Simonet, Tina Rambonilaza*

Ce chapitre aborde la question du changement climatique du point de vue de ses conséquences et des transformations sociales économiques et politiques qu'il pourrait générer. Les vulnérabilités des sociétés au changement climatique, les capacités d'adaptation à faire émerger, ne pouvant faire l'objet d'une analyse exhaustive, une sélection d'enjeux qui concernent plus particulièrement l'Aquitaine sont abordées : villes et démographie, forêt, littoral, ressource en eau, tourisme.

Le degré de vulnérabilité et les capacités de réponse au changement climatique seront dépendants des dynamiques démographiques et en particulier du niveau d'attractivité du territoire aquitain marqué par les phénomènes de littoralisation et de métropolisation. La vulnérabilité des forêts au changement climatique s'exprime sur un plan économique et social. Les diverses manifestations (perçues ou attendues) du changement climatique remettent en question des pratiques de culture et de gestion établies et dessinent aujourd'hui de nouvelles tensions entre les diverses fonctionnalités socio-économiques et écologiques de la forêt. La vulnérabilité du littoral se pose au regard de risques d'érosion, de submersions marines, d'événements extrêmes potentiellement accrus par des activités humaines. Il faut dès lors envisager comment, l'implantation des aménagements, les activités productives (pêche, agriculture, conchyliculture), récréatives (tourisme, loisirs nautiques, baignade...) et les pratiques résidentielles sur la bande côtière seront amenées à s'adapter sous l'effet des conséquences du changement climatique. En ce qui concerne l'eau en Aquitaine, malgré des ressources abondantes, le changement climatique est susceptible d'accroître les tensions. La présence d'étiages plus sévères et plus fréquents sur la Garonne et l'Adour nécessite de trouver des arbitrages pour le partage de l'eau (eau potable, milieux, agriculture, tourisme...). La vulnérabilité de l'estuaire de la Gironde aux submersions marines et à des événements extrêmes constitue un facteur à intégrer dans les politiques de gestion des risques.

Introduction

En quelques décennies, la problématique du changement climatique s'est imposée comme un défi pour les sociétés humaines. Le changement climatique interroge l'ensemble des interdépendances socio-économiques et environnementales et questionne l'avenir des conditions de vie des sociétés contemporaines sur la planète terre. La question climatique ne peut être pensée indépendamment des « changements globaux » constitués des effets conjugués de la globalisation des échanges socio-

économiques, des dynamiques démographiques et des mobilités migratoires, des besoins alimentaires, de la montée potentielle de crises environnementales (réchauffement, événements extrêmes…), des impacts des aménagements sur les écosystèmes et la pérennité de l'accès aux ressources naturelles (déforestation, épuisement des énergies fossiles, problèmes d'accès à l'eau, pressions sur les ressources halieutiques, érosion de la biodiversité). Ces tendances lourdes fonctionnent comme autant d'injonctions au changement qui interrogent les modèles d'organisations économiques, sociales et politiques des sociétés.

Le changement climatique, les questions et les controverses qu'il suscite sont emblématiques d'un état d'incertitude permanente qui traverse tous les domaines de l'activité sociale, économique et politique et croise les champs de l'environnement, de la science et de la technique [1][2]. Face à un certain déterminisme des contraintes globales, l'aspiration à la « maîtrise de l'incertain », qui a été au cœur de l'idée de progrès des sociétés, semble à la recherche de voies alternatives, pour repenser les rapports sociaux, économiques et politiques.

Dans ce contexte, la compréhension du changement climatique nécessite d'articuler des connaissances diversifiées sur le climat et l'environnement avec des savoirs sur les dynamiques de changement des sociétés [3] ; il s'agit également de relier des approches globales sur les scénarios climatiques et la globalisation des échanges avec des approches intermédiaires et locales qui prennent en compte les dynamiques des sociétés aux échelles des territoires où s'expriment les vulnérabilités et les capacités d'adaptation des acteurs et des activités [4][5][6][7].

Partant de ce questionnement général, quelques éléments de définition sont nécessaires pour appréhender les *vulnérabilités* et le potentiel d'*adaptation* aux changements globaux du territoire aquitain. L'exposition aux risques du changement climatique et les réponses à y apporter, l'exploitation des opportunités éventuelles, ne peuvent être pensées sans caractériser respectivement la *vulnérabilité* et les *capacités d'adaptation* spécifiques à un groupe social donné dans son contexte culturel, territorial et socio-économique.

Le GIEC en 2007 a défini la vulnérabilité par « le degré de capacité d'un système à faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les extrêmes). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme de l'évolution climatique, des variations auxquelles le système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation ». Dans les développements des travaux sur le changement climatique, l'accent est désormais mis sur la dimension sociale de la vulnérabilité [8][9], considérant que les impacts du changement climatique sont fortement liés aux conditions de vie et d'organisation des sociétés, ainsi qu'à leurs prédispositions et leurs capacités variables à se prémunir des risques ou à tirer profit des opportunités. Dans ses différentes dimensions, la vulnérabilité au changement climatique implique donc d'observer conjointement les aléas climatiques tout comme les facteurs d'exposition des biens et des personnes aux impacts du changement climatique ; les conditions environnementales de pérennisation des activités d'un secteur ou d'un territoire ; le degré de robustesse des organisations sociales, économiques et politiques face aux impacts du changement climatique ; les connaissances disponibles, les capacités cognitives et les facteurs culturels qui structurent les différentes perceptions du changement climatique.

Face à l'urgence climatique [10], le défi posé aux sociétés est non seulement de concrétiser des mesures d'atténuation des causes du changement climatique par une réduction des émissions de CO_2 mais également d'imaginer les processus d'adaptation nécessaires pour faire face à des impacts jugés désormais inéluctables du changement climatique. En France, l'*ONERC*[1] organisme créé en 2001 et placé sous la tutelle du ministère de l'écologie, a été chargé de définir la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. Le Plan National d'Adaptation adopté en juillet 2011 souligne que « l'adaptation de notre territoire au changement climatique est devenue un enjeu majeur qui appelle une mobilisation

1. http://onerc.org

nationale »[2]. Le concept d'*adaptation* est défini par le rapport du GIEC 2007 comme « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques ».

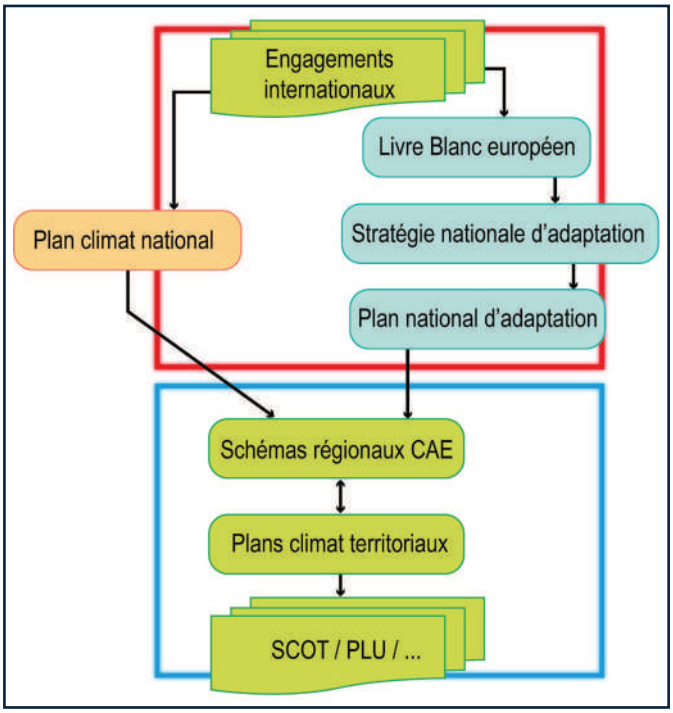


Figure 1 : *Schéma institutionnel de l'adaptation au changement climatique (Source : ONERC).*

Du point de vue sociétal, l'adaptation ne peut être dissociée des représentations de l'opinion publique sur le sujet controversé du changement climatique [11] et des dispositions individuelles, collectives et institutionnelles à modifier des comportements pour faire face aux effets du changement climatique.

L'adaptation au changement climatique peut être caractérisée par son caractère autonome-spontané vs planifié-stratégique ; par sa dynamique (proactive vs réactive) ; par la portée territoriale visée (locale vs globale) ; par le statut des mesures d'adaptation (protection vs retrait/prévention vs restauration/change-ment vs accommodement) ; par la forme d'organisation des actions d'adaptation (réglementaire vs contractuelle-volontaire ; institutionnelle, financière, technique) ; par les mesures d'évaluation de l'adaptation (coût, efficacité, efficience, application, équité) [12].

L'anticipation et la planification de l'adaptation au changement climatique font désormais l'objet d'une institutionnalisation croissante dans les politiques publiques depuis le niveau mondial (GIEC) et européen, en passant par le niveau national (ONERC, Plan National d'Adaptation) jusqu'aux échelons régionaux (SRCAE Schémas Régionaux Climat Air Énergie[3]) et territoriaux (Plans Climats Énergie Territoriaux) **(Figure 1)**.

Pour autant cette dynamique de planification ne recouvre pas l'ensemble des capacités d'adaptation des sociétés au changement climatique. Des travaux en sciences humaines et sociales s'intéressent également aux processus d'adaptation observables à l'échelle des modes de vie, des pratiques économiques et sociales des acteurs individuels [13].

Afin d'analyser les vulnérabilités de l'Aquitaine au changement climatique, la démarche adoptée dans ce chapitre consiste à repérer les principaux facteurs de vulnérabilité au changement climatique, à la fois objective et subjective, qui seraient spécifiques au territoire aquitain ; à appréhender le potentiel d'adaptation des territoires et des sociétés locales aux changements globaux et à identifier les besoins de connaissance à acquérir.

Dans l'incapacité de couvrir l'ensemble des domaines concernés par le changement climatique, cette étude des vulnérabilités et du potentiel d'adaptation est déclinée au travers de six enjeux particulièrement saillants pour l'Aquitaine. Les enjeux agricoles, ruraux et montagnards sont développés dans des chapitres spécifiques.

2. http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Plan-national-d-adaptation,22978.html
3. Schéma Régional Climat Air Energie en Aquitaine. http://www.srcae-aquitaine.fr/public

I- Villes, dynamiques démographiques et changement climatique

Avec 70 % de la population mondiale devenue citadine en 2050 (pour la moitié aujourd'hui), avec des modes de vie urbains responsables de 80 % des émissions de CO_2 et consommateurs de 75 % de l'énergie mondiale, l'avenir de la planète semble devoir se jouer pour une large part dans la recomposition des villes. Face aux avancées limitées des accords internationaux pour traiter le problème du changement climatique, une des voies de recours réside dans les actions de proximité, au plus près des lieux de vie, pour penser des cités urbaines protégeant la qualité de l'air, de l'environnement et du cadre de vie. Il s'agit, pour imaginer des villes avec 2 à 4 degrés de plus, d'habiter, de se déplacer, de se nourrir, de produire « autrement » ce qui nécessite de repenser l'aménagement et le développement durable des villes et des métropoles. Une meilleure maîtrise du processus continu d'urbanisation représente un immense chantier auxquels s'attellent avec plus ou moins d'urgence des autorités publiques, des mouvements citoyens et des acteurs économiques [14][15]. Il s'agit donc dans ce court chapitre sur les enjeux urbains du CC de mettre l'accent sur les vulnérabilités et impacts potentiels du CC sur les villes et de distinguer à grands traits les modes de gouvernance de l'adaptation au changement climatique en milieu urbain qui s'esquissent dans la région Aquitaine ou ailleurs.

A- Changement climatique et dynamiques démographiques

La mise en relation des changements climatiques avec les dynamiques démographiques constitue un premier éclairage nécessaire permettant d'anticiper les conditions de vie en Aquitaine à l'horizon 2050. Au 1er janvier 2008, l'Aquitaine comptait 3 175 500 habitants. Depuis 1999, la région a enregistré une croissance moyenne de 1 % l'an contre 0,7 % pour la métropole. Ce rythme de croissance qui a doublé par rapport à la période 1982-1999 repose essentiellement sur un solde migratoire positif (+ 0,9 % contre + 0,5 %). Dans tous les départements d'Aquitaine, l'évolution du solde migratoire est proche de la moyenne régionale excepté pour les Landes où l'accroissement est le plus fort (+1,4 %).

En prolongeant les tendances démographiques observées, avec 3 880 000 habitants en 2040, l'Aquitaine gagnerait 730 000 habitants par rapport à 2007, soit en moyenne 22 000 personnes de plus chaque année (l'équivalent d'une ville comme Cenon en Gironde). Au cours des trente prochaines années, l'Aquitaine connaîtrait une croissance démographique à un rythme légèrement inférieur à celui observé récemment, mais nettement supérieur à celui de la France métropolitaine **(Figure 2)**.

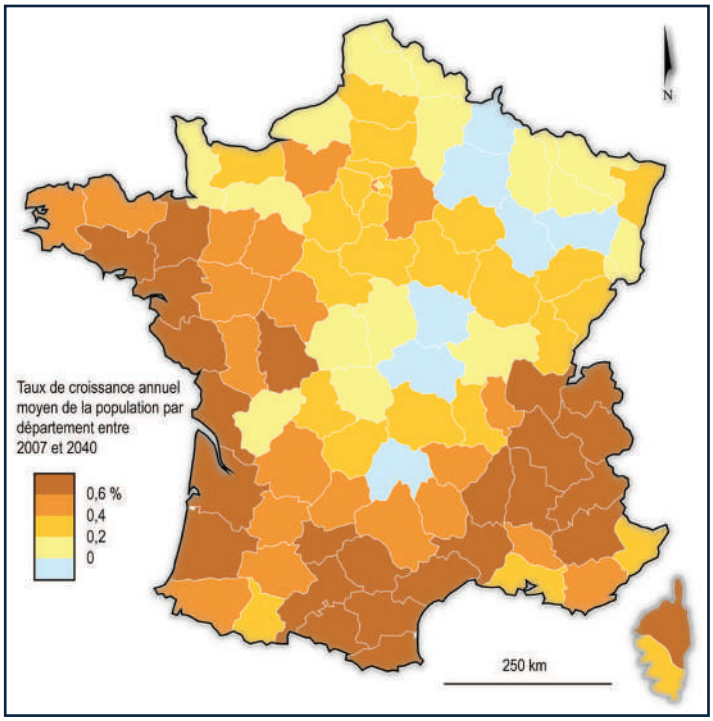


Figure 2 : *Taux de croissance annuel moyen de la population par département entre 2007 et 2040 (Source : Insee, RP 2007 – Omphale).*

En termes de répartition sur le territoire aquitain, on peut anticiper une tendance à une forte concentration de la population régionale dans les pôles urbains et sur le littoral. On peut également anticiper un vieillissement de la population plus accentué qu'au niveau national, qui est lié conjointement à un faible niveau des naissances et à un allongement de l'espérance de vie. Ce vieillissement global de la population aquitaine **(Figure 3)**, même freiné par les migrations résidentielles, devrait

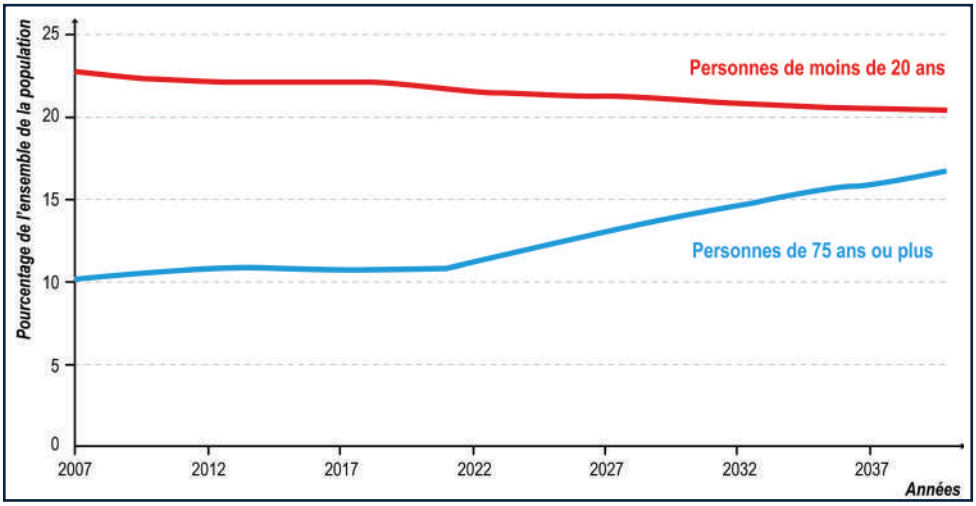


Figure 3 : *Part des 75 ans ou plus et part des 20 ans ou moins en Aquitaine (Sources : Insee, RP 2007 – Omphale 2010).*

engendrer une profonde déformation de la pyramide des âges régionale. Entre 2007 et 2040, le nombre de personnes de 60 ans ou plus augmentera de 70 % et celui des 75 ans ou plus devrait doubler.

S'il semble difficile d'estimer l'influence du changement climatique sur ces dynamiques démographiques de migration, de métropolisation, de littoralisation et de vieillissement, il est cependant possible d'envisager l'accroissement de vulnérabilités dans les villes. La croissance démographique liée à l'accueil de nouveaux résidents aura des incidences sur les conditions d'accès aux ressources et en particulier sur les besoins en eau potable. La concentration urbaine peut laisser augurer d'une plus forte vulnérabilité des personnes âgées, plus sensibles aux épisodes de fortes chaleurs et de canicule (cf. chapitre 9).

B- Vulnérabilité des équipements

Les constructions urbaines sont théoriquement conçues pour affronter des variations météorologiques usuelles. Au-delà de certains seuils elles ne peuvent que partiellement faire face à des situations extrêmes de force des vents, de précipitations, d'épisodes de chaleur ou de froid. Les évolutions du climat auront des répercussions sur le comportement et sur le processus de dégradation des aménagements urbains et par voie de conséquences sur la sécurité des usagers, la disponibilité des infrastructures et les coûts d'entretien.

Les chaussées composées de matériaux bitumineux, les ouvrages urbains construits pour l'essentiel en béton armé, les charpentes en bois présentes dans la grande majorité des ouvrages traditionnels ou industriels ou encore les réseaux urbains enterrés (eau, assainissement, électricité) sont particulièrement sensibles à l'influence des facteurs environnementaux [16]. Des variations significatives de température, de précipitations, d'humidité de l'air, le taux de gaz carbonique pourront accélérer des processus de corrosion, des mouvements de sols, réduire les durées de service des ouvrages, augmenter les coûts d'entretien et, dans des cas extrêmes, menacer la sécurité des usagers et des services.

La catastrophe naturelle dont l'impact économique est le plus important en France concerne les désordres du bâti liés au retrait et au gonflement des sols argileux. La région Aquitaine est particulièrement exposée à ces sinistres plus fréquents en période de sécheresse. La répétition de ce type d'événements depuis 2003 conduit les chercheurs, les bureaux d'études et les assureurs à renforcer les connaissances dans ce domaine. Un site expérimental dans la commune de Pessac, fruit d'un partenariat Ville et Université sert de support à des recherches innovantes visant à mieux appréhender les conséquences sur le bâti des variations du climat.

C- Transports, mobilité et politiques urbaines

Les politiques des collectivités territoriales (Régions, départements, communes) et des intercommunalités en matière de changement climatique ont été initiées depuis 2004 dans le cadre du Plan Climat national (réactualisé en 2006), dans le Grenelle de l'Environnement de 2007 et dans le Plan National d'Adaptation au changement climatique[4] adopté en 2011 qui propose un catalogue de mesures à mettre en œuvre de 2011 à 2015 pour faire face et tirer parti de nouvelles conditions climatiques.

Ces politiques ont été déclinées au niveau régional dans le Schéma Régional Climat-Air Énergie d'Aquitaine[5] approuvé le 15 novembre 2012, au niveau départemental dans le plan climat énergie girondin[6] adopté en décembre 2012, au niveau des agglomérations des communes et intercommunalités de plus de 50 000 habitants, par les Plans Climat Énergie Territorial (PCET), projet de développement durable ayant pour finalité la lutte contre le changement climatique (environ 22 PCET étaient adoptés fin 2011 en Aquitaine hors Agenda 21).

Deux grandes stratégies de lutte contre le réchauffement climatique sont mobilisées par les villes. La première engage la promotion d'une nouvelle logique d'aménagement urbain qui intègre l'idée que l'urbanisme et la mobilité sont les deux faces d'une même pièce, aujourd'hui considérés comme un « couple infernal » [17]. Il s'agit de bâtir une ville plus sobre dans sa consommation de carbone fondée des principes de densification, de polycentrisme, de mixités sociale et fonctionnelle, permettant une optimisation de modalités de déplacements (transports en commun, vélo, marche) moins émettrices de gaz à effet de serre. À titre d'exemple, au niveau de la CUB, la lutte contre l'étalement urbain et la densification intra-rocade le long des corridors de tramway, le développement de programmes de construction de logements (50 000) et d'éco-quartiers (Niel, Ginko, Euratlantique), apparaissent comme les moyens de recomposition de la ville. Au-delà de la ville dense sont envisagées des polarités urbaines secondaires reliées par des transports publics et une ceinture verte qui marque de manière forte la frontière entre ville et rural.

La seconde stratégie qui vise des réductions de consommation d'énergie plus tangibles et immédiates, porte essentiellement sur la réduction de la consommation énergétique par la rénovation et la construction des bâtiments publics et privés. Selon l'Agence Locale de l'Énergie un logement de 70 m^2 sur la Communauté Urbaine de Bordeaux verrait sa consommation en chauffage et eau chaude sanitaire passer de 170 kWh/m^2 à 58 kWh/m^2 après rénovation en Bâtiment Basse Consommation (BBC) et à 35 kWh/m^2 pour une construction neuve. Le bâti urbain constitue donc un gisement important de gains énergétiques qui va ouvrir un vaste chantier de rénovation et de construction pour l'avenir. Pour autant, le modèle dominant de la performance énergétique et environnementale repose sur une conception du bâtiment, « économe » ou « basse consommation » qui recourt à la multiplication des équipements et des systèmes autorégulés comme facteur premier de la performance énergétique. De nombreux travaux ont montré le mythe d'un pilotage des comportements humains par la technique [18] et prétendre surmonter la crise énergétique et écologique par le recours exclusif à des moyens techniques participe de cette utopie. L'appropriation sociale des bâtiments basse consommation pose la question « d'une véritable démocratie technique capable d'établir un dialogue durable entre les experts, les usagers et les dispositifs techniques qui, tous et ensemble, contribuent à la production de la performance énergétique » [19].

Plus fondamentalement, l'adaptation au changement climatique en milieu urbain nécessite une planification stratégique de l'énergie qui peut passer par une remise en question du modèle énergétique centralisé et par un soutien à des initiatives décentralisées de développement d'énergies alternatives.

4. http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Plan-national-d-adaptation,22978.html
5. http://www.aquitaine.developpement-durable.gouv.fr/le-schema-regional-climat-air-a1060.html
6. http://www.gironde.fr/jcms/c_16802/le-plan-climat-energie-girondin

Le volontarisme apparent, l'écho médiatique et le passage plus ou moins systématique par des processus de concertation pour la mise en place de ces politiques locales du changement climatique ne doivent cependant pas faire illusion, les projets d'action en sont à leur balbutiement, la crise économique tend à reléguer au second plan l'urgence climatique et au final seule une réelle appropriation par les élus, les citoyens, les acteurs économiques et les organisations politico-administrative constituera un réel étalon de mesure d'un succès potentiel de ces politiques qui engagent un profond changement dans l'organisation des villes et dans les modes de vie urbains.

II- L'activité forestière face au changement climatique : quels facteurs de vulnérabilité ?

Avec 1,8 million d'hectares, soit plus de 40 % de son territoire, l'Aquitaine est la première région boisée de France. Cette forêt ne se résume pas à son essence emblématique qu'est le pin maritime. Ainsi, a-t-on coutume de représenter la forêt aquitaine à travers trois grands ensembles que sont :

- le massif très morcelé Dordogne-Garonne (523 000 ha), constitué principalement d'essences feuillues où dominent le chêne et le châtaignier destinés à une production de bois d'œuvre dans le cadre d'une filière professionnelle organisée.
- le massif des Landes de Gascogne (974 000 ha) caractérisé par la futaie de pin maritime à forte vocation de bois d'œuvre et d'industrie.
- le massif très morcelé et hétérogène Adour-Pyrénées (227 100 ha), constitué principalement d'essences feuillues et sur lequel la filière professionnelle est nettement moins structurée.

En Aquitaine, la forêt appartient majoritairement à des propriétaires privés : 128 000 propriétaires privés, aux profils variés (individuels, groupements, institutions financières…) possèdent 92 % de la surface forestière totale. La structure de la propriété est cependant très concentrée puisque 4 % des propriétaires possèdent environs 50 % des surfaces. Les forêts publiques se répartissent sur le littoral en Gironde et dans les Landes (avec un rôle de fixation des dunes et une fonction très marquée d'accueil du public) ; ou en montagne, dans les Pyrénées-Atlantiques.

Les motivations et contraintes de gestion sont très variables. La production forestière alimente la deuxième industrie d'Aquitaine (sylviculture, première et deuxième transformation), après l'agroalimentaire. Avec un chiffre d'affaire supérieur à 3,5 millions d'euros (en 2007), la sylviculture et la filière bois emploient près de 30 000 salariés. Aujourd'hui, à côté des industries traditionnelles de transformation (papier, lambris), de nouvelles filières de production sont en train d'émerger notamment la filière bois énergie et le bois construction.

Parallèlement, les usages « non-bois » suscitent un intérêt croissant pour la *multifonctionnalité* de la forêt ou encore pour les *services écosystémiques* qui visent la valorisation de fonctionnalités environnementales (fixation des sols, stockage de carbone, réserve de biodiversité, épuration des eaux) ou socioculturelles (paysage, cultures locales, loisirs et tourisme). Bien qu'encore mal évalués, plusieurs indices laissent penser que ces services offrent un potentiel significatif [20]. Une enquête de 2006 a établi que près de 8 Aquitains sur 10 se rendaient en forêt durant leur temps libre, ce qui a conduit à une estimation de près de 100 millions de visites annuelles pour l'ensemble des forêts d'Aquitaine[7]. Toutes ne présentent pas la même attractivité et les forêts périurbaines, littorales et certains sites remarquables concentrent une large part de la fréquentation [21] [22].

7. Une nouvelle étude, prévue en 2012, actualisera ces données.




RISKZONE 20 H

Une forêt exposée aux événements climatiques

La tempête *Klaus* de 2009, qui a détruit 234 000 hectares de forêt à plus de 40 %, soit 42,5 millions de mètres cubes de bois abattu[8], est intervenue 10 ans après les épisodes *Lothar* et *Martin* (décembre 1999). Ces événements successifs ont suscité de vives interrogations sur leurs liens avec le changement climatique. La plupart des réflexions se sont focalisées sur les impacts physiques et environnementaux du changement climatique, abordant finalement peu les vulnérabilités socio-économiques.

Récemment, deux analyses prospectives menées par le GIP ECOFOR d'une part[9] et l'INRA d'autre part[10] et quelques projets récents ou en cours, bien que non ciblés sur la thématique du changement climatique[11], apportent des éclairages nouveaux sur la vulnérabilité des activités forestières au changement climatique, sans toutefois combler le déficit encore important de connaissances en sciences humaines et sociales dans ce domaine.

Une filière forestière vulnérable, des capacités d'accès en forêt menacées

Diverses menaces liées au changement climatique concernent potentiellement les forêts d'Aquitaine. La vulnérabilité de la forêt au changement climatique revêt de multiples visages qui associent risques naturels, modes de gestion et diversité des usages. Les plus importantes d'entre elles concernent l'augmentation probable des risques de sécheresse et des attaques parasitaires. Sur un plan socio-économique, l'un des premiers effets du changement climatique à avoir été évoqué est celui de l'impact possible sur l'approvisionnement de la filière, avec les conséquences directes sur le fonctionnement de l'industrie locale. La répétition d'événements extrêmes impacte en effet sérieusement la structure des peuplements (notamment au niveau des classes d'âge) et, de fait, leurs possibilités de valorisation économique. Dans ce contexte, le risque d'une insuffisance en bois d'industrie (dominée par la filière papetière) dans les 5 à 10 ans à venir a été particulièrement souligné [23]. Les tensions prévisibles sont d'autant plus importantes que la montée en puissance des besoins en énergies renouvelables tendrait à favoriser le développement d'une consommation de bois (biomasse) initialement affecté l'industrie[12]. À terme, la concurrence entre diverses demandes pourrait aussi concerner l'approvisionnement en bois d'œuvre, au risque de freiner des filières émergentes comme celles du bois de construction. Un tel scénario pourrait résulter d'une stratégie de réduction des âges d'exploitation visant à limiter les risques de voir les peuplements détruits par des événements climatiques extrêmes.

Bien que moins évidents, les effets du changement climatique sur les usages non productifs ne doivent cependant pas être sous-estimés. D'un point de vue social et culturel, les agressions subies en termes d'incendies, de tempêtes, d'attaques parasitaires, laissent autant de traces dans les esprits que dans la forêt. Les dégâts provoqués limitent les pratiques de la forêt en interdisant l'accès, en détruisant les équipements d'accueil ou encore en affectant les stocks et les habitats de gibier pour la chasse.

---

8. Source Institut Forestier National.
9. ECOFOR, 2010. *Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais*, rapport pour les ministères du Développement durable et de l'Agriculture, ECOFOR, Paris [23].
10. Mora *et al.*, 2012. Le massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050, Rapport de l'étude prospective, Conseil régional d'Aquitaine-INRA [24].
11. Programmes de recherche financés par la Région Aquitaine : « Services récréatifs et multifonctionnalité des forêts en Aquitaine », « Hauts lieux montagnards et forestiers », « Pins et feuillus, entre doutes et incertitudes. Les forestiers des Landes de Gascogne et la question de la multifonctionnalité des boisements feuillus après la tempête de 2009 », « Construction sociale et régulation des projets forestiers (CONSORE) »/Projet européen INTEGRAL (*« Future-oriented integrated management of European forest landscapes »*).
12. La demande en bois-énergie pourrait augmenter de 500 000 tonnes en 2010 à 2 millions de tonnes à l'horizon 2015. Le pin maritime représenterait 90 % de ces besoins en bois, qui correspondraient à un quart de la production annuelle du massif des Landes de Gascogne dès 2015 (Source : DRAAF).

Les événements météorologiques extrêmes ont un impact significatif sur les populations locales dans la mesure où ils bouleversent brutalement les paysages et le cadre de vie et représentent un danger potentiel pour les personnes et les biens. Ces phénomènes extrêmes répétés ont contribué à renforcer l'attachement des populations et des collectivités à une préservation du cadre forestier[13]. Dès lors, certains sites (forêts littorales, alluviales et de montagne), du fait de leur forte attractivité[14] et de leur exposition aux risques naturels peuvent être considérés comme plus vulnérables que d'autres. La vulnérabilité en jeu est donc à la fois celle d'une dégradation de la forêt elle-même mais également d'un ensemble d'usages dont elle est le support.

Dans ce contexte d'exposition à des événements extrêmes, les propriétaires forestiers et les sylviculteurs occupent une position centrale en tant que principaux acteurs de la gestion forestière. En effet, en plus d'être directement soumis aux impacts de ces événements (pertes de revenus, traumatismes personnels, etc.), leurs décisions en matière d'orientation de la sylviculture pourraient largement conditionner l'éventail futur des usages de la forêt aquitaine. De nombreuses incertitudes persistent sur ces orientations à venir, renforcées par la montée en puissance d'opérateurs sectoriels de la gestion sylvicole (Coopérative CAFSA, Caisse des dépôts, etc.).

Après 2009, le modèle traditionnel landais d'exploitation sylvicole a été sérieusement questionné du fait notamment de la fragilité du système racinaire [23] ou encore de la vulnérabilité du pin maritime face aux attaques parasitaires. Même si la forêt aquitaine semble toujours s'être remise des multiples catastrophes qui l'ont affectée par le passé, qu'il s'agisse du gel (100 000 ha atteints en 1962), des grands incendies (50 000 ha en 1949, 10 000 ha en 1989-1990) ou des tempêtes (200 000 ha en 2009), aujourd'hui, la problématique du changement climatique tend à relier entre eux des événements qui avaient jusqu'à présent, été perçus comme indépendants [25]. L'argument du changement climatique pourrait remettre en cause certains fondamentaux de la gestion forestière, comme dans les Landes de Gascogne, où la confiance exprimée jusqu'à présent envers le pin maritime, voire même la vocation forestière des territoires, pourrait être mise en question [26].

Avec la problématique du changement climatique, les politiques publiques semblent aussi à la croisée des chemins. Le système de DFCI (Défense des forêts contre les incendies) aquitain, s'il a toujours démontré son efficacité, pourrait se trouver en difficulté pour maintenir un niveau de protection performant face à des sécheresses récurrentes annoncées pour les prochaines décennies [27], difficultés accrues si des revenus de la forêt en baisse réduisent la contribution au financement de la DFCI. À cela, s'ajoutent la territorialisation des politiques publiques (où les logiques de territoires télescopent les intérêts de la filière) ou, à l'inverse, la multiplication des directives européennes parfois contradictoires. Ainsi, l'injonction à augmenter la part des énergies renouvelables, *via* notamment la consommation de biomasse ligneuse, supposerait la mise en place de modèles de production sylvicole intensifs susceptibles à leur tour de renforcer les effets de la sécheresse et d'entraîner des modifications paysagères importantes qui pourraient affecter la qualité d'un cadre de vie recherché.

Les conditions de marché apparaissent également fluctuantes. Les cours des usages traditionnels du bois sont orientés à la baisse ; alors que de nouvelles valorisations de la ressource (biomasse, biocarburant, chimie verte) n'ont pas exprimé leur potentiel.

Des pistes pour l'adaptation

À l'instar de la vulnérabilité, les capacités d'adaptation au changement climatique sont elles aussi multiples. La puissance publique dispose de leviers d'intervention à plusieurs niveaux. Au travers de la réglementation (obligation de débroussailler, de couper les bois malades ou de replanter après

13. La tempête *Klaus* a conduit le Parc naturel régional des Landes de Gascogne à définir « la conservation du caractère forestier du territoire » comme la première priorité politique de sa future charte pour la période 2012-2024.
14. Cf. *infra* 2.5 sur le « tourisme et les loisirs ».

tempête…), de l'incitation (aide au reboisement, primes pour le changement de sylviculture) ou encore dans l'accompagnement de systèmes collectifs de gestion préventive.

L'assurance entre notamment dans cette dernière catégorie. Aujourd'hui, les forêts privées sont globalement peu assurées et si les propriétaires ne se déclarent pas opposés au principe, ils sont en attente d'une clarification des modalités [26]. L'organisation par la puissance publique de nouveaux systèmes assurantiels pour la forêt, que le secteur privé ne semble pas vraiment en mesure d'établir, pourrait constituer une réelle stratégie pour la mutualisation des risques. Une autre forme d'adaptation au changement climatique envisagée par les propriétaires forestiers consiste à mutualiser les risques en diversifiant les itinéraires techniques (en visant différents produits et qualité de bois) et les sources de revenus issus de la forêt ou du foncier forestier (chasse, location ou vente du foncier, solaire, accueil touristique). La reconnaissance des multiples services rendus par les forêts apparaît alors comme un facteur favorable.

Du côté des populations, la réduction de la vulnérabilité passe aussi par tout un train de mesures (débroussaillement, élagage autour des habitations et des franges urbaines par exemple) qui impliquent l'attention des pouvoirs publics sur l'aménagement des zones d'interface forêt-habitat et une forte mobilisation des particuliers. Cependant, l'exemple méditerranéen pour les incendies, montre combien celle-ci est complexe du fait que les populations tendent à minorer les risques et à rejeter les contraintes normatives dès lors qu'elles ont un coût et qu'elles affectent la jouissance qu'elles ont de leurs biens [28]. Les dispositions du public à l'égard d'une adaptation de la forêt aux risques du changement climatique semblent réelles, si l'on considère que malgré un attachement des Aquitains vis-à-vis de « leurs » paysages forestiers [29], ceux-ci ne semblent pas opposés à une certaine diversification de leur cadre de vie notamment dans la forêt landaise [30].

III- Enjeux et vulnérabilités du littoral face au changement climatique

Les littoraux sont confrontés depuis quelques décennies à une tension croissante entre l'attractivité de ces territoires et une vulnérabilité spécifique liée à leur position d'interface entre terre et mer. Les politiques de préservation des littoraux doivent ainsi composer avec des préoccupations relatives à l'accessibilité et à la valorisation des fonctions sociales et économiques du bord de mer [31]. Le littoral aquitain, considéré dans toute sa diversité, n'échappe pas à ce constat. Sous l'effet du changement climatique, la récurrence et/ou l'intensité de divers phénomènes comme l'accélération de l'élévation du niveau marin, des modifications de circulations océaniques et des phénomènes de surcotes plus importantes sont susceptibles de transformer le paysage littoral et d'affecter les biens et les conditions de vie. Cette section traite plus particulièrement des enjeux de l'érosion et du recul de la frange côtière, ainsi que des submersions marines et leurs impacts possibles sur les biens et les activités humaines, dans une perspective de long terme.

La vulnérabilité des territoires littoraux est souvent mise en avant du fait des enjeux qui s'y concentrent : densités de population et d'urbanisation élevées, interdépendance des processus à l'interface terre-mer, risques de catastrophes naturelles plus élevés… Appréhender la vulnérabilité des territoires côtiers nécessite alors des démarches interdisciplinaires de recherche et de gestion. Le projet VULTEC [32] mené sur des communes du littoral de la Côte d'Opale (Manche) puis étendu à des communes du littoral méditerranéen, a par exemple permis d'élaborer une grille d'analyse et une méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux risques d'érosion et de submersion fondée sur quatre critères (les *aléas*, les *enjeux*, la *gestion effective* des risques, les *perceptions et les représentations sociales* liées aux risques) et de déterminer un indicateur de *vulnérabilité globale du territoire* étudié. D'autres démarches s'intéressent à la vulnérabilité des littoraux en analysant les impacts sociaux et environnementaux des territoires, eu égard aux tendances et aux prévisions en matière d'érosion de la frange côtière ou d'élévation du niveau des eaux et des submersions marines associées[15].

15. Le projet de recherche BARCASUB (LITEAU, 2009-2012) analyse les impacts sociaux et environnementaux d'une hausse du

À l'échelle de la région Aquitaine, en matière de préoccupations sur les risques côtiers, le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Littoral Aquitain, constitue, depuis 2006, une structure pérenne de gouvernance du littoral associant l'État et les collectivités territoriales ; il s'appuie sur les expertises de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA) et du Réseau de Recherche Littorale Aquitain (RRLA). La région Aquitaine a coordonné le projet européen ANCORIM inscrit dans un réseau atlantique pour la prévention et la gestion des risques littoraux[16]. L'application de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) et de la Directive européenne (2007/60/CE) relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondations (intégrant les submersions marines) apporte également de nouveaux éléments pour la gestion des territoires d'interface Terre/Mer et des risques associés.

Une vulnérabilité côtière sous surveillance

Le littoral aquitain, constitué de 230 km de côtes sableuses et d'environ 40 km de côtes rocheuses, représente l'une des régions littorales européennes les plus exposées à l'érosion marine [33]. Près du tiers de la portion littorale sableuse présente un recul moyen de 1 à 3 m par an (pouvant atteindre localement des reculs de 6 mètres par an). Les falaises à roche dure de la côte basque sont également sensibles aux phénomènes de mouvements de terrain et exposent des biens et des personnes du fait de la densité de l'occupation de toute la frange littorale. Ces phénomènes d'érosion dépendent de la dynamique propre des franges littorales mais sont modifiés et/ou aggravés par l'artificialisation croissante des milieux (ouvrages de défense, imperméabilisation de surfaces…).

En réponse à ces problèmes, le GIP Littoral Aquitain a lancé en 2009 l'élaboration d'une « stratégie régionale de gestion du trait de côte » à l'échelle de l'ensemble du littoral aquitain (exception faite des passes du bassin d'Arcachon du fait de la complexité des phénomènes à l'œuvre)[17]. Cette stratégie a été validée en 2012, au moment du lancement de la *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte par le Ministère en charge de l'écologie*[18]. Un important effort d'acquisition de connaissances et de données s'est concentré sur les aléas érosion marine, permettant d'établir des projections tendancielles aux horizons 2020 et 2040 sur les positions futures du trait de côte et établissant ainsi une première projection sur l'exposition des milieux, des infrastructures et des activités humaines sur des espaces voués à disparaître ou à évoluer sous l'effet de ces forçages **(Figure 4)** [34].

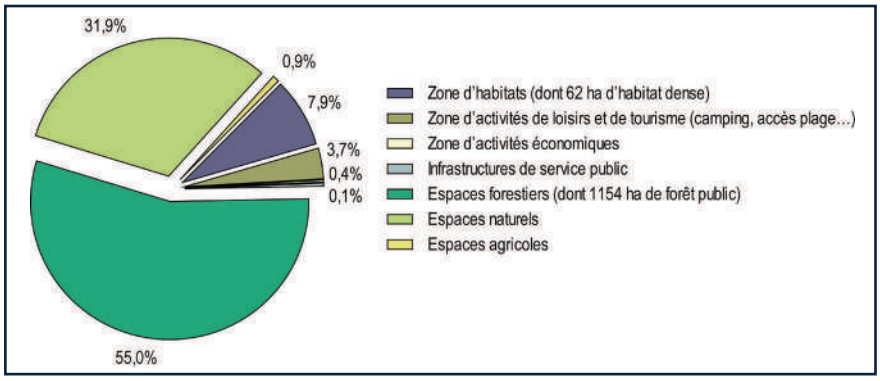


Figure 4 : *Activités humaines et enjeux répertoriés dans la bande d'aléa érosion marine (2 233 ha) à l'horizon 2040 (Source : Sogreah 2011/GIP Littoral Aquitain/ Stratégie régionale de gestion de la bande côtière en Aquitaine).*

La situation des trois départements littoraux d'Aquitaine est contrastée en matière d'occupation de la frange littorale : les côtes sableuses des Landes et de la Gironde ont été relativement préservées

niveau moyen des eaux sur le domaine de Graveyron dans le bassin d'Arcachon et étudie les conditions et les impacts d'aménagements comme la dépoldérisation.

16. http://ancorim.aquitaine.fr

17. http://www.littoral-aquitain.fr/spip.php?rubrique20

18. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/12004_Strat%C3%A9gie-gestion-trait-de-cote-2012_V6_29-02-12_light.pdf

vis-à-vis d'aménagements aux abords immédiats du trait de côte, à l'inverse la côte basque présente des habitations et des infrastructures relativement denses et à l'aplomb des falaises rocheuses.

Certaines situations locales sont d'ores et déjà préoccupantes sinon urgentes, comme en atteste le cas emblématique de l'immeuble « Le Signal » à Soulac-sur-mer (Gironde) séparé des eaux océaniques par un cordon dunaire d'une vingtaine de mètres, et pour lequel les rechargements artificiels de plage ne permettent plus de garantir à terme la protection de ce bien et des personnes résidentes. A court ou moyen terme, des situations en équilibre instable – comme à Saint-Jean-de-Luz, Biarritz et Anglet (Pyrénées-Atlantiques), Capbreton (Landes), où sont réalisés des aménagements de protection face aux érosions marines – pourraient se dégrader (en raison du coût des interventions, de la vétusté des ouvrages de protection et/ou de l'intensification des phénomènes d'érosion) et appellent des mesures d'anticipation et de prévention. Ainsi, selon la stratégie régionale de gestion du trait de côte en Aquitaine, « si l'on ne tient pas compte des ouvrages existants et qu'aucune action de gestion n'est entreprise, une première approche régionale permet d'estimer que ce sont potentiellement près de 250 bâtiments d'habitation qui sont menacés à l'horizon 2040 sur la côte sableuse dans les Landes et en Gironde et près de 150 biens concernés par un aléa 2040 moyen ou fort de mouvement de falaises dans les Pyrénées-Atlantiques ». Ce scénario tendanciel devra en outre, à l'horizon 2100, prendre en compte une accélération de la hausse du niveau moyen des océans et l'évolution des surcotes, suggérées par les prévisions du GIEC, sans toutefois pouvoir déterminer les effets couplés de ces évolutions aux échelles régionales et locales. Des vulnérabilités face à la réduction de zones de plage et/ou de baignade avec des conséquences potentielles (encore mal évaluées) sur les activités touristiques sont à prendre en compte, en particulier sur les stations balnéaires fortement dépendantes de ces supports de loisirs et de tourisme.

Les zones basses du littoral aquitain (bassin d'Arcachon, estuaire de la Gironde, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye), présentent pour leur part une exposition et une vulnérabilité aux phénomènes de submersions marines et d'inondations (plus de 200 Plans de Préventions des Risques d'Inondation (PPRI) ont été approuvés en 2005 dans le seul département de la Gironde). L'exposition des ouvrages de protection (digues, enrochements), des milieux et des constructions, dans le scénario GIEC pessimiste d'une élévation du niveau de la mer de l'ordre d'un mètre à l'horizon 2100, engage une transformation graduelle des milieux et des paysages (exemple des marais doux du Domaine de Graveyron, site du Conservatoire du Littoral dans le bassin d'Arcachon, [35]) et interroge la durabilité des usages productifs et récréatifs liés aux ressources naturelles (pêche, agriculture, conchyliculture). La gestion des niveaux d'eau et des équilibres à maintenir entre eau douce, eau salée et sédiments, héritée de dynamiques anciennes par des systèmes complexes de vannes et de canaux nécessitant des entretiens réguliers, sera donc certainement modifiée par suite de l'élévation croissante du niveau marin.

La littoralisation et l'artificialisation de la frange côtière dans le contexte du changement climatique posent ainsi de nombreuses questions sur la révision des options d'aménagement et d'urbanisme sur des territoires soumis à une pression démographique et foncière importante. Face au changement climatique, les outils d'orientation et de planification (SCOT, PLU…) et les plans de gestion des risques d'inondations peuvent-ils transformer les usages et l'occupation du littoral ?

Des options d'adaptation à penser collectivement

La vulnérabilité du littoral aquitain face au changement climatique soulève ainsi des questions d'ordre techniques (types de protection et modes de gestion), réglementaires et juridiques (cohérence des différents documents de planification et d'orientations, régimes de responsabilité et d'assurances, procédures d'expropriation…), économiques et financières (expropriation et indemnisation, nouveaux ouvrages de protections à construire et entretenir…), politiques et institutionnelles (en particulier sur la gouvernance du littoral et les relations sciences, technique et société).

Considérant les arbitrages et les décisions à prendre, les dimensions socio-économiques vis-à-vis des risques littoraux aggravés par les changements climatiques semblent pour l'heure encore mal estimées dans le contexte régional aquitain. Il convient de consolider des connaissances concernant les populations riveraines (niveaux et modes de vie des habitants de la frange côtière, leurs représentations et leur degré d'appropriation des risques littoraux) ; de conduire des expérimentations pour mesurer les capacités d'adaptation des entreprises, des organisations, des collectivités face à des options de relocalisation d'activités ; d'apprécier les impacts de ces options d'adaptation en termes d'équité, d'égalité et de solidarité (entre individus, entre groupes de populations, entre générations, entre territoires…). L'adoption d'options de déplacement et/ou de *relocalisation* éventuelles de certains biens et activités dépendra en effet des conditions locales d'évolution des milieux et des usages, mais également des équilibres à trouver avec l'arrière-pays et les territoires littoraux adjacents. La mise en chantier en 2013 de la stratégie régionale de gestion du trait de côte portée par le GIP Littoral Aquitain, ainsi que des stratégies locales pour s'adapter à l'érosion côtière (Pointe du Médoc, Lacanau, Mimizan, Agglomération Côte Basque-Adour, Agglomération Sud Pays Basque) et des stratégies locales inondation sur les « territoires à risque important » d'inondation (bassin d'Arcachon et côtier basque), représentent des expériences émergentes porteuses d'enseignements sur les conditions nécessaires pour mener des actions de type *repli stratégique*, ainsi que sur les dispositifs de participation citoyenne nécessaires pour faciliter l'émergence d'options d'adaptation jugées acceptables et justes.

IV- Les enjeux de l'eau face changement climatique

L'abondance d'eau qui caractérise l'Aquitaine n'exclut pas des tensions sur la ressource à certaines périodes (63 % des prélèvements ont lieu en été) et dans certaines zones, qui pourraient être accentuées par le changement climatique. Ces tensions sont liées à la disponibilité de l'eau mais également aux règles de partage de la ressource entre les différents usages, ainsi qu'aux conditions de préservation des fonctionnalités écologiques des écosystèmes. Prétendre évaluer la vulnérabilité et identifier les capacités d'adaptation de l'Aquitaine face au changement climatique du point de vue de la ressource en eau nécessite d'estimer les dynamiques d'évolution des usages anthropiques et de la demande en eau et d'observer le degré de prise en charge du changement climatique dans la gouvernance de l'eau et les politiques publiques. Trois illustrations seront mobilisées pour montrer les arbitrages qui se dessinent pour la gestion de l'eau dans le contexte du changement climatique (le Plan de Gestion des Étiages de l'Adour, la programmation des besoins en eau potable de la Communauté Urbaine de Bordeaux, la prévention des risques inondation dans l'Estuaire de la Gironde).

Une ressource abondante mais vulnérable

En Aquitaine la disponibilité en eau est de l'ordre de 35 milliards de m^3 dont 1,1 milliard (500 Mm^3 pour le bassin de l'Adour) sont prélevés pour les usages anthropiques. Ces prélèvements sont respectivement destinés pour 45 % à l'irrigation (Adour 51 %), pour 30 % aux usages domestiques (Adour 25 %), et 25 % pour les usages industriels (Adour 24 %)[19].

L'observation de l'évolution des usages souligne plusieurs tendances : les besoins en eau pour l'industrie ont connu une baisse régulière et significative (Figure 5). La demande en eau pour l'irrigation, après les importants équipements durant les années 1970-1980 (x3 entre 1970 et 1990) s'est stabilisée dans les années 1990 et a décru dans les années 2000 avec la persistance de variations départementales fortes en Aquitaine **(Figure 5)**. À l'échelle du bassin Adour-Garonne, avec 530 000 hectares en 2010, les surfaces irriguées ont été réduites de 18 % en 10 ans. 73 % des surfaces irriguées sont occupées par la culture du maïs irrigué. 950 millions de m^3 sont prélevés annuellement pour l'irrigation représentant 70 % des prélèvements effectués l'été. La réduction de la sole irriguée ne se traduit cependant pas par une baisse du volume prélevé ce qui indique une tendance à l'intensification de l'utilisation de l'eau[20].

19. Source Prospective Aquitaine 2006 et Observatoire de l'eau du Bassin de l'Adour.
20. Lignes d'eau – Lettre d'informations d'ADOUR GARONNE, # 30 décembre 2012, http://info.eau-adour-garonne.fr/newsletters/articles/numero_30/chiffres.pdf

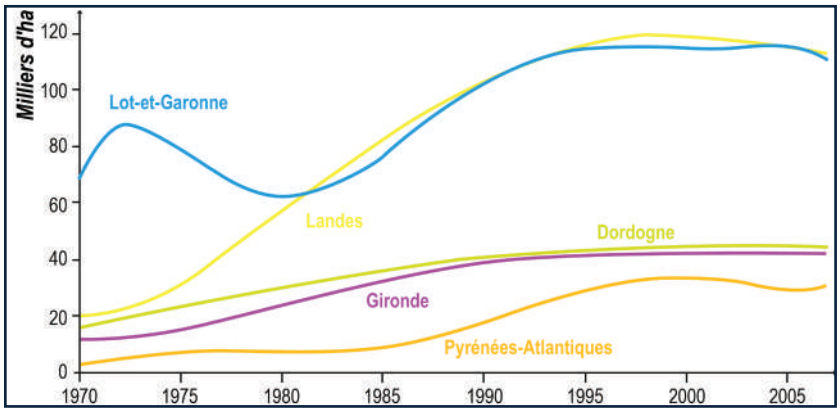


Figure 5 : *Évolution des surfaces irriguées entre 1970 et 2007 en Aquitaine, par département (Source Recensements Agricoles et enquêtes structures intercensitaires. Agreste 2010).*

Les prélèvements pour l'eau potable (326 Mm^3/an) destinés à 3 millions d'habitants d'Aquitaine sont issus des nappes souterraines (61 %) et des eaux de surface (30 %). La consommation moyenne annuelle d'eau par habitant (164 l/j) est légèrement supérieure à la moyenne française (150 l/j) et se révèle variable non seulement selon les saisons mais également selon des événements météorologiques comme par exemple la canicule de 2003 en France.

Les milieux aquatiques en Aquitaine se caractérisent par la présence d'une grande diversité d'espèces de poissons migrateurs (esturgeon, alose, anguille, truite de mer, saumon, lamproie). Le potentiel halieutique a été fortement affecté ces dernières décennies par des causes conjointes de surpêche, de dégradation de la qualité des milieux et de conditions liées au changement climatique. Le nombre de pêcheurs professionnels est en forte baisse (300 dans l'estuaire de la Gironde), la pêche de loisirs concerne 110 000 pratiquants à l'échelle du bassin Adour-Garonne.

La biodiversité des milieux aquatiques et humides (zones humides alluviales et estuariennes, bras morts, forêts alluviales) est exposée à des impacts anthropiques anciens et persistants (artificialisation du lit et des berges par l'emprise agricole et urbaine, déconnexion avec le fleuve, des rives, impacts des extractions de granulats) qui pourraient être aggravés par des étiages annoncés comme plus fréquents et plus sévères, pouvant atteindre potentiellement jusqu'à -25 %. De même les événements de crues, notamment les submersions marines dans l'estuaire, exposent des zones urbanisées et des zones d'activités à des risques accrus qu'il convient de protéger par des infrastructures combinées à des méthodes alternatives (dépoldérisation, zones d'expansion de crues, repli stratégique).

Face aux pressions en période d'étiage, le maintien des débits dans les rivières pour garantir des usages et assurer les conditions de vie des milieux, est devenu une préoccupation forte depuis les lois sur l'eau de 1992 et 2006, renforcée par l'application de la DCE 2000 visant un bon état écologique de l'eau à l'horizon 2015. La gestion des débits à l'étiage est assurée par une norme de Débits Objectifs d'Étiages (DOE) inscrite dans le SDAGE[21] et négociée localement dans le cadre des Plans de Gestion des Étiages (PGE) en Adour Garonne. Le déficit de ressource identifié dans le bassin Adour Garonne pour le respect des DOE est estimé à 235 millions de m^3. Des étiages sévères d'intensité et de fréquence plus importantes (référence à 1986-1989/1990-1991/2003), tels qu'ils sont envisagés dans le contexte du changement climatique, pourraient avoir des impacts significatifs sur les conditions de respect des seuils limites.

L'observation des tensions sur la ressource en eau en Aquitaine met en évidence de nombreux domaines que le changement climatique risque de renforcer. Nous concentrerons notre attention sur trois phénomènes permettant d'illustrer des facteurs de vulnérabilités de l'eau plus spécifiques à l'Aquitaine :

- La gestion des étiages de l'Adour
- L'adaptation des services d'eau potable de la *CUB* au changement climatique
- La vulnérabilité de l'estuaire de la Gironde aux événements extrêmes

21. SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

A. La gestion des étiages de l'Adour

Les PGE visent le respect de débits minimum (*Débits Objectifs d'Étiages*) par le biais d'économies d'eau, par la mobilisation de ressources existantes (soutien étiage EDF) et par la création de nouvelles ressources (ouvrages, retenues collinaires)[22].

Sur l'Adour, une hausse des températures de 2 °C à l'horizon 2050 entraînerait une modification sur la pluviométrie et le régime des eaux, qui se traduirait par une réduction générale des débits de l'Adour, et en particulier par des étiages plus longs, voire plus sévères. Cependant, la reconstitution des débits naturels de l'Adour sur la période 1970-2007 ne traduit pas pour l'instant cette tendance et ne fait pas apparaître de baisse significative des étiages naturels **(Figure 6)**, on observe en revanche une très forte sollicitation de la ressource par l'irrigation[23].

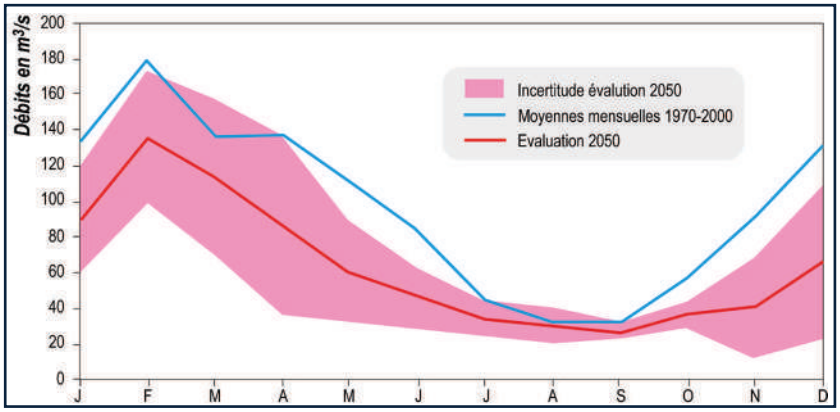
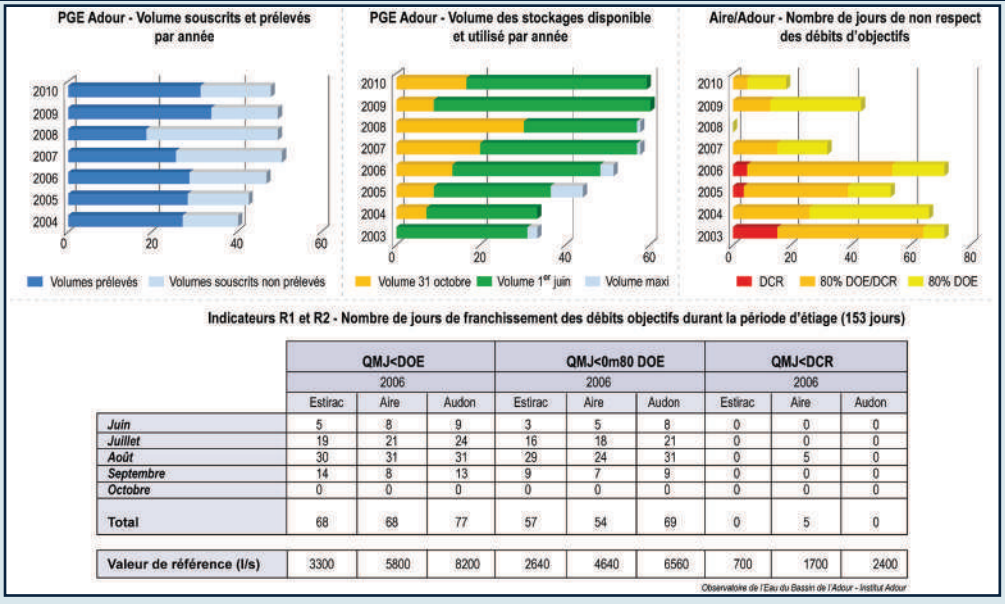


Figure 6 : *Débits moyens de l'Adour à Saint Vincent de Paul, moyennes mensuelles 1970-2000 et évaluation des moyennes mensuelles (Sources : SAGE Adour-Scénario tendanciel, CERFACS/ Météo France 2007).*

Le PGE Adour, adopté en 1999, est en cours de révision depuis 2009. Entre les deux dates la gestion de l'eau dans le bassin de l'Adour s'est caractérisée par une amélioration des moyens de mesure des prélèvements (compteurs), par une généralisation du conseil aux irrigants, par la mise à disposition de réserves d'eau supplémentaires (26 Mm³ entre 2003 et 2009), par la mise en place d'un plan de crise opérationnel, par une concertation interdépartementale et l'adoption de seuils de restrictions progressives destinés à éviter l'atteinte des *débits de crise* (DCR).

Fonctionnement du PGE Adour



Indicateurs R1 et R2 - Nombre de jours de franchissement des débits objectifs durant la période d'étiage (153 jours)

	QMJ<DOE			QMJ<0m80 DOE			QMJ<DCR		
	2006			2006			2006		
	Estirac	Aire	Audon	Estirac	Aire	Audon	Estirac	Aire	Audon
Juin	5	8	9	3	5	8	0	0	0
Juillet	19	21	24	16	18	21	0	0	0
Août	30	31	31	29	24	31	0	5	0
Septembre	14	8	13	9	7	9	0	0	0
Octobre	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	68	68	77	57	54	69	0	5	0
Valeur de référence (l/s)	3300	5800	8200	2640	4640	6560	700	1700	2400

Observatoire de l'Eau du Bassin de l'Adour - Institut Adour

22. La Région Aquitaine est concernée par le PGE Dropt, le PGE Garonne et le PGE Adour.
23. CACG, 2008, Schéma d'aménagement et de gestion des eaux Adour amont – Tendances et scénarios [36].

- Les volumes souscrits et prélevés par les agriculteurs ; les volumes souscrits (ou autorisés) sont stables, voire régressent légèrement depuis 2007. Les volumes prélevés sont relevés aux compteurs ; ils varient chaque année en fonction des conditions climatiques et se rapprochent plus ou moins du volume autorisé (relevé des compteurs depuis 2004).
- Les capacités de stockage et leur utilisation ; la capacité totale a augmenté nettement entre 2003 et 2009, passant de 32 millions de m3 en 2003 à 57 millions en 2010 (hors Lac Bleu). Certaines années, le volume au 1er juin n'atteint pas la capacité maximale, à cause de mauvaises conditions de remplissage (printemps déficitaire) et en fin de campagne (31 octobre) les réservoirs disposent d'un stock plus ou moins important selon les sollicitations de l'été.
- Le respect des débits d'étiage, entre le Débit Objectif d'Étiage (DOE) ou valeur de référence, et le Débit de Crise (DCR) qui ne doit pas être atteint et impose l'arrêt total des irrigations ; un système graduel de restrictions est mis en place entre le DOE et le DCR pour éviter d'atteindre le DCR.

(Source Observatoire de l'eau du Bassin de l'Adour)

La comparaison interannuelle met en évidence les disparités où les conditions climatiques restent déterminantes dans la gestion de l'eau et permet de relever trois observations : 1) Le poids de la variabilité climatique dans la gestion des étiages : les années 2004, 2005, 2006, et surtout 2003 montrent que malgré la sollicitation des barrages, on évite difficilement des étiages sévères qui nécessitent des réalimentations au-delà de la fin de prélèvements agricoles. 2) L'augmentation des volumes stockés depuis 2007, dont la mise en service du réservoir du Gabas, sans augmentation de volumes souscrits a détendu la situation vis-à-vis des étiages. 3) L'amélioration de la gestion des débits a permis de mieux anticiper les étiages.

L'expérience du premier PGE Adour et les analyses réalisées pour sa révision ont dessiné les principales orientations du PGE révisé : maintien d'un objectif d'économies d'eau de 5 % soit 5 Mm^3 par la rationalisation des prélèvements, du choix des assolements et des variétés. La création de nouvelles ressources destinée à combler le déficit estimé entre 22 et 30 Mm^3. Le PGE révisé constituera le volet quantitatif du SAGE[24] Adour en cours de réalisation et ses orientations deviendront ainsi opposables aux tiers et à l'administration. Il devra s'intégrer dans un cadre plus global en prenant en compte les autres usages et des objectifs environnementaux. On mesure combien les enjeux quantitatifs du PGE Adour dépendent essentiellement du contrôle de la demande en eau agricole et de la capacité à réaliser les objectifs de mobilisation de ressources supplémentaires.

B- L'adaptation des services d'eau potable face au changement climatique

Dans le cadre des programmes de recherche Eau&3E et ECU[25] qui étudient la durabilité (équité, économie, environnement) des services d'eau potable dans les villes et menés en collaboration avec le *Syndicat Mixte d'Études pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde (SMEGREG)*, un volet concerne notamment l'élaboration de scénarios pour étudier le processus de métropolisation de la Communauté Urbaine de Bordeaux dans un système aux ressources limitées. Ces scénarios ont pour vocation d'envisager l'adaptation des services d'eau potable aux changements globaux et les réorganisations territoriales nécessaires. Pour dimensionner et programmer des investissements conséquents et de long terme adéquats, il s'agit donc de mieux comprendre l'évolution des consommations d'eau potable. La baisse de la consommation générale dans les pays développés, observable depuis une à deux décennies (depuis 2003 en Gironde, **Figures 7 à 9**) a-t-elle atteint un niveau plancher ? Le changement climatique peut-il infléchir cette tendance ? Un premier élément de réponse peut être obtenu par la mise en relation des données des volumes de prélèvement en eau pour la distribution d'eau potable avec des séries de données météorologiques (quinze dernières années), pour rechercher une éventuelle corrélation entre des évolutions de consommation et des variations météorologiques.

24. SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.
25. Programme Eau&3E, Programme ANR Villes Durables (B Barraqué, sous la dir. de) (2009-2012)/Programme région Aquitaine ECU : Eaux dans les Choix Urbains (S. Vaucelle, sous la dir. de) (2010-2013).

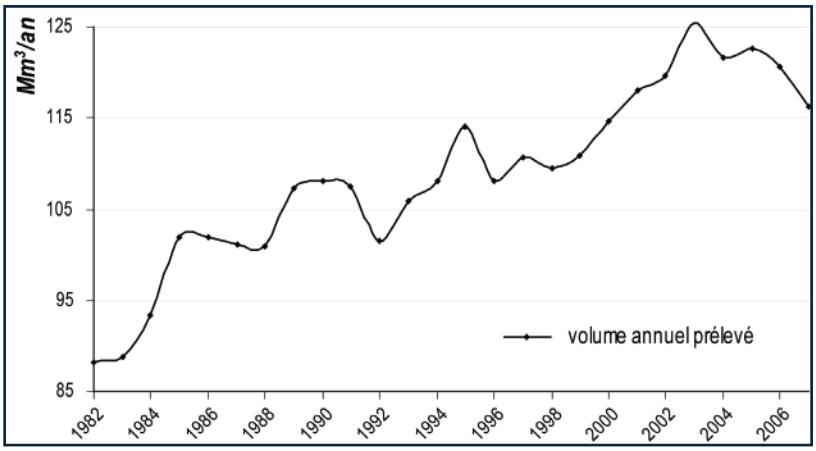


Figure 7 : *Volumes annuels d'eau potable prélevés en Gironde de 1982 à 2007.*

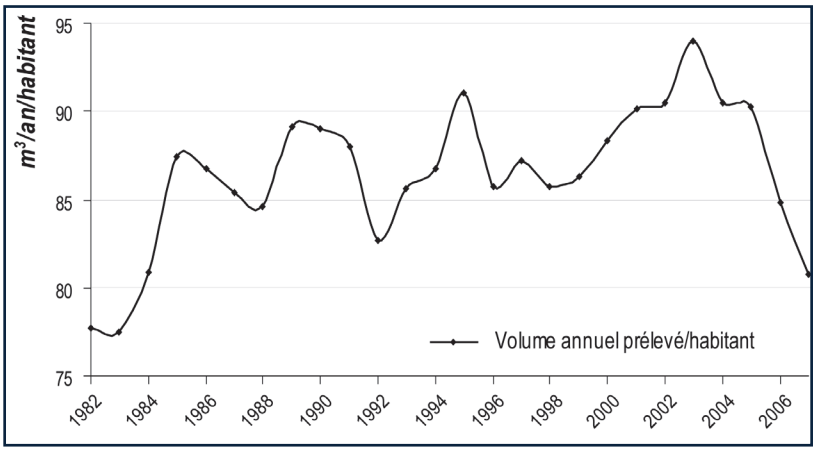


Figure 8 : *Volumes annuels d'eau potable prélevés par habitant en Gironde de 1982 à 2007.*

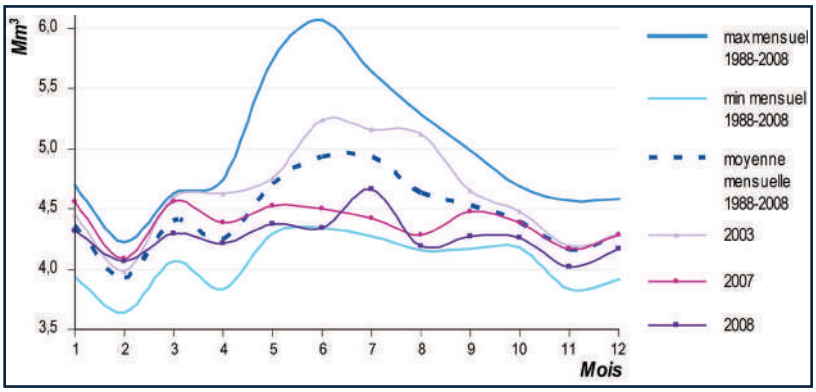


Figure 9 : *Volumes prélevés des années 2003, 2007 et 2008 sur la CUB.*

Relations prélèvements/Données climatologiques

L'étude des relations entre les prélèvements et les données climatologiques s'appuie sur la variable la plus déterminante qui est la température maximale (TX) puis celles de l'évapotranspiration (ETP) et de la température moyenne. La variable temporelle porte sur des données journalières, hebdomadaires, mensuelles, semestrielles et annuelles. Des résultats encore partiels de cette recherche montrent que « les phénomènes climatologiques extrêmes et ponctuels n'expliquent pas à eux seuls les prélèvements atypiques des années 2003 ou 2007-2008 » et les calculs indiquent « une augmentation de 1,6 % de la consommation par degré d'augmentation de température ». En appliquant les scénarios modérés et intensifs du GIEC, la recherche montre que « ces effets sur les consommations d'eau ne peuvent être négligés pour le dimensionnement des infrastructures d'AEP, notamment du fait de l'impact prévisible fort sur les consommations de pointe ». (S. Vaucelle et al., 2009)[26].

26. S. Vaucelle, E. Paredes, B. de Grissac, C. Herbet, A. Pichon. « Enseignements de la canicule 2003 et des années 2007 et 2008 pour la prise en compte des changements climatiques dans l'estimation des besoins futurs en eau potable, les enjeux pour le SAGE nappes profondes de Gironde », Communication colloque SHF sur les événements climatiques extrêmes, Lyon Octobre 2009.

Une des clés pour consolider les réponses qui pourront être apportées dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, réside dans une meilleure compréhension des déterminants de l'évolution des consommations d'eau des usagers dans leur diversité (logement individuel/collectif, locatif/propriétaire, approvisionnements alternatifs au réseau public…) et de la mesure des impacts de leurs pratiques de consommation sur le service eau potable. Ces analyses sociologiques et économiques en cours sont partie intégrante des réflexions interdisciplinaires nécessaires pour appréhender de manière globale les enjeux de l'eau potable face au changement climatique.

C- Vulnérabilité de l'estuaire de la Gironde et gouvernance des risques d'inondation

Les travaux du GIEC estiment que la hausse à long terme du niveau moyen des océans serait comprise entre 0,2 m et 0,6 m pour le XXI^{e} siècle ou pouvant atteindre 1 m à 1,20 m [37]. Ces projections de montée des eaux peuvent donner lieu à la planification d'importants aménagements de protection de zones vulnérables comme c'est déjà le cas dans certains pays comme aux Pays-Bas ou en Allemagne[27]. Les situations où la hausse du niveau de la mer se conjugue avec des événements météorologiques ponctuels peuvent créer des catastrophes qui nécessitent d'explorer des formes nouvelles de prévention des risques. La tempête Xynthia qui a touché le littoral atlantique en 2010 résulte d'une conjonction d'événements extrêmes (marée proche de l'équinoxe, fort vent d'ouest, dépression atmosphérique) provoquant une brutale et importante surcote responsable d'inondations par submersion et dégradation de digues [38]. La Gironde, qui compte 433 km de digues, protégeant 2 200 km^2 et 120 000 habitants [39][40], est particulièrement exposée à ces événements extrêmes **(Figure 10)**. Le choc social suscité par les bilans humains et économiques des tempêtes de 1999 (Martin) et 2010 (Xynthia) a rappelé aux sociétés locales leur vulnérabilité face à ces phénomènes.

Plusieurs programmes de recherche en cours portant sur l'estuaire de la Gironde seront de nature à éclairer les recompositions de la gouvernance des risques d'inondations dans l'estuaire de la Gironde. Une approche économique interroge les critères de choix et de gestion des aménagements hydrauliques pour concilier à la fois sécurité des personnes et préservation des fonctionnalités écologiques des zones humides[28]. Le programme interrégional et interdisciplinaire franco-québécois Gagilau et le programme ANR Adapt'eau[29], cherchent plus généralement à explorer des modes d'adaptation des sociétés aux variations hydrologiques de la Garonne-Gironde.

La mise à jour des interdépendances aval-amont propres à ces événements, conduit à repenser les stratégies de protection contre les inondations. La révision des Plans de Protection contre les Risques d'Inondation (PPRI) et la mise en chantier d'un Programme d'Action et de Prévention des Inondations (PAPI) pour 2014, le futur Schéma de Gestion des Eaux (SAGE)[30] de l'estuaire de la Gironde, les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU*)*, figurent notamment parmi les outils de gouvernance des risques sur le territoire de l'estuaire de la Gironde. Dans ce cadre, diverses stratégies guidant la gestion des territoires humides riverains de l'estuaire sont en cours de définition : renforcement d'aménagements de protection dans certaines zones stratégiques, classement de zones inondables inconstructibles, retrait programmé de zones constructibles, libération de zones d'expansion de crues destinées à protéger des zones plus urbanisées et/ou à rétablir certaines fonctionnalités écologiques des zones humides.

Les choix de réduire les risques dans certaines zones à enjeux (dont les zones urbanisées de la CUB - **Figure 10**) créent des obligations et des contraintes pour d'autres zones aval de l'aire urbaine dans

27. http://www.deltacommissaris.nl/english/topics/

28. Programme MARGO « GOuvernance des MARais ». Programme National « Eaux & Territoires I » – CNRS-Irstea, (P. Point Gretha, sous la dir. de), (2008-2010) ; Programme VEGGA. Programme National « Eaux et territoires II », (T. Rambonilaza, sous la dir. de), (Irstea ADBX), (2010-2012).

29. GAGILAU : Quels fleuves et estuaires pour demain ? Garonne-Gironde/Saint-Laurent. Programme interrégional Aquitaine-Midi-Pyrénées (D. Salles, G. Blanc, F Gilbert, sous la dir. de) (2010-2013)/Programme ANR Adapt'eau (D Salles, sous la dir. de) (2011-2014).

30. http://www.sage-estuaire-gironde.org

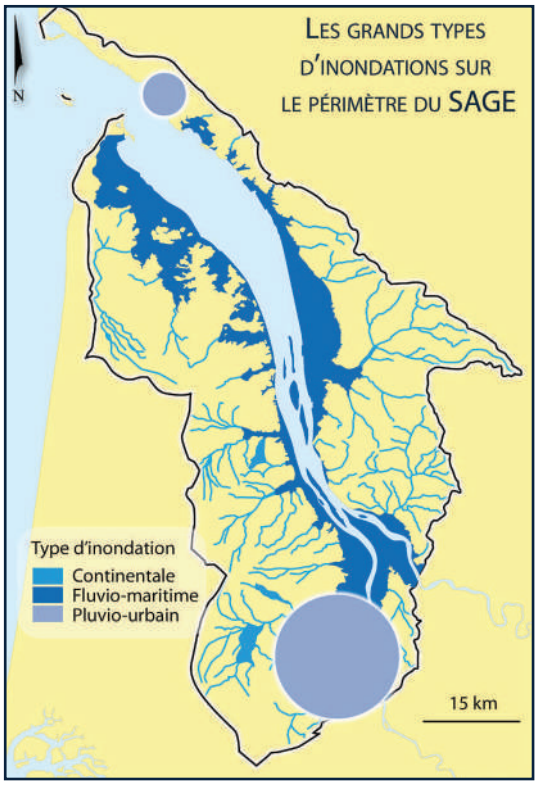


Figure10 : *Les grands types d'inondation sur le périmètre du SAGE Estuaire Gironde (Source : PAGD Smiddest).*

l'estuaire. Ainsi les communes désignées comme devant assumer une exposition aux risques d'inondations se voient limitées dans leurs capacités de développement résidentiel et économique, alors que le renforcement localisé de digues reporte les risques sur des territoires voisins. De ce fait, les charges financières et les impacts sur les usages des zones riveraines sont distribués de manière très différenciée selon les zones de l'estuaire. Ces intérêts contradictoires entre enjeux urbains et agricoles notamment suscitent des conflits qu'illustrent les difficultés d'adoption du SAGE Estuaire de la Gironde.

Face aux risques liés aux événements extrêmes, la transformation du système de gouvernance des aménagements de l'estuaire constitue le principal défi de la gestion du risque inondation. Avec les réformes réglementaires et juridiques de la gestion hydraulique engagées depuis 2004, chacune des nombreuses organisations institutionnelles de l'estuaire voit son rôle et sa place redéfinis dans la gestion des zones humides estuariennes. Témoignage de ce millefeuille complexe, ce sont plus de trente entités, correspondant à des unités spatiales, qui sont directement concernées par la gestion des digues et des zones humides sur le territoire estuarien[31]. Par ailleurs, les propriétaires fonciers privés, (individuels ou regroupés en associations syndicales autorisées), sont parmi les principaux acteurs de la gestion effective des zones humides estuariennes (hors surfaces Port Autonome de Bordeaux et Conservatoire du littoral). Plusieurs programmes de recherche de sciences humaines et sociales en cours (programmes Liteau Beest, Eaux et Territoires Margo et Vega, ANR Adapt'eau) seront rapidement en mesure d'éclairer cette recomposition de la gouvernance des risques d'inondations dans l'estuaire de la Gironde.

La tendance à l'utilisation systématique d'indicateurs intégrés pour la gestion des ressources et des espaces naturels (type *bon état écologique* pour l'eau) participe d'un mouvement de standardisation des critères de qualité de l'environnement, de définition des risques, alors que coexistent dans la société des visions et des conceptions très différenciées pour qualifier les espaces estuariens et les fonctionnalités qui leur sont associées. Face aux changements globaux, la persistance de malentendus entre visions de l'expertise et celles de la société sur les indicateurs à mobiliser, contribue à rendre plus complexe la recherche d'options d'adaptation au changement climatique. Ces options doivent être à la fois efficaces pour la gestion des risques environnementaux et perçues comme socialement et économiquement légitimes et justes par les usagers riverains.

Autre instrument de connaissance et de planification, l'outil de modélisation des phénomènes d'inondations (RIG référentiel inondation de la Gironde) promu par le SMIDDEST vise à simuler les conséquences d'événements météo extrêmes, en prenant en compte des phénomènes du passé. Il vise à disposer des connaissances nécessaires pour établir un schéma de gestion des zones inondables à l'échelle du bassin.

31. Pour la partie de l'estuaire rattachée au département de la Gironde, 37 % des infrastructures sont gérées par des syndicats mixtes, 12 % par des collectivités territoriales, 31 % par des associations syndicales autorisées (associations de propriétaires), 20 % par des propriétaires privés.

V- Tourisme, loisirs et patrimoine naturel : évolution des pratiques et gestion des risques

De plus en plus de travaux attestent que tourisme et loisirs en général sont deux formes complémentaires d'utilisation du temps libre[32], qui sont couplées sous l'effet de facteurs tels que l'augmentation du temps libre, la réorganisation des conditions de travail ou encore l'amélioration des transports [42]. La qualité de l'environnement et du patrimoine naturel sont des composantes à part entière de la demande, voire sont à l'origine de segments très spécifiques qualifiés d'écotourisme, de tourisme vert ou encore d'activités de pleine nature.

L'Aquitaine est une région attractive du point de vue touristique ; elle se situe au 5e rang national avec 95 millions de nuitées en 2010 [43]. C'est une des rares régions à offrir les 4 types de destinations (campagne, mer, montagne, ville). Elle affiche un patrimoine naturel remarquable avec, de façon non exhaustive, 230 kilomètres de plages de sable, la côte rocheuse du Pays Basque, le plus grand massif forestier, la plus haute dune d'Europe, des lacs et des zones humides, la montagne pyrénéenne (cf. chapitre 7).

La saisonnalité de la demande demeure très marquée, les trois quarts des visites ayant lieu en Juillet-Août. La clientèle est essentiellement de proximité, avec une majorité de visiteurs provenant d'un grand quart Sud-Ouest (Aquitaine, Midi-Pyrénées et Centre-Ouest). La concentration s'exprime également d'un point de vue spatial, puisque le littoral attire plus de 40 % des nuitées tandis que les zones intérieures se partagent le reste (8 % pour le Périgord, 6,8 % pour l'intérieur des Pyrénées Atlantiques, unique territoire montagnard, et moins de 4 % pour les Landes). Bien que les contours de la filière soient relativement délicats à cerner[33], on estime que le tourisme a généré 48 600 emplois salariés en 2005 avec de très fortes variations saisonnières[34]. Le chiffre d'affaire se situe entre 4,6 milliards et 6 milliards d'euros selon les sources.

Au quotidien, les loisirs des Aquitains ne suivent pas exactement les mêmes tendances. En 2006 une enquête indiquait ainsi que 87 % des habitants fréquentaient la campagne durant leur temps libre (soit plus de 2,6 millions d'individus) contre 78 % pour la forêt [21]. Le littoral apparaissait en 3e position avec 61 % de réponses, devant la montagne (environ un aquitain sur deux). La distance est un facteur décisif : les taux de visites diminuent régulièrement avec l'éloignement aux espaces naturels [21][44] tandis qu'en forêt, le déplacement moyen est inférieur à 30 kilomètres (aller-retour). Ces espaces « de tous les jours », qui n'affichent pas nécessairement de caractères exceptionnels, définissent un cadre de vie qui est donc très apprécié. À titre d'illustration, on estime que l'ensemble des espaces boisés d'Aquitaine ont accueilli environ 100 millions de visites en 2006 et, sur le littoral, de nombreuses plages « naturelles » rivalisent avec les stations balnéaires et affichent des chiffres de fréquentation supérieurs à 300 000 visites, et pouvant atteindre les 500 000 visites, pour les seuls mois de Juillet et Août[35] [44]. L'Aquitaine présente en outre certaines aménités qui sous-tendent des activités très spécifiques : sports de nature[36], ornithologie, chasse…

32. Une distinction courante réside dans l'horizon temporel retenu : suivant les définitions statistiques, un touriste passe une nuit au moins en dehors de son domicile, ce qui n'est pas le cas de toutes les pratiques de loisirs. De même, le fait touristique intègre des déplacements dont le motif n'est pas strictement récréatif (tel que les déplacements professionnels ou ceux entrepris pour raison de santé) que nous n'aborderons par ici.
33. On doit en effet intégrer des activités qui ne dépendent que partiellement du tourisme.
34. Le nombre d'emplois grimpe jusqu'à 72 400 durant le pic de la saison estivale, avec un recours massif de saisonniers. Ramené en équivalent temps plein, le chiffre annuel s'établit à 37 100 environs (source INSEE).
35. La plage du Porge, qui est la plus proche de la communauté urbaine de Bordeaux, accueillerait près de 1 million de visites chaque année, soit à peine moins que la Dune du Pilat [44].
36. La région est première en nombre de licenciés pour le surf. Elle héberge le premier cluster (système productif local) glisse de France.





Une activité de loisirs mal connue

Le tourisme est en Aquitaine, comme dans le reste de la France, un secteur d'activités relativement bien renseigné par des dispositifs d'observation spécifiques. Dans le prolongement de certains traités internationaux, des études ont même tenté d'approfondir les liens entre le tourisme et le changement climatique [45], mais la plupart de celles-ci en restent bien souvent au stade d'hypothèses sur des liens qui demeurent eux-mêmes qualitatifs. Peu d'études ont été menées en Aquitaine sur le sujet. Signalons que le GIP Littoral Aquitain a récemment initié deux réflexions prospectives, dont une spécifique au tourisme, qui abordent en partie le sujet du changement climatique[37]. La connaissance des loisirs au quotidien, qui renvoient à des pratiques informelles, non organisées et ne s'appuyant pas nécessairement sur des transactions marchandes, apparaît encore plus réduite. À ce jour, des données aussi essentielles que les flux de fréquentation font cruellement défaut. Ceci dit, les quelques études qui se sont intéressées aux usages récréatifs sur les espaces naturels [20], montrent que le phénomène est loin d'être négligeable et permettent d'esquisser plusieurs hypothèses.

Un potentiel touristique inégalement exposé au changement climatique

La vulnérabilité de l'activité touristique au changement climatique est le reflet d'une double diversité, celles des effets environnementaux (y compris les écosystèmes qui portent les espaces de pratiques) d'une part et celles des acteurs d'autre part. Il est généralement admis que le développement d'activités touristiques et récréatives en lien avec des facteurs naturels présente un caractère risqué. Il y a quelques années, l'*Ifen*[38] constatait déjà que les communes dites « touristiques » affichaient quasiment toutes une exposition à un risque quelconque et qu'elles étaient nettement plus nombreuses que la moyenne à en concentrer plusieurs [45]. Notons que les espaces les plus attractifs sont aussi souvent ceux où la diversité des milieux est la plus élevée, ce qui d'une certaine façon, tendrait à en accroître le degré d'exposition aux risques. Sur le littoral aquitain par exemple, l'accès aux plages de sable est exposé aux risques d'érosion mais aussi aux incendies de forêts[39]. De ce fait, des inégalités territoriales fortes sont à attendre dans le futur vis-à-vis du potentiel touristique.

Des modifications météorologiques significatives, imputables au changement climatique, sont inévitablement les premiers facteurs considérés comme pouvant modifier l'activité touristique, même s'il reste encore difficile d'en évaluer les conséquences, faute d'études précises. La plupart des enquêtes touristiques rappellent en effet que le « soleil et le climat » sont parmi les principaux motifs de déplacement des touristes en Aquitaine [43]. Certaines activités (baignade, ski) semblent toutefois plus exposées que d'autres (promenade en forêt) [21][43].

La question de la disponibilité des ressources naturelles va également se poser. Le premier stade se limite à des restrictions d'accès, en particulier pour l'eau qui constitue un facteur d'attractivité essentiel de la fréquentation des espaces naturels et pas seulement sur le littoral[40] [21]. L'enneigement des montagnes est un autre point qui devrait poser problème dans le futur[41]. Dans les cas extrêmes, l'existence même de la ressource est susceptible d'être menacée, à l'instar des plages qui sont soumises au risque d'érosion. Les contextes géosédimentaires ainsi que les formes d'artificialisation montrent un éventail varié de situations et en Aquitaine, les plages urbaines apparaissent parmi les plus vulnérables vu qu'elles accueillent environ la moitié de la fréquentation touristique [44].

37. Analyse prospective pour un schéma des plans plages sur le littoral Aquitain. Étude prospective Tourisme à l'horizon 2020-2040.

38. Ex Institut Français de l'Environnement (IFEN), devenu aujourd'hui Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS).

39. L'argument s'inverse si l'on considère que la diversité des ressources permet, ponctuellement, de pallier le déficit de l'une d'entre elles (on pense par exemple au développement des pratiques « hors ski » à la montagne). Ce qui suppose des substitutions possibles entre les usages.

40. En forêt par exemple, la présence d'un plan d'eau était le premier motif de déplacement en 2006, bien avant la diversité des essences ou la nature des équipements. En outre, plus de 4 sorties sur 10 en forêt associaient à la visite en forêt un détour par un plan d'eau ou une rivière.

41. Certaines études estiment en effet que les périodes d'enneigement des stations situées aux alentours de 1 500 mètres d'altitude (c'est-à-dire toutes les stations des Pyrénées-Atlantiques) seraient réduites d'un mois [45].

Les effets sur la diversité des paysages et des habitats sont moins évidents à prédire. En forêt, l'attachement des populations au massif des Landes de Gascogne n'est pas incompatible avec le souhait d'une certaine diversification des essences de bois [46]. Par contre, l'extinction ou la raréfaction d'espèces sensibles induira inévitablement avec elles la disparition de pratiques qui, si elles ne touchent pas nécessairement une population importante, n'en ont pas moins une valeur culturelle et sociale forte (telle que la chasse aux oiseaux migrateurs).

Ceci nous permet d'évoquer les multiples traductions économiques et sociales de la vulnérabilité des activités touristiques au changement climatique : au-delà des pertes financières pour les acteurs de la filière, les désagréments touchent aussi (et surtout) les populations locales qui se voient privées d'une partie de leur activité de loisirs. À l'extrême, la sécurité même des personnes pourrait être menacée[42] et certaines activités traditionnelles disparaître (cas de cueillettes ou de chasses très spécifiques par exemple) [46]. L'opposition entre activités marchandes et non marchandes est d'ailleurs relativement artificielle puisque plusieurs études ont montré que ces dernières sont aussi porteuses de bénéfices économiques [47].

Enfin, la vulnérabilité des activités touristiques au changement climatique sera fonction des stratégies mises en place par les acteurs et notamment les usagers eux-mêmes qui ont la possibilité d'adapter leurs déplacements pour faire face aux changements environnementaux. Les visiteurs seront néanmoins contraints par les possibilités de substitution entre les sites et, de ce point de vue, la montagne offre certainement moins d'options de report que le littoral ou la forêt[43]. Les limites sont également d'ordre économique et social. Par exemple, les touristes et les résidents n'ont pas nécessairement les mêmes éventails de choix, les premiers ayant sans doute plus d'options de report dans l'espace que dans le temps[44], contrairement aux seconds [47][48]. Les capacités d'adaptation sont aussi matérielles et culturelles : si l'accès aux espaces naturels demeure assez largement gratuit, on sait que les catégories sociales les moins favorisées ont, d'une façon générale, une gamme de loisirs plus réduite que les autres. Enfin, l'action des gestionnaires et des acteurs de la filière touristique est également très importante et révèle des moyens assez inégaux. Sur le littoral, on a ainsi estimé que le coût d'entretien des plages pouvait atteindre 20 % du budget de fonctionnement de certaines communes[45] [44]. En forêt, les modes de financement traditionnels de l'accueil du public, y compris en forêt publique, sont aujourd'hui fortement questionnés [20][22].

Si, d'une manière générale, le secteur du tourisme a d'ores et déjà engagé une réflexion sur les effets attendus du changement climatique, on ne recense encore pas vraiment de traduction réelle en Aquitaine. Bien que la filière soit assez bien suivie au niveau régional, sur un plan statistique notamment, il reste difficile d'appréhender la vulnérabilité de l'activité touristique. Les besoins de connaissances sont encore plus importants en ce qui concerne le temps libre et les loisirs, où elles sont très limitées en dépit de premiers efforts engagés. En la matière, les enjeux portent autant sur la collecte des données de base (évaluation des flux de fréquentation) que sur la connaissance des usagers et la réponse apportée par l'offre, qu'elle émane de la puissance publique mais aussi des agents économiques privés.

42. En 1989, l'incendie qui s'est déclaré dans les forêts domaniales du Porge et de Lacanau, en Gironde, a requis l'évacuation de plus de 5 000 estivants en pleine période touristique.
43. Même pour les plages, les substitutions d'un site à l'autre ne sont pas si nombreuses (voir en particulier l'opposition entre plages « naturelles » et urbaines) [44][48].
44. Contraints par les périodes de congés.
45. Contre 2% pour d'autres [44].

Conclusion

Les éclairages proposés dans ce chapitre sur les vulnérabilités de la région Aquitaine aux impacts du changement climatique, sans prétendre à l'exhaustivité, montrent l'intérêt et la nécessité de relire les enjeux régionaux à la lumière du changement climatique. Cette relecture permet de prendre la mesure des démarches nécessaires (pour certaines déjà engagées) pour assurer la sécurité des personnes et des biens, garantir l'usage et la protection des ressources et des milieux, pérenniser les activités des territoires. Qu'il s'agisse des domaines de la forêt, de l'eau, du littoral, de la gestion des risques, les perspectives ouvertes par le changement climatique remettent en question des pratiques, des modes d'exploitation, de gestion et de protection et dessinent de nouvelles tensions entre les diverses fonctionnalités socio-économiques et écologiques. Qu'il trouve une expression dans des « événements extrêmes » ou dans une « transformation silencieuse », le changement climatique impose d'inventorier les vulnérabilités sociales, économiques et territoriales et de les considérer comme indispensables à l'élaboration des visions du futur. Il convient donc d'assumer que l'adaptation au changement climatique révèle des interdépendances territoriales inédites (terre/mer, aval/amont, zones rurales/zones urbaines…) et doit composer durablement avec des incertitudes scientifiques sur des potentiels de point de basculement ou de rupture liés changement climatique. Il est également acquis que la relecture des enjeux au prisme du changement climatique ouvre sur des sujets polémiques, suscite la confrontation d'intérêts contradictoires et est potentiellement porteuse de conflits.

Face à cet ensemble de constats, les politiques publiques sont à la croisée des chemins et le changement climatique conduit à repenser les modes de gouvernance des territoires.

Premièrement, du fait des incertitudes qu'il génère, le changement climatique rend inopérante la pensée planificatrice qui a dominé le XX^{e} siècle. Que ce soit pour le développement économique ou pour la conservation de l'environnement, il semble désormais plus rationnel de fixer collectivement des objectifs révisables au gré de l'acquisition de nouvelles connaissances et de l'émergence de nouvelles opportunités (en terme de technique et d'ingénierie écologique notamment). Les logiques de conservation et de protection de la biodiversité sont elles-mêmes à reconsidérer, à la protection d'espaces (parcs, zonages etc.) s'ajoutent ou se substituent, du fait des migrations d'espèces, des mesures de protection, de contrôle et de guidage de flux d'espèces (corridors, aires, associations d'espèces).

Deuxièmement, l'adaptation au changement climatique (et aux changements globaux) repose pour une large part sur les dispositions d'individus à changer leurs pratiques sociales et leur mode de vie. Contre un mythe technologique qui investit les techniques d'une capacité à infléchir les comportements humains et contre un esprit gestionnaire qui hypertrophie la logique économique, les conditions d'adaptation des sociétés aux conséquences du changement climatique semblent devoir relever d'une logique nouvelle de construction collective et d'appropriation individuelle. Le passage désormais quasi obligé par des phases de concertation des parties prenantes et de participation des publics cibles aux normes qu'ils vont se voir imposer ne constitue pas une condition suffisante. Encore faut-il que ces concertations soient de nature à rendre explicites les vulnérabilités, à arbitrer des interdépendances entre des intérêts contradictoires et que soient mise en discussion dans des arènes publiques la hiérarchisation des enjeux, les éventuelles compensations et contreparties à des changements de pratiques sociales ou professionnelles.

Troisièmement, les connaissances scientifiques de divers horizons, nécessaires pour éclairer les conséquences du changement climatique en Aquitaine, sont encore à des stades très divers d'acquisition. Si certaines filières (bois, construction, vin) bénéficient d'une relative bonne couverture en termes de recherche scientifique et technique, il persiste des déficits sur les innovations technologiques et organisationnelles ou plus généralement sur l'évolution de la demande économique (en bois par exemple). Les avancées scientifiques en cours sur le changement climatique, n'intègrent que depuis quelques années seulement les dimensions sociologiques, politiques et économiques qui apparaissent désormais

comme une des clés de compréhension des leviers d'action pour s'adapter au changement climatique. D'importants besoins de connaissances restent à combler sur les facteurs sociaux de la vulnérabilité des sociétés et des territoires (littoral, ville…), ou également sur les déterminants des comportements des usagers/consommateurs/citoyens, sur l'appropriation sociale des techniques émergentes, sur les usages non productifs et non marchands des ressources (bois, eau, biodiversité…), sur la gouvernance du changement climatique, sur les outils juridiques et sur l'évaluation des politiques publiques (PCET, SRAEC…).

La question des savoirs scientifiques doit également être posée en termes de capacité d'intégration interdisciplinaire des connaissances et également en termes d'évaluation d'options d'adaptation au changement climatique. Des collectifs pluralistes composés de chercheurs, d'acteurs économiques, d'acteurs publics et de représentants de la société civile, (cf. le modèle du consortium Ouranos au Québec http://www.ouranos.ca/fr/) sont nécessaires pour accompagner la définition de stratégies d'adaptation au changement climatique. Le LabEx COTE[46] porte depuis 2011 une approche intégrative des interfaces entre écosystèmes forestiers, agrosystèmes et hydrosystèmes/littoraux. Il promeut l'analyse des dynamiques à l'œuvre face aux changements globaux notamment en Aquitaine, en intégrant en particulier les enjeux socio-économiques propres au territoire.

46. LabEx COTE: Continental to Coastal ecosystems : Evolution, adaptability and governance. (A Kremer, H. Budzinski, sous la dir. de) http://cote.labex-univ-bordeaux.fr/



Crue de la Garonne, deux jours après la tempête Klaus, le 26 janvier 2009 à Marmande, en Lot-et-Garonne (© J. Matthys).



La vallée de la Garonne, proche de la confluence avec le Lot (© P. Laymond, Université de Bordeaux 3).



St-Emilion, en Gironde : vignoble emblématique de l'activité viti-vinicole de la région (© T. Aully, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 4 :

Enjeux économiques : évaluation des impacts du changement climatique

Coordination : *Jean-Christophe Péreau*
Rédacteurs : *Christophe Boschet, Luc Doyen, Gabrielle Irichabeau, Marc Leandri, Jean-Christophe Martin, Jean-Christophe Péreau, Patrick Point, Tina Rambonilaza, Denis Salles, Jean-Philippe Terreaux*

Ce chapitre analyse les concepts et méthodes qui fondent la prise de décision des acteurs privés et publics face aux impacts du changement climatique dans un contexte d'incertitude. Dans la logique économique les décisions doivent être évaluées à l'aune de leurs bénéfices et de leurs coûts. Aux difficultés d'évaluations soulevées par les impacts du changement climatique, s'ajoute la nécessaire prise en compte des critères de durabilité et d'équité intergénérationnelle combinant à la fois des contraintes socio-économiques, écologiques... Enfin, toute décision se doit d'être acceptable socialement pour garantir son application.

Introduction

Face au changement climatique et aux changements d'usage des écosystèmes (intensification agricole, surpêche, introduction d'espèces invasives, pression urbaine...), nos sociétés doivent décider de mesures d'atténuation et/ou d'adaptation à prendre dans un contexte d'incertitude. Pour comprendre et agir sur la logique des acteurs, tant privés que publics, il importe d'expliciter les processus qui sous-tendent leurs actions dans leurs stratégies d'exploitation, de régulation et/ou de conservation des ressources ainsi que des biens et services écosystémiques ou écologiques associés[1]. Ce chapitre met l'accent sur les contributions de la science économique dans le processus d'élaboration des stratégies, des scénarios, des instruments et des politiques publiques à mettre en œuvre. Cet éclairage ne saurait être l'unique prisme à travers lequel les politiques climatiques doivent être pensées et discutées mais il permet de mettre en lumière des notions clés comme l'efficacité ou l'équité intergénérationnelle.

Les biens environnementaux globaux, à l'image du climat ou la qualité de l'air, sont des biens que les individus peuvent gratuitement consommer sans que cela ne diminue la quantité disponible pour les autres individus. Dès lors, face à une dégradation de ces biens environnementaux, aucun individu ne voudra en assurer seul le financement, considérant que sa contribution est marginale comparativement au dommage global subi. Dans le cadre des négociations internationales sur le changement climatique, cela signifie que les mesures de réduction des gaz à effet de serre (GES) réalisées par les pays seront en deçà de ce qui serait souhaitable pour la planète. Comme chaque pays souhaite profiter des efforts de réduction des autres sans avoir lui-même à faire un effort, aucun pays ne sera enclin à véritablement s'engager dans des politiques contraignantes. Cette absence de coopération explique la difficulté

1. Ces services écosystémiques se décomposent en services d'approvisionnement, de régulation environnementale, de support et culturels selon la typologie adoptée par le Millenium Ecosystem Assessment.

de parvenir à un accord global [1]. Elle explique aussi la difficulté de mettre en œuvre des mesures domestiques d'adaptation aux changements globaux comme celles préconisées dans le 1er Plan National d'Adaptation au changement climatique [2]. Considérons l'exemple d'une mesure visant à construire ou consolider une digue le long d'un estuaire pour faire face à la montée des eaux. Dans la mesure où le niveau de protection de la digue dépend de tous les efforts consentis par les riverains, il conviendra de se préoccuper du riverain « maillon faible » dont l'effort individuel insuffisant pourrait pénaliser l'ensemble de l'ouvrage. Des dépenses d'adaptation comme des changements de culture ou d'usage des sols par des agriculteurs, relevant de décisions privées, doivent aussi être analysées à l'aune de leurs effets sur la biodiversité. Des mesures de réduction de l'accès à l'eau posent le problème des règles de partage qui seront acceptables et acceptées par tous les agents [3]. Tous ces exemples ont en commun d'ouvrir des espaces de négociation, de concertation et/ou de contraintes entre les autorités et les agents économiques, usagers ou non.

Les rapports de l'*Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique* (ONERC) [4] et du *Conseil Économique pour le Développement Durable* [5] soulignent la nécessité de fonder des stratégies d'action sur des procédures d'évaluation économique. Cela s'avère particulièrement important pour l'évaluation de la biodiversité indépendamment de ses usages notamment récréatifs rattachés à la forêt, au littoral et à la mer, ou de leur usage productif.

L'environnement a été longtemps perçu comme un cadre exogène de contraintes à prendre en compte dans le pilotage des activités humaines. La mise en avant d'objectifs de développement durable et de maîtrise du changement climatique impose une vision renouvelée des politiques publiques. Elles doivent être considérées au niveau du système nature-sociétés dans lequel les composantes environnementales sont vues comme des ressources. Si l'évaluation de celles-ci requiert de définir leur valeur marchande ou d'usage, il convient aussi de prendre en compte leurs contributions au fonctionnement global du système, voire leur existence même. La prise de décision doit se fonder sur des critères de durabilité en situation d'incertitude.

Enfin, la mise en œuvre de politiques publiques pour une gestion soutenable des ressources et des territoires peut s'avérer inopérante, si faute d'acceptabilité sociale, les comportements des agents ne changent pas. Cela suppose d'identifier les acteurs en jeu, la nature de leurs conflits et la façon dont ceux-ci peuvent être résolus en construisant un compromis soutenable pour toutes les parties prenantes. Nous verrons dans la dernière partie du chapitre comment il est possible d'apporter des réponses à ces questions.

I- Évaluer pour décider

Le principe de l'évaluation

Nous vivons dans un monde de rareté et nous devons faire des choix en matière de gestion des actifs naturels. Un usage plus intense d'un service délivré par un écosystème ou la protection d'une composante du patrimoine naturel se traduit par une forme de renoncement : renoncement à un autre service non compatible avec le premier ou renoncement au développement économique au profit de la conservation. Il convient donc de comparer ce qui est gagné par rapport à ce qui est sacrifié.

Les cadres d'analyse dominant pour les évaluations économiques sont l'analyse coût-bénéfice et l'analyse coût-efficacité. L'analyse coût-bénéfice renvoie à un critère intertemporel intégrant bénéfices, coûts et dommages exprimés en termes monétaires. La question sous-jacente d'une telle analyse est de savoir si les gains agrégés dans le temps d'une politique excèdent les sacrifices et les pertes qu'elle provoque. Une politique de référence est celle qui rend maximum cette différence entre les gains et les coûts. La difficulté majeure d'une telle analyse, notamment pour la biodiversité [6][7], est l'évaluation

des dimensions non marchandes qui renvoient aux méthodes d'évaluation fondées sur les coûts et les préférences individuelles des agents. Comment donner une valeur monétaire à la disparition d'une espèce ou à l'altération d'un paysage ?

L'analyse coût-efficacité peut être utilisée pour révéler la politique de coût minimal parmi celles réalisant des objectifs donnés de conservation ou d'exploitation exprimés le plus souvent en quantités. Cette approche permet d'éviter l'écueil de l'évaluation monétaire d'objectifs non marchands. Au contraire de l'analyse coût-bénéfice, qui fixe de manière endogène, en fonction des arbitrages économiques, les niveaux optimaux de ressources à conserver ou de pollution à éliminer, l'analyse coût-efficacité repose sur des objectifs exogènes fixés par des experts ou par un consensus sociopolitique, comme l'illustre le débat international sur le seuil de concentration de GES à ne pas dépasser (voir Exemple 1).

L'évaluation économique des impacts du changement climatique

Le 1er Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) de juillet 2011 se compose de fiches-action mettant en avant des mesures phares pour différents domaines (eau, forêt, biodiversité) [2]. Le PNACC ne propose pas d'évaluation du coût financier pour les préconisations ; un montant global de 171 millions d'euros est évoqué sans précision (page 18) pour tout le territoire national. Le rapport de l'ONERC en 2009 indique quelques éléments chiffrés [4]. La démarche consiste à évaluer les impacts physiques du changement climatique sur les rendements de certaines ressources, puis à les traduire en termes de volume de production et enfin à les évaluer monétairement à partir d'un prix moyen de référence ou d'une valeur tutélaire issue des conclusions du Centre d'Analyse Stratégique. Cette dernière étape est très délicate et les évaluations menées sur le blé, le maïs, le vin ou la forêt n'ont qu'une valeur illustrative. Plus fondamentalement une mise en garde est nécessaire sur le transfert de valeurs, c'est-à-dire sur l'utilisation de valeurs obtenues dans un contexte donné pour un autre contexte. Afin d'éviter ce transfert souvent peu robuste, la production d'évaluations locales doit être encouragée, c'est pourquoi la démarche du PNACC présente surtout l'intérêt de construire des bases de données et des indicateurs nécessaires pour une aide à la décision ancrée dans la réalité économique et écologique locale.

Du changement climatique aux changements globaux

Les changements globaux incluant changement climatique et changements d'usage ont conduit à des modifications importantes de la biodiversité marine et terrestre. La surpêche, l'intensification et la déprise agricoles, les invasions d'espèces induisent des évolutions préoccupantes avec notamment des phénomènes d'extinction, d'érosion, de déclin de la biodiversité [8]. Ces évolutions d'espèces, de peuplements, de communautés ou d'écosystèmes ont des conséquences sur les sociétés humaines via les dommages, menaces et risques qu'elles font peser sur les biens économiques et les services écosystémiques fournis par cette biodiversité. Des valeurs d'usage direct notamment alimentaire, énergétique ou médical, des valeurs d'usage indirect lié à la pollinisation, aux cycles de l'eau ou du carbone, des valeurs récréatives, culturelles ou esthétiques, valeurs d'option pour un usage futur et capacité d'adaptation peuvent être ainsi perdues ou affaiblies et ce de manière plus ou moins irréversible. Beaucoup de travaux et d'outils sont disponibles pour mesurer l'impact des activités humaines sur l'écosystème, mais on dispose en revanche de peu de résultats et d'outils permettant d'évaluer l'impact des écosystèmes sur le bien-être humain. L'évaluation économique est alors nécessaire pour construire des indicateurs objectifs de ces impacts et pour guider les orientations des politiques de conservation et de préservation.

Si la biodiversité est le support de la production d'autres biens et services écosystémiques, la plus grande partie de la valeur économique est rattachée à sa valeur de non-usage. Cela est particulièrement évident quand la biodiversité en jeu concerne une espèce ou un écosystème emblématique, menacé et/ou sans équivalent. Dans les autres cas, comme les forêts tempérées et les écosystèmes littoraux et marins, seule l'expérience empirique peut montrer que leurs valeurs économiques non marchandes sont

significatives et importantes pour servir d'argumentation ou de justification à leur préservation ou à leur restauration. Cette évaluation des valeurs de non-usage de la biodiversité pour ces écosystèmes est au cœur des discussions – sur l'avenir des dits écosystèmes – entre les usagers, les non-usagers, les acteurs locaux et les instances politiques décisionnelles.

Les méthodes de simulation du marché

Pour une large partie des services écosystémiques, le fait qu'il n'y ait pas de coût de production de référence implique l'échec du marché dans l'allocation de ces ressources. Pour de nombreux acteurs, l'absence d'étiquetage prix se traduit par des comportements guidés par un prix nul alors qu'il est en fait simplement non apparent. Ces ressources ne bénéficient pas du mécanisme révélateur de valeur que constitue le marché. Elles relèvent du non-marchand. Ceci génère des distorsions considérables dans l'affectation des ressources. Ainsi un actif naturel, une zone humide par exemple, ayant deux usages : un usage marchand et un usage non marchand verront l'usage marchand systématiquement privilégié au détriment de l'usage non marchand. Un des grands enjeux est donc de révéler la valeur des services non marchands et de permettre une prise en compte exhaustive dans le processus de décision à l'aide de méthodes de simulation de marché [9]. On distingue les méthodes basées sur l'observation des comportements et celles qui relèvent d'une approche plus hypothétique basées sur des déclarations ayant un statut d'intentions.

Les méthodes basées sur les préférences révélées regroupent les méthodes des dépenses de protection et de changement de productivité. La valeur d'un bien environnemental se déduit des dépenses engagées par les agents, pour se prémunir ou atténuer les conséquences de la dégradation du bien. Les méthodes liées au changement de productivité consistent à évaluer la perte de valeur d'un bien à l'aune du changement de productivité induit par sa dégradation (voir Exemple 2).

Les méthodes basées sur les préférences déclarées recouvrent les méthodes dites d'évaluation contingente et d'expérience de choix. Les premières consistent à évaluer la valeur d'un bien à partir de questions posées aux agents sur les montants qu'ils seraient prêts à accepter en compensation d'un bien de moindre qualité ou de façon symétrique ce qu'ils seraient prêts à payer pour garder le bien environnemental intact. Les méthodes d'expérience de choix partent des différentes caractéristiques qui composent un bien. L'idée est de proposer à des agents, différentes alternatives possibles basées sur des combinaisons de caractéristiques auxquelles il donne plus ou moins de valeur. Il est alors possible d'attribuer une valeur à chaque caractéristique du bien et ainsi la valeur au bien par sommation des caractéristiques.

Les méthodes des coûts de remplacement consistent à évaluer le coût induit par le remplacement, le coût de restauration ou le coût de relocalisation d'un actif environnemental détruit.

Les valeurs qui émergent des simulations du marché doivent être appréhendées non comme des résultats indiscutables, mais comme des éléments d'information destinés à guider, et non à dicter, la prise de décision. L'analyse microéconomique constitue d'abord un « langage de négociation » [10] qui permet d'expliciter les enjeux en présence.

Exemples régionaux et discussion de la pertinence des méthodes

Exemple 1 : Estimation des coûts d'opportunité des projets de construction des infrastructures routières et ferroviaires de la région Aquitaine sous contrainte d'un plan climat pour la période 2007-2013 [11]

Le Conseil régional d'Aquitaine a mis en place un plan climat régional afin de réduire ses émissions[2] de 2 883 kT eq. CO_2 sur la période 2007-2013. Le secteur des transports devrait contribuer à hauteur de 24 % aux économies d'émissions régionales de GES. Parallèlement, face à l'augmentation du

2. Kilo tonne équivalent CO_2.

trafic prévue au sein de la région, et afin d'éviter une hausse trop importante des coûts de congestion, les différents maîtres d'œuvre de la Région Aquitaine ont décidé de mettre en œuvre des projets de construction d'infrastructures de transport. La décision de réalisation de ce type de projet repose généralement sur l'analyse coût-bénéfice, c'est-à-dire sur la comparaison entre les bénéfices et les coûts engendrés par la construction et l'utilisation de l'infrastructure de transport, en intégrant les effets économiques au sens strict (coût d'investissement), mais également les effets sur le bien-être de la société, qu'ils soient positifs ou négatifs. Ces derniers incluent ainsi les gains en sécurité et en temps et les coûts environnementaux (bruit, pollution atmosphérique, émissions de GES) qui sont monétarisés à partir des prix tutélaires[3]. Cette méthodologie est reprise du document « Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économiques des grands projets d'infrastructure de transport » du 25 mars 2004 élaboré par le ministère de l'équipement et des transports. La décision de mise en œuvre du projet dépend alors de la différence entre l'ensemble des bénéfices et l'ensemble des coûts, en prenant en compte leur date d'occurrence. Un projet est décrété socialement désirable si cette différence est positive, et cela même s'il en résulte une hausse des émissions de GES. Or, si la région veut honorer ses engagements de réduction des émissions de GES énoncés dans son plan climat, elle doit les compenser à travers la séquestration de carbone (reforestation et/ou séquestration souterraine) ou l'économie supplémentaire d'émissions (développement des énergies renouvelables ou maîtrise énergétique). L'analyse coûts-bénéfices standard n'intègre pas cette question et il convient de développer une approche coût-efficacité permettant de connaître le coût de compensation des émissions émanant de la réalisation de ces projets. Pour mesurer ce coût, Martin et Point [11] calculent le coût qu'il faudrait supporter si on devait réduire ce supplément d'émissions par une diminution de l'activité économique. Dans un contexte de ralentissement économique, ce scénario est purement hypothétique. L'objectif est de proposer aux élus un repère dans le montant de budget qui doit être alloué aux projets de compensation des émissions de GES.

Pour être pertinente, cette méthodologie nécessite la construction d'une maquette régionale retraçant tous les flux économiques au cours d'une année à partir d'un tableau d'entrées-sorties [12]. Il est en effet nécessaire de pouvoir prendre en compte les effets directs des projets mais aussi tous les effets indirects sur le reste de l'économie : modification des prix relatifs, variation de la production, des emplois et des émissions de GES. Cette méthodologie repose aussi des postulats significatifs (modèle statique de quantités, linéaire, à technologie fixe, à rendements constants) qui incitent à une certaine prudence dans leur interprétation.

Les estimations réalisées par les auteurs [11] sur les infrastructures de transport de la région Aquitaine sur la période 2007-2013 concernent quatre grands projets routiers (2x3 voies sur la rocade bordelaise et sur l'A63 dans le Pays Basque, la transformation de la RN10 en autoroute A63 dans le département des Landes, la nouvelle autoroute A65 entre Langon et Pau) et 6 grands projets ferroviaires (la LGV Bordeaux-Angoulême, la LGV Bordeaux-Espagne et autres travaux d'accompagnement et de modernisation). À partir d'enquêtes d'utilité publique sur les coûts d'investissement et d'études sur les prévisions de trafic pour la région Aquitaine, l'augmentation de valeur ajoutée résultant de la construction des infrastructures a été estimée. Pour un coût global d'investissements, supporté par les acteurs publics et privés, de 1 843 M€$_{2001}$ pour les projets routiers et de 1 546 M€$_{2001}$ pour les projets ferroviaires, la hausse de la valeur ajoutée est comprise entre 1 600 M€$_{2001}$ et 1 700 M€$_{2001}$ et une création nette d'emplois comprise entre 30 000 et 31 000 pour la période 2007-2013. Cependant, la réalisation de ces infrastructures va également impliquer un accroissement des émissions de GES compris entre 1 000 kT eq. CO_2 et 1 700 kT eq. CO_2 pour la période considérée. La présence d'un plan climat exige donc une compensation de ces émissions. Le coût que cela représenterait par une réduction de l'activité productive est compris entre 1 920 M€$_{2001}$ et 3 592 M€$_{2001}$ pour les projets routiers sur la période 2007-2013 selon le scénario d'augmentation du trafic retenu et de 225 M€$_{2001}$ pour les projets ferroviaires. Ces montants indiquent l'enveloppe financière maximale qui doit être mobilisée pour financer la mise en œuvre des projets de compensation au niveau de la région Aquitaine.

3. Ainsi pour les émissions de GES, le prix tutélaire de la tonne de carbone est de 100 €, ce qui correspond à la valeur de la taxe qui permettrait à la France de satisfaire ses engagements de réduction d'émissions issus du protocole de Kyoto. Une tonne de carbone est équivalente à 3,67 tonnes de CO_2.

Exemple 2 : Évaluation économique d'une variation de la température de l'eau sur la production des entreprises ostréicoles arcachonnaises : méthode du changement de productivité [13]

Le bassin d'Arcachon est le deuxième centre conchylicole français pour la fourniture de naissains (ou de larves) d'huîtres creuses issus du captage naturel et se caractérise par une importante activité de captage de naissain pour près de 80 % des firmes ostréicoles arcachonnaises (Recensement de la Conchyliculture, 2001). Cette activité dépend fortement de la température de l'eau qui explique 40 % de la variabilité de la quantité de naissain captée. Sur la base d'une relation empirique positive entre la variation de la température de l'eau et l'intensité de captage[4] mise en évidence par Auby et Maurer [14], une évaluation économique a été réalisée sur l'impact d'une variation de la température de l'eau de -2 °C et de +2 °C, par rapport à la température en 2000, sur la production apparente (égale aux ventes nettes des achats de naissain, huîtres de 18 mois, huîtres avec ou sans marquage sanitaire) et sur la vulnérabilité des firmes. Cette étude permet notamment de tester la viabilité des stratégies des firmes face à une possible manifestation locale du changement climatique.

L'évaluation économique de cet impact climatique a été menée par une approche en termes de fonction de production où la température est considérée comme un facteur de production environnemental. Une première étape a consisté à modéliser le cycle sur 3 ans de production d'huîtres commercialisables à partir de la quantité de naissains captés au cours d'une saison de reproduction qui dépend de la température et du nombre de collecteurs posés, ce qui dans sa version simplifiée donne la **figure 1**.

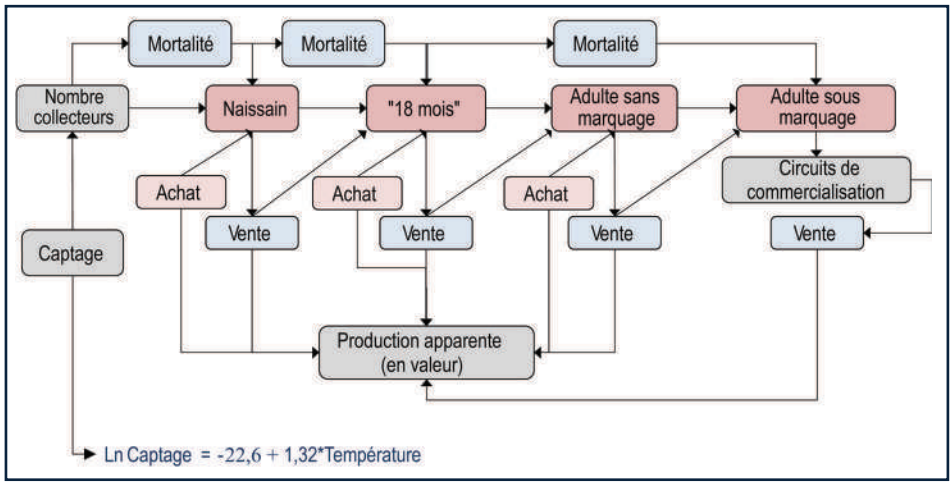


Figure 1 : *Modèle de cycle de production d'huîtres commercialisables.*

L'évaluation a été menée sur la base des taux de mortalité, des achats et ventes à chaque stade de développement, des taux de commercialisation ainsi que des prix de vente pour chaque circuit de distribution observés en 2001. La collecte et le suivi de ce type de données seraient à entreprendre sur une longue durée.

Les résultats de l'évaluation sont décomposés selon le type des firmes. Concernant les entreprises qui ne vendent que du naissain, les résultats montrent que la production apparente baisse faiblement dans le cas d'une variation négative de la température alors que la production apparente augmente fortement dans le cas d'une variation positive de la température. La vente exclusive de naissain semble donc être une stratégie de spécialisation qui limiterait l'impact d'un changement des conditions de température. Concernant la vente d'huîtres creuses sans marquage sanitaire, les résultats soulignent un fort impact de la production apparente et donc des revenus générés pour une variation aussi bien positive que négative de la température. Une spécialisation dans cette unique activité peut s'avérer risquée en cas de périodes consécutives où la température de l'eau serait inférieure à la température de référence. Enfin, s'agissant

4. Cette relation s'écrit : ln (Captage) = -22,6 + 1,32 * Température. Le coefficient de corrélation est égal à 0,65 et est significativement différent de 0.

des entreprises qui pratiquent la vente d'huîtres adultes pour la consommation, les résultats montrent un faible impact de la production apparente à une variation positive ou négative de la température. La pratique de cette activité semble donc être une stratégie de spécialisation permettant aux entreprises de réduire les risques liés à une modification des conditions de température de l'eau lors de la saison de reproduction. Bien évidemment, ces résultats doivent être interprétés avec précaution. L'évaluation se fonde sur des données de 2001 et n'intègre donc pas les épisodes non expliqués de surmortalité du naissain et des huîtres adultes qui ont affecté la filière ostréicole depuis ces dernières années.

Notons que l'ostréiculture, comme la pêche, se caractérise par l'exploitation d'une ressource naturelle commune (en l'occurrence la capacité trophique du milieu), ce qui génère des externalités négatives entre les exploitants *via* le milieu naturel. Il en résulte une sur-exploitation de la ressource qui prend ici la forme d'une surcharge des parcs qui induit une dissipation, au moins partielle, de la rente de la ressource. Une analyse de ces questions en termes de conflit d'usage ouvre la voie à des recherches futures.

II- Décider sur la base de critères de durabilité

Le taux d'actualisation et le poids donné au futur

L'un des obstacles à surmonter pour lutter contre le changement climatique réside dans le décalage temporel très fort entre le moment où les efforts d'atténuation sont réalisés et celui où leurs effets se feront ressentir (dans 50 ans ou plus). Par le biais de cette asymétrie, la manière dont nous valorisons monétairement aujourd'hui les dommages futurs est fortement conditionnée par la valeur du taux d'actualisation, un paramètre fondamental en économie qui mesure le poids que nous donnons au futur dans nos choix. Si le bien-être des générations futures nous importe peu, les conséquences négatives du changement climatique, quel que soit leur coût économique concret, pèseront très peu dans nos décisions. Les controverses autour du rapport Stern en 2006 sur le changement climatique [15] ont montré à quel point l'estimation monétaire de l'impact du changement climatique dépendait du taux d'actualisation choisi.

Commandé en 2006 à l'économiste Nicholas Stern par le gouvernement britannique pour apporter un éclairage économique sur la question du changement climatique, le rapport Stern fait une revue exhaustive des enjeux économiques internationaux des politiques de réduction de GES et d'adaptation [15]. Le rapport s'appuie sur une analyse coûts-bénéfices menée à l'échelle de la planète pour évaluer l'efficacité économique des politiques de lutte contre le changement climatique. Cette approche, fondée sur le couplage de modèles économiques et climatiques, montre que le coût des efforts à mettre en œuvre immédiatement serait largement compensé par l'ampleur des dommages climatiques ainsi évités dans le futur. Stabiliser la concentration de GES à 500-550 ppm eq. CO_2 d'ici 2050 coûterait environ 1 % du PIB mondial par an en moyenne mais permettrait d'éviter des dommages qui représenteraient, selon les scénarios climatiques, 5 à 20 % du PIB mondial annuel. Ces résultats, qui plaident en faveur d'une action politique forte et d'une régulation accrue des émissions de GES et qui ont été approuvés par plusieurs prix Nobel d'économie, ont été largement diffusés internationalement. Cependant ils ont été également contestés par une partie de la communauté des économistes qui leur reproche d'être conditionnés par la valeur très faible retenue pour le taux d'actualisation. Ce paramètre, qui pondère l'importance économique des gains et pertes qui ont lieu dans le futur, détermine en effet *a priori* la pertinence d'une politique dont les effets sont ressentis à moyen ou long terme et reflète nos préférences pour l'équité intergénérationnelle. Comme l'a montré Godard [16] la véritable question au cœur de la controverse qui a entouré ce rapport est finalement une question d'ordre philosophique, qui porte sur le statut à accorder aux générations futures dans les décisions présentes.

On peut également montrer qu'en présence d'un taux d'actualisation élevé, il pourrait être « optimal » (en référence à un critère de maximisation d'une rente) de laisser la pollution s'accumuler au-delà d'un seuil irréversible [17] ou de mener une ressource renouvelable ou épuisable à son extinction [18]. Bien évidemment, la seule optimalité ne saurait justifier ce choix extrême pour la société. Cela plaide surtout pour le développement de nouvelles approches.

Le choix du taux d'actualisation est également critiquable du point de vue de l'équité intergénérationnelle car il induit une préférence pour le présent préjudiciable pour les générations futures et la conservation des ressources naturelles [19].

La durabilité entre équilibres, optimalité et viabilité

Les approches d'équilibre et l'étude des états stationnaires constituent une démarche importante et historique pour traiter de la durabilité en environnement. La **figure 2** indique les montants possibles de prélèvement soutenable (en ordonnée) correspondant à différents montants de stock en tonnes (en abscisse). Il est ainsi possible de mettre en évidence différents équilibres stationnaires, comme le prélèvement maximal soutenable (MSY), le prélèvement qui maximise le profit (MEY) ou l'équilibre bionomique où la rente est totalement dissipée (OA). Enfin en l'absence de prélèvement, le stock maximal est donné par la capacité de charge de la ressource notée K. Ces équilibres sont des concepts de référence pour la gestion des ressources renouvelables [20]. Néanmoins ces approches stationnaires ont le défaut d'être trop statiques et de s'appliquer surtout à un cadre déterministe. Malgré ces limites, ces concepts sont néanmoins encore abondamment mobilisés pour la gestion des pêches par exemple.

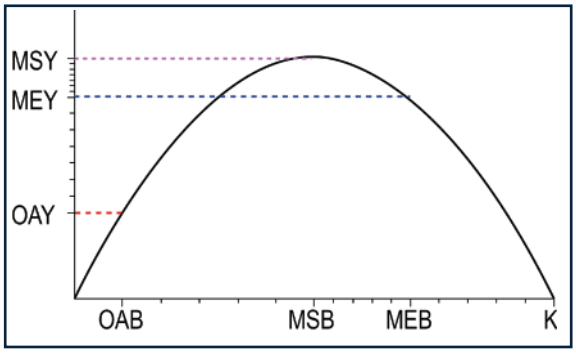


Figure 2 : *Équilibres de référence dans la gestion d'une ressource renouvelable. Dans le plan (biomasse, capture), aux niveaux de biomasse (B) en accès libre (OAB), maximum soutenable (MSB), maximum économique (MEB) correspondent des prélèvements (Y) notés OAY, MSY et MEY.*

Des approches fondées sur l'idée de faisabilité, d'acceptabilité ou de sécurité comme la viabilité peuvent s'avérer fécondes pour aborder la durabilité [21]. Elles présentent l'avantage de s'affranchir du choix délicat d'un taux d'actualisation et de se restreindre à des trajectoires stationnaires. Ces approches se focalisent sur la compatibilité des dynamiques en jeu avec des contraintes représentant la bonne santé et la sécurité des systèmes écologiques et économiques. Ces contraintes sont souvent écologiques comme les seuils d'extinction inspirés de l'analyse de viabilité des populations. L'impératif de respect de ces seuils écologiques (seuil de précaution, nombre d'espèces, indicateur de biodiversité) peut être alors combiné au respect de seuils socio-économiques (profitabilité garantie des exploitations, sécurité alimentaire, nombre d'exploitants). Leur analyse dans un cadre dynamique qui traduit les évolutions conjointes des différents systèmes permet de délimiter l'ensemble des décisions qui satisfont simultanément et dans le long terme des exigences écologiques, économiques et sociales. En ce sens cette approche multicritère de coviabilité rejoint la conception la plus intuitive du développement durable.

Ces approches aspirent à dépasser l'antagonisme apparent entre l'écologie, souvent préoccupée par des questions de survie, de conservation, et l'économie plutôt attachée à la recherche de l'efficience et de l'optimalité. Les exemples 3 et 4 proposent des illustrations et un cadre de référence permettant à terme d'y intégrer les effets du changement climatique.

Exemple 3 : Gestion halieutique dans le golfe de Gascogne[5] : modèle de co-viabilité

La durabilité des pêcheries est un défi mondial avec 3/4 des stocks de poissons qui sont aujourd'hui estimés comme surexploités. Les pêcheries démersales du golfe de Gascogne ciblant en particulier le merlu, la sole, le cabillaud, l'anchois et la langoustine n'échappent pas à ces difficultés. Différentes flottilles françaises, espagnoles et belges opèrent dans cette zone. Les engins et technologies de capture utilisés dans ces pêcheries incluent le chalut, les filets maillants et la palangre. Les chaluts de fond sont connus pour être peu sélectifs et leur utilisation dans un écosystème multi-espèces induit des captures de poissons non ciblés (prises accessoires) ou des rejets conséquents qui fragilisent l'ensemble de l'écosystème et la biodiversité marine. Ainsi la réconciliation de préoccupations écologiques et économiques est un enjeu central pour une exploitation durable des ressources marines et la régulation de ces pêcheries [22].

Appliqué à la langoustine, Péreau *et al.* analysent le fonctionnement d'un système de gestion décentralisée d'une ressource renouvelable fondé sur des quotas individuels et transférables [23]. Dans le cadre d'un modèle bioéconomique dynamique de co-viabilité, ils montrent sous quelles conditions un régulateur peut satisfaire durablement des objectifs de conservation de la ressource, d'efficience économique et de maintien de l'activité de pêche. En prenant 2003 comme année de référence, avec un stock initial estimé à 18 600 tonnes, 235 navires français en activité et un effort de pêche mesuré par le nombre de jours de sortie en mer égal à 163 jours, il apparaît que le maintien du *statu quo* n'est pas viable. Compte tenu du stock initial, il n'est pas possible de déterminer des trajectoires de capture et de stock qui puissent satisfaire les contraintes écologiques, économiques et sociales du système. Dès lors, pour rendre le système viable, les résultats montrent qu'un effort maximum possible de 128 jours en mer permettrait de maintenir les 235 navires en activité ou bien de garder le même effort initial au prix d'une baisse à 214 du nombre de navires. Toute combinaison entre ces deux variables de contrôle est bien évidemment possible. Cette régulation peut s'opérer par la mise en place de licences, la mise à l'arrêt des navires. Une autre façon d'aborder la question serait d'imposer un moratoire afin de restaurer durablement la ressource et de déterminer des stratégies fondées sur la notion de temps de crise par rapport aux contraintes bioéconomiques [24]. Ces approches en termes de coviabilité sont généralisables à des modèles multi-espèces (langoustine, merlu et sole) et multi-flottilles. Gourguet *et al.* analysent sous quelles conditions il est possible de préserver la biomasse du stock reproducteur pour chaque espèce, tout en assurant une rentabilité économique pour les différentes flottilles en jeu [25]. Les résultats indiquent que les stratégies durables exigent une atténuation significative de la capacité de pêche par rapport à l'année 2008 pour les chalutiers ciblant la langoustine et fileyeurs ciblant la sole. L'ensemble de ces travaux bioéconomiques au niveau du golfe de Gascogne et la pertinence des politiques publiques sous-jacentes doivent être renforcés dans une perspective de changement climatique et d'adaptation à ces changements [26].

Exemple 4 : Couplage agriculture-oiseaux[6]

Les changements globaux de l'agriculture incluant intensification et déprise modifient la biodiversité des milieux agricoles touchant en particulier les populations d'oiseaux. La Commission Européenne vient d'adopter l'indicateur « farmland birds » comme indicateur structurel de développement durable pour la biodiversité. À terme, la Politique Agricole Commune sera évaluée, entre autre, à travers cet indicateur produit au niveau français par le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Il s'agit de promouvoir des méthodes de gestion durable des milieux, par des mesures ou incitations agro-environnementales, dans une perspective de multifonctionnalité.

Des travaux et résultats bio-économiques s'inscrivent dans cette perspective [27][28]. Ils s'appuient sur des modèles agro-écologiques articulant biodiversité-agriculture pour une durabilité jointe des activités agricoles et de la biodiversité représentée ici par l'avifaune. Plus spécifiquement, des dynamiques de population d'une quarantaine d'espèces d'oiseaux sont couplées avec l'évolution

5. ANR 6e extinction projet ADHOC et projet BIOMER soutenu par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB).
6. Projet MOBILIS soutenu par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) et GDF SUEZ.

des habitats et paysages *via* les occupations des sols agricoles. Les calibrations des modèles s'appuient sur les données historiques de la base de Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) du Muséum National d'Histoire Naturel pour la biodiversité aviaire et les données agronomiques de l'INRA. Différents scénarios agro-écologiques à l'horizon 2050 sont évalués et comparés. Plus spécifiquement, des scénarios d'assolement et des politiques publiques (à travers un système de taxes et de subventions) favorisant la durabilité économique et écologique sont mis en exergue. La dimension multi-échelle des études à l'échelle globale métropolitaine permet des déclinaisons régionales en particulier au niveau de l'Aquitaine. Les objectifs seraient de mettre davantage l'accent sur l'articulation des écosystèmes forestiers et agricoles en y intégrant les changements de culture en liaison avec les impacts du changement climatique.

Le principe de précaution

Les incertitudes sur les états et sur les mécanismes sont souvent envahissantes dans les domaines environnementaux et sont particulièrement importantes dans l'étude du changement climatique. Or les outils traditionnels développés par les sciences de la décision pour faire face aux risques (critère d'espérance par exemple) se révèlent inopérants face à ces incertitudes environnementales, c'est-à-dire des risques auxquels les experts ne sont pas capables d'attribuer une probabilité. Ces incertitudes sont d'autant plus problématiques qu'elles peuvent justifier dans de nombreux cas l'absence ou le retard de décision sous couvert de manque de connaissances et de certitudes scientifiques. Pour certains problèmes cruciaux comme l'accumulation des GES, ce refus d'agir rapidement peut mener à dépasser des seuils irréversibles. C'est pour lutter contre ces décisions « par défaut » que le principe de précaution a été élaboré. Sa transcription sous forme d'instrument de décision reste néanmoins très complexe car ce principe échappe à la formalisation économique classique.

Une difficulté de la décision sous incertitude dans les problèmes environnementaux tient au fait que la décision publique est confrontée à différents types d'incertitude dans la connaissance scientifique. En effet certaines incertitudes fondées sur des données et mesures (cycle du carbone, dynamiques de population…) sont de nature probabiliste tandis que d'autres incertitudes sont liées à des controverses, des croyances, des scénarios (croissance économique, dynamique de prix, scénario climatique) sans fondement statistique fort.

Une deuxième difficulté tient à l'irréversibilité des situations dangereuses, des crises et dommages en jeu. Ainsi les pertes de biodiversité sont souvent des problèmes de survie ou de viabilité. Il apparaît donc judicieux de prendre en compte les événements extrêmes plutôt que de se fonder sur un scénario « moyen ».

Une autre difficulté est liée à la structure dynamique de l'incertitude et de la connaissance scientifique. Il est en effet probable que la connaissance scientifique progresse et que des incertitudes se réduisent au cours du temps.

S'il reste difficile d'élaborer une règle de choix qui opérationnaliserait le principe de précaution, l'étude conjointe des dimensions évoquées ci-dessus (irréversibilité, information) permet de mieux cerner le défi de la prise de décision en incertitude [29]. Dans ce contexte, il est pertinent d'analyser dans quelle mesure la diversité et l'hétérogénéité (versus la spécialisation) constituent un atout pour la durabilité des systèmes socio-économiques face aux incertitudes et fluctuations exogènes. Le test d'une telle hypothèse d'assurance bioéconomique concerne ici le rôle de la diversité tant au niveau du vivant que des stratégies humaines d'exploitation du vivant. Ces questions renvoient ainsi à la résilience des systèmes socio-écologiques en jeu que l'on peut définir comme la capacité des écosystèmes et des sociétés humaines à maintenir leur fonctionnement à la suite de perturbations externes et atteindre ou non un nouvel équilibre viable.

La gestion du risque

Les incertitudes scientifiques entourant l'efficacité environnementale des actions de préservation et les divergences des avis d'experts quant à l'impact du changement climatique vont influencer les décisions des acteurs qui doivent opérer leur choix dans l'incertitude. En absence d'information claire sur les risques futurs, les individus construisent leur jugement de croyance sur l'avenir, sur la base de leurs propres connaissances, de celles données par les experts, ou de leurs propres vécus. Cette situation de confusion et de controverses sur les impacts du changement climatique va donc affecter la perception du risque par les gestionnaires de l'espace [30]. Un individu qui ignore ou méconnaît le risque ne s'en inquiète pas et ne s'y prépare pas. S'il est conscient du risque et qu'il considère que les connaissances scientifiques sont mauvaises, cela peut amplifier sa peur du risque. Dans ce contexte, les instruments financiers comme non financiers restent peu efficaces. Les individus préfèrent le statu quo. La perception du risque constitue alors une composante essentielle des comportements des acteurs. Toute réflexion impliquant des mécanismes économiques pour concevoir les politiques de préservation doit intégrer cet aspect. En effet, si l'origine des refus des nouvelles pratiques pour les services écosystémiques est plutôt liée au risque alors il faut allouer des ressources financières supplémentaires pour mieux communiquer sur ces risques, ou renforcer les mécanismes de protection et d'assurance

III- Acceptabilité sociale et gouvernance

Les défis de l'action publique face aux changements globaux

Pour l'analyse des politiques publiques, la problématique des changements globaux et de l'adaptation pose une série de questions qui sont particulièrement exacerbées par leurs enjeux spécifiques (interdépendances, échelles de temps et d'espace, incertitude des connaissances). Le défi de l'action publique moderne, confrontée à des problèmes de décision en situation d'incertitude, est de penser des solutions composites qui doivent répondre conjointement à plusieurs exigences pour fonder leur légitimité : 1) être supportables économiquement par les marchés, les territoires et les agents économiques ; 2) être gouvernables par une organisation collective trans-sectorielle et trans-territoriale concertée pour répondre aux problèmes de la gouvernance multi-niveaux ; 3) être jugées justes et recevables (équité, recevabilité) par les publics destinataires dans leurs figures diverses de citoyens/consommateurs propres à la société *singulariste* ; 4) être légales pour faire front aux risques de judiciarisation provenant des réglementations européennes ; 5) être efficaces par rapport au problème posé pour faire face à la légitimité croissante du pilotage par les *conséquences* des politiques ; 6) être évaluables quant aux résultats environnementaux et aux procédures et imputables pour chercher à attribuer à chaque acteur sa part de responsabilité dans le succès ou l'échec [31].

Les territoires estuariens (marais, zones humides…) et les conflits sur l'eau illustrent les complexités de cette gouvernance et des jeux d'acteurs. La cartographie des zones humides et marais dans le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de l'Estuaire de la Gironde est source de conflits d'usage entre les acteurs. Ces zones humides sont importantes et remplissent plusieurs fonctions – écrêtement des crues et soutien d'étiage, épuration naturelle, réservoir de biodiversité, valeurs touristiques et patrimoniales [32][33]. Les projets d'aménagements industriels, agricoles, urbains en zone littorale estuarienne génèrent un triple problème : l'accroissement de la vulnérabilité socio-économique, la réduction des surfaces des zones humides et des services écosystémiques et enfin un impact qualitatif et quantitatif sur les masses d'eau. Les exemples suivants proposent une grille de lecture de ces enjeux où le changement climatique apparaît comme un facteur déclencheur ou amplificateur des situations actuelles.

Exemple 5 : Exposition au risque et appréciation de la qualité de vie par les habitants des territoires estuariens[7]

Il serait illusoire d'imposer un déterminisme direct entre *dynamiques environnementales* – qui seraient elles-mêmes surdéterminées par les évolutions climatiques – et *dynamiques socio-économiques* s'imposant aux populations locales. Au regard des scénarios d'évolution des impacts du changement climatique pour les territoires estuariens, les sociétés doivent répondre à deux questions fondamentales : quel degré de protection contre les événements extrêmes et les risques naturels est-il souhaitable ? Et quel niveau de risque peut être accepté ? En Aquitaine, la dimension du risque, par les adaptations qu'elle a déjà fait naître (Plan de Prévention du Risque Inondation [PPRI] et leurs zonages), et par les différentes stratégies d'aménagement qui se dessinent actuellement, participe à l'appréciation globale de la qualité de vie. Si le choix spatialisé de la meilleure combinaison des stratégies repose en grande partie sur les jeux d'acteurs, on ne peut ignorer les dimensions sociales du problème et les perceptions différenciées de leurs impacts pour les populations locales. Pour ces territoires estuariens, les habitants ont eu l'habitude de vivre avec l'eau. Ils bénéficient d'un certain nombre d'aménités[8] spécifiques liées aux écosystèmes estuariens dans leur dimension socioculturelle à travers « l'art de vivre estuarien » et écosystémique du fait de la biodiversité marine et des fonctionnalités écologiques des zones humides, support de différents usages récréatifs et agricoles. Ils font également face à de nombreuses contraintes environnementales : vulnérabilité de leurs actifs individuels et collectifs aux risques naturels, et multiplication des contraintes dans leur mobilité quotidienne du fait de l'importance des réglementations et des normes environnementales sur leur territoire. Le concept de *qualité de vie* (bien-être subjectif) à travers sa mesure (sur une échelle de perception) et la méthodologie d'investigation empirique de ses différentes composantes (économiques, sociales, environnementales) permettent d'aborder quatre enjeux majeurs des interactions entre milieux naturels et société sur les territoires estuariens à fort potentiel écologique, mais soumis aux événements extrêmes. Ces quatre enjeux sont la contribution des aménités naturelles spécifiques aux territoires estuariens au bien-être de la population ; l'impact effectif des contraintes quotidiennes induites par la préservation de l'environnement sur le bien-être des individus : potentiel d'emploi plus restreint, tensions dans les différents usages de l'espace (notamment, les usages de l'eau) ; la perception de la vulnérabilité des actifs individuels et collectifs face à l'augmentation des aléas naturels notamment les risques d'inondation ; et enfin la perception des inégalités face aux impacts différenciés des stratégies de défense contre l'inondation (PPRI, zonage, politique d'endiguement).

L'évaluation et l'analyse des facteurs économiques et non économiques qui fondent cette qualité de vie ressentie par les résidents constituent ainsi un point de départ des actions publiques locales dans la perspective des nouvelles orientations en matière d'aménagement dans ces territoires de l'eau, mais plus globalement de la viabilité des nouvelles orientations du développement socio-économique qui s'y engage, par un développement tourné vers la valorisation des ressources naturelles.

Exemple 6 : La gouvernance des marais estuariens et la gestion hydraulique par les propriétaires[9]

La surface du SAGE de 323 300 ha regroupe 185 communes, 13 Syndicats Intercommunaux de Bassin-versant (SIBV), 19 bassins versants et 270 km de digues. 53 690 ha sont en zone verte et 38 470 ha sont gérés par des Associations Syndicales de Propriétaires (ASP). La délimitation de ces zones humides fait l'objet de remise en cause par certains acteurs ayant des objectifs très différents comme la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB), certaines communes, la chambre d'agriculture, l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO), le Grand port maritime de Bordeaux (GPMB) ou des exploitants agricoles. Dans le cas des zones humides et marais, les parties prenantes s'organisent comme suit **(Figure 3)**.

7. Contrat de recherche ANR CEPS ADAPT'EAU et VEGGA du MEDDTL.
8. La définition usuelle des aménités renvoie aux attributs, naturels ou façonnés par l'homme, liés à un espace ou à un territoire et qui le différencient d'autres territoires qui en sont dépourvus.
9. Contrats de recherche MARGO et VEGGA du MEDDTL et REMOB du CCRDT.

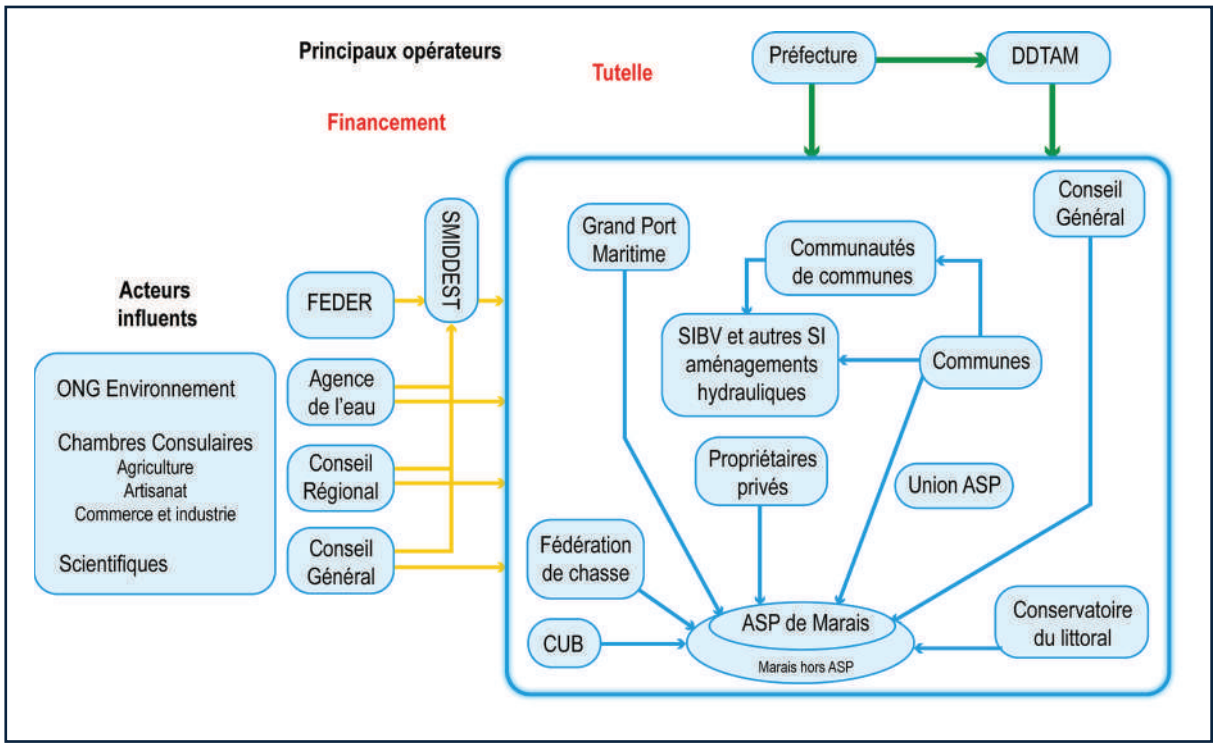


Figure 3 : *Les acteurs de la gestion des marais estuariens de la Gironde.*

La gouvernance des zones humides rivulaires de l'estuaire de la Gironde se trouve actuellement au cœur des discussions sur les différentes options de stratégies d'aménagements des territoires du périmètre du SAGE Estuaire.

Le maintien des différentes fonctionnalités des zones humides à un moindre coût s'appuie sur une gestion alliant une bonne maîtrise et un bon entretien des ouvrages hydrauliques, ainsi qu'une régulation des niveaux d'eau en adéquation avec les besoins des usagers et des milieux. Actuellement la fourniture de ces biens et services publics locaux est assurée pour une grande partie par des acteurs privés : soit directement par les propriétaires, soit par leur regroupement au sein des associations syndicales de propriétaires (ASP). Cette configuration organisationnelle qui gouvernait l'action collective et la coopération entre les différents acteurs de l'eau autour de la gestion des ouvrages et des infrastructures hydrauliques ont permis jusqu'à présent de concilier les différents usages des territoires humides et de limiter les conflits. Aujourd'hui, un défi de grande ampleur se présente à eux au travers de deux éléments majeurs. Le premier a trait aux besoins grandissants d'adaptation des aménagements face à l'évolution de la donne climatique et ses implications, notamment en termes de fiabilité des ouvrages face aux évènements extrêmes. Le second concerne l'évolution récente des cadres juridiques et institutionnels de la gestion hydraulique. Ce nouveau contexte institutionnel fait intervenir à côté des propriétaires de marais, réunis ou non en association, différents acteurs institutionnels dont les collectivités locales. Le rôle des ASP est ainsi formalisé dans la préservation, la restauration et la valorisation des zones humides tout en remettant en cause leur droit de propriétés sur les ouvrages et les infrastructures (loi relative au Développement des Territoires Ruraux [DTR] de 2005). La gestion hydraulique est confrontée ici à un dilemme en termes d'assignation de compétences. D'un côté les acteurs traditionnels de l'eau – les propriétaires et les ASP – sont les détenteurs de la compétence de gestion liée à leur connaissance du terrain. De l'autre côté l'implication de nouveaux acteurs (essentiellement publics) présente une réponse à l'accroissement des besoins techniques et financiers. L'analyse en termes de réseaux sociaux des actions entreprises par les membres des ASP et de leurs présidents à l'intérieur tout comme à l'extérieur de l'association met en lumière le mode de coordination locale pour la gestion de marais en termes de projet et de travaux : les relations financières contractuelles, les relations de conseils ou toute autre forme de relations informelles (soutien en cas de crues, gestion collective des niveaux d'eau) s'imbriquent et se

renforcent mutuellement. La perspective d'un nouveau système de gouvernance de la gestion des zones humides bouscule le support usuel de la gestion hydraulique jusqu'alors assuré par les relations sociales entre les propriétaires et entre les propriétaires et le président de l'ASP, et réinterroge l'efficacité relative de formes organisationnelles alternatives.

Des premières estimations montrent que la dépense moyenne par ASP est de 3 566 €/an avec une variation allant de 153 € à 13 895 $€_{2000}$. Le coût moyen à l'ha est de 5,42 $€_{2000}$ et l'hypothèse de présence d'économies d'échelle semble se confirmer [34]. Cela implique qu'il serait optimal pour les ASP de se regrouper au sein de plus grandes entités pour atteindre une meilleure efficacité. L'analyse du rôle et des actions entreprises par les ASP et leur président au sein de la configuration organisationnelle actuelle est importante pour comprendre le mode de coordination locale pour la gestion de marais, en termes de financement, d'entretien, et d'investissements. La question de l'efficacité relative de formes d'organisation alternatives privées et/ou publiques est ouverte.

Agir ensemble : décideurs politiques, parties prenantes, et chercheurs

Étant donné l'ampleur des enjeux en présence, l'élaboration de politiques climatiques à la fois efficaces et socialement acceptables passe nécessairement par une concertation accrue entre les décideurs et les parties prenantes ainsi qu'une articulation plus étroite entre les chercheurs et la société civile. C'est dans cette perspective que le programme de recherche NOVIWAM[10] [35], financé par l'Union Européenne, vise à mettre en relation les chercheurs, les décideurs et les laboratoires d'idées ainsi que les parties prenantes pour la résolution de différents problèmes majeurs liés à l'eau. L'objectif général est de conduire les chercheurs à travailler sur des sujets cruciaux pour les deux autres partenaires, pour les décideurs de poser des questions à la fois importantes et abordables par les chercheurs, et pour les différentes parties prenantes (industrie, agriculture, représentants de l'environnement…) de participer à cette construction. Le programme Noviwam concerne initialement cinq régions ou pays pour lesquels l'eau constitue un enjeu important de développement à différents titres (Albanie, Chypre, Région Nord du Portugal, Andalousie et Région Poitou-Charentes), mais il a pour ambition de s'étendre par la suite à d'autres secteurs géographiques comme la région Aquitaine.

L'irrigation, au cœur du projet NOVIWAM, constitue l'une des premières sources de consommation d'eau, même dans nos climats tempérés. Dans un contexte de rareté accrue, les conflits s'exacerbent entre les usages agricoles de l'eau, les usages industriels et domestiques, et cela assez souvent au détriment de l'environnement, par exemple suite à un non-respect des débits d'étiage. Si maintenant des compteurs d'eau permettent de mesurer les quantités consommées par chaque agriculteur, que l'été soit humide ou sec le prix payé par m^3 reste généralement le même, conduisant à une inefficacité globale du système (les étés secs, un sentiment de gaspillage par le monde agricole qui se développe dans les zones urbaines, la nécessité de prendre des arrêtés de restriction d'usage de l'eau, puis des agriculteurs finalement privés d'eau en cas de sécheresse, avec tous les impacts en termes de rupture de contrat vis-à-vis de la filière agro-alimentaire, ou des difficultés de trésorerie importantes pour certains). Une simple augmentation du prix de l'eau en cas de sécheresse est assez souvent totalement inopérante.

Des travaux préliminaires, fondés en particulier sur des expériences locales dans le Sud-Ouest de la France notamment (certaines réussies, d'autres moins), fondés aussi sur des travaux théoriques (optimisation, théorie des jeux…) en économie quantitative, ont permis de montrer qu'il était possible de mettre en place un système de tarification dit « non linéaire », simple au final et acceptable par les agriculteurs, permettant, par la construction du système, de faire respecter les débits d'étiage, conduisant aussi à une utilisation de l'eau par les agriculteurs qui la valorisent le plus. Ce mode de tarification fondé sur la réservation de volumes au printemps et à une consommation pouvant être différente des volumes réservés permet aussi dès le printemps d'anticiper d'éventuels conflits d'usage et de les résoudre calmement, lorsqu'il existe encore une marge de manœuvre pour le choix des assolements, et non pas dans l'urgence et les difficultés des périodes de crise [36].

10. www.noviwam.eu, NOVel Integrated WAter Management Systems for Southern European Regions.

Conclusion

La science économique peut et doit participer activement à l'élaboration des politiques climatiques. D'une part l'évaluation économique est un outil important d'aide à la décision et de guide pour la conduite des politiques environnementales. Elle doit cependant être utilisée avec précaution tant sur le plan des méthodes, du contexte et de la nature des services écosystémiques étudiés et ne saurait être l'unique critère de décision. La mise en place d'observatoires est une étape nécessaire pour la constitution de bases de données qui font souvent défaut pour fonder les évaluations sur des valeurs spécifiques aux sites étudiés. Cette évaluation doit aussi s'appuyer sur un dialogue interdisciplinaire renforcé en liaison avec la société civile.

D'autre part les cadres théoriques de l'analyse économique se sont adaptés face aux défis et aux spécificités des enjeux environnementaux (incertitude, irréversibilité…) et sont plus à même aujourd'hui de proposer des instruments qui garantissent la soutenabilité de nos trajectoires. La recherche de critères de durabilité pour l'aide à la décision suppose une vision renouvelée des relations entre l'écologie et les sciences humaines. En intégrant les contraintes écologiques, économiques et sociales, la co-viabilité offre un cadre d'analyse pertinent et opérationnel qui dépasse une vision étroite de l'environnement vu comme un objet économique standard.

Enfin, au-delà de leur contenu économique, le succès des politiques climatiques locales, en Aquitaine comme ailleurs, reposera également sur le degré d'intégration des parties prenantes et sur le rapprochement entre décideurs, société civile et chercheurs.



Défis pour les ressources, les activités et la qualité de vie en Aquitaine





Le vignoble du Blayais (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 5 :

Agriculture et forêts

Préambule

L'histoire du monde rural se conjugue avec celle du climat. Les années de fortes ou faibles récoltes sont traditionnellement associées à des conditions climatiques extrêmes. Ces relations entre productions agricoles et climat ont même été utilisées pour la reconstruction de climats anciens. Ainsi les dates de récoltes renseignent sur les variations annuelles de température. Et les variations de largeurs de cernes des arbres permettent d'appréhender les variations climatiques au cours des derniers siècles. Très naturellement la recherche agronomique s'est donc préoccupée dès les premières publications du GIEC des conséquences du changement climatique sur les agrosystèmes et les forêts en Aquitaine.

Les deux chapitres qui suivent s'attachent à rassembler les connaissances actuelles sur l'impact du changement climatique non seulement sur les niveaux de productivité observés des cultures agricoles et forestières, mais également sur le fonctionnement des plantes, sur la composition des formations végétales et forestières, et de manière plus générale sur l'évolution du monde agricole et forestier. Les effets de l'accroissement du CO_2, de la température et des changements de pluviométrie sur les plantes cultivées ou arbres ont fait l'objet d'expérimentation en milieux contrôlés dans lesquels ces conditions ont été artificiellement reconstituées. Ces études ont été utilement complétées par des observations et simulations faites au niveau d'écosystèmes entiers et prenant en compte en plus le bilan radiatif ou le bilan hydrique. Des tendances très générales ont été observées qui transgressent toutes les cultures et forêts : avancée des stades de développement de toutes les formations végétales pérennes (arbres fruitiers, vignes, arbres forestiers) et progressive depuis une trentaine d'années, tendance à l'augmentation de la productivité mais avec de fortes variations selon les types de cultures. L'impact des événements extrêmes (sécheresses, incendies ou tempêtes) s'avère souvent plus important que les variations graduelles des facteurs climatiques. Au-delà des effets et impacts déjà visibles, une vaste étude prospective a été récemment menée à l'échelle de l'ensemble du territoire, accompagnée d'un examen particulier au sein de 6 zones géographiques (projet CLIMATOR) dont l'objectif était de traduire les différents scénarios climatiques du GIEC en conséquence sur les principaux systèmes de culture et les forêts. Ces données sont examinées et commentées en détail dans le contexte aquitain dans les deux chapitres suivants. Ils mettent également l'accent sur l'importance de l'action humaine dans la régulation de ces changements. Cette action s'attache à concilier les modes d'utilisations des terres, la gestion des ressources naturelles nécessaires à l'agriculture et aux forêts (sols et eau), et le maintien des principaux services écosystémiques.

5.1 Les activités agricoles

En mémoire de Nadine Brisson qui nous a quittés dans sa 47e année après un long combat contre la maladie.

Coordination : *Nathalie Ollat*
Rédacteurs : *Nadine Brisson†, Béatrice Denoyes, Inaki Garcia de Cortazar-Atauri, Jean-Pascal Goutouly, Marc Kleinhentz, Marie Launay, Richard Michalet, Nathalie Ollat, Philippe Pieri, Cornelis Van Leeuwen*

L'Aquitaine est l'une des régions françaises où l'agriculture est le secteur économique le plus déterminant. Elle est caractérisée à la fois par une grande diversité de productions agricoles, mais aussi une spécialisation pour certaines cultures majoritaires comme le maïs et la vigne. En raison de la vocation agricole de la région et de la grande dépendance de l'agriculture vis-à-vis du climat, le changement climatique représente un enjeu majeur pour ce secteur en Aquitaine. L'évolution des variables environnementales et climatiques qui caractérisera le changement climatique au cours du XXIe siècle, i.e. principalement la teneur en CO_2 dans l'atmosphère, la température et les précipitations sera déterminante pour la production agricole. La teneur en CO_2 et le régime des pluies affecteront principalement la capacité de production de biomasse, et donc les rendements, mais aussi la qualité des produits. La température aura un effet majeur sur la phénologie et le cycle de développement des plantes. Des avancées jusqu'à 40 jours sont prédites pour la fin du siècle pour la plupart des espèces cultivées. Ces changements auront un impact majeur sur le maintien ou non de certaines cultures. En raison de la très possible raréfaction de la ressource en eau, la culture du maïs irrigué est fortement menacée à long terme. Des adaptations techniques et des délocalisations seront nécessaires. Pour les grandes cultures, il faut compter principalement sur des arbitrages d'assolements revisités (surfaces), l'adaptation du matériel végétal (variétés) et la modification des itinéraires techniques (dates de semis). L'irrigation des cultures devra être gérée très précisément, notamment pour les productions fruitières. La viticulture dispose également d'un potentiel d'adaptation avec la possibilité de modifier les modes de culture, de changer les cépages et les porte-greffes, et de mettre en valeur des situations climatiques plus favorables. Ces adaptations devront s'accompagner de modifications de la réglementation et de l'organisation des filières. Leur mise en œuvre sera dépendante des politiques publiques. Il existe une véritable dynamique de recherches en Aquitaine pour étudier l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, notamment pour la viticulture et l'arboriculture fruitière. Par ailleurs, la région Aquitaine pourra largement bénéficier des travaux conduits sur le plan national pour d'autres cultures ou axes de recherche.

Introduction

Les enjeux du changement climatique pour l'agriculture en Aquitaine

Le changement climatique représente un double défi pour l'agriculture. D'une part, le secteur agricole rejette dans l'atmosphère des gaz à effets de serre (GES) et bien qu'au niveau européen, il ne représente que 9 % des émissions totales de GES, ce secteur concourt à près de 20 % des rejets en Aquitaine pour 3 % de la consommation régionale d'énergie. Ces émissions sont essentiellement dues à l'utilisation d'engrais azotés pour 3M t CO_2eq/an et à l'élevage via le dégagement de méthane pour 2,7 M t CO_2eq/an [1]. Mais les surfaces agricoles constituent également un important puits de carbone permettant de limiter l'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère, et l'agriculture pourrait donc jouer un rôle pour atténuer les effets du changement climatique. D'autre part, il est indiscutable que l'activité agricole et les milieux naturels terrestres subiront la majeure partie des impacts du changement

climatique. Il est donc indispensable d'étudier les moyens de s'y adapter. Selon les scénarios établis par le GIEC [2], les projections font état d'une augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique de 540 à 950 ppm et de la température moyenne de 1,8 à 4 °C, voire plus en fonction des zones géographiques considérées. De plus l'ensemble des scénarios s'accordent sur une augmentation de la variabilité du climat et des événements climatiques extrêmes. Une cascade de répercussions du changement climatique sur les besoins et les disponibilités en eau, sur la qualité des sols, sur la pression de bio-agresseurs, sur les besoins en intrants[1], sur la qualité et la typicité des produits, les rendements agricoles ainsi que sur les modes d'utilisation des terres, est donc à envisager au cours du siècle [3].

Contexte général de l'agriculture en Aquitaine

Avec 43 100 exploitations agricoles et 1 377 300 ha de surface agricole utilisée, recensés en 2010, l'Aquitaine se place au second rang des régions françaises en termes de SAU[2], après Midi-Pyrénées, et au premier rang en termes d'emploi agricole [4]. Représentant 4,3 % du PIB régional, la valeur ajoutée apportée par les secteurs de l'agriculture, de la forêt et de la pêche en Aquitaine représente plus du double de celui de la France qui est de l'ordre de 2 % [5]. La filière agricole représente donc une part importante de l'économie régionale. Le secteur des vins d'AOP contribue pour 31 % de la valeur de la production agricole, suivi principalement par le maïs, les fruits et légumes. Le vignoble aquitain tient la première place mondiale pour la production de vins d'Appellation d'Origine Protégée (AOP), et s'étend sur 142 313 hectares, dont 83 % en Gironde. Près de 11 000 viticulteurs produisent 7 millions d'hectolitres de vin dont 90 % en AOP. Les trois principales grandes cultures sont en superficie, le maïs (grain et semences) qui représente 20 à 25 % de la surface agricole utile (SAU) de la région, le blé tendre avec 7 % de la SAU et le tournesol avec 4,2 % de la SAU [6]. L'Aquitaine est depuis longtemps la première région de production française de fraises, avec 40 % de la production nationale organisée pour environ 20 000 tonnes produites sur 1 000 ha en 2010 [6]. Les productions animales sont essentiellement représentées par la filière bovine (10 %) et la volaille (9 % environ). Avec une prédominance des productions végétales (68 % des productions, contre 57 % pour le national) et une faible part de culture hors-sol, la filière agricole en Aquitaine est donc relativement tributaire des aléas climatiques. La région Aquitaine est de plus caractérisée par une forte spécialisation départementale des systèmes de production, ce qui rendra variables les impacts des évolutions climatiques futures entre départements. Ainsi la Gironde est à vocation majoritairement viticole alors que la filière animale couvre 70 % de la production des Pyrénées-Atlantiques. La polyculture-élevage prédomine en Dordogne alors que les Landes sont spécialisées dans la maïsiculture et l'aviculture. Le Lot-et-Garonne quant à lui, affiche une production de fruits et légumes (principalement tomates et fraises), de céréales et de protéagineux.

Avec 350 000 de surfaces irrigables, l'Aquitaine occupe la troisième place au niveau national en surface, mais la première en termes de pourcentage de la surface agricole totale. Elle recense 200 000 ha de maïs irrigué (soit plus de 50 % des surfaces cultivées en maïs) et 8 000 maïsiculteurs irrigants. L'irrigation est également déterminante pour la production fruitière et légumière. La gestion de la ressource en eau sera donc tout particulièrement cruciale pour l'avenir de l'activité de la filière agricole de l'Aquitaine [7].

Les grandes fonctions biologiques de la production agricole végétale potentiellement affectées par le changement climatique

Dans le cadre du changement climatique, l'augmentation du CO_2 et la modification des différentes variables climatiques (température, rayonnement, précipitations) affecteront la croissance et le développement de toutes les espèces végétales, cultivées ou non. En effet, l'activité photosynthétique

1. En agriculture, on appelle « intrants » les différents produits apportés aux terres et aux cultures ; ce terme comprend notamment les engrais, les produits phytosanitaires et l'eau d'irrigation.
2. SAU : surface agricole utile, correspond au territoire consacré à la production agricole, composée des terres arables (grande culture, cultures maraîchères, prairies artificielles…) ; des surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, alpages) ; des cultures pérennes (vignes, vergers…).

d'une plante, qui permet la production de biomasse, dépend du rayonnement absorbé, de la température, du taux de CO_2, de la disponibilité en eau et d'un élément majeur, l'azote. Chacune de ces composantes va être touchée par le changement climatique. Certains effets seront favorables et d'autres défavorables aux productions végétales. Par ailleurs, l'effet de l'interaction entre ces facteurs sur la fertilité des sols (teneur en matière organique, minéralisation, notamment de l'azote) et la physiologie des plantes est très complexe et les conséquences de la combinaison de ces différents effets sont particulièrement difficiles à évaluer. Au-delà des effets des variations moyennes des paramètres climatiques, l'occurrence d'événements extrêmes (tempêtes, canicules, inondations, sécheresses extrêmes, gel) et leurs impacts se surimposent et devront être analysés.

Une élévation de la concentration en CO_2 se traduira jusqu'à un certain seuil par une augmentation de l'activité photosynthétique de la plante et une diminution de la conductance stomatique qui mesurent le degré d'ouverture des pores situés à la surface des feuilles et qui permettent les échanges de CO_2 et d'eau entre l'atmosphère et la plante. Cela aura pour conséquence de diminuer les besoins en eau des cultures. Ceci devrait conduire à une augmentation de la production de biomasse, dans la mesure où les autres facteurs climatiques (température et eau) ne seront pas trop limitants. Par contre, toutes les plantes ne réagiront pas de la même façon. Ainsi des plantes comme le blé et vigne seront plus favorisées par l'augmentation du CO_2 que des plantes comme le maïs et le sorgho, lesquelles seront presque insensibles, les seuils de saturation (environ 400 ppm) ayant été atteints pour ces espèces [8].

La température est le moteur du développement des plantes dans une gamme qui varie selon l'espèce considérée. La température régule également la majeure partie des processus chimiques et biochimiques du vivant. À ce titre elle joue un rôle majeur sur la quantité de biomasse produite et sur la composition et la qualité des produits récoltés. L'augmentation attendue des températures va accroître la disponibilité thermique pour les végétaux[3]. Cela aura des conséquences sur l'avancement et la longueur des cycles phénologiques[4] des cultures, et sur la possibilité de cultiver de nouvelles espèces ou variétés dans des zones considérées jusqu'ici comme trop fraîches. Par ailleurs, les processus physiologiques de levée de dormance qui font que les graines acquièrent la capacité à germer et les bourgeons à débourrer sont dépendants de l'occurrence de certaines températures hautes ou basses à un moment donné du cycle. Par exemple, certaines espèces fruitières ont des besoins en froid spécifiques pour déclencher la levée de la dormance. Ainsi des températures trop élevées pendant l'hiver pourront entraver le démarrage de la végétation au printemps, ainsi que la fertilité de ces cultures. Finalement l'intensité d'autres processus biochimiques, notamment ceux qui accompagnent la maturation des fruits, est corrélée à la température dans une gamme variable avec les processus en question et les espèces. Des températures trop élevées peuvent conduire à des phénomènes de brûlure et d'échaudage ayant un impact très négatif sur le rendement.

L'eau représente généralement le premier facteur limitant la croissance d'une plante et le rendement des cultures. La disponibilité hydrique conditionne l'ensemble des processus métaboliques indispensables au fonctionnement d'un être vivant et un manque d'eau peut occasionner un arrêt des chaînes métaboliques voire la mort de la plante, si l'équilibre hydrique de la plante n'est pas satisfait. De l'état hydrique de la plante, dépend également en partie l'intensité de la photosynthèse. Les besoins en eau d'une plante varient au cours de son cycle de développement. Ainsi, pour atteindre un rendement maximal, le maïs ne doit absolument pas souffrir de stress hydrique au moment de la floraison qui s'étend entre mi-juillet et mi-août. Pour la vigne, une contrainte hydrique modérée pendant la maturation des raisins est reconnue comme bénéfique pour la qualité car elle limite la croissance et réoriente le métabolisme vers la biosynthèse et l'accumulation de polyphénols. La sécheresse se définit en fonction de composantes météorologiques (déficit de pluviométrie), hydrologiques (niveau anormalement bas des rivières) et agricoles (déficit des réserves en eau des sols superficiels) [9]. En agriculture, il faut distinguer les déficits pluviométriques en cours de végétation (sécheresse édaphique) et ceux conduisant à une reconstitution

3. Cumul des températures journalières dépassant un seuil (appelé base) sur une période d'intérêt.

4. Cycle phénologique : succession d'événements périodiques dans le monde du vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat, comme le débourrement, la floraison, le changement de couleur des feuilles…

déficiente des réserves hydrographiques (sécheresse hydrologique) [10]. La sécheresse conduit à des baisses de rendements par rapport au rendement attendu en situation favorable, et peut affecter la qualité des produits récoltés. Elle ne dépend pas de la seule pluviométrie, mais du croisement entre les conditions climatiques (pluviométrie, évapotranspiration de référence), les caractéristiques du sol (réserves en eau), le système de conduite (surface foliaire) et la réaction de la plante. L'augmentation du nombre des épisodes de sécheresse depuis 1976, ainsi que les prévisions d'une baisse de pluviométrie de 900 mm à 680 mm par an dans le Sud-Ouest (même si les modélisations sont moins fiables que celles concernant la température), avec une augmentation de la demande en eau exprimée par l'évapotranspiration potentielle (de 800 à 850 mm) justifient que cette question soit prise très sérieusement en compte [8][11]. Les projections faites sur le XXI^{e} siècle des indices de sécheresse définis dans le cadre du projet ClimSec font ressortir un risque d'intensification de l'assèchement des sols superficiels jusqu'en 2050, puis de la multiplication de sécheresses agricoles extrêmes d'ici la fin du siècle [9].

Ainsi chaque année, le rendement et la qualité de chaque production agricole apparaissent comme la résultante des interactions entre l'offre du milieu naturel et la demande de la plante qui varie au cours de son cycle de développement et des interventions culturales. Ce schéma est général pour l'ensemble des cultures. Pour maintenir une activité agricole de qualité et économiquement rentable, l'évolution des conditions climatiques attendue au cours du XXI^{e} siècle nécessitera la mise en œuvre de modifications dans les systèmes de culture qui constitueront un défi d'innovation et d'adaptation pour les agriculteurs.

Contexte scientifique

La question des impacts des changements globaux sur l'agriculture a commencé à faire l'objet de préoccupations à l'échelle mondiale à partir du début des années 1990. Cet intérêt n'a fait que croître depuis. En France, depuis la fin des années 1990, 70 projets de recherches ont été mis en œuvre sur cette thématique, dont la moitié s'intéressait aux impacts, une vingtaine concernait l'atténuation des effets négatifs et une dizaine l'adaptation aux nouvelles conditions attendues. Au cours des années 2000, les recherches se sont multipliées sur ce sujet et l'année 2003 a été un facteur déterminant pour la prise de conscience des impacts attendus du changement climatique. Le projet CLIMATOR (2007-2010) a représenté une contribution majeure à l'étude des impacts du changement climatique sur l'agriculture française [12]. Sur la base des résultats de ces projets, un atelier de réflexion prospective a été mis en place en 2009 (ANR ADAGE) dont l'objectif était d'identifier les besoins en recherche et en développement sur l'adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés [13]. Les conclusions de cet atelier ont conduit l'INRA à proposer en 2011 une structuration transversale de ses recherches sur cette thématique dans le cadre du Métaprogramme ACCAF [3]. Un projet qui structure à l'échelle nationale les recherches sur ces questions pour la filière viti-vinicole a été construit. Ce projet, dénommé LACCAVE, regroupe 22 laboratoires nationaux. Il est coordonné par l'UMR EGFV (Bordeaux ISVV) et l'UMR Innovation (Montpellier IHEV) afin de renforcer le caractère national de la problématique. En écho aux priorités de la Région Aquitaine définies dans les plans climat 2007 et 2011 et aux attentes des professionnels particulièrement sensibilisés à cette question, les laboratoires de l'ISVV[5] coordonnent leurs actions pour mieux anticiper les conséquences du changement climatique sur la filière viti-vinicole, étant donné l'enjeu économique qu'elle représente. Des programmes de recherche sont également en cours de mise en place pour les espèces fruitières.

I- Impacts observés et attendus pour les principales productions agricoles en Aquitaine

Certaines observations (dates de vendanges, rendement des cultures) réalisées au cours des dernières décennies en agriculture montrent que le changement climatique est en cours. Si l'évolution

5. Institut des Sciences de la Vigne et du Vin – Bordeaux Aquitaine.

future de ces indicateurs ne peut être prévue avec certitude, il paraît important de rapporter ici ces observations, puis les impacts attendus pour les principales cultures d'intérêt en Aquitaine. Comme il est impossible d'être exhaustif, ces changements observés et attendus seront présentés pour les principales caractéristiques des cultures : phénologie, rendement, qualité des produits, et pression parasitaire, à partir d'exemples relatifs aux productions agricoles majeures de la région. En raison de son importance pour la région, certains aspects liés à la ressource en eau seront également décrits.

Contexte et méthodologies

Au cours des dernières années plusieurs bases de données (Phenoclim, Observatoire de Saisons, PEP 725...) ont été mises en place pour stocker les observations de la réponse des espèces végétales au climat passé et présent. Ces données nous ont permis d'analyser les tendances et l'intensité de l'évolution de cette réponse et de nous renseigner sur la capacité d'adaptation des espèces cultivées dans nos régions.

En revanche les impacts attendus du changement climatique ne peuvent être étudiés autrement que par voie de modélisation. Pour cela, les conditions climatiques futures simulées à l'aide de modèles de circulation globale du climat (i.e modèle ARPEGE de MétéoFrance régionalisé) sont introduites dans des modèles agronomiques qui représentent le fonctionnement de différents processus de fonctionnement de la plante (par exemple la phénologie) ou des systèmes de culture (i.e. à l'échelle de la parcelle). Au préalable ces modèles ont été testés avec des données climatiques du passé récent. Des variables de sortie synthétiques concernant ces différents processus permettent de quantifier les impacts probables du changement climatique.

L'évaluation des conséquences futures du changement climatique peut aussi reposer sur des expérimentations en conditions contrôlées, notamment celles où la concentration en CO_2 dans l'atmosphère a été augmentée artificiellement. Les informations de cette nature concernant les principales espèces cultivées sont encore rares. Leur extrapolation pour les conditions futures est pour cela souvent critiquable et risquée puisque de nombreuses interactions potentielles ne sont pas prises en compte. La seule alternative est alors d'utiliser la modélisation comme dans le projet CLIMATOR. Mais cette démarche n'est également pas dépourvue d'inconvénients puisque des étapes intermédiaires sont nécessaires, par exemple la régionalisation des sorties issues des modèles climatiques globaux, et les erreurs peuvent facilement se cumuler au cours de ce processus d'emboîtement de modèles de natures très différentes. Ainsi, il est très important d'évaluer les incertitudes générées par ce type de couplage. Certaines incertitudes sont irréductibles, comme celles liées aux scénarios de concentration des gaz à effet de serre. D'autres sont associées à une méconnaissance du fonctionnement et des interactions entre processus qui sont décrits dans les modèles climatiques, les méthodes de régionalisation et les modèles de culture utilisés pour l'étude d'impact. Par ailleurs, il existe également des sources de variabilités, qui sont soit subies (variabilité interannuelle, variabilité des sols et des sites étudiés) ou qui, au contraire, constituent des choix possibles pour la conduite de l'agriculture (choix de variétés, itinéraires techniques...). Tout cela conduit à interpréter les résultats d'impacts attendus avec précaution, notamment en générant des séries trentenaires de variables agronomiques (rendement, phénologie, etc.) et en analysant celles-ci, variabilité interannuelle comprise. Il est toujours nécessaire de les considérer comme définissant des tendances prévisibles sur lesquelles fonder des choix stratégiques pour l'adaptation.

Le projet CLIMATOR [8][12]

Ces dernières années, plusieurs projets ont mis en œuvre cette démarche de modélisation couplée, pour évaluer les impacts du changement climatique en agriculture. C'est notamment le cas du projet CLIMATOR (2007-2010), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Pendant 3 ans, 17 équipes de 7 instituts et organismes ont travaillé ensemble sur le projet CLIMATOR, associant ainsi des disciplines variées : climatologie, agronomie, écophysiologie, bioclimatologie, science du sol pour des objectifs divers : recherche, développement, enseignement. Cependant, la mise en place d'un cadre méthodologique commun a permis une gestion optimale de cette diversité. Ce projet avait pour objectif de proposer des méthodes et des informations pour des systèmes cultivés variés (monocultures et rotations de blé, tournesol, maïs, sorgho, colza, prairies, forêt, banane, canne à sucre et vigne), à

l'échelle de la parcelle, sur 13 sites représentatifs des climats français. Le travail réalisé dans CLIMATOR repose sur une analyse d'impacts possibles selon diverses hypothèses pour le climat futur. Il s'agit d'un exercice de modélisation à vocation prospective qui ne peut, en aucun cas, être considéré comme prévisionnel. L'objectif est de traduire les hypothèses climatiques en impacts chiffrés pour distinguer les effets positifs, négatifs ou non significatifs qu'induisent ces hypothèses sur l'agriculture et la forêt françaises, dans leur dimension uniquement biotechnique. De nombreux résultats issus de ce projet seront présentés dans ce document pour illustrer les impacts attendus du changement climatique sur l'agriculture en Aquitaine. Pour la plupart de ces projections, le scénario du GIEC d'émission des gaz à effets de serre A1B a été utilisé. Il correspond à une augmentation de la température moyenne de l'ordre de 2 °C sur la France en 2050, et de 3,2 °C à la fin du XXIe siècle. D'autres informations plus complètes sur les méthodes de régionalisation du climat, sur les modèles agronomiques utilisés pour chaque culture, ainsi que sur la hiérarchisation des incertitudes peuvent être obtenues dans le Livre Vert du projet CLIMATOR.

La phénologie

Comme il a été vu précédemment, l'augmentation de la température aura un effet majeur sur la vitesse de développement des plantes. La phénologie est déterminante pour l'adaptation des espèces dans un environnement donné. Par conséquent c'est un caractère des espèces cultivées pour lequel de nombreuses études d'impact ont déjà été conduites.

Impacts observés

L'augmentation des températures accélère le développement de la vigne [14]. Depuis vingt ans, l'augmentation de la température moyenne combinée à des pratiques culturales particulières (faible rendement, réduction de la fertilisation, augmentation de la surface foliaire) a conduit à une avance de la date de maturité des raisins de 15 jours en moyenne **(Figure 1)**. Cet ordre de grandeur de l'avancement de la phénologie dans le Bordelais est comparable à celui observé dans d'autres vignobles [15]. À ce sujet, il est nécessaire de faire référence aux importantes recherches qui ont permis de reconstruire le climat passé à partir des données phénologiques de la vigne et notamment la date de vendanges (cf. chapitre 2, **Figure 15**) [16][17].

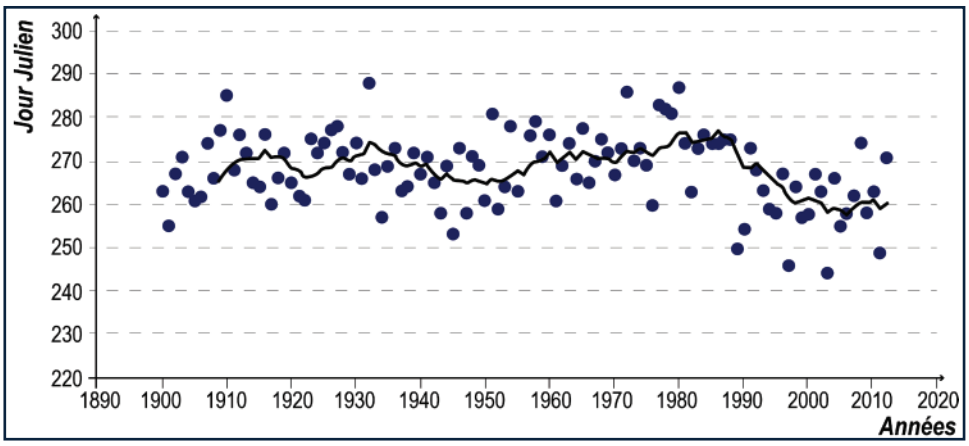


Figure 1 : *Évolution de la date des vendanges dans une propriété du Bordelais entre 1900 à 2012. Si la date des vendanges a eu tendance à reculer jusqu'au début des années 1990, principalement en raison de la diminution de la pression des maladies par une amélioration des traitements phytosanitaires, elle a subi une avancée de près de 15 jours par la suite [18].*

De la même manière, des avancées de la phénologie ont été observées sur la plupart des espèces cultivées, que ce soient dans les grandes cultures ou les espèces fruitières telles que le pommier, le poirier, le cerisier [19] et le prunier d'Ente. Sur les 40 dernières années, une avance de 7-8 jours a été mise en évidence pour la floraison du pommier et de 10-11 jours pour celle du poirier et du cerisier. Ces observations ont été faites malgré des hivers plus doux qui ont eu pour conséquence une augmentation de 3 à 5 jours de la durée nécessaire pour la satisfaction des besoins en froid, nécessaire à la levée de dormance, préalable au débourrement (cf. *supra*).

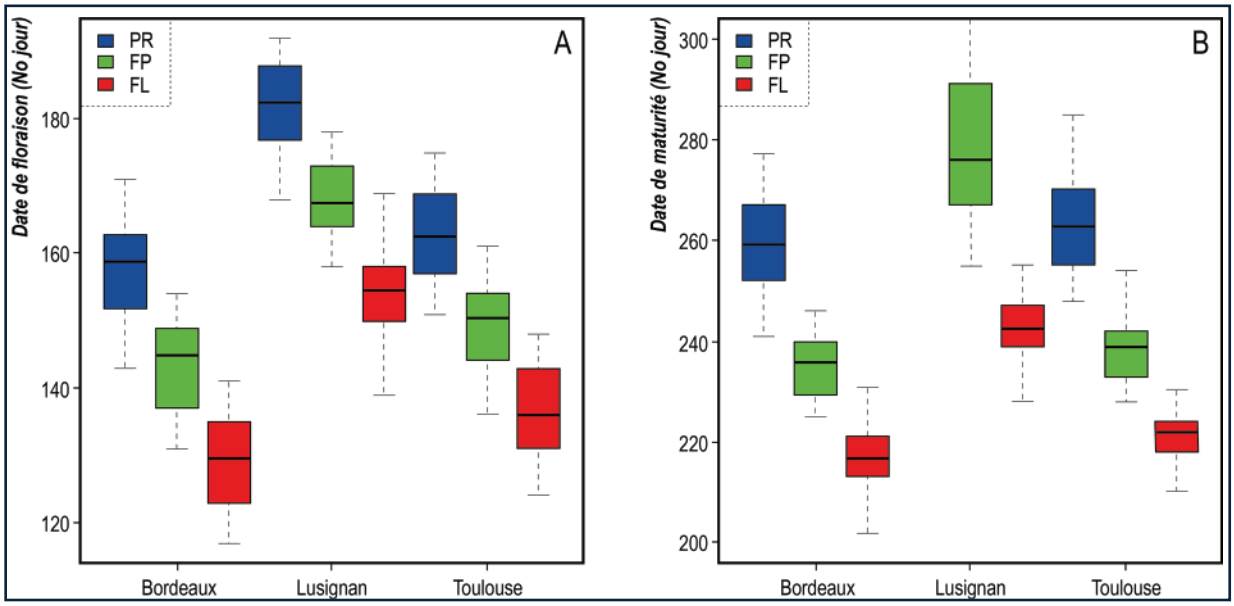


Figure 2 : *Dates moyennes de floraison (A) et de vendanges (B) pour le cépage Merlot calculées pour le passé récent PR (1971-2000), le futur proche FP (2020-2050) et le futur lointain FL (2070-2100) à Bordeaux, Lusignan et Toulouse [8].*

Impacts attendus

Sur la vigne, les simulations produites dans le projet CLIMATOR permettent d'envisager pour le cépage Merlot à Bordeaux une avancée de la date de floraison et de la date des vendanges d'environ 40 jours pour la fin du siècle **(Figure 2)**. Du fait de ce décalage vers le milieu de l'été, la température minimale moyenne pendant la période de maturation des raisins serait augmentée de 4 à 6 °C, ce qui renforce l'impact du réchauffement climatique sur la composition des raisins. Voisine de 15 °C actuellement, cette température augmenterait au-delà de 20 °C.

L'avancée de la phénologie se poursuivra pour toutes les espèces cultivées. Concernant le maïs, un avancement de la date de floraison d'environ 15-20 jours est attendu pour la fin du siècle, et d'environ 15 à 30 jours selon le scénario, pour la récolte [8]. Sur les espèces fruitières telles que le prunier d'Ente et le cerisier, les avancées de floraison envisagées sont susceptibles d'accroître le risque de gel de fleurs ou de jeunes fruits. Des anomalies physiologiques de la phénologie des bourgeons causées par des satisfactions insuffisantes des besoins en froid (retards et étalements excessifs de la floraison) pourraient être observées. Les conséquences agronomiques attendues sont des désynchronisations de floraison entre des cultivars devant s'interpolliniser ou des étalements excessifs de la maturité des fruits à l'échelle de l'arbre ou des vergers. Des débourrements végétatifs excessifs pourraient également perturber fortement l'architecture des arbres et la conduite des vergers.

Les rendements

Pour la plupart des productions agricoles, le rendement est la variable clé qui conditionne la rentabilité économique. Pour une variété et un système de culture donnés, il dépend en grande partie de l'évolution des conditions climatiques au cours de la saison de croissance de la culture.

Impacts observés

En Aquitaine, les rendements pour le maïs sont proches des rendements moyens nationaux (autour de 90 qtx/ha). Ces rendements ont notablement augmenté entre les années 1980 et 2000, et stagnent depuis une dizaine d'années, notamment en raison des épisodes de sécheresse répétés avec des besoins en eau accrus. De 2007 à 2010, alors que le rendement moyen du maïs irrigué est resté stable, le rendement du maïs pluvial (non irrigué) a significativement diminué. Le rendement du blé en

Aquitaine est inférieur d'un cinquième au rendement moyen national (environ 55 qtx/ha pour 70 qtx/ha au niveau national). Pour cette culture d'automne non irriguée, on observe la même tendance que pour le maïs, c'est-à-dire une augmentation du rendement depuis les années 1980 (gain de 15 qtx/ha environ), puis une stagnation voire une légère diminution depuis les années 2000 attribuée en grande partie au changement climatique, mais aussi à des paramètres agronomiques tels que la baisse de la fertilisation azotée [20]. Le rendement du tournesol, culture de printemps, non irriguée, est comparable au rendement moyen national (25 qtx/ha). Il s'avère exemplairement stable depuis une trentaine d'années.

Certaines espèces fruitières telles que le cerisier, l'abricotier, le prunier d'Ente sont déjà très sensibles aux irrégularités de production. Spécifiquement pour la région Aquitaine, il faut citer l'exemple du prunier d'Ente dont la récolte de 2011 n'a pas atteint 25 000 tonnes de fruits parvenus à maturité et de calibre marchand, alors que la filière en espérait entre 45 000 et 50 000. La sécheresse du printemps puis l'été humide en sont la cause. Ces irrégularités de production pourraient augmenter avec le changement climatique [21].

Impacts attendus

Le projet CLIMATOR a permis d'obtenir de nombreux résultats concernant la culture du maïs, de blé tendre et du tournesol dans le Sud-Ouest. Dans le cas du maïs irrigué à 80 % des besoins, on pourrait ainsi s'attendre à une diminution de rendement de 9 qtx/ha dans le futur proche (FP- 2020-2050) et de 15 qtx/ha dans le futur lointain (FL- 2070-2100). Le rendement pourrait diminuer malgré l'irrigation car l'avancement des stades phénologiques (floraison, récolte) est susceptible de générer une diminution du nombre de jours de remplissage des grains et donc une diminution du rendement. Dans le cas du blé tendre, il est prévu une stabilité du rendement dans le futur proche, voire une augmentation du rendement dans le futur lointain (+9 qtx/ha dans le FL) en raison de l'effet de l'accroissement de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère sur la production de biomasse. Les prévisions pour le futur proche sont en contradiction avec les effets observés depuis le milieu des années 1990. Pour cette culture, un avancement des stades est également attendu. Les phases de remplissage du grain pourraient donc se produire pendant des périodes moins contraignantes pour la plante. Les résultats obtenus pour le tournesol laissent envisager



Production de fraises hors sol (Marie-Noëlle Demene, Invenio)

également une stabilité du rendement dans le futur proche et une amélioration du rendement dans le futur lointain (+ 4 qtx/ha dans le FL). Mais cette augmentation ne serait pas significative, et soumise à une forte variabilité interannuelle. Ce résultat est expliqué par une compensation entre les effets bénéfiques de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique et les effets négatifs du stress hydrique, particulièrement prégnant sur sol à faible réserve en eau.

Chez le fraisier cultivé, le rendement est conditionné par le potentiel de production de la plante. L'initiation florale est un facteur déterminant pour la rentabilité de cette culture car elle conditionne le potentiel de floraison et donc pour partie, le rendement. Le fraisier a besoin en hiver d'être exposé à des heures de froid pour pouvoir lever sa dormance. L'impact d'une élévation de température se traduirait notamment par des besoins en froid non satisfaits, Dans ces conditions les plants reprendraient leur activité de façon plus précoce. Ils pourraient alors présenter un développement végétatif réduit, des hampes florales très courtes avec des fleurs mal formées. Les conséquences seraient une réduction du rendement et des fruits plus petits (comme au printemps 2003 en Aquitaine suite à un hiver doux). Par ailleurs, les automnes chauds conduisent à un retard de l'initiation florale qui a lieu le plus souvent fin août ou début septembre. Avec des températures automnales élevées, il faudrait attendre des jours plus courts pour que les plants puissent induire des inflorescences. Dans ces conditions le taux de plants induits à une date donnée serait réduit.

L'INRA Aquitaine s'associe avec Invenio et le Ciref pour étudier l'impact d'une élévation de la température sur le rendement. Des marqueurs de potentiel de floraison sont recherchés pour permettre une évaluation rapide du potentiel de production et une sélection efficace de variétés productives même en conditions plus chaudes.

La qualité des fruits

Pour les productions fruitières et surtout pour la vigne, la composition des fruits à maturité est déterminante pour la valorisation des récoltes. Cette composition dépend étroitement des conditions climatiques, comme en atteste la variabilité qu'il existe entre millésimes pour des vins élaborés à partir de raisins issus de la même parcelle. Il est donc déterminant d'étudier ce point en particulier.

Impacts observés

Pour beaucoup de régions viticoles, notamment en Aquitaine, l'avance des dates de maturité au cours des 20 dernières années a permis d'atteindre plus régulièrement une excellente maturité du raisin et s'est traduite globalement par une amélioration de la qualité des vins produits. On constate une plus grande fréquence de bons millésimes à partir des années 1980. Cette amélioration est surtout liée à l'évolution des techniques viticoles et à une plus grande fréquence des déficits hydriques au cours de l'été. Dans le Bordelais, la qualité du millésime n'est en effet pas corrélée à la température, mais au déficit hydrique perçu par la vigne entre la véraison et la récolte [22]. Par exemple, les millésimes les plus secs depuis 50 ans, 2005 et 2010, sont de grands millésimes. Ces observations réalisées dans le Bordelais sont valables pour l'ensemble de l'Aquitaine. Au cours de cette période, on constate aussi une évolution de la composition du raisin, qui n'est pas sans conséquence sur l'équilibre des vins produits. L'augmentation de la teneur en sucres du raisin, qui se traduit par une augmentation de la teneur en alcool des vins, est particulièrement spectaculaire **(Figure 3)**.

En parallèle, l'acidité du raisin a diminué, provoquant une augmentation du pH des vins. Cette évolution peut, suivant la situation et suivant la sensibilité du dégustateur, augmenter les qualités gustatives du vin (plus de souplesse et de rondeur) ou les déprécier (moins de fraîcheur). Lorsque l'augmentation des températures provoque une trop grande avancée de la période de maturation, et que celle-ci se déroule en conditions chaudes au cœur de l'été, la maturité technologique (équilibre entre sucres et acidité) est

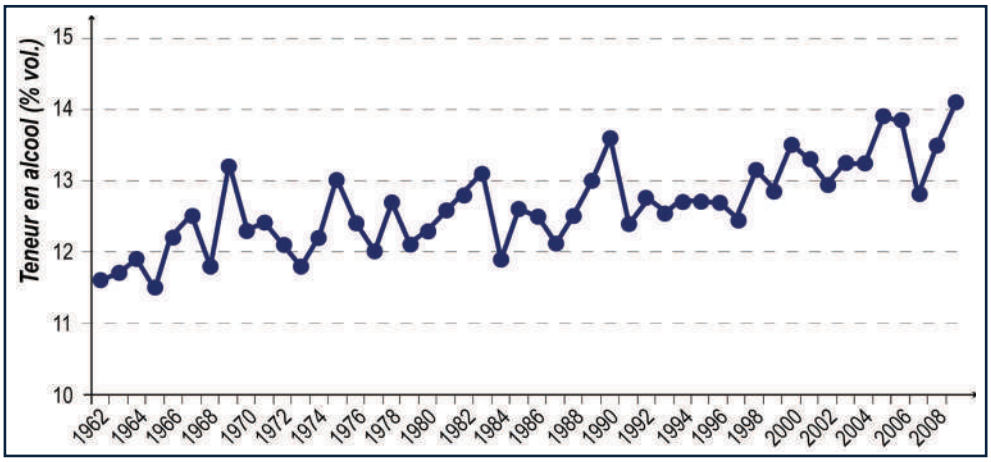


Figure 3 : *Augmentation de la teneur en alcool d'un vin d'une propriété en Bordelais entre 1962 et 2009. Alors que la teneur moyenne en alcool était inférieure à 12° au début des années 1960, elle a augmenté jusqu'à des valeurs supérieures à 13° à la fin de la première décennie du XXI^e^ siècle (Roby, communication personnelle).*

atteinte avant la maturité phénolique (maturité des tanins). L'augmentation des températures pendant les vendanges entraîne déjà des modifications de pratiques avec une augmentation de la fréquence des récoltes nocturnes. De plus, l'évolution de la composition des raisins a des conséquences majeures sur les procédés œnologiques d'élaboration des vins.

Impacts attendus

Pour la vigne, l'avancement de la phénologie conduira en toute vraisemblance à un déroulement de la maturation dans des conditions de plus en plus chaudes. Les conséquences sur la qualité du vin, plutôt positives jusqu'à aujourd'hui, risquent de devenir négatives pour une proportion croissante des vins produits en Aquitaine lorsque les augmentations de température dépasseront un certain seuil. Des études réalisées sous des climats plus chauds ont montré que l'exposition directe et prolongée des raisins à des températures élevées apparaît préjudiciable à l'accumulation des polyphénols qui contribuent à la couleur et à la structure des vins rouges [23] et des composés aromatiques [24]. Par ailleurs, la hausse des températures minimales sera probablement plus importante que celles des températures moyennes [25]. L'élévation des températures nocturnes et la réduction probable de l'amplitude thermique jour-nuit dans le cadre du réchauffement climatique à venir devraient également contribuer à des modifications de la composition en polyphénols. Des recherches sont actuellement conduites en Aquitaine au sein de l'ISVV sur ces questions. Pour des températures supérieures à environ 35 °C, des symptômes d'échaudage sur feuillage peuvent apparaître, entraînant une altération des feuilles et un blocage de la synthèse des sucres. Les raisins peuvent être eux aussi touchés par cet échaudage extrême et présenter des brûlures ou un dessèchement. Si des contraintes hydriques modérées sont favorables à la qualité des vins, des épisodes de sécheresse plus marquée s'accompagneraient d'un arrêt de la synthèse des sucres *via* la photosynthèse et de chutes de feuilles précoces, induisant un blocage de la maturation et de l'accumulation des sucres dans les raisins. Ces nouvelles conditions de maturation provoqueront des déséquilibres gustatifs (vins trop alcoolisés et insuffisamment acides), un décalage entre la maturité technologique et phénolique, ainsi qu'une modification de la composition en arômes des vins produits. Elles pourront augmenter le risque d'un vieillissement prématuré des vins, en particulier pour les vins blancs.

Au-delà des effets sur le calibre des fruits, des modifications des rythmes de croissance pourraient avoir des conséquences sur des aspects majeurs de la qualité des fruits. Chez le Cerisier, par exemple on observe déjà une plus grande proportion de fruits doubles, phénomène favorisé par des températures dépassant fréquemment les 30-35 °C durant l'été précédent. Par ailleurs l'éclatement de la cerise constitue un exemple préoccupant de caractère de qualité qui pourrait être de plus en plus soumis aux irrégularités de pluviométrie **(Figure 4)**.



Figure 4 : *Dégâts d'éclatement sur cerises mûres (photo J. Claverie, INRA). Ces fruits ne sont plus commercialisables.*

Des facteurs génétiques, physiologiques, climatiques et agronomiques ont une influence sur ce caractère. Des études sont actuellement en cours à l'INRA en Aquitaine pour créer des variétés moins sensibles à ce problème.

Le confort hydrique des cultures et les conséquences sur la ressource en eau

Étant donné l'importance et l'enjeu que représente l'eau pour l'agriculture en Aquitaine, il nous a paru indispensable de présenter quelques éléments relatifs aux situations actuelles et futures pour cette question. Le confort hydrique exprime la capacité d'une culture à fonctionner de façon potentielle, c'est-à-dire sans réduction de la consommation en eau liée à un stress hydrique.

Impacts observés

De 2003 à 2006, les besoins en eau d'irrigation des cultures de maïs ont été, en France, de 30 % supérieurs à la moyenne de la décennie précédente [calcul qui tient compte des précipitations et de la réserve en eau des sols, 26], même si la responsabilité du changement climatique sur cette augmentation n'a pas été démontrée. La surface de maïs irrigué a été réduite de 10 % en Aquitaine (pour une moyenne nationale de 13 %). Dans le même temps, les volumes d'eau par hectare ont progressé pour compenser les déficits de précipitation. La sécheresse a surtout été plus marquée en 2005 dans notre région [27]. Cette année avait en effet été caractérisée par un déficit de pluviométrie estivale, précédé d'un hiver également sec. Ces sécheresses ont eu un impact négatif sur le rendement des céréales (cf. § Les rendements), mais positif sur la qualité des vins produits dans la région (cf. § La qualité des fruits).

Impacts attendus

Les simulations réalisées dans le cadre du projet CLIMATOR montrent des impacts variables pour le confort hydrique et la restitution aux nappes, selon les cultures et le fait qu'elles sont irriguées ou non.

Ainsi, dans le cas du blé, culture d'automne non irriguée, malgré l'anticipation des stades phénologiques, la diminution de la pluviométrie pourrait provoquer une détérioration du confort hydrique, affectant davantage le rendement. Par contre, à même niveau de confort hydrique, l'effet bénéfique du CO_2 induirait une augmentation du rendement dans le futur proche (2020-2050) et dans le futur lointain (2070-2100). Concernant le maïs irrigué, l'augmentation du déficit hydrique climatique pourrait se traduire par la nécessité d'un supplément d'irrigation de l'ordre de 40 mm/an en moyenne dans le futur proche (2020-2050). Dans le futur lointain (2070-2100), les incertitudes sont grandes et il se peut que le frein phénologique compense l'augmentation du déficit climatique. Par ailleurs, le maïs, en raison de ses particularités en matière de photosynthèse, serait moins favorisé par l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique. Les choix des variétés et des sols seront très importants pour limiter l'augmentation d'eau d'irrigation.

Malgré l'augmentation du déficit hydrique climatique, le confort hydrique de la vigne dans le vignoble girondin ne subirait pas de détérioration très sensible pendant la période floraison-maturité grâce au maintien de quelques pluies estivales et à l'avancée de la phénologie qui pourrait reporter les périodes de sécheresses les plus intenses après les vendanges. En revanche, une franche diminution du confort hydrique de la vigne pourrait concerner le nord de la région, par extrapolation de ce qui est simulé à Lusignan en Poitou-Charentes. Les zones les plus à l'est connaîtraient un confort hydrique toujours

dégradé, comme l'indiquent les résultats obtenus pour Toulouse **(Figure 5)**.

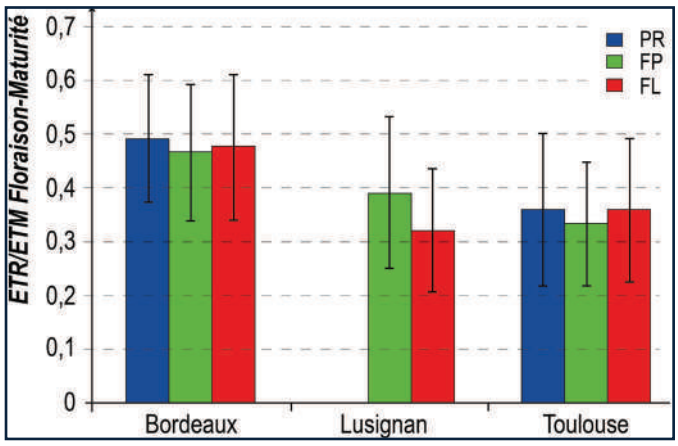


Figure 5 : *Confort hydrique estimé pour le passé récent (PR), futur proche (FP) et futur lointain (FL) par le rapport ETR (Évapotranspiration réelle) sur ETM (Évapotranspiration Maximale) pour un vignoble du cépage Merlot à Bordeaux, Lusignan et Toulouse. ETM représente la demande en eau d'une culture en absence de limitation hydrique. Ce rapport quantifie donc l'équilibre offre/demande moyen entre la floraison et la maturité [8].*

Le changement climatique aurait pour conséquence une baisse très sensible de la restitution d'eau aux nappes en profondeur ou aux rivières. Les prévisions réalisées pour les sols viticoles dans le cadre du projet CLIMATOR montrent que dans les zones où le rapport offre sur demande en eau est initialement relativement élevé, comme à Bordeaux, la quasi-totalité de la baisse de la ressource en eau se répercuterait sur un défaut d'alimentation des nappes en profondeur (ou d'alimentation du réseau hydrologique), ce qui est cohérent avec le fait que le confort hydrique des cultures serait peu affecté. Pour les zones plus continentales comme le Lot-et-Garonne, dont le bilan hydrique climatique est initialement plus faible ou négatif, il y aurait une diminution moindre de la restitution de l'eau aux nappes par rapport à la situation actuelle. Le niveau de restitution d'eau au milieu serait également modulé par les paramètres du système de culture, en premier lieu par la réserve utile du sol : une réserve plus importante permet de stocker de l'eau qui sera évaporée ou transpirée vers l'atmosphère, et donc de réduire la transmission en profondeur.

La santé des cultures

Les bioagresseurs des plantes sont connus pour avoir des impacts variables sur les cultures en fonction des variations de conditions climatiques interannuelles. On imagine donc que le changement climatique aura un impact majeur sur le fonctionnement des pathogènes et sur leur agressivité vis-à-vis des différentes cultures.

On s'attend notamment à des effets directs du changement climatique sur les champignons pathogènes, ainsi qu'à des effets indirects *via* la plante hôte. L'augmentation des températures, de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, de l'irrégularité des pluies et de l'occurrence d'événements extrêmes, devrait modifier non seulement les cycles épidémiques mais également la répartition spatiale des pathogènes. Classiquement, l'efficacité d'infection d'un champignon dépend de deux variables climatiques, la température et la durée d'humectation (présence d'eau libre sur les feuilles ou les fruits). L'augmentation des températures et la diminution de la durée d'humectation attendues dans un contexte de changement climatique pourraient avoir des effets antagonistes sur le processus d'infection. Les simulations réalisées dans différents travaux (dont le projet CLIMATOR) montrent que, selon les besoins en durée d'humectation et l'optimum thermique des pathogènes, différentes situations se dessinent. Ainsi, dans le cas de la rouille brune du blé, les effets de la température et de la durée d'humectation devraient se compenser dans un futur proche, puis l'effet défavorable de la baisse significative de la durée d'humectation devrait l'emporter et réduire notablement le nombre de jours favorables aux infections du printemps et de l'été. Globalement, on s'attend à une diminution marquée des pertes de rendement dues à la rouille brune, notamment pour les variétés tardives de blé. Pour la septoriose du blé, on montre que la constitution de l'inoculum serait bien moins limitée par le froid hivernal, mais qu'en revanche la diminution des pluies freinerait ensuite fortement la progression épidémique, se traduisant par une diminution de la nuisibilité de la maladie. Cette baisse de pluviométrie devrait également pénaliser les phases d'infection et de sporulation du mildiou de la vigne, ainsi que le risque épidémique de botrytis, étroitement lié aux précipitations durant la période véraison-maturité. Toutefois, on constate un effet positif de l'accroissement de température et de l'augmentation de teneur en CO_2 sur la croissance de

divers champignons qui sont suspectées être à l'origine de déviations aromatiques dans les vins évoquant la terre humide, l'humus, la betterave rouge ou le champignon frais.

Enfin, l'augmentation des températures est également susceptible de modifier le positionnement du cycle du champignon par rapport au cycle de la culture. Ainsi, l'avancement des dates de débourrement de la vigne pourrait favoriser les infestations primaires de mildiou, même si les autres phases du cycle épidémique étaient en moyenne freinées par la baisse de pluviométrie comme on l'a montré plus haut [28].

En ce qui concerne les insectes ravageurs, le principal facteur ayant un effet direct sur leur cycle reproducteur est la température [29][30]. Jusqu'il y a une dizaine d'années, un ravageur majeur de la vigne, l'espèce de vers de la grappe *Eudemis* avait généralement trois générations en Aquitaine, la dernière étant nettement séparée des deux précédentes et située tard en septembre. Aujourd'hui cette troisième génération succède rapidement à la deuxième et il n'est pas rare de trouver une quatrième génération en octobre/novembre. Mais les effets des températures élevées peuvent parfois être néfastes au développement de certains insectes en bloquant les cycles de pontes (au-delà de 32,5 °C) et en causant une forte mortalité des œufs au-delà de 38 °C, comme dans le cas d'une autre espèce de vers de la grappe, *Cochylis* [31]. De même, il est très probable que de nouveaux ravageurs puissent faire leur apparition suite au réchauffement climatique. Ainsi des lépidoptères, des drosophiles agents de la pourriture acide ou des cochenilles vectrices de virus, cantonnés actuellement dans les zones méditerranéennes, commenceraient leur remontée [32]. La drosophile fait déjà de nombreux ravages dans les Alpes maritimes (source chambre d'agriculture) sur les fraises et cerises, et a été signalée en Poitou-Charentes en 2011 (source FREDON).

II- Adaptations

L'adaptation peut être définie comme « l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et en maximiser les effets bénéfiques ». Elle recouvre des formes d'actions très variées qui s'appliquent à de nombreux secteurs. Ses problématiques diffèrent suivant les zones et les échelles géographiques et sa mise en œuvre implique de combiner des instruments très divers [33]. Nous n'aborderons ici que les aspects techniques et de localisation en lien avec les enjeux agricoles.

Les changements de pratiques culturales

L'irrigation est l'une des pratiques culturales qui risque d'être la plus remise en question dans le futur. Cela est particulièrement déterminant pour la culture du maïs, mais aussi la production de semences, les vergers à fruits et les légumes de plein champ [34]. Les surfaces irriguées ont augmenté de 20 % depuis les années 1980. Les différentes zones de culture de maïs en Aquitaine présentent de forts contrastes en matière de possibilité d'irrigation. Si les irrigants des sables landais puisent sans contrainte dans la nappe superficielle, abondante et impropre à la consommation humaine, les irrigants du bassin de l'Adour, de la Garonne et de la Dordogne sont fréquemment soumis à des restrictions, voire des interdictions, l'été alors que les besoins du maïs grain sont les plus élevés.

Ces dernières années, d'importants efforts ont été accomplis pour adapter les apports aux réels besoins de la plante, en pilotant l'irrigation avec des bilans hydriques ou des mesures de l'eau dans le sol. Par ailleurs, les surfaces en maïs irrigué ont décru depuis 2005, et plus de la moitié des terres libérées a été réaffectée à d'autres cultures céréalières non irriguées. Mais dans le contexte du changement climatique et de la raréfaction de la ressource en eau en Aquitaine, la poursuite de la culture du maïs sous irrigation est fortement menacée dans le Sud-Ouest à échéance variable en fonction des zones de production [8]. La réduction des surfaces en maïs irrigué pourrait ainsi libérer des volumes d'eau pour des

irrigations de complément pour des cultures non irriguées jusqu'alors (blé, tournesol etc.) ou le maintien de l'irrigation pour des filières très sensibles (semences, vergers, légumes de plein champ) [34]. Du point de vue économique, la culture du maïs a permis jusqu'à présent le maintien de nombreuses exploitations de taille moyenne, elle est aussi liée aux systèmes de culture « sous contrats » qui rendent l'irrigation presque obligatoire pour maximiser et sécuriser le rendement. Par ailleurs, les politiques publiques de développement agricole avaient clairement affiché l'irrigation comme priorité stratégique dès le milieu des années 1980 pour maintenir le marché des cultures « sous contrats » et pousser à l'intensification de certaines cultures. Ce sont donc principalement des éléments de politique publique (modèles d'agriculture, PAC, prix de l'eau, arbitrage au sein des territoires, développement d'infrastructures pour le stockage de l'eau) qui feront évoluer la situation [11].

La tendance actuelle est de continuer à envisager l'irrigation des vergers en mettant en œuvre des techniques permettant de réduire les apports de 20 à 30 % sans pénaliser la production. En Lot-et-Garonne, l'ATGM participe à de nombreux projets de recherche et d'expérimentation dont l'objectif est d'une part de mieux prévoir les risques de sécheresse et de mieux piloter l'irrigation. L'irrigation de la vigne en Aquitaine, interdite jusqu'alors en AOP, ne pourrait être envisagée qu'en dernier recours, en se posant clairement la question des priorités en matière de partage des ressources en eau. La vigne est une plante naturellement résistante à la sécheresse, qui n'est pas cultivée pour obtenir un rendement maximal, mais un rendement compatible avec une qualité donnée des raisins, les deux éléments étant déterminants pour la rentabilité économique des exploitations. Par ailleurs, l'irrigation, même raisonnée, peut conduire à une augmentation supplémentaire de la teneur en sucres des raisins.

D'autres pratiques culturales peuvent être modifiées en réponse au changement climatique. Pour les grandes cultures, l'avancée des dates de semis est une pratique qui est déjà mise en œuvre et pourra se poursuivre. D'après les résultats de CLIMATOR, elle serait *a priori* très intéressante pour le tournesol. Pour le blé, l'avancement des dates de semis, intéressant en termes d'esquive du stress hydrique de fin de cycle, doit être réfléchi en tenant compte de ses conséquences sur la gestion de la flore adventice et sur la phase de germination et levée en lien avec l'humidité du sol. Dans le cas du maïs et du sorgho, son intérêt est vérifié, mais plus limité compte tenu de la physiologie et du positionnement calendaire de ces deux espèces.

En viticulture, le potentiel de certaines pratiques doit être évalué. La mise en œuvre de la taille hivernale pourrait être retardée, avec pour conséquence un retard de quelques jours seulement sur le démarrage de la végétation. L'accumulation en sucres des raisins est également très dépendante de l'équilibre entre la quantité de feuillage (qui produit les sucres) et de raisins (qui accumulent les sucres). Ainsi, une réduction du rapport feuilles/fruit, soit par une augmentation de rendement, soit par une diminution de la surface foliaire, pourrait présenter un intérêt dans le cadre du changement climatique. C'est paradoxalement l'inverse de ce qui est conseillé depuis 30 ans en viticulture, car appliqué à un contexte où la teneur en sucres des raisins était jusqu'à présent un facteur limitant de la qualité. Les pratiques de taille hivernale, de conduite du feuillage et d'éclaircissage pourraient être revues dans ce sens. On pourra également à court terme adapter le système de conduite pour éviter l'échauffement des baies de raisin, par exemple développer toutes les pratiques favorisant l'ombrage des grappes par les feuilles (par exemple usage du cordon déployé comme en Espagne). Finalement, une diminution de la densité de plantation (nombre de souches/ha) pourrait conduire à une réduction des besoins en eau. Étant en général accompagnée d'une augmentation du rendement par souche (pour maintenir le rendement à l'hectare), les effets pourraient retarder l'accumulation des sucres dans les raisins. L'impact sur l'accumulation des composés phénoliques devrait être évalué.

Le changement d'espèces et de variétés

Le maintien de la culture du maïs dans la région Aquitaine ne pourra se faire sans une orientation nette vers des variétés plus précoces et des dates de semis avancées. Mais cette évolution ne résoudra pas à elle seule les difficultés pressenties. La modération des surfaces et la possibilité d'accroissement de la ressource (en eau) devront également être étudiées. Pour maintenir la culture du maïs dans la région Aquitaine, le recours à des variétés à cycle court avec des maturités plus précoces permettrait d'importantes économies d'eau d'irrigation. Pour le blé, le choix des variétés précoces permettrait d'éviter les périodes de stress hydrique importantes en fin de cycle, sous réserve que l'implantation se réalise en condition d'humidité du sol suffisante pour permettre une germination rapide et une bonne installation du peuplement. Dans le cas du tournesol, le choix de variétés progressivement à cycle long et l'avancée des semis pourra ponctuellement offrir des perspectives d'augmentation des rendements, mais pas de façon systématique. Actuellement, de programmes de recherche de variétés moins gourmandes en eau et plus résistantes aux fortes températures est en cours pour toutes ces espèces. Le sorgho est une culture qui a des atouts indéniables d'adaptation à la sécheresse attendue dans le cadre du changement climatique, grâce à son système racinaire, plus profond que celui du maïs, et son feuillage moins exubérant [11] **(Figure 6)**. Elle pourrait avantageusement remplacer la culture du maïs. Les perspectives de cette culture dans la région Aquitaine montrent que l'on peut s'attendre à une augmentation de 6 qtx/ha du rendement d'ici la fin du siècle pour le sorgho pluvial. De plus, l'introduction de l'irrigation raisonnée permettrait d'améliorer la capacité de production de cette culture alternative.

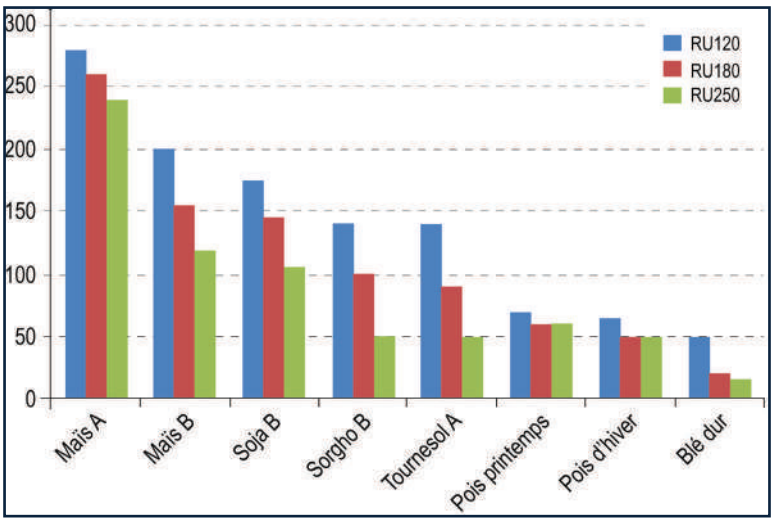


Figure 6 : *Besoins en irrigation moyens de 7 cultures d'hiver et d'été : simulation avec le modèle [35] sur la base de seuils « transpiration réelle/transpiration maximale » différents selon la sensibilité des cultures (3 niveaux de réserve utile RU, sols argilo-limoneux, climat Toulouse 1984-2004) [11].*

Pour la vigne, la modification des cépages et des porte-greffes paraît être une alternative à considérer avec sérieux que ce soit pour essayer de retarder la maturité ou pour améliorer l'adaptation à la sécheresse [36]. Étant donné les impacts du changement climatique sur la qualité et la typicité des vins, il conviendra d'abord de retarder la phénologie. Cela peut se faire, dans un premier temps, par le recours à des clones plus tardifs et des porte-greffes à cycle plus long (420A, 41B). Il sera aussi possible d'augmenter la proportion de cépages tardifs, tout en restant dans la palette des cépages traditionnellement cultivés en Aquitaine (Cabernet-Sauvignon, Cabernet franc et Petit Verdot pour la production de vins rouges, petit Manseng, gros Manseng et Colombard pour les cépages blancs). Pour la deuxième moitié du siècle, cette solution ne sera certainement pas suffisante et l'introduction de cépages tardifs non autochtones pourrait être envisagée [36] **(Figure 7)**. Il est néanmoins nécessaire d'évaluer au préalable leur compatibilité avec la typicité des vins de Bordeaux. Le recours à des cépages d'origine atlantique, comme le Touriga nacional (cépage tardif portugais) pourrait être prometteur. Des recherches sont actuellement menées dans ce sens en Aquitaine par l'ISVV avec le soutien du Conseil Interprofessionnel des Vins de Bordeaux (CIVB). En ce qui concerne la sécheresse, il est bien connu qu'il existe une large variabilité de comportement entre cépages et aussi entre porte-greffes. Plusieurs programmes de recherches sont conduits à ce sujet à l'ISVV pour sélectionner des porte-greffes plus résistants à la sécheresse.

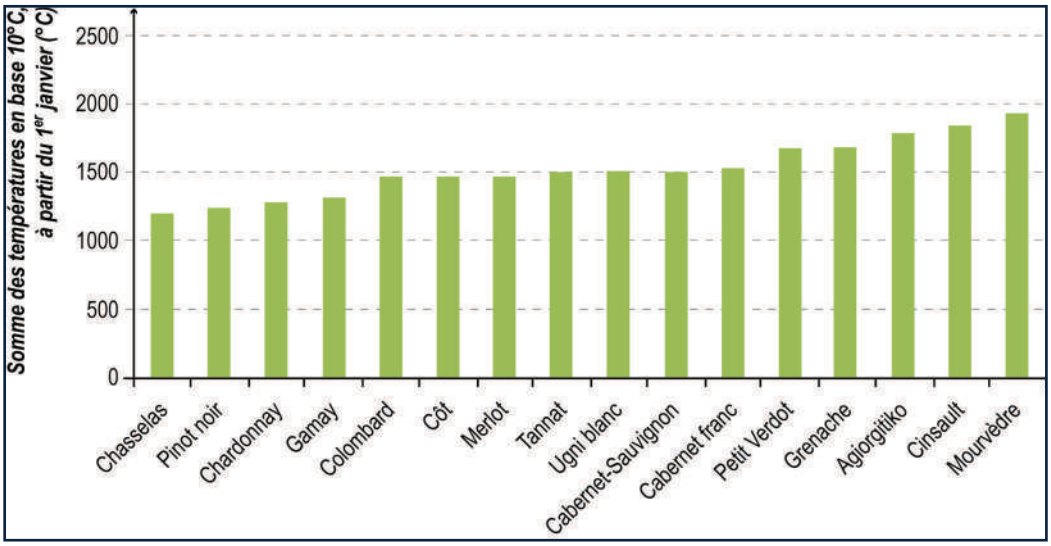


Figure 7 : *Classification des besoins thermiques de quelques cépages pour atteindre le stade maturation des raisins. Ces besoins sont calculés en faisant la somme des températures journalières moyennes supérieures au seuil de 10 °C à partir du 1er janvier jusqu'à la date de maturité des raisins. Un jour à température moyenne de 15 °C apporte 5 °C. J à la somme et un jour à température moyenne inférieure à 10 °C n'apporte rien à la somme. Cet indice caractérise la précocité des différents cépages. Les cépages situés sur la gauche du graphique mûrissent le plus tôt, et ceux qui sont sur la droite mûrissent le plus tard. Les cépages les plus tardifs pourraient être introduits dans l'encépagement bordelais, après avoir expérimenté leur potentiel pour élaborer des vins de qualité dans la région Aquitaine [37].*

Pour les espèces fruitières, la recherche de variétés adaptées à des automnes chauds (fraisier), à des hivers doux (cerisier) est développée à l'INRA d'Aquitaine. Sur fraisier, le rôle de la température sur l'architecture de la plante est analysé pour mieux comprendre l'équilibre entre développement végétatif et reproducteur et son évolution attendue avec le changement climatique.

Le changement de localisation

La capacité à maintenir un certain confort hydrique pour chaque culture (sols profonds pour le maïs et le blé, sols moins riches pour le tournesol ou le sorgho) est déjà prise en compte dans le choix des assolements. L'enjeu majeur résidera alors à limiter les besoins en eau d'irrigation dans certaines zones de la région, en remplaçant partiellement certaines cultures par d'autres moins consommatrices.

En viticulture, notamment en Aquitaine, les enjeux spatiaux sont majeurs, en raison de la prépondérance des vins en Appellation d'Origine Protégée. L'AOP est une dénomination européenne de protection (reprenant l'AOC française et lui reconnaissant une valeur européenne) d'un produit lié à son origine géographique. Il garantit l'origine de produits alimentaires traditionnels, issus d'un terroir et d'un savoir-faire particulier. Il est soumis à une réglementation très stricte et conditionne en partie l'organisation générale de la filière. Le terroir est défini comme un écosystème cultivé dans lequel la vigne est en interaction avec le sol et le climat [38].

Le climat aquitain présente une variabilité non négligeable qui a été étudiée dans la zone de production des vins de Bordeaux [39] et qui pourrait donc être mise à profit pour relocaliser la vigne sur des zones plus fraîches et donc plus tardives dans un même espace géographique. L'effet des températures sur les cultures est classiquement évalué par l'établissement des sommes de températures. La somme de températures journalières moyennes supérieures au seuil de 10 °C, calculée sur la période s'étalant du 1er janvier à fin septembre varie d'environ 300 °C.J sur la zone de production des vins de Bordeaux **(Figure 8)**. Cette variabilité est du même ordre de grandeur que la variabilité des sommes thermiques entre millésimes et du même ordre que les changements prévus pour le futur proche. Elle est aussi du même ordre de grandeur que les différences entre la somme thermique enregistrée en Bourgogne

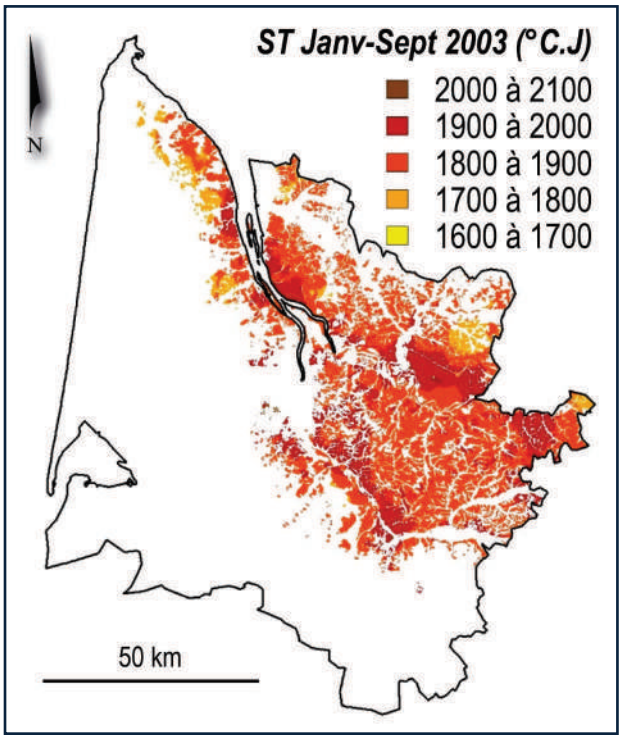


Figure 8 : *Cartographie des sommes de températures supérieures à 10 °C entre le 1er janvier et le 30 septembre de l'année 2003, à l'échelle du vignoble bordelais. La somme des températures peut varier de 1700 dans certaines zones du Blayais et du Nord-Ouest du Médoc à 2000 °C.J dans les vignobles proches de l'agglomération bordelaise ou sur les rives de Garonne et Dordogne [38].*

(1160 °C.J en moyenne trentenaire pour Dijon) et celle enregistrée à Bordeaux (1490 °C.J), ou encore entre Bordeaux et le Languedoc (1800 °C.J pour Montpellier) [40]. La connaissance de cette variabilité climatique à l'échelle des terroirs viticoles fait actuellement l'objet de plusieurs projets de recherche (TERADCLIM, LACCAVE) avec plusieurs zones d'études dans le Bordelais. Localement, ces recherches sont soutenues par les professionnels. Possible sur le plan strictement technique, une relocalisation dans des espaces géographiques nouveaux soulèvera des questions socio-économiques et organisationnelles majeures.

Impacts sur l'élevage et les systèmes prairiaux

En Aquitaine, la production agricole est en valeur à près de 70 % d'origine végétale. Les productions animales sont essentiellement représentées par la filière bovine (10 %) et la volaille (9 %). Pourtant l'élevage concerne 30 % des exploitations en Aquitaine et utilise près de 40 % de la SAU sous forme de cultures fourragères et de surfaces en herbe. À l'échelle nationale, l'élevage herbivore contribue à 11 % des émissions brutes de gaz à effet de serre, mais cette part à tendance à se réduire. Dans le contexte du changement climatique, l'effort porte à la fois sur la réduction de l'impact environnemental des activités d'élevage (réduction des émissions de gaz à effet de serre, économie d'énergie au niveau des bâtiments agricoles) et les études d'impact de la modification des paramètres climatiques sur la production des élevages et des aliments destinés à l'élevage. L'établissement d'enseignement supérieur Bordeaux-Sciences-Agro s'implique particulièrement dans ces thématiques.

L'impact de l'augmentation de la température et des vagues de chaleur sur les élevages avicoles et porcins fait l'objet de travaux de recherche dans les régions très concernées, notamment la Bretagne. Mais les résultats obtenus sont extrapolables à l'Aquitaine. Ces animaux ne transpirant pas, ils doivent évacuer la chaleur produite par leur organisme par différents mécanismes, et notamment l'augmentation de leur rythme respiratoire. Les difficultés d'évacuer la chaleur augmentent avec la température et l'humidité de l'air, ce qui peut entraîner des baisses de production voire la mort des animaux [41][42]. Par ailleurs différents facteurs liés à l'alimentation et à l'âge des animaux jouent sur la production de chaleur. Les recherches portent actuellement sur la mise au point de modèles qui permettent de simuler la production de chaleur et la productivité des animaux, afin de pouvoir estimer à terme les impacts des augmentations de température prévues par les climatologues. PIGCHANGE, un projet du Métaprogramme ACCAF est consacré à ces travaux. Ces travaux prennent également en compte les caractéristiques des bâtiments d'élevage afin d'en améliorer l'isolation thermique et la ventilation.

En ce qui concerne la production d'aliments et les systèmes prairiaux, il a été montré qu'à court terme une réduction des surfaces en maïs du fait de la restriction des volumes d'eau prélevables pour l'irrigation ne remet pas en question la production et la transformation de volailles. Outre leur fonction de production, les prairies jouent également un rôle de protection de l'environnement (limitation du lessivage), de la biodiversité, en tant que puits de carbone, et de détoxification des polluants de sols. L'impact du changement climatique sur ces éco-agro systèmes doit donc être évalué en termes de production, de qualité et aussi de diversité biologique. Les travaux réalisés dans le programme CLIMATOR [8] pour les prairies semées montrent que le réchauffement climatique devrait permettre un allongement de la période de production et donc une exploitation (fauche ou pâturage) plus tôt au printemps et plus tard en fin d'année. Par contre une diminution du rendement estival est envisagée à cause de la sécheresse, ce qui accentuerait le problème de surproduction d'herbe au printemps et de manque de fourrages en été. En Aquitaine, les augmentations de production seraient assez limitées. De plus des études réalisées sur des prairies naturelles en Dordogne et dans les Pyrénées par une équipe de l'Université de Bordeaux I (EPOC) montrent que l'effet du changement climatique sur les communautés herbacées dépendrait fortement des situations locales, et ce en interaction avec les modes de gestion des prairies. En zones déjà sèches en Dordogne, l'aggravation de la sécheresse aurait un impact très négatif sur la diversité, la composition floristique et le fonctionnement des écosystèmes, aussi bien en situation fauchée (ou pâturée) que dans les espaces abandonnés par la gestion [43][44]. En revanche, dans les Pyrénées et en situation sèche, la sécheresse induite par le changement climatique n'affecterait négativement la diversité que dans les zones très pâturées ou très fauchées. En zones plus humides, aussi bien en Dordogne que dans les Pyrénées la diversité augmenterait avec la fauche sans effet de la sécheresse.

Conclusion

Étant donné l'importance de l'agriculture en Aquitaine et le positionnement que cela confère à la région dans l'économie nationale, le changement climatique représente un enjeu majeur qu'il est nécessaire d'ores et déjà de prendre en compte. Les efforts pour en étudier les impacts et envisager des adaptations devront se faire en concertation entre tous les acteurs des différentes filières concernées. La réflexion et l'action devront être collectives et prendre en compte tous les éléments déterminants pour l'agriculture, y compris ceux relatifs à la protection des écosystèmes. Pour la région Aquitaine, il s'agira notamment de préserver le potentiel agricole, en recherchant des solutions agronomiques qui conduisent à une réduction des besoins en eau d'irrigation. Il serait déterminant de mettre en place un observatoire du changement climatique et de ses effets agricoles en région Aquitaine. Une réflexion sérieuse sur les types d'agriculture adaptés et le lien production-commercialisation devra être conduite pour maintenir le tissu économique. La question de l'irrigation devra être posée quel que soit le type de culture, et les choix devront être établis en tenant compte des usages partagés de la ressource en eau, que ce soit entre les différents utilisateurs, mais aussi entre les différents départements de la région Aquitaine.

Certains secteurs comme les fruits et légumes pourraient bénéficier de l'avancée des dates de récolte et améliorer ainsi leur compétitivité vis-à-vis d'autres régions françaises et européennes. La viticulture dispose quant à elle d'un potentiel adaptatif important et devrait avoir comme objectif de maintenir, dans les nouvelles conditions climatiques, le haut niveau qualitatif qui est la marque du vignoble aquitain. Les procédures réglementaires devront prendre en compte les adaptations techniques nécessaires. Pour ces cultures, il existe une dynamique scientifique bien implantée dans la Région, dont les objectifs prioritaires de recherche tiennent compte des impacts du changement climatique et des adaptations à mettre en œuvre.

La question de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique est par nature pluri-factorielle et doit être abordée par des recherches pluridisciplinaires, allant des sciences physiques et biologiques aux sciences humaines et sociales. La question de l'adaptation de la Viticulture aquitaine au changement climatique devrait à ce titre, constituer une priorité exemplaire (dans le sens servir d'exemple). Comme cette viticulture est principalement associée à la notion d'appellation d'origine, la question des adaptations techniques doit être envisagée, conjointement à une réflexion sur les dispositions réglementaires, mais aussi sur le lien au terroir comme gage de qualité et de valorisation commerciale. La recherche bordelaise, au sein de l'ISVV, s'est engagée dans cette direction, que ce soit au niveau régional, qu'au niveau national.

5.2 Les forêts

Coordination : *Antoine Kremer*
Rédacteurs : *Laurent Augusto, Vincent Banos, Alexandre Bosc, Yves Brunet, Antoine Collin, Emmanuel Corcket, Sylvain Delzon, Marie-Laure Desprez-Loustau, Hervé Jactel, Antoine Kremer, Denis Loustau, Jean-Jacques Malfait, Céline Meredieu, Olivier Mora, Virginie Moreaux, Dominique Piou, Margot Régolini, Pierre Trichet*

Après avoir rappelé l'importance écologique et économique des forêts en Aquitaine, ce chapitre fait une revue des effets déjà visibles des changements globaux sur les forêts, des tendances futures et des mesures d'anticipation envisagées. Il est souvent difficile d'attribuer les effets observés aujourd'hui au seul changement climatique. L'accélération de la croissance de certaines essences, l'avancée de la date de débourrement des arbres et leur migration sont les manifestations les plus tangibles des effets des changements environnementaux en cours. Ces tendances sont amenées à se renforcer, même si l'évolution de la productivité pourrait présenter des disparités géographiques fortes au cours des décennies à venir. Le changement climatique augmentera l'exposition des forêts à des risques phytosanitaires et physiques (feux, sécheresse), à l'émergence de pathosystèmes nouveaux. Des politiques de gestion adaptative sont envisagées avec l'objectif d'améliorer la résilience des peuplements forestiers, ou de renforcer les mécanismes d'adaptation des espèces aux changements environnementaux. Les forêts offrent également des opportunités d'atténuation des effets du changement climatique, qui résident dans leur capacité de stockage du carbone in situ, dans les sols et la biomasse, et de substitution par les produits forestiers du carbone fossile utilisé dans différents secteurs (énergie, construction, etc.).

Introduction

Les forêts d'Aquitaine constituent une ressource économique et écologique considérable, tant par la diversité des ressources biologiques qu'elles renferment que par les services et produits qu'elles fournissent. Elles couvrent globalement 1,8 million d'ha, ce qui correspond à un taux de boisement de 43 % (le taux moyen national de boisement est de 29 %). On distingue traditionnellement trois types de forêts, réparties sur des zones écologiques contrastées :

- Les forêts des plateaux calcaires de Dordogne et du Lot-et-Garonne partiellement recouverts de placages acides (360 000 ha), principalement constituées de chêne pédonculé, chêne sessile, châtaignier et pin maritime.
- Les forêts du bassin sédimentaire sableux des Landes de Gascogne (triangle landais, 1,2 million d'ha), constituées de pin maritime et de chêne pédonculé et chêne tauzin.
- Les forêts de la zone Adour-Pyrénées (277 000 ha) regroupent trois ensembles majoritairement feuillus (vallée de l'Adour, piémont pyrénéen, montagne pyrénéenne) et sont principalement composées de chêne pédonculé, châtaignier, frêne, aulne, robinier, érable, hêtre et sapin.

Leur situation écologique et géographique particulière entre régions méditerranéenne et tempérée fait que nombre d'espèces forestières se retrouvent en limite d'aire de répartition méridionale (hêtre, chêne sessile) ou septentrionale (chêne-liège, chêne tauzin), dont le maintien ou l'extension sera sans doute dépendant de leurs réponses aux changements climatiques.

La production de bois des forêts est une composante majeure de l'économie régionale. La filière forêt-bois en région Aquitaine regroupe 33 000 emplois salariés (ce qui représente 10 % de l'emploi industriel dans la région). Outre la production de matériau bois orienté vers des valorisations industrielles, les forêts d'Aquitaine jouent un rôle important dans la protection des milieux (fixation des dunes, des berges dans les ripisylves et des sols en montagne) et la conservation de la diversité biologique dans les milieux naturels connexes (principalement dans les zones humides, étangs, lacs côtiers, tourbières acides, lagunes…) ou au sein de zones protégées (zones Natura 2000, réserves biologiques, zones ZNIEFF[1]). Enfin elles constituent un élément essentiel du cadre de vie des Aquitains en offrant de nombreuses activités touristiques et récréatives.

Les forêts d'Aquitaine ont connu de profondes mutations au cours du siècle dernier. La plus spectaculaire est l'intensification de la sylviculture des peuplements de pin maritime. D'autres moins connues concernent leur extension en surface et leur croissance accrue. Les trois types de forêts ont doublé en surface au cours du dernier siècle. Au-delà de l'augmentation de la productivité due notamment à l'amélioration des techniques culturales dans les Landes de Gascogne, la croissance des arbres a continuellement augmenté depuis le début du XX^{e} siècle autant en altitude [1] qu'en plaine [2], en réponse aux changements environnementaux (dépôts azotés, accroissement de la teneur atmosphérique en CO_2, élévation de la température). Elles ont également été sujettes à de profondes crises démographiques suscitées par des événements climatiques exceptionnels par leur intensité (cf. *infra*).

La présente contribution constitue un état de lieux des connaissances acquises à partir des observations faites au cours des toutes dernières décennies, sur les effets et conséquences du changement climatique sur les forêts d'Aquitaine. Elle complète utilement les constats et synthèses faites à d'autres échelles géographiques depuis le niveau mondial [3] [4], le niveau européen [5] [6] [7] et le niveau national [8] [9] [10] [11] [12]. Elle se fixe également pour objectif de considérer les impacts attendus et d'évaluer les capacités d'adaptation et d'atténuation des forêts d'Aquitaine.

I- Changements et impacts observés

A- Phénologie des arbres

La phénologie est l'étude des variations des phénomènes périodiques de la vie végétale et animale en relation avec le climat. Les événements phénologiques sont des marqueurs du climat mais jouent également un rôle central dans l'adaptation des êtres vivants aux variations climatiques. Pour les arbres, ils conditionnent en grande partie les échanges de carbone entre l'atmosphère et la biosphère terrestre et semblent jouer un rôle sur les limites de répartition des espèces. Dans le contexte actuel de changement climatique, ces caractères adaptatifs revêtent donc une importance croissante dans de nombreux domaines de recherche fondamentale et appliquée. C'est pourquoi plusieurs études scientifiques, réseaux d'observations, bases de données et programmes de recherches sur la phénologie ont vu le jour ces dernières années dans les unités de recherche d'Aquitaine.

Les suivis phénologiques de la date de débourrement des feuilles effectués au cours des trois dernières décennies montrent que toutes les espèces forestières étudiées en forêt naturelle (chêne sessile, hêtre commun, houx, érable sycomore, frêne élevé et sapin commun) ont avancé leur date de débourrement en réponse au réchauffement du climat [13]. Toutefois, nous constatons que la sensibilité phénologique à la température varie considérablement entre espèces : les données montrent que le frêne et le chêne sont les espèces dont le débourrement a été le plus avancé au cours des trois dernières décennies alors que le débourrement du hêtre n'a été affecté que marginalement sur cette même

1. ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique.

période **(Figure 1)**. Les résultats montrent également, pour toutes les espèces étudiées, un allongement de la saison de croissance (différence entre la date de débourrement et la date de chute des feuilles) avec l'augmentation de la température moyenne annuelle. Toutefois, les différences de sensibilité à la température de la phénologie printanière et automnale induisent des réponses en termes de saison de croissance relativement contrastées entre les espèces. Le hêtre et le frêne sont les espèces dont la saison de croissance s'allonge le moins face à une augmentation de la température (respectivement 8 et 7 jours/°C) alors que cet allongement est supérieur à 13 jours par degré pour le chêne [13]. Par conséquent, le changement climatique a et va avoir un impact important sur l'équilibre compétitif des espèces vivant dans une même communauté.

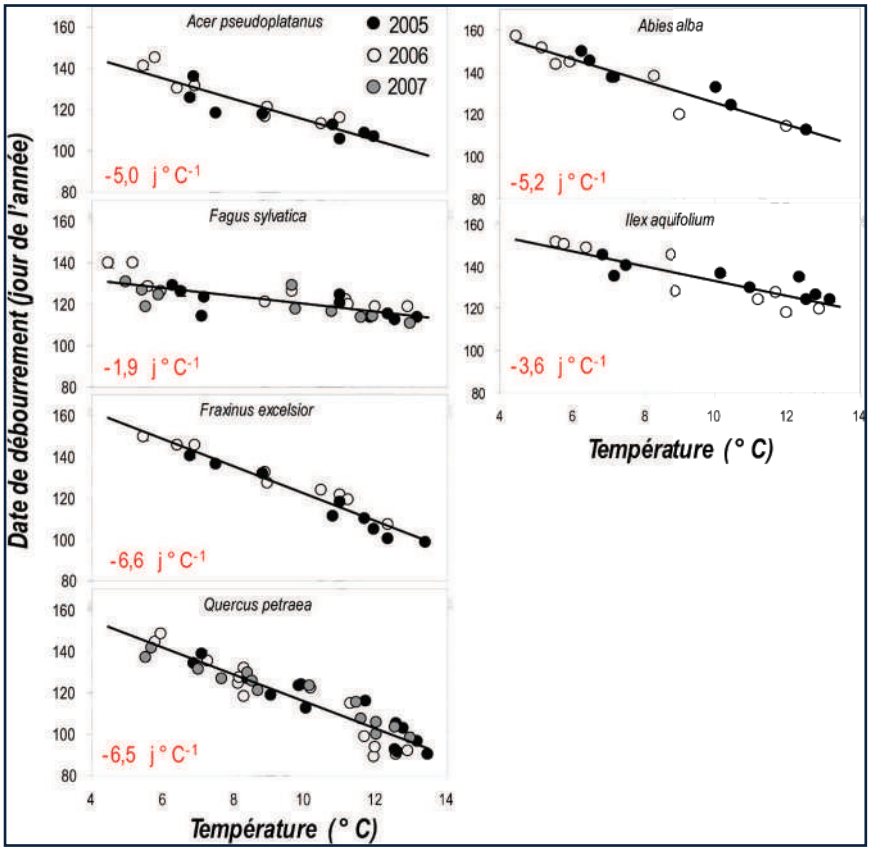


Figure 1 : *Sensibilité phénologique du débourrement (date d'apparition des feuilles) à la température pour six espèces forestières étudiées dans le massif des Pyrénées depuis 2005, le long de gradients altitudinaux. L'ordonnée représente le jour du débourrement (en nombre de jours depuis le premier janvier) et l'abscisse la température moyenne annuelle au site d'observation. Les tendances montrent que toutes les espèces avancent leur date de débourrement avec l'augmentation de la température mais cette sensibilité varie significativement entre espèces (Vitasse et al. [13]). La pente de la droite de régression (chiffre en rouge) représente le décalage moyen de la date de débourrement exprimée en nombre de jours par degré de réchauffement (j°C^{-1}).*

B- Migration des espèces

De nombreuses études basées sur de la modélisation prédisent des migrations d'espèces vers des plus hautes latitudes et altitudes, notamment en Europe (cf. *infra*) et Amérique du Nord. L'exemple le plus frappant en Aquitaine est sans doute celui du chêne vert (*Q. ilex*). La dynamique temporelle du chêne vert a été étudiée dans le Médoc (proche de la limite nord de son aire de répartition) depuis 1880 grâce à une étude historique des peuplements (utilisation des sommiers de l'ONF). En 1880, Q. *ilex* n'était pas présent sur les 4 036 ha de la forêt domaniale de Hourtin (voir **Figure 2**, carte du haut). Entre 1880 et 1916, le chêne vert a colonisé les dunes barkhanoïdes par le Nord-est, probablement *via* la dispersion de glands issus de forêts relictuelles dont il a été retrouvé l'existence à quelques kilomètres de la forêt

domaniale (données non présentées). Entre 1916 et 1991, Q. *ilex* a colonisé de nouvelles parcelles vers le Sud et vers l'Est : il disparaît localement suite aux incendies de 1944 (carte de 1953) et on peut observer l'accélération de son expansion à partir des années 1950. En 2011, il est présent dans l'intégralité des parcelles de la réserve naturelle d'Hourtin et sa densité est extrêmement élevée dans les parcelles de hauts de dunes où la nappe phréatique est très profonde. Cette colonisation relativement rapide a été confirmée dans trois autres forêts littorales de la côte atlantique (voir également la forêt d'Olonne sur Mer au nord de la forêt d'Hourtin, **Figure 2**, carte du bas). Les vitesses de migration de Q. *ilex* estimées à partir de ces cartes sont de 30 m par an et sont significativement inférieures à celles prédites par les modèles de niche bioclimatique (cf. *infra*). Autrement dit, la vitesse de migration spontanée observée pour le chêne vert est trop lente pour suivre l'évolution supposée du climat.

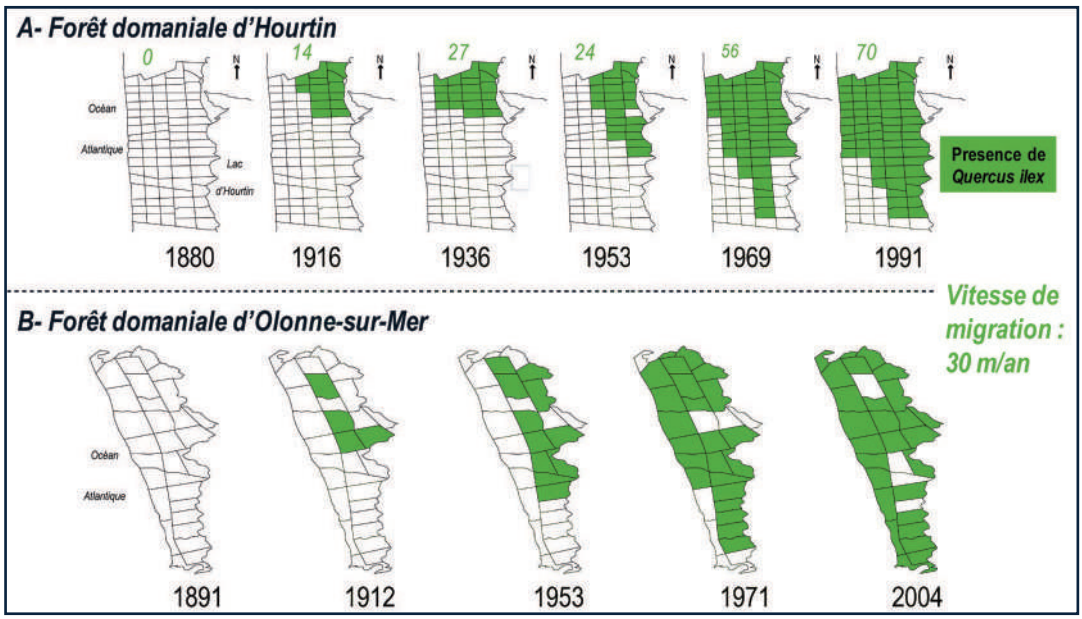


Figure 2 : *Distribution du chêne vert dans deux forêts domaniales au cours des 120 dernières années. Panneau supérieur : cartes du parcellaire de la forêt d'Hourtin (87 parcelles soit 4 000 ha) de 1880 à nos jours. La couleur verte indique la présence du chêne vert. Les dates correspondent aux années de parution des plans d'aménagement. Le chiffre mentionné au-dessus des plans indique le nombre de parcelles présentant du chêne vert. Panneau inférieur : cartes du parcellaire de la forêt domaniale d'Olonne sur Mer à quelques dizaines de kilomètres au nord de la forêt de Hourtin. La couleur verte indique la présence de chêne vert. Les dates correspondent aux années de parution des plans d'aménagement. Ces données historiques mettent en évidence une colonisation très rapide du chêne vert à la limite nord de son aire de distribution (Urli 2013 [14]).*

C- Croissance

À l'échelle mondiale, une tendance à l'augmentation de la productivité a été observée pendant les deux dernières décennies du XX^{e} siècle [15] [16] [17], sans que l'on puisse attribuer au seul changement climatique cette augmentation. En Aquitaine, l'analyse des données d'inventaire forestier ainsi que les observations dendrochronologiques ont permis de mettre en évidence des modifications de croissance en forêt de montagne (hêtre) et en forêt de plaine (pin maritime).

Remontée altitudinale de l'optimum de croissance du hêtre dans les Pyrénées (cf. chapitre 7)

L'analyse de la croissance des peuplements forestiers apparaît comme un bon indicateur de l'impact des changements environnementaux, car la croissance des arbres présente une réponse rapide aux variations environnementales [18]. C'est dans cet objectif que l'UMR BIOGECO a conduit une analyse dendrochronologique qui a mis en évidence une remontée altitudinale de l'optimum de croissance du hêtre dans les Pyrénées entre 1970 et 2009. Le long de gradients altitudinaux situés dans les Pyrénées françaises, l'optimum de croissance de cette espèce, qui est ici dans sa limite sud d'aire de répartition, s'est déplacé à la vitesse de 34 m par décennie passant de 420 m d'altitude en 1970 à 550 m d'altitude

quatre décennies plus tard. Cette remontée s'explique d'une part par un déclin de croissance à basse altitude (en dessous de 600 m) et d'autre part par un gain de croissance au-dessus de 600 m au cours des quatre dernières années **(Figure 3)**. De plus, la comparaison des variations annuelles du climat et de la croissance a permis de constater que les faibles précipitations tout comme les hautes températures conduisent à un optimum de croissance plus élevé le long du gradient.

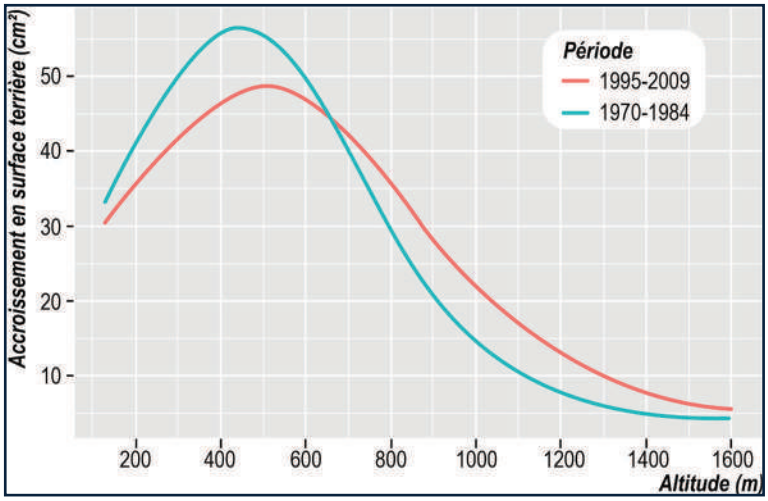


Figure 3 : *Accroissement moyen du hêtre en surface terrière en cm² sur les périodes 1995-2009 et 1970-1984. La croissance des 15 dernières années présente un déclin sensible en dessous de 600 m d'altitude par rapport à celle de 1970-1984. Au-dessus de 600 m, la croissance des arbres a par contre augmenté lors de la période récente. Le déclin à basse altitude et le gain de croissance à haute altitude ont conduit à une remontée altitudinale de l'optimum de croissance (Paillette 2010 [19]).*

Évolution de la croissance des peuplements de pin maritime

En France, depuis de nombreuses années l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) mesure, sur des placettes d'inventaire réparties sur tout le territoire, des accroissements radiaux sous écorce par sondage d'arbres. En Aquitaine, si on regarde les inventaires du XX^{e} siècle pour une des essences emblématiques du massif landais, le pin maritime, on constate une augmentation de sa productivité (en Gironde, pour les futaies régulières, moyenne de 10,1 m^3/ha/an en 1999 contre 7,2 m^3/ha/an en 1977 [source IFN]). Mais dans le même temps, le massif subissait de nombreuses évolutions en trois périodes successives : abandon progressif de la sylviculture du gemmage après la seconde guerre mondiale, généralisation du drainage, de la préparation du sol, du semis en ligne et de la fertilisation phosphatée à partir des années 1960 et enfin, depuis les années 1990, utilisation de matériel végétal amélioré pour 50 % des surfaces reboisées [20] et aujourd'hui à plus de 90 %.

La productivité (en volume comme en surface terrière) varie en fonction des facteurs de l'environnement mais également au cours de la vie d'un peuplement (en fonction de son âge), atteignant plus ou moins rapidement une valeur maximale puis déclinant au-delà. L'amplitude et la rapidité des variations dépendent notamment de l'essence et de la fertilité. Pour une essence comme le pin maritime traitée principalement en futaie régulière il est plus facile d'examiner l'évolution de sa productivité en fonction de l'âge. Cela a été fait dans deux départements de l'Aquitaine où cette essence est présente sur de grandes surfaces (environ 800 000 ha) et pour lesquels les trois derniers inventaires départementaux ont été concomitants (Gironde et Landes en 1978, en 1988 et en 1999) [21].

On observe très nettement une augmentation de la surface terrière des arbres sur pied liée au changement de sylviculture : faible densité nécessaire au gemmage, au contraire d'une forte densité nécessaire à la production de bois **(Figure 4)**.

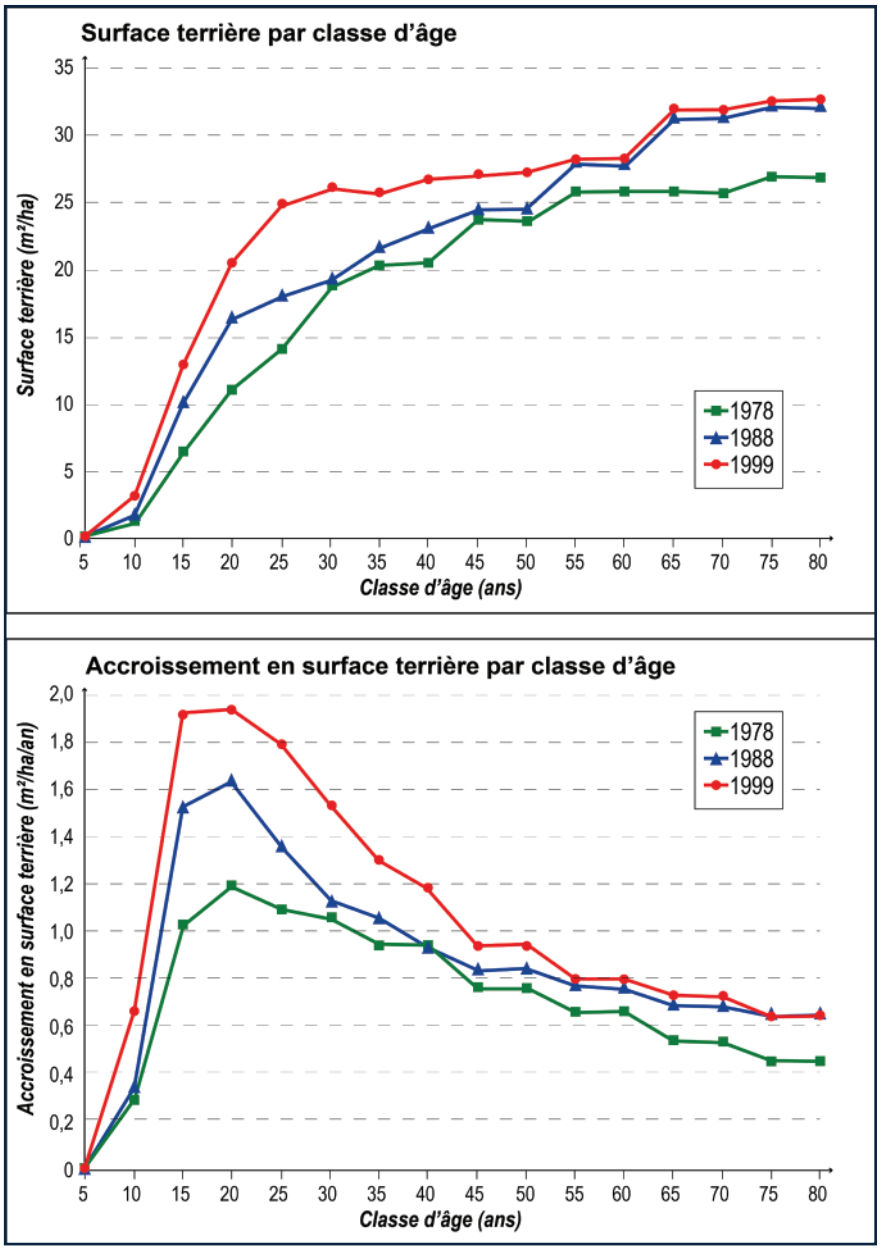


Figure 4 : *Surface terrière et accroissement en surface terrière par classe d'âge pour les trois derniers inventaires départementaux de la Gironde et des Landes (peuplements de pin maritime traités en futaie régulière, Pignard [21]).*

Enfin, les variations observées en terme d'accroissement en surface terrière par classe d'âge sont particulièrement importantes : elles peuvent certainement être attribuées en grande partie à l'intensification des pratiques sylvicoles dans ce massif. En 1999, un peu moins de 10 % du massif est composé de matériel amélioré, ce qui n'est pas de nature à impacter prioritairement la productivité du massif (Raffin, Communication personnelle). Une part de cet accroissement pourrait être liée au changement climatique. Ainsi, les études par modélisation [22], qui ne prennent en compte que les ressources du milieu (composantes climatiques et pédologiques) sans tenir compte des modifications de gestion, nous indiquent elles aussi une augmentation de la productivité dans le Sud-Ouest pour cette même période (dernières décennies du XX^{e} siècle). Pour le pin maritime dans les Landes de Gascogne les mesures sur les placettes de l'IGN permettent aussi de constater une augmentation de la productivité qui, comparée à toutes les autres essences en France, est la plus forte (variation annuelle de productivité de +2 % à comparer à 1,58 % pour l'ensemble des résineux en France et à 0,46 % pour les feuillus) [21]. L'examen des accroissements pour le début du XXI^{e} siècle est plus délicat à mener en raison des deux tempêtes qui ont traversé l'Aquitaine et qui ont à la fois modifié l'équilibre des classes d'âge en surfaces

mais aussi la structure des peuplements restant sur pied (peuplements mités). Cette étude reste donc à faire pour confirmer la poursuite de l'augmentation ou le déclin de productivité, parfois temporaire, constaté sur certaines espèces [23].

D- Mortalités observées au cours des dernières décennies

Les grands froids de 1956 et de 1985 et à un degré moindre ceux de 1962-1963, ont provoqué des mortalités importantes dans les peuplements de pin maritime, notamment parmi les plus jeunes et qui avaient été plantés à partir d'origines portugaises [24]. À la suite de ceux de 1985 (-22 °C), on estime que 30 000 à 50 000 hectares ont été détruits ou sévèrement atteints.

À la suite de la sécheresse de 1976 et d'une succession d'années déficitaires sur le plan hydrique, des dépérissements importants de chêne pédonculé sont apparus, essentiellement en Pyrénées-Atlantiques ; près de 10 000 ha ont été plus ou moins affectés [25]. Après quelques années d'accalmie, les chênaies du sud de l'Aquitaine ont de nouveau subi des dépérissements dans les années 1989-1992 [26]. À chaque épisode, les causes étaient multifactorielles, incluant des facteurs prédisposants (faible rétention en eau et pauvreté chimique des sols), des facteurs déclenchants (sécheresses successives associées à des attaques de parasites foliaires : insectes défoliateurs, oïdium) et des facteurs aggravants (pourridiés racinaires).

Malgré sa relative résistance à la sécheresse, plus de 10 000 hectares de pins maritimes dépérissants ont été recensés dans le massif landais en 1990-1991 du fait de la conjonction de plusieurs années de sécheresse estivale et de fortes défoliations de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* [27]. Ces mortalités sont en partie imputables aux insectes sous corticaux (scolytes), qui se sont préférentiellement attaqués aux arbres affaiblis tout comme en 1956, lorsque de grands froids ont succédé à des défoliations par la processionnaire du pin [28].

Curieusement, la sécheresse et la canicule de 2003 n'ont pas provoqué en Aquitaine de dépérissements importants [29], mis à part des mortalités plus fréquentes dans les châtaigneraies de Dordogne déjà attaquées par la maladie de l'encre.

Les grands vents et les chablis qu'ils occasionnent ne sont pas des phénomènes nouveaux mais les violentes tempêtes de 1999 et 2009 ont provoqué des chablis d'une ampleur sans précédent en Aquitaine (respectivement 29 et 42 millions de m^3 de pin maritime). Les scolytes des pins (surtout *Ips sexdentatus*) se sont dans un premier temps multipliés abondamment sur les arbres au sol ou sur les grumes stockées en bord de route puis se sont reportés en masse sur des arbres verts épargnés par les tempêtes, engendrant une perte supplémentaire d'environ 10 à 15 % du volume de chablis.

E- Biodiversité : assemblages et composition des communautés

Au niveau français, le Réseau National de suivi des Écosystèmes Forestiers (RENECOFOR) permet de disposer de 15 ans de suivis floristiques depuis 1992-1995 [30]. Au niveau quantitatif, la richesse floristique augmente dans les forêts françaises à l'échelle de la décennie [30] [31]. De telles augmentations sont également visibles à l'échelle de 70-90 ans dans des écosystèmes herbacés, mais cette augmentation tend à s'annuler à très haute altitude [32]. Les mécanismes invoqués pour expliquer cette augmentation sont divers : principalement le réchauffement climatique et les dépôts azotés atmosphériques.

Au niveau qualitatif, la composition forestière à l'échelle française est globalement peu affectée entre 1995 et 2005. Cette stabilité n'est qu'apparente et masque une très grande variabilité de dynamique en fonction des types de forêts considérées [30]. Les pinèdes maritimes océaniques sur sable font partie

des peuplements forestiers qui ont montré la plus forte dynamique floristique entre 1995 et 2005. Les variations floristiques détectées sont bien corrélées avec la forte diminution du nombre de tiges sur ces placettes, directement liée à la tempête Martin de décembre 1999 [33]. Les tempêtes seraient ainsi la première cause de variation de végétation forestière à l'échelle de la décennie détectable par le réseau RENECOFOR. Des analyses plus approfondies sont nécessaires pour identifier les autres facteurs qui interviennent pour expliquer la dynamique observée dans ces groupements forestiers.

Des épisodes de canicule/sécheresse tels que ceux connus en 2003 engendrent une diminution de richesse végétale, mais la résilience des communautés forestières leur permet de retrouver leur niveau initial de richesse dès 2004 [30]. Les sécheresses favorisent en outre les épidémies de ravageurs, parasites ou maladies [34] affectant les essences forestières. Bien que les données manquent en ce qui concerne le moyen et long terme, on peut s'attendre à une augmentation de la biodiversité des sous-bois provoquée par la mortalité des arbres. En outre, l'augmentation de bois mort dans les forêts serait un facteur de diversité animale [35].

Il apparaît, outre ces grandes tendances, que les variations de biodiversité dépendent sensiblement du type de forêts étudiées. En Aquitaine, les pinèdes maritimes landaises ne se comportent pas de la même façon que les chênaies pédonculées de Chalosse ou les hêtraies du piémont pyrénéen. Si des analyses supplémentaires doivent être réalisées sur les données déjà disponibles, le défi pour l'avenir consiste à compléter le dispositif de suivi des écosystèmes forestiers qui ne représente que très partiellement les forêts aquitaines, et surtout trouver des moyens pour assurer sa pérennité.

F- Maladies et ravageurs

Évolutions et fluctuations

La base de données du Département de la Santé des forêts (DSF) permet d'avoir une bonne estimation des principaux problèmes sanitaires que les forêts d'Aquitaine ont connus entre 1989 et 2011. Mise à part une punaise (*Leptoglossus occidentalis*) s'attaquant aux graines de pin, récemment découverte, le cortège d'insectes ravageurs des forêts d'Aquitaine est composé très majoritairement d'espèces autochtones dont les niveaux de populations et de dégâts fluctuent cycliquement, comme la processionnaire du pin, ou en fonction de l'affaiblissement des peuplements comme les scolytes. De façon différente, le cortège de pathogènes est en partie dominé par des champignons non indigènes introduits depuis plus ou moins longtemps en Europe, comme l'oïdium des chênes, *Phytophthora cinnamomi, Dothistroma septosporum* [36] [37].

Sur peuplier, on observe depuis 1995 l'apparition de dégâts importants causés par le puceron lanigère (*Phloeomyzus passerinii)* alors que cet insecte, connu en France depuis 1939, ne causait pas de dégâts jusqu'alors [38]. Parallèlement, les dégâts d'insectes xylophages des pousses et des branches semblent avoir diminué depuis 2000, tandis que les attaques de rouilles foliaires (*Melampsora larici-populina*) ont connu un pic dans les années 2000-2005.

Sur chêne, les signalements de défoliateurs semblent nettement moins fréquents depuis la fin des années 1990, par rapport à la décennie précédente, sauf peut-être dans le nord de la Région, mais les signalements d'oïdium (*Erysiphe* spp) ont été fréquents certaines années.

Dans le massif landais, on observe une extension marquée et continue des mortalités de pin liées au fomès (*Heterobasidion annosum*) et à l'armillaire (*Armillaria ostoyae*), tandis que les dégâts de pyrale des troncs (*Dioryctria sylvestrella*) demeurent à un niveau élevé

Sur pin laricio, l'apparition de dégâts à partir des années 1990 dus à la maladie des bandes rouges (*Dothistroma septopsorum et D. pini*) et à *Sphaeropsis sapinea* ont fortement limité l'usage de cette essence dans l'ensemble du Sud-Ouest. Ces deux pathogènes ne causaient jusqu'alors que très peu de dégâts.

D'autres maladies parasitaires introduites, comme les maladies de l'encre du châtaignier et du chêne rouge (*Phytophthora cinnamomi*), ou le chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*) continuent de représenter des contraintes fortes, limitant l'usage de ces essences.

La part du changement climatique

Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer l'émergence de nouveaux parasites ou l'augmentation des dégâts de parasites connus : le changement climatique bien sûr mais aussi, l'évolution des pratiques sylvicoles.

Dans un certain nombre de cas, les évolutions mentionnées ci-dessus pourraient s'expliquer principalement par un effet du réchauffement climatique. Ainsi, *Dothistroma pini* et surtout *Sphaeropsis sapinea* et *Phytophthora cinnamomi* sont des parasites plutôt thermophiles ; les années récentes plus chaudes ont donc probablement favorisé leur développement [39] [40]. Dans le cas de l'oïdium des chênes, une relation positive est observée entre températures hivernales et sévérité de la maladie, mais les mécanismes biologiques sous-jacents restent à caractériser [41] [42]. L'effet positif de l'augmentation des températures sur le développement des insectes est connu. Les températures élevées de l'automne 2009 ont ainsi accéléré le cycle de développement de la processionnaire du pin dont une partie de la population s'est nymphosée dès l'automne sans tisser de nids d'hiver.

Pour d'autres évolutions parasitaires rapportées ci-dessus, la part du changement climatique est plus difficile à isoler des autres facteurs. Dans le cas du puceron lanigère du peuplier, le réchauffement climatique mais aussi la composition en clones sensibles des peupleraies, auraient contribué à l'émergence des pullulations [43].

De façon générale, la disponibilité en hôtes sensibles est un facteur majeur de développement des maladies. L'augmentation des surfaces en Pin laricio est un facteur probablement important d'explosion des cas de *Dothistroma* et de *Sphaeropsis* : le pin laricio y étant particulièrement sensible [40]. L'augmentation des surfaces de peupleraies en clones sensibles (Beaupré et autres cultivars euraméricains) est un des facteurs explicatifs des attaques de rouilles à *Melampsora* [44].

Dans le cas du pin maritime, l'existence d'un massif largement monospécifique est un facteur de risque pour le développement des épidémies et pullulations, liées aux parasites déjà présents ou qui pourraient être introduits [45]. Les principaux parasites (pourridiés, rouille courbeuse, pyrale du tronc) sont d'autre part très influencés par les pratiques de sylviculture intensive [46] [47] [48].

II- Tendances attendues et incertitudes

Les observations des évolutions récentes aident à formuler des prédictions futures. On peut donc raisonnablement s'attendre à ce que les tendances graduelles, décrites dans le paragraphe précédent en matière de croissance, phénologie, migration continuent à l'avenir. Ces jugements qualitatifs sont d'autant plus pertinents quand ils s'appuient sur des observations répétées et portant sur de longues périodes. Les prédictions plus précises s'appuient aujourd'hui sur des modèles déterministes des effets de changements climatiques, forcés par les scénarios climatiques et environnementaux évoqués dans les

premiers chapitres de cet ouvrage. De tels travaux portent surtout sur les bilans en biomasse, carbone et eau des écosystèmes.

A- Aires de distribution et enveloppes bioclimatiques

Les observations faites au cours des dernières décennies ont clairement fait apparaître des migrations par dispersion naturelle, du chêne vert depuis l'océan atlantique vers l'intérieur des terres (cf. *supra*). La question des modifications d'aires de répartition (expansion, translation géographique, ou rétraction) se pose donc de manière générale pour l'ensemble des espèces présentes en Aquitaine. Ces questions ont été abordées par simulation en cherchant à prédire les aires de répartition équivalentes à celles d'aujourd'hui dans le nouveau contexte environnemental généré par les changements climatiques. Ces aires de répartition équivalentes sont indifféremment appelées « niches » ou « enveloppes bioclimatiques » et le qualificatif « équivalent » signifie « invariance des corrélations entre présence d'une espèce et conditions climatiques actuelles ».

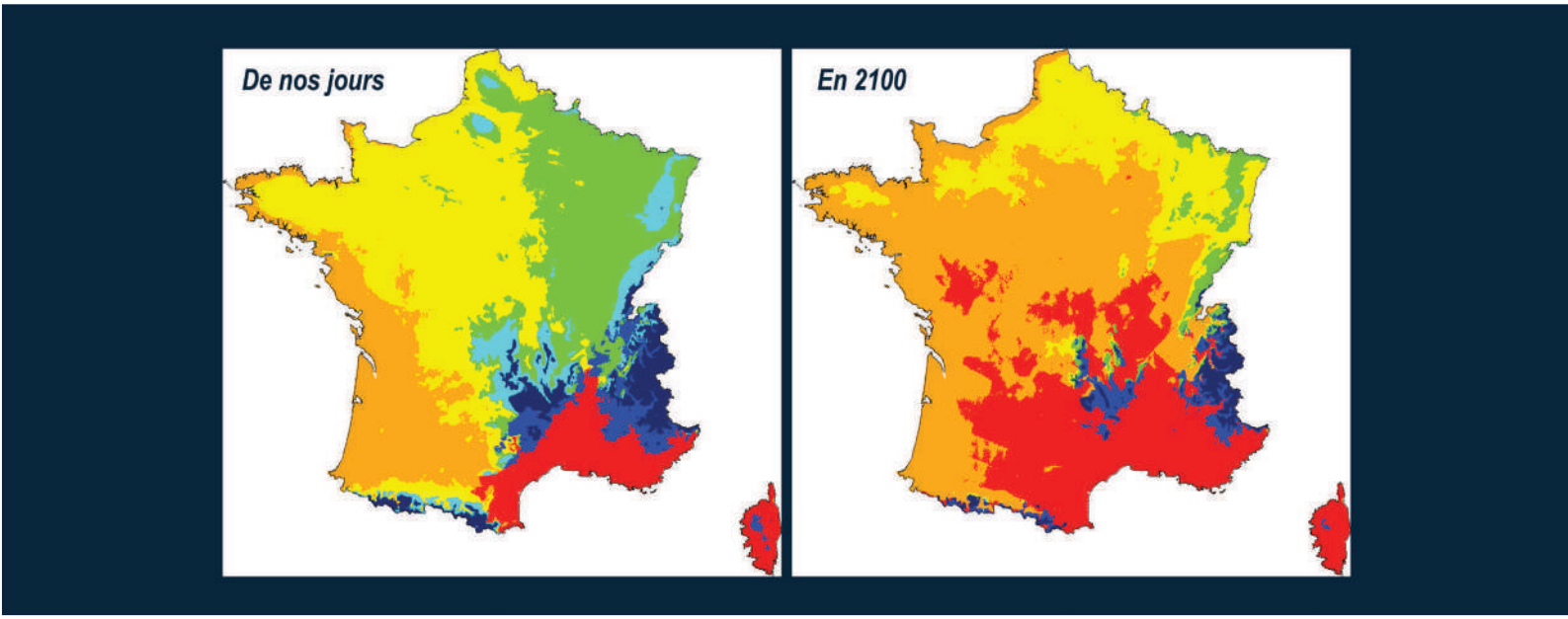


Figure 5 : *Enveloppes bioclimatiques des groupes chorologiques en France. En orange, le groupe Aquitain (pin maritime, chêne tauzin…) et en rouge le groupe méditerranéen (pins et chênes méditerranéens). La Figure de gauche correspond aux enveloppes actuelles et celle de droite aux enveloppes en 2100 (Badeau et al. [49], avec permission de l'éditeur).*

Une première génération de cartes a été produite par [49], utilisant les prédictions climatiques ARPEGE [50] et basée sur le scénario B2 du GIEC (ce qui correspond à une augmentation de température de l'ordre de 2 °C à la fin du siècle). Ces cartes ont été produites pour des espèces individuelles, et pour des groupes chorologiques correspondant à des groupes d'espèces qui partagent les mêmes affinités climatiques **(Figure 5)**. Les auteurs ont ainsi défini 7 groupes chorologiques dont l'un d'entre eux correspondait à un groupe aquitain (pin maritime, chêne tauzin…). Les projections à l'horizon 2100 montrent que le groupe aquitain aurait tendance à s'étendre (expansion sans translation) jusqu'à la Champagne et la vallée de la Saône. L'Aquitaine elle-même serait progressivement colonisée vers 2100 sur sa façade orientale (Lot, Garonne, Dordogne) par le groupe chorologique méditerranéen (chênes et pins méditerranéens.). Ces projections sont confirmées sur les cartes prédites pour des espèces considérées individuellement. L'enveloppe bioclimatique du pin maritime et du chêne vert pourrait couvrir tout l'Ouest de la France à l'exception de la Normandie et du Massif Central en 2100.

Une deuxième génération de cartes compare les prédictions basées sur des modèles de niches (équivalente à l'approche précédente, modèle BIOMOD, N-NBM) avec des modèles basés sur des processus fonctionnels. Ces modèles corrèlent la présence d'une espèce soit à la phénologie, reproduction, résis-

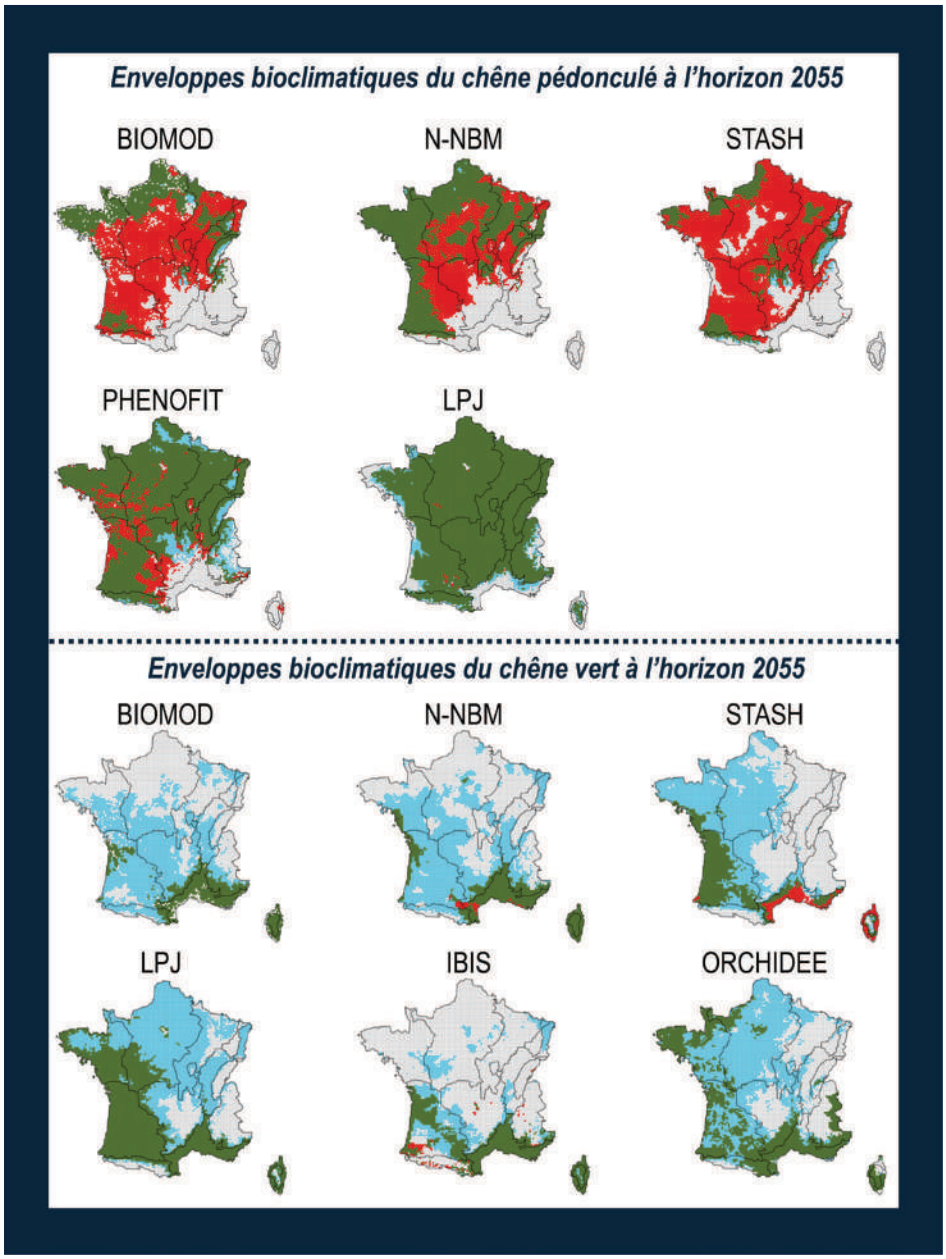


Figure 6 : *Enveloppes bioclimatiques prédites à l'horizon 2055 par différents modèles pour le chêne pédonculé et le chêne vert. Les aires marquées en rouge correspondent à des surfaces perdues, en vert à la partie de l'aire actuelle maintenue, et en bleu aux surfaces devenues propices à l'espèce (Cheaib et al. [51], avec permission de l'éditeur).*

tance au stress (modèle PHENOFIT), soit à la croissance (modèle STASH), soit au métabolisme du carbone, de l'eau (modèle CASTANEA), soit au métabolisme du carbone, de l'eau et à la dynamique végétale (modèles LPJ, IBIS et ORCHIDEE). Ces projections se placent dans le scénario A1B du GIEC [51]. Ces nouvelles cartes confirment les tendances observées précédemment **(Figure 6)**, à savoir un retrait des espèces feuillues tempérées (chênes pédonculé et sessile, hêtre), et une progression des espèces à tempérament méditerranéen (chêne vert, pin maritime). Ces modèles ne peuvent, pour l'instant, que suggérer des tendances, en attendant une intégration plus complète des différents processus non seulement fonctionnels, démographiques, mais également écologiques et évolutifs qui contribuent à l'aire de distribution des espèces.

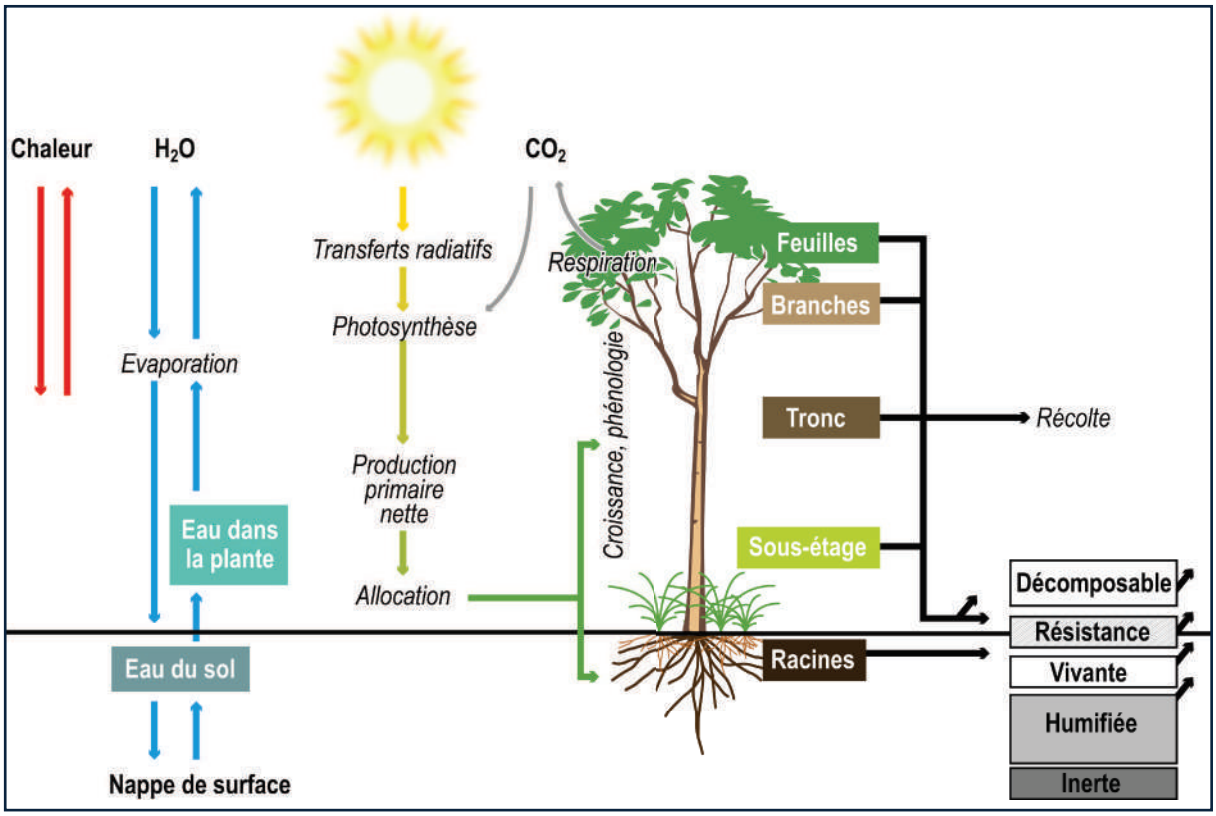


Figure 7 : *Schéma des processus biophysiques considérés dans le modèle Go+ (Moreaux [55]).*

B- Fonctionnement des écosystèmes

Productivité à l'échelle régionale

La prédiction des impacts environnementaux sur les écosystèmes forestiers procède d'une approche de modélisation mécaniste. Elle représente les processus d'assimilation et de transformation d'énergie (rayonnement, chaleur, vent) et de masse et leur sensibilité aux facteurs de l'environnement et parmi ceux-ci les facteurs climatiques : température, précipitations, humidité de l'air, vent, rayonnement solaire et de grande longueur d'onde [52] [53]. Certains comme le modèle Go+ de l'Inra **(Figure 7)** prennent en compte la structure du couvert en trois dimensions, les effets des travaux sylvicoles et peuvent couvrir une rotation forestière entière avec une résolution temporelle demi-horaire [54] [55].

Les premières régionalisations de scénarios climatiques produites par Météo-France à partir du modèle ARPEGE ont permis dès 2002 d'affiner la résolution spatiale de ces analyses à 50x50 km pour le scénario SRES B2 [12] [56] [57] [58] [59]. D'autres scénarios (SRES A2) ont été analysés depuis [60] et ces recherches se poursuivent à travers plusieurs projets financés par les programmes GICC (MEED) et GIP-Ecofor (MAAP) (projet FAST), la région Aquitaine (projet FAST-A), l'ANR (projet ORACLE) ou la commission européenne (GHG-Europe) pour n'en citer que quelques-uns. Les développements actuels visent à analyser des scénarios complets (environnements abiotique et biotique, sylviculture, économie) et intégrés (nouveaux scénarios du GIEC).

On peut ainsi résumer l'état actuel des connaissances issues de ces projets.

- En zone tempérée, plus de 10, 20 et 40 % de la surface des forêts feuillues, conifères et mixtes respectivement serait vulnérable au changement climatique en cours. Ces prédictions suscitent des interrogations sur les réponses des forêts à ces sollicitations [61] et sur leurs capacités d'adaptation [62] (cf. *infra*).

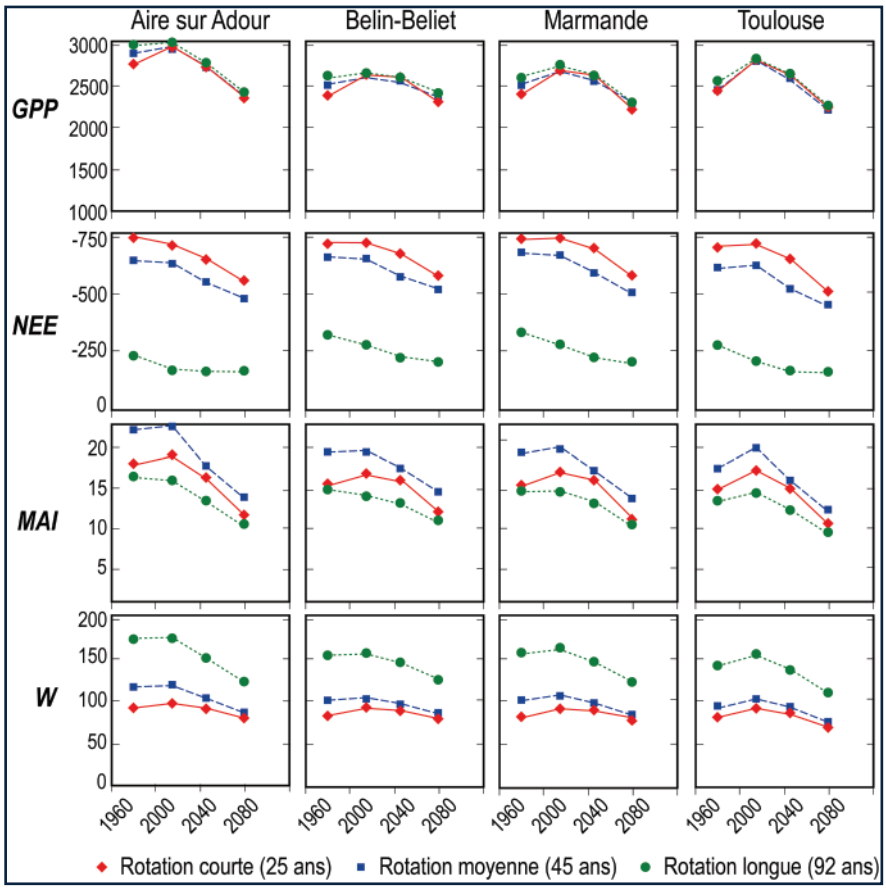


Figure 8 : *Évolution entre 1960 et 2080 de la productivité primaire brute (GPP, gC.m^{-2}.an^{-1}), du bilan net de CO_2 de l'écosystème (NEE, gC. m^{-2}. n^{-1}), de l'accroissement annuel en bois (MAI, m^3 tige ha^{-1}.an^{-1}) et du stock de carbone dans la biomasse (W, tC ha^{-1}), moyennés sur toute la rotation pour trois scénarios sylvicoles (rotation de 25, 45 et 92 ans) de plantations de pin maritime sur quatre sites du Sud-Ouest de la France. Les prédictions ont été réalisées pour des sites fertiles (teneur foliaire en azote= 1.5 gN.100 g dm^{-1} dans les aiguilles, réserve utile en eau du sol = 150 mm) par le modèle GO+, sous le scénario climatique B2 (Ciais et al. 2010 [64]).*

- Les impacts du changement climatique présentent de fortes disparités régionales (**Figure 8**, [63]).
- Les simulations opérées par les différents modèles de niche [49] ou de fonctionnement [58] [60] et utilisant plusieurs schémas de régionalisation du climat produisent des résultats concordants et cohérents.
- L'interaction entre gestion et climat varie suivant les itinéraires de sylviculture, et l'intensification de la sylviculture de production de conifères dans le sud amplifie les effets climatiques, qu'ils soient positifs ou négatifs (9).
- Enfin, l'effet du climat est amplifié dans les stations les plus productives [58].

Il faut aussi replacer ces analyses dans le contexte récent montrant, par exemple, que l'évolution du bilan de masse des glaciers continentaux (mission GRACE) et les émissions de carbone depuis le permafrost (CO_2 et CH_4, [65]) amènent à considérer des hypothèses dépassant systématiquement les scénarios envisagés jusqu'ici. Le risque de disparition de surfaces forestières significatives dans les années à venir dans le sud de l'Europe est aujourd'hui avéré.

Cycles biogéochimiques

Les éléments minéraux peuvent changer de compartiment dans un écosystème, voire le quitter pour un autre. À l'inverse, les éléments minéraux peuvent revenir à leur compartiment, ou écosystème, de départ pour ensuite prendre de nouveau un même cheminement. C'est la notion de cycle. Ces flux de matières se font *via* des processus biologiques, physiques ou chimiques. On parle alors de cycles biogéochimiques.

Les cycles biogéochimiques sont appréhendables à plusieurs échelles **(Figure 9)** :

- Cycle biochimique : à l'échelle de la plante, les éléments minéraux, et notamment les nutriments, sont fréquemment remobilisés afin de permettre une optimisation de leur utilisation (ex. : mise en réserve d'une partie des nutriments d'une aiguille avant sa chute).
- Cycle biologique : à l'échelle de l'écosystème, les éléments minéraux sont prélevés par les végétaux, puis reviennent au sol essentiellement par le biais de nécromasse. Ils sont alors plus ou moins vite réabsorbés après minéralisation de la matière organique.
- Cycle géochimique : à l'échelle de la région, voire plus, les éléments minéraux peuvent quitter ou arriver dans des écosystèmes. La plupart des flux en jeu sont d'ordre physico-chimiques (comme les dépôts atmosphériques ou les fuites des sols vers les cours d'eau) mais pas tous (ex. : fixation symbiotique de l'azote).

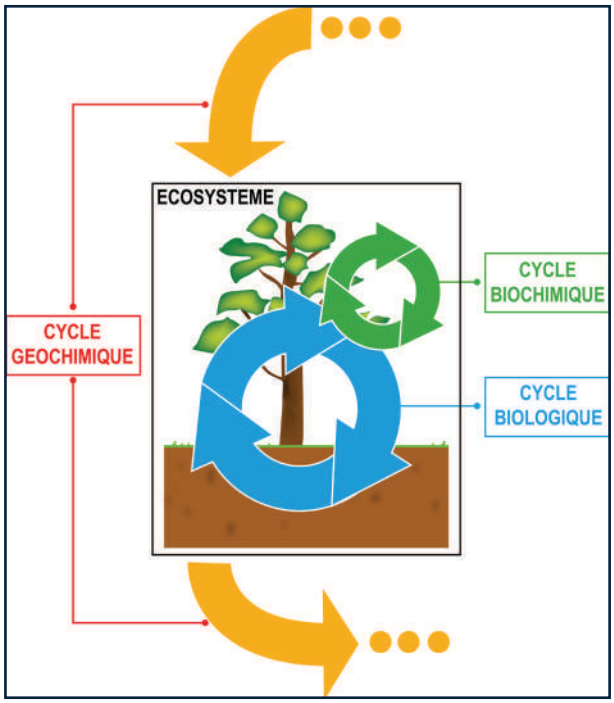


Figure 9 : *Les cycles biogéochimiques dans les écosystèmes forestiers.*

Le fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers aquitains est étudié de manière intensive depuis le début des années 2000. Il n'existe donc pas de recul suffisant pour mettre en évidence une évolution des cycles biogéochimiques sous l'effet des changements climatiques. Il est toutefois d'ores et déjà possible d'identifier les processus susceptibles d'être impactés.

Ainsi, la hausse attendue des températures devrait accélérer l'ensemble des processus biologiques et le cycle biologique en particulier. C'est notamment le cas de la décomposition des nécromasses forestières (litières, branches, racines, résidus de récolte) qui devrait être accéléré sous l'effet du réchauffement et ainsi contribuer au déstockage de carbone dans les sols. Toutefois, la production de biomasse étant également susceptible d'être stimulée par l'effet de la température, l'effet de ce changement pourrait être neutre sur les stocks de carbone [66]. Y compris dans ce dernier cas de figure, le recyclage des nutriments associés aux matières organiques (azote et, dans une moindre mesure, phosphore) devrait être plus rapide.

Une modification du régime des précipitations est le second changement climatique majeur attendu (été plus sec et hiver plus humide). L'augmentation des sécheresses estivales devrait perturber les cycles biologiques alors que des hivers plus pluvieux entraînement probablement des pertes de nutriments (azote, potassium etc.) vers les eaux de surface par lixiviation.

Parmi les changements non climatiques causés par les activités humaines, l'augmentation des dépôts atmosphériques d'azote minérale est un phénomène qui touche la grande majorité des écosystèmes forestiers, y compris dans les régions éloignées des sources de pollution [67]. Ces dépôts d'azote tendent à stimuler la croissance des arbres, à condition que celle-ci ne soit pas limitée par d'autres contraintes nutritionnelles [68].

Enfin, dans le cadre des politiques d'atténuation du changement climatique, on assiste à des conversions importantes d'écosystèmes forestiers peu anthropisés vers des systèmes de production intensive (ex. : plantations industrielles, taillis à (très) courte rotation, cf. *infra*). Ces changements s'accompagnent généralement de substitutions d'essences et d'une augmentation des pertes en nutriments, notamment *via* les récoltes de biomasse.

C- Rétroactions forêts-climat

On sait que le climat influence la répartition spatiale de la végétation à la surface de la terre (cf. *supra*). À l'inverse, on a pu montrer que la végétation, par un ensemble de mécanismes de rétroaction, pouvait agir sur le climat [69]. Le massif forestier des Landes de Gascogne (environ 10^4 km²) est de taille suffisante pour que se manifestent des effets de rétroaction qui pourraient se traduire par une diminution locale des précipitations en cas de réduction des surfaces boisées. Toutefois, du fait de la position de la région Aquitaine en façade ouest du continent, la contribution de l'évaporation locale aux précipitations est vraisemblablement modérée et l'effet de rétroaction devrait rester limité.

Un facteur à considérer en forêt landaise est son émission importante de composés organiques volatils (terpénoïdes). Ces derniers en effet peuvent induire la formation d'aérosols, qui peuvent accroître la couverture nuageuse en augmentant la quantité de noyaux de condensation [70]. En réalité, il faut considérer l'ensemble des facteurs en jeu – albédo, évaporation, cycle du carbone, etc. – et selon l'importance relative des processus couplés, les interactions forêt-atmosphère vont conduire à des situations d'équilibre différentes. Si par exemple une augmentation de surface forestière dans une région donnée entraîne une plus grande séquestration de carbone, la diminution de l'albédo qui résulte de ce changement d'occupation des terres est de nature à entraîner un réchauffement de l'atmosphère, qui peut être lui-même atténué par un refroidissement lié à une plus grande évaporation. Ainsi, malgré le rejet de CO_2 occasionné par la déforestation, les changements d'usage des sols européens et nord-américains sur les 150 dernières années semblent avoir conduit à un refroidissement net de l'hémisphère Nord [71]. Une analyse générale des mécanismes de rétroactions entre forêts et climat, prenant en compte les différences entre forêts tropicales, boréales et tempérées [72], montre que le cas des forêts tempérées est en fait le plus incertain : les forçages radiatifs et évaporatifs y apparaissent modérés, et l'influence de l'évaporation reste peu claire.

Un autre aspect à considérer est celui de la structure du paysage, qui peut avoir un fort impact sur ses propriétés et son fonctionnement. Le cas de la stabilité au vent des peuplements forestiers illustre bien ce point. Localement, on sait qu'une lisière agit sur le vent en le modifiant sur une certaine distance horizontale, d'une manière qui dépend de la structure de la parcelle, elle-même liée aux interventions sylvicoles. Un aspect moins connu, mais qui peut être d'un grand poids dans un massif comme celui des Landes de Gascogne, est l'impact de la fragmentation du paysage : chaque lisière, chaque parcelle, contribue à « charger » en turbulence l'écoulement. Des travaux préliminaires visant à analyser le comportement d'un paysage formé de parcelles forestières régulièrement espacées ont montré que l'énergie turbulente du vent et les forces mécaniques qu'il exerce sur les arbres varient en passant par un maximum pour une valeur de l'espacement valant à peu près le double de celle de la longueur des parcelles [73]. Certains degrés de fragmentation pourraient ainsi conduire à un accroissement des risques en cas de vent violent. Le déterminisme de la localisation des dégâts n'est donc pas seulement lié aux caractéristiques sylvicoles de chaque parcelle, mais aussi à la structure du paysage dans son ensemble ; une amélioration de la stabilité du massif peut passer par un meilleur aménagement du territoire.

L'étude de ces mécanismes de rétroaction, complexes et encore pour une large part mal connus, reste une priorité car de la qualité de leur prise en compte dépend la fiabilité des prévisions climatiques, aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle régionale, et des études d'impact liées aux changements d'occupation et d'utilisation des terres.

D- Santé

Hausse des températures

Les insectes ne régulant pas leur température, il est attendu (et déjà observé) que la vitesse de leur développement sera accrue par des hausses de températures [74]. Pour beaucoup d'espèces, un plus

grand nombre de générations par an est à prévoir, favorisant la multiplication des populations. Ainsi les scolytes comme le sténographe *Ips sexdentatus* pourraient accomplir 4-5 générations par an contre 3-4 actuellement, et la pyrale du tronc du pin *Dioryctia sylvestrella*, passer d'une à deux générations par an comme cela est le cas dans certaines régions d'Espagne [75].

En climat tempéré, les limites d'aire de distribution des insectes et champignons sont souvent déterminées par les températures froides en hiver. Des hivers plus chauds risquent donc de favoriser l'expansion en altitude (forêts des Pyrénées) et en latitude (remontées depuis la péninsule ibérique) d'espèces de plaines ou des régions méridionales [76] comme c'est déjà le cas en France, pour la processionnaire du pin [77] ou le chancre du châtaignier.

Des conditions de températures plus élevées pourraient également favoriser l'établissement et l'expansion d'espèces exotiques introduites depuis des régions au climat plus chaud que les climats actuels d'Aquitaine comme cela a déjà été le cas avec *Phytophthora cinnamomi* [78] [79].

En revanche ces hausses de températures pourraient conduire à une désynchronisation des périodes d'éclosion des œufs (notamment chez les lépidoptères défoliateurs) ou de sporulation des champignons et de débourrement des arbres d'essences feuillues (comme les chênes par exemple) conduisant à une réduction potentielle des dégâts des chenilles défoliatrices (comme celles de la cheimatobie, *Operophtera brumata*) ou de champignons pathogènes (comme l'oïdium du chêne).

Aggravation des sécheresses

Les modèles climatiques prévoient une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans le Sud-Ouest de la France, surtout en été. Ainsi l'effet généralement positif du réchauffement pourrait être contrebalancé par des effets négatifs sur le développement de certaines maladies [76] [79]. La plupart des champignons en effet sont très dépendants de facteurs hydriques lors de la dissémination et de la germination des spores. *Dothistroma septosporum* est ainsi favorisé par des conditions humides au printemps et en été [80]. Il a été signalé très peu de maladies foliaires en 2003, maladies pour lesquelles l'humidité de l'air est importante dans la réalisation des cycles [81].

Au-delà de l'impact direct des sécheresses sur les parasites et sur la croissance et la survie des arbres, celles-ci auront également des conséquences indirectes sur les dégâts induits par les parasites *via* la physiologie de l'hôte [82].

Une étude bibliographique internationale a récemment conclu à une aggravation des dégâts en conditions de stress hydrique pour les insectes primaires s'attaquant aux feuilles et aux aiguilles (pucerons, insectes défoliateurs) et pour les bioagresseurs opportunistes s'attaquant aux organes ligneux des arbres affaiblis (scolytes, pissodes, *Sphaeropsis sapinea*...) [83]. En revanche, l'augmentation des stress hydriques pourrait défavoriser des parasites primaires se développant préférentiellement sur hôtes vigoureux, comme les oïdiums et les rouilles sur feuilles [84] ou ceux se développant sur tronc comme la pyrale, la cochenille du pin maritime, ainsi que certains pourridiés racinaires [83].

Incertitudes et risques

Toute prédiction fiable ne peut être que basée sur une modélisation mécaniste des systèmes. De tels modèles ne sont pas encore disponibles pour les parasites, même si certains processus fortement affectés par le climat commencent à être modélisés, comme la survie hivernale de P. *cinnamomi* [39] [78] ou de la processionnaire du pin [85] ou la synchronisation phénologique [42] [86].

Les incertitudes sur le fonctionnement et l'évolution des « pathosystèmes » restent très nombreuses. Un premier type d'incertitude concerne les effets des facteurs climatiques eux-mêmes sur les populations d'insectes et de champignons forestiers. En second lieu, les populations d'insectes et de pathogènes n'évoluent pas seules dans un environnement abiotique donné. Elles interfèrent avec d'autres organismes vivants, comme les plantes hôtes, les compétiteurs et les ennemis naturels (antagonistes, prédateurs ou parasites), les champignons endophytes non pathogènes, qui sont eux-mêmes soumis aux changements climatiques. Il existe donc une grande incertitude quant aux effets en cascade, au travers des différents niveaux trophiques, du changement climatique sur la dynamique des populations d'insectes ravageurs et l'épidémiologie des pathogènes forestiers. Une autre incertitude concerne les mécanismes d'adaptation au changement climatique qui peuvent différer en rapidité et intensité chez les arbres et leurs antagonistes (insectes et champignons pathogènes).

Enfin, comme souligné précédemment, une très grande inconnue concernant les maladies est liée à l'importance des introductions de parasites, dont le développement peut être favorisé par le changement climatique. La méconnaissance générale des champignons, en particulier dans les zones tropicales ou subtropicales qui constituent des réservoirs de pathogènes importants, et la part de stochasticité dans les événements invasifs rendent les prédictions extrêmement hasardeuses dans ce domaine. D'où la recommandation principale de maintenir les capacités de détection et de compréhension des phénomènes émergents pour répondre à ces imprévus.

III- Adaptation et atténuation

Devant l'ampleur des impacts observés et ceux prédits pour le siècle à venir, les pouvoirs publics ont cherché à anticiper les effets négatifs du changement en mettant en place des politiques adaptatives (« adaptive management ») dont l'objectif est de réduire la vulnérabilité des écosystèmes forestiers [6] [7] [9]. Ces politiques peuvent prendre différentes formes, allant de la mise en place de réseaux d'observation et de surveillance jusqu'au développement de règles d'aménagement et de sylviculture susceptibles d'améliorer la résilience des peuplements. Certaines de ces mesures peuvent s'appuyer ou renforcer des mécanismes d'évolution biologique en accélérant l'adaptation résultant de la sélection, quand il s'agit de forêts renouvelées par régénération naturelle. D'autres s'appuient sur des études de scénario pour identifier les mesures les plus pertinentes. Les forêts offrent également des opportunités d'atténuation des effets du changement climatique grâce à leur capacité à stocker du carbone à moyen terme et par la substitution au carbone fossile extrait par différentes filières de transformation (énergie, construction, etc.) de produits forestiers renouvelables. Ces mesures d'adaptation et d'atténuation sont très largement dépendantes des modes de gouvernance des formations forestières, qui sont également évoquées dans les paragraphes qui suivent.

A- Adaptation

Adaptation biologique

Les capacités d'adaptation biologique des arbres sont souvent sous estimées par un raisonnement intuitif, leur longévité étant considérée comme un frein à l'évolution. Ces assertions sont démenties par l'histoire évolutive des arbres au cours des cycles successifs de refroidissement-réchauffement du quaternaire. La reconstruction de cette histoire notamment au cours de l'holocène, et tout particulièrement dans le cas des chênes, a clairement mis en évidence les capacités d'évolution et d'adaptation aux changements climatiques naturels qui ont eu cours lors du réchauffement qui a suivi les dernières glaciations [87]. Ces capacités, ou potentiel adaptatif reposent sur un ensemble de propriétés et de mécanismes évolutifs qui sont sans doute mis à contribution dans l'évolution actuelle [62] [88]. Il y a tout d'abord la diversité génétique intra populationnelle, dont l'ampleur est une condition nécessaire à

toute évolution future. Cette diversité est par ailleurs continuellement alimentée par des flux de pollen. La dispersion à longue distance dans le sens Sud Nord peut à cet égard importer des gènes venant de régions aujourd'hui soumises à des conditions équivalentes à celles prédites dans les décennies à venir. La connectivité génétique au travers des flux de gènes peut ainsi faciliter l'adaptation. Ces principes généraux ne s'appliquent cependant que pour des espèces observant une distribution continue au-delà de la région Aquitaine (pin maritime, chêne sessile…). Les espèces en limite sud de distribution risquent à cet égard d'être plus exposées à une maladaptation chronique pouvant conduire à des difficultés de maintien (chêne pédonculé, hêtre, pin sylvestre). Par ailleurs les mécanismes adaptatifs (diversité génétique + flux de gènes) peuvent être fortement contraints en cas de déséquilibres démographiques des populations. Ainsi les populations à effectifs réduits (hêtre, bouleau…) risquent d'être plus sensibles aux changements climatiques.

Dans tous les cas, des mesures préventives s'inspirant d'ailleurs des mécanismes évolutifs naturels peuvent être anticipées. Elles consistent à enrichir la diversité génétique actuelle par l'adjonction de matériel de reproduction venant de régions plus méridionales. Elles peuvent être mises en œuvre lors des opérations de renouvellement des peuplements sous forme de régénération assistée (par semis ou plantations). L'enrichissement de la diversité au plan interspécifique peut également être recommandé comme mesure adaptative, en se basant sur les connaissances acquises sur les réseaux de plantations d'espèces dans le Sud-Ouest, les essais de provenance et les connaissances sur les mouvements migratoires en cours des espèces. En tous les cas, l'introduction de matériel nouveau est généralement raisonnée en termes d'enrichissement et non de substitution : la diversité introduite s'ajoute à la diversité autochtone [7], qui est de toute manière maintenue. Cette initiative exploite la valeur de garantie que renferme implicitement la notion de diversité. Une palette de gènes ou d'espèces plus variés offre plus d'opportunités et d'alternatives évolutives à la sélection qui sera induite par les changements climatiques. Dans cette optique l'introduction de pin maritime issu de la Péninsule Ibérique ou du Rif peut être réalisée sous forme d'hybrides au vu des essais déjà préalablement réalisés [89]. Au plan interspécifique les chênes de la section des chênes rouges peuvent être plantés, y compris sur les landes bien drainées (lande mésophile à fougère), en plus des chênes à tempérament plus méditerranéens. Il est probable que la productivité escomptée issue de ces peuplements nouveaux soit inférieure à celle du pin maritime, mais la pérennité des surfaces forestières et de leurs services écosystémiques demandées par nos sociétés sera mieux assurée.

Méthodes de conduite des peuplements

La cause principale du changement climatique, à savoir l'augmentation du CO_2 atmosphérique a eu et peut avoir, à court et moyen terme, des impacts positifs sur la croissance des arbres et des peuplements. Cependant les autres aléas liés à cette modification de la composition de l'atmosphère ont des impacts négatifs sur la croissance et la survie des arbres et donc plus largement sur les biens et les services fournis par cet écosystème. D'une façon générale, le maintien de la surface forestière en Aquitaine doit être un des premiers objectifs de gestion puisque la déforestation est une source d'émission de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et qu'elle a aussi des conséquences sur le climat et l'hydrologie au niveau local.

Méthodes de conduite des peuplements dans le cadre de l'évolution de l'aléa feu dans les Landes de Gascogne

En 2010, une mission interministérielle (Intérieur, Agriculture, Écologie) a travaillé sur l'impact du changement climatique sur les incendies de forêts. Dans ce rapport [90], le classement des massifs prend en compte le paramètre de sécheresse, issu de l'indice de forêt météo (IFM) et des caractéristiques de sensibilité de la végétation. Le massif landais, sans changement notable de la composition de son couvert forestier voit son niveau de risque passer de moyen à fort à l'horizon 2040, c'est-à-dire au même niveau que celui actuellement constaté pour les massifs du Sud-Est de la France **(Figure 10)**.

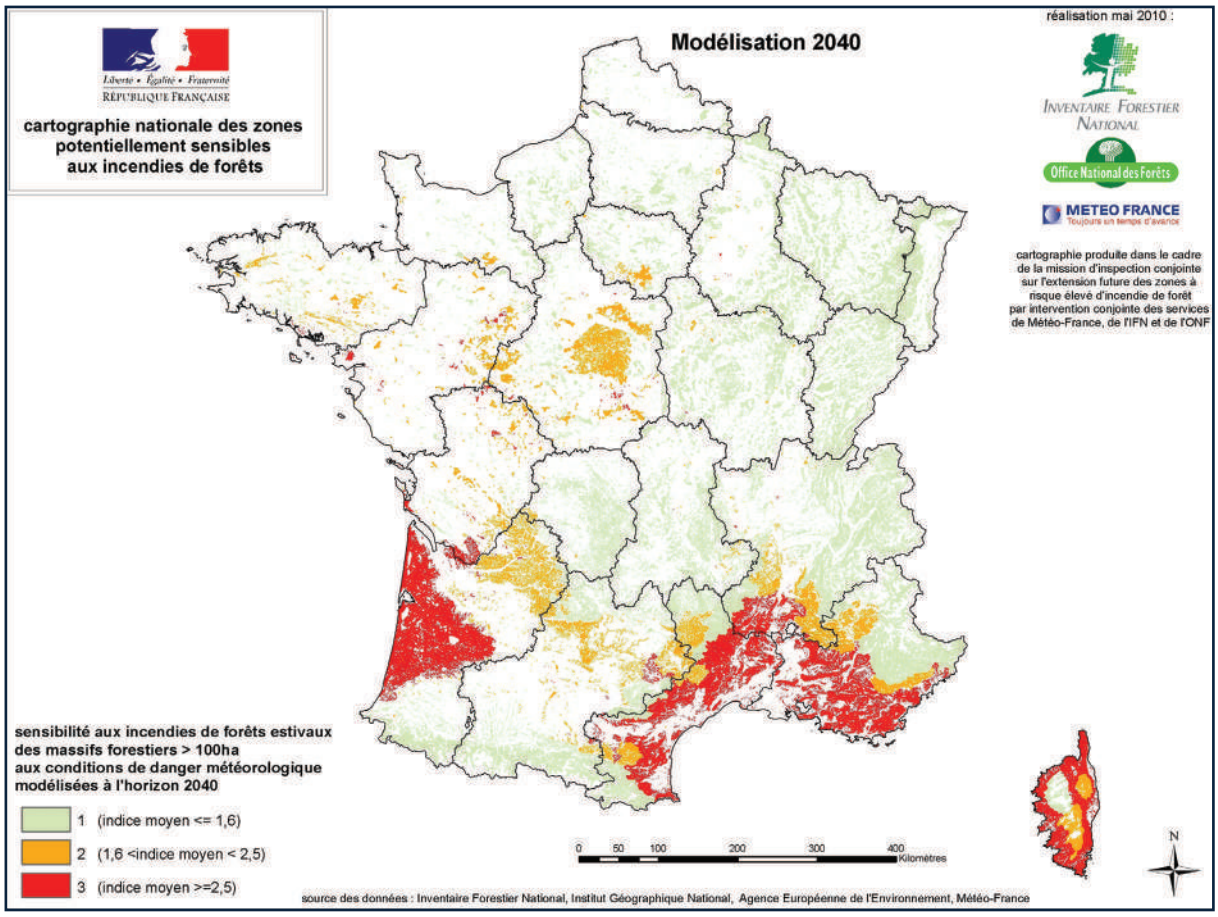


Figure 10 : *Carte des zones potentiellement sensibles aux incendies de forêts à l'horizon 2040. Le niveau le plus élevé est en rouge, le niveau moyen en orange et en vert pâle le niveau faible. En blanc les zones sans massif forestier supérieur à 100 ha ou à sensibilité très faible (Source : Chatry et al. [90]).*

Pour ce massif, la première recommandation sylvicole est de pratiquer une sylviculture dynamique des peuplements de production : des éclaircies précoces et progressives permettant une croissance dynamique des arbres et une fermeture rapide du couvert pour empêcher le développement d'un sous-bois trop vigoureux.

Le pin maritime fait partie des essences les plus sensibles au risque incendie. Le choix d'une essence qui « brûle moins » peut être une gageure car un objectif important pour la lutte contre les incendies est le maintien d'un couvert sans arbre dépérissant. Néanmoins une réflexion est à mener sur la composition en essences accompagnatrices (feuillus à feuilles caduques) ou la constitution de zones-tampons autour des plantations, pratiques courantes autour des plantations d'*Eucalyptus globulus* en Australie.

Enfin, le dispositif landais de lutte contre les incendies, cité en exemple par le rapport Chatry [90] doit aussi se renforcer et s'adapter aux nouvelles conditions annoncées autant climatiques que socio-économiques [91].

Méthodes de conduite des peuplements dans le cadre de l'évolution de l'aléa sécheresse dans le massif Adour-Pyrénées

L'aléa sécheresse et son évolution avec les changements climatiques sont des enjeux particulièrement importants pour les forêts du Massif Adour-Pyrénées. En effet, les prévisions climatiques (scénario A2 pessimiste ou scénario B2 optimiste du GIEC) annoncent une diminution des précipitations (moyennes et estivales) particulièrement prononcée dans les Pyrénées [92] aux horizons 2050 et 2100.

Par ailleurs, les simulations de la distribution potentielle du Hêtre et du Sapin (essences majoritaires des montagnes des Pyrénées-Atlantiques) indiquent une forte régression possible de ces deux espèces sur leur aire de répartition actuelle dans le cadre des changements climatiques [93]. De plus, des dépérissements dus aux sécheresses sont constatés depuis 1980 pour le Chêne pédonculé (essence majoritaire des plaines et coteaux en Adour-Pyrénées) dans les piémonts basques et béarnais [25].

Des adaptations sylvicoles pourraient permettre d'atténuer la vulnérabilité des forêts à cet aléa :

- Les opérations sylvicoles : des coupes régulières et une gestion accrue du sous-bois permettraient de diminuer la compétition de la végétation pour l'eau.

- La structure des peuplements : un traitement en forêt irrégulière permettrait d'atténuer l'effet des variations brutales de températures et des sécheresses par le maintien, tout au long de la vie du peuplement d'un couvert forestier et de répartir les besoins en eau du peuplement (hauteurs et essences variées).

Ces évolutions sylvicoles nécessiteraient le retour à une gestion active des forêts en Adour-Pyrénées (notamment en montagne) et plus particulièrement le retour à une gestion forestière organisée à une échelle supérieure à celle de la parcelle (dans le cas par exemple de l'amélioration de la desserte nécessaire à la gestion).

Méthodes de conduite des peuplements dans le cadre des aléas pathogènes et ravageurs dans le massif Dordogne-Garonne

Le châtaignier est l'essence la plus importante en taillis (40 % de la surface de taillis) dans le massif Dordogne-Garonne et souffre de dégâts et de mortalités causés par l'encre (*Phytophtora cinnamoni*) et le chancre (*Cryphonectria parasitica*). Les changements climatiques seraient *a priori* favorables à beaucoup de pathogènes, notamment ceux qui sont limités par les basses températures hivernales comme P. *cinnamoni* (cf. *supra*).

Dans ce contexte, certaines précautions sylvicoles pourraient permettre de limiter les dégâts dus aux pathogènes :

- Les traitements : dans un contexte de limitation des produits phytocides au niveau européen, certains traitements biologiques existent et pourraient être généralisés, comme par exemple l'hypovirus du chancre [94].
- La santé des plants : l'utilisation de plants sains issus des pépinières est extrêmement importante pour éviter la diffusion des pathogènes et la mise en place de plantations contaminées dès l'installation.

Enfin, un balivage effectué dans des taillis de châtaigniers infectés par l'hypovirulence a montré que l'éclaircie peut contribuer au développement de l'hypovirulence en favorisant l'accroissement des tiges et donc la vigueur des arbres [95]. Ainsi, de manière assez générale, la vigueur et la bonne physiologie de l'arbre, favorisées par une sylviculture dynamique, contribuent à la résistance des arbres aux pathogènes [45].

La sylviculture peut offrir des solutions spécifiques pour adapter les forêts de contextes différents à certains aléas (dans le cadre de leurs évolutions liées aux changements climatiques). Cependant ces solutions peuvent impliquer des compromis difficilement réalisables à l'échelle de la parcelle [45] et qui nécessitent une organisation de la gestion forestière à des échelles plus larges comme le territoire, le massif forestier ou le paysage.

Gouvernance

Les défis posés par le changement climatique participent à épuiser le « modèle traditionnel » d'une politique forestière nationale qui est, selon [96], fortement ancrée dans une double logique de pilotage centralisé par l'État et d'autonomisation sectorielle. Ce modèle hiérarchisé et cloisonné est confronté au problème de sa mise en cohérence avec des stratégies environnementales transversales portées par une diversité d'acteurs privés et publics à de multiples échelles (internationale, européenne, national, infranational) qui apparaissent comme autant de scènes interdépendantes où se structurent de nouveaux standards de l'action forestière.

Dans ce contexte mouvant et incertain, les dispositifs d'engagement volontaires et les mécanismes basés sur le marché sont souvent jugés plus souples et plus adaptés que les approches réglementaires classiques pour promouvoir une gestion durable des forêts. Cependant, prisonnière des intérêts sectoriels et de l'atomisation de l'espace économique, cette régulation privée peut aussi conduire à une simple réduction du coût des dommages liés aux risques. Un développement des contractualisations pourrait alors permettre de donner plus de poids aux exécutifs locaux et aux partenariats territoriaux afin de renforcer la définition concertée d'une adaptation conçue autour de la qualité des espaces et des produits. En impliquant de nouvelles formes de regroupement des propriétaires ou le développement de coopératives, ces procédures peuvent aussi être envisagées comme des modes de coordination contribuant à améliorer l'organisation du dialogue intra/inter-sectoriel et la mutualisation des risques [97].

Mais, la territorialisation de l'action publique forêt-bois paraît à la fois potentiellement plus efficace, car mieux adaptée à la diversité des situations, et plus légitime, car plus propice à la mise en débat des enjeux forestiers et aux pratiques délibératives [98]. La fabrication d'arrangements locaux pourrait ainsi s'appuyer sur des forums territoriaux au sein desquels se travaillerait une hybridation des différents intérêts en présence afin de maîtriser l'environnement sectoriel mais aussi les interfaces entre les différents usages du territoire. L'instauration de ces communautés d'utilisateurs serait de nature à favoriser la co-construction de normes d'action adaptées aux écosystèmes et aux ressources territoriales [99].

B- Atténuation

Forêts et plantations à vocation de fixation de carbone

Atténuer et anticiper les effets du changement climatique sont les enjeux à considérer dans la gestion de la forêt française dans un contexte d'intensification des pratiques sylvicoles. Un des objectifs est de maintenir le rôle de la forêt dans la séquestration de carbone tout en répondant à la demande énergétique croissante par le recours à la production de biomasse [100]. L'intensification de la sylviculture pose un certain nombre de questions quant au maintien de la viabilité des forêts. Elle affecte les composantes du système sol-végétation-atmosphère au travers de changements des propriétés du sol (travail du sol, tassement dû aux passages d'engin, retours de matière organique, fertilisation), des propriétés de surface (albédo, rugosité, interception de la pluie) et par conséquent le microclimat du système.

Itinéraires sylvicoles

Pour analyser ces impacts multiples, la réponse au climat de trois options de sylviculture a été analysée sur trois périodes 1970-2000, 2020-2050 et 2070-2100 du scénario climatique type A2 ([55], **Tableau 1**).

	ITK 1. Pin - 30	ITK 2. Pin - 15	ITK 3. Eu
Essences	Pins maritimes + sous-bois	Pins maritimes + sous-bois	*Eucalyptus*
Scénarios sylvicoles	30 ans	2 × 15 ans	3 × 10 ans
Densité initiale (tige ha^{-1})	13 300	13 300	1 200
Pratiques sylvicoles	- Labour initial - Débroussaillement à 5 ans - Dépressage et éclaircies - Coupe rase à 30 ans	- Labour initial - Débroussaillement à 5 ans - Dépressage - Coupe rase à 15 ans	- Sans labour initial - Sous-bois détruit chimiquement pendant 3 années consécutives donc absence totale de sous-bois dans les simulations - Coupe à 10 ans (souches de 10 cm maintenues) - Recépée en rotation 2 et 3

Tableau 1 : *Itinéraires sylvicoles analysés (Moreaux, [55]).*

Pour les ITK 1 et 2, il s'agit d'itinéraires intensifs s'appuyant sur des discussions engagées dans le cadre de la production intensive de biomasse-énergie [101]. Pour ITK 3, il s'agit des itinéraires actuellement développés dans la région Sud-Ouest.

Scénario climatique

	1970-2000	2020-2050	2070-2100
Rg (MJ an^{-1})	4538	4647	5045
Ta (°C)	13,4	14,6	17,5
RH (%)	77,4	76,9	69,9
Précipitations (mm an^{-1})	910	920	656
[CO_2]	345	414	722

Tableau 2 : *Moyenne annuelle par période des variables climatiques du scénario climatique A2 utilisé pour l'expérience de simulation, pour le point de grille de Bordeaux entre 1970 et 2100 (données SAFRAN)-(Rg désigne le rayonnement global, Ta la température de l'air, RH l'humidité relative, et [CO_2] la concentration en CO_2).*

Le scénario climatique A2 présente une rupture importante entre 2035 et 2085, notamment en termes de précipitation. Le point choisi dans la région Sud-Ouest (Bordeaux) présente une réduction de 28 % entre 1985 et 2085, ce qui correspond à l'une des plus fortes réductions en France [63]. Par ailleurs, l'augmentation de la température atteint 4,1 °C et la concentration en CO_2 750 ppm d'ici 2099.

Productivité **(Figure 11)**

Les trois options réagissent différemment au scénario climatique considéré. Le climat 2035 semble favorable aux *Eucalyptus* (accroissement positif de Ag Inc de +4 %) alors que pour les deux options de Pins, celui-ci est réduit de -11 % et -21 % respectivement. En 2085, l'incrément en biomasse aérienne est fortement réduit pour les trois essences, mais celui des *Eucalyptus* est moins sensible avec une réduction de 31 % contre 61 % pour les deux options de Pins.

Changements du stock de carbone dans le sol entre la fin et le début du cycle **(Figure 12)**

En 1985 et 2035, l'itinéraire *Eucalyptus* (ici sans labour) accumule du carbone à un taux annuel de 69 gC m^{-2} an^{-1} et l'effet d'un changement climatique est peu important. Dans le cas du Pin, la dynamique du carbone du sol est fortement impactée par les interventions sylvicoles (labour et rouleau lourd). Le compartiment de carbone humifié du sol (HUM) est affecté et les deux itinéraires déstockent du carbone. Les apports de matières organiques ne sont pas suffisants pour compenser la perte en carbone du sol pour des rotations aussi courtes.

Flux de carbone **(Figure 13)**

Au cours des trois périodes climatiques, l'itinéraire *Eucalyptus*, en l'absence de perturbations du sol, représente un puits de carbone conséquent, permettant la séquestration de 965 gC m^{-2} an^{-1} en moyenne et ce,

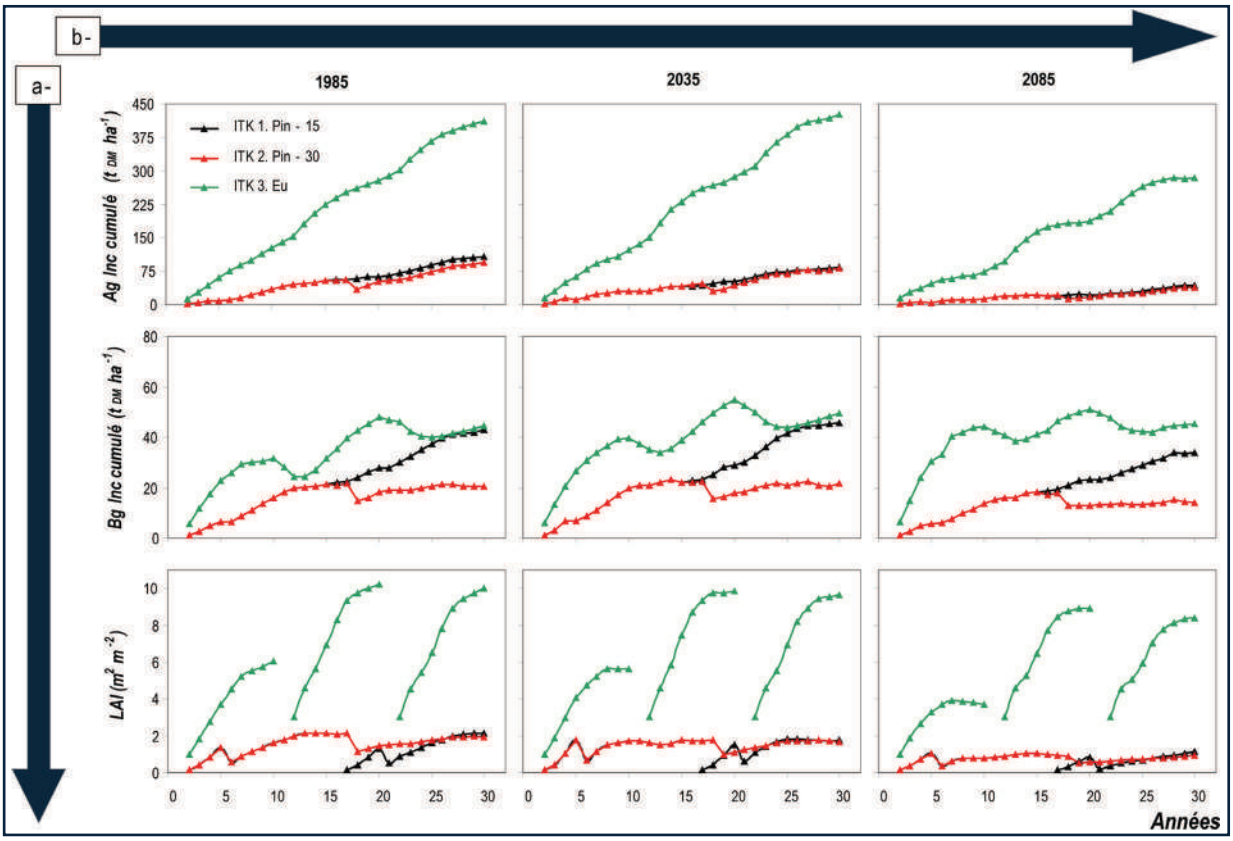


Figure 11 : *Évolution du cumul de l'incrément de biomasse (exprimées en tonne matière sèche (t DM) des parties aériennes) des parties aériennes (Ag Inc) et souterraines (Bg Inc) et de l'indice foliaire (LAI) pour les trois options sylvicoles (taillis d'Eucalyptus 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques (Moreaux [55]). Entre 0 et 15 ans, les deux simulations Pin-15 et Pin-30 sont confondues.*

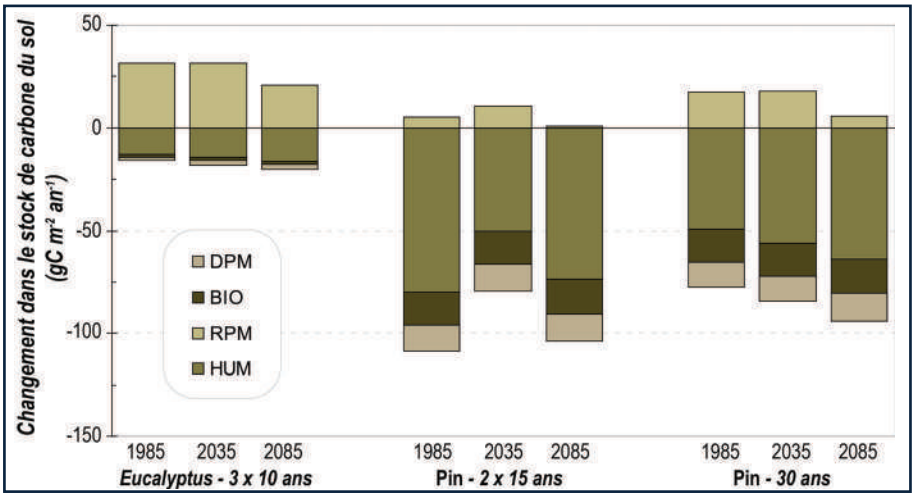


Figure 12 : *Variations moyennes annuelles des stocks de carbone des compartiments du sol pour trois options sylvicoles (taillis d'Eucalyptus 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques (scénario A2). Un accroissement est compté positivement. DPM désigne le compartiment d'entrée de la matière organique (MO) labile, RPM : celui de la MO résistante. BIO désigne le compartiment de biomasse microbienne et HUM le compartiment de matière organique humifiée, c'est-à-dire stabilisée (Moreaux [55]).*

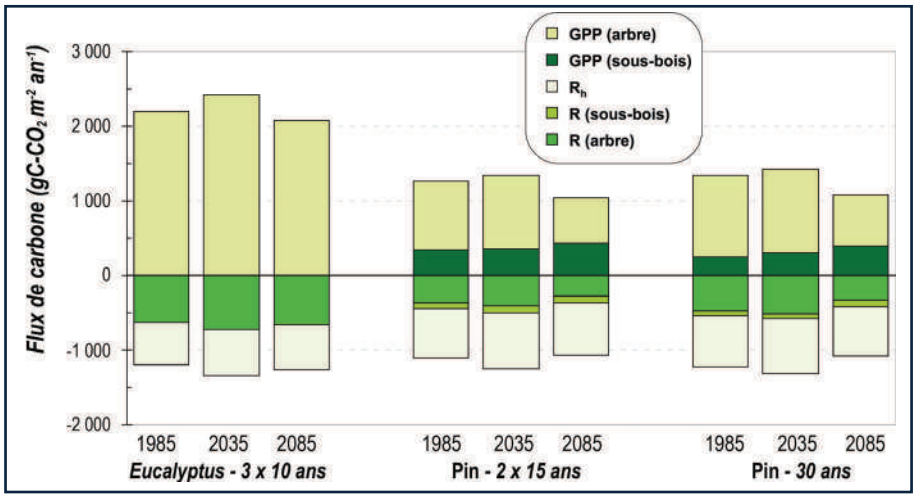


Figure 13 : *Valeurs moyennes annuelles des flux de C-CO2 simulés pour les trois options sylvicoles (taillis d'Eucalyptus 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques. Les flux descendants (assimilation) sont comptés positivement. Pour rappel, GPP désigne la production primaire brute, Rh la respiration hétérotrophe et R la respiration autotrophe (Moreaux [55]).*

essentiellement dans la biomasse aérienne **(Figure 13)**. Les deux itinéraires de Pins sont également un puits de carbone moyen sur les trois périodes (NEE moyen de -76 gC m^{-2} an^{-1}). Sur un cycle de 30 ans, cette valeur faible s'explique par les perturbations successives du sol et la respiration hétérotrophe importante.

La seconde période climatique (2035) est favorable aux trois essences en termes de production primaire brute (GPP) car les plantes ne sont pas à saturation en CO_2. L'activité de stockage de carbone est stimulée. Cet effet de l'élévation de concentration en CO_2 est assez bien compris [102] [103]. Cependant, en 2085, la diminution des précipitations et l'augmentation de température amènent une réduction de GPP de -15 % dans le cas de l'*Eucalyptus* et de -38 % pour les deux itinéraires de Pins qui est attribuée à l'aggravation du déficit en eau du sol. Finalement, en 2085 l'option sylvicole Pins-15 ans devient une source nette de carbone (+17 gC m^{-2}) et l'option Pins-30 ans est proche de la neutralité.

De récents travaux estimant le bilan en gaz à effet de serre d'un système de taillis à courte révolution de peuplier ont utilisé le modèle global de fonctionnement de la végétation {ORCHIDEE} couplé à un module de gestion forestière à l'échelle européenne [104] [105]. Ses auteurs obtiennent une augmentation de la production énergétique sous un climat enrichi en CO_2. Les auteurs précisent cependant que les changements de carbone dans le sol ne sont pas pris en compte. Finalement, les effets climatiques sur la dynamique des flux de carbone obtenus par Moreaux [55] sont en accord avec les résultats présentés par le projet CLIMATOR à l'échelle du Sud-Ouest [11] pour lesquels les sécheresses édaphiques et atmosphériques sont considérées comme les contraintes majeures.

Utilisation du bois comme substitution aux énergies fossiles

La demande de biomasse forestière commercialisée à usage énergétique en Aquitaine sera de l'ordre de 2 millions de tonnes d'ici cinq années. Elle concernera sans doute en majorité des quantités provenant d'essences résineuses, si on tient compte de l'usage des produits connexes des scieries et des ressources non mobilisées actuellement (rémanents et souches).

Le potentiel de l'autoconsommation de bois de feu des particuliers provenant des feuillus aquitains est du même ordre de grandeur. La mobilisation de peuplements feuillus non valorisés aujourd'hui et le développement de peuplements feuillus dédiés pourraient sensiblement augmenter à plus long terme le potentiel de ressources.

Compte tenu des effets des tempêtes de 1999 et 2009, un risque de tension entre usages devrait exister sur l'affectation de la ressource forestière dans les dix à quinze années à venir.

Jusqu'en 2030, il a été indiqué précédemment que la productivité des peuplements de pin maritime devrait continuer à croître. En faisant abstraction de risque de mortalités engendrées par des événements climatiques extrêmes, on peut penser que, même avec une baisse de productivité dans les vingt années suivantes (sécheresse et attaques biotiques), les volumes des reboisements issus de la tempête Klaus devraient atteindre leur maximum de potentiel de récolte annuel vers 2050 et compenser cette possible perte de productivité. À cet horizon on peut envisager de disposer, durant une décennie, d'une récolte stable annuelle de *10 à 12 millions de m³* par an pour les résineux, essentiellement du pin maritime hors mortalités. Cette ressource conservera le grand intérêt d'être facilement mobilisable techniquement. Il existera également un potentiel énergétique de *2 millions de m³ dans les rémanents et souches d'arbres.* Il est difficile de prévoir quelle sera la part de récolte affectée aux usages énergétiques substitutifs des énergies fossiles. Les interactions avec les marchés du bois d'œuvre et du bois d'industrie dépendront beaucoup du prix relatif de l'énergie. Les usages traditionnels, bois d'œuvre et bois d'industrie, pourraient souffrir de la concurrence de la demande de bois d'énergie, même si les acteurs de la filière bois souhaitent préserver ces usages de la ressource forestière sur le long terme. À titre de repère, en passant par les tonnes de matière sèche [106] et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du bois, c'est un potentiel total de *2,2 à 2,6*[2] *millions* de tonnes équivalent pétrole *(30 500 Gigawatt-h)* que pourrait représenter la biomasse résineuse à cet horizon.

À ce même horizon 2050, le niveau des stocks de feuillus aquitains dépendra des prélèvements effectués sur cette ressource durant les années antérieures. On sait que les stocks de bois sur pied ont régulièrement crû jusqu'à aujourd'hui durant les décennies passées. La récolte commercialisée de bois d'œuvre et d'industrie reste actuellement nettement inférieure à *1 million de m³*, celle de l'autoconsommation de bois de feu non commercialisée est voisine de *2 millions de m³* depuis des décennies. Cette ressource autoconsommée pourrait être réintroduite avec une meilleure efficience dans les circuits commerciaux. Sans préjuger d'un ralentissement de la productivité des feuillus dû au réchauffement climatique, il existera sûrement également un potentiel supplémentaire de récolte de *2 millions de m³*, sans altérer les stocks de bois sur pied, récolte dont la mobilisation dépendra des conditions économiques d'exploitation à cet horizon temporel. Le prix de revient de l'exploitation sera, là encore, déterminant. À titre de repère, le potentiel représenté par cette biomasse forestière feuillue serait alors de *0,7 à 1,2*[3] million de tonnes équivalent pétrole (*13 500 GWh).*

Au total, les ressources forestières d'Aquitaine représenteraient à cet horizon de *2,9 à 3,7* millions de tonnes équivalent pétrole. Exprimé en gigawatt, le potentiel représenté pourrait être compris entre *34 000 et 44 000 GWh*. Cependant sur ce potentiel il serait raisonnable, compte tenu des *contraintes socio-économiques sur l'affectation de la ressource aux autres usages*, de ne retenir qu'un *ordre de grandeur de 17 500 à 24 500 GWh comme gisement de biomasse forestière potentiel*[4]*.*

À titre de comparaison, la consommation énergétique de l'Aquitaine était voisine en 2008 de *100 000 GWh*. Notons que les émissions de CO_2, qui résultent de la combustion de la biomasse forestière, ne sont pas comptabilisées dans les inventaires car elles vont être refixées lors de la croissance des peuplements forestiers. Ceci rend d'autant plus vertueux le mécanisme de substitution énergétique au profit de cette biomasse, en tenant compte bien sûr du circuit d'approvisionnement qui devrait être

2. Soit, pour 14 millions de bois (bois fort 12 Mm³ et 2 Mm³ de rémanents), une quantité de matière sèche de 6 millions de tonnes (infradensité de 0,43) et un PCI de 2,6 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) (coefficient 0,43 par tonne anhydre) ou 30 500 Gigawatt-h (coefficient 5,06 Mégawatt-h par tonne anhydre). Les résultats dépendent bien sûr des coefficients retenus toujours discutables.

3. Soit, pour 5 millions de m³ de récolte, une quantité de matière sèche de 2,7 millions de tonnes (infradensité de 0,54) et un PCI de 1,2 million de tep (coefficient 0,43 par tonne anhydre) ou 13 500 Gigawatt-h (coefficient 5,06 Mégawatt-h par tonne anhydre).

4. En comptant les usages énergétiques lors des processus de transformation de la ressource (liqueurs noires…).



Vue aérienne de la forêt du Médoc, entre étang et dune littorales (© J. Haas, Fédération départementale des Chasseurs de Gironde).



Landes humides dans la forêt des Landes, près d'Hostens (© A. Kremer, INRA-Bordeaux).

le plus neutre possible pour le calcul du bilan carbone de la substitution énergétique de la biomasse forestière aux énergies fossiles.

À l'horizon de la fin du siècle, compte tenu d'une baisse potentielle de productivité des peuplements forestiers actuels (de 30 à 40 %), la concurrence entre usages ne pourra être que plus forte. Bien sûr cela suppose que catastrophes climatiques ou biotiques n'hypothèquent pas la vocation de production des espaces forestiers.

Gouvernance

Les mesures dites « d'atténuation » conduisent au développement rapide de diverses formes de marchés carbones articulant régulations privées et incitations publiques. Certes, dans le cadre de l'actuel « Protocole de Kyoto » (1997), la France apparaît peu concernée car elle est plus susceptible de stocker du carbone par la gestion forestière (crédits plafonnés) que par les processus de boisement, et ce d'autant plus que les reboisements post-tempêtes ne sont pas éligibles. Cependant, depuis 2002, des marchés volontaires se sont peu à peu imposés comme une alternative plus souple avec des mécanismes de « compensation carbone », portés par différents labels (ex. : Voluntary Carbon Standard [VCS], Chicago Climate Exchange [CCX]….), à partir de l'augmentation de stock de carbone en forêt ou dans les produits du bois. De plus, il existe également des projets infranationaux. L'Association Aquitaine Carbone (2012) est ainsi un projet régional qui vise à répondre à l'enjeu particulier du reboisement post-tempête et à promouvoir des projets et des parcours sylvicoles capteurs de CO_2 [99]. À l'avenir, d'autres dispositifs gagneraient à être développés en favorisant, par exemple, les emplois à longue durée du bois et des produits ligneux dans l'habitat [9]. Ces certifications, qui s'appuieraient sur des Analyses de Cycle de Vie (ACV) des produits du bois, s'inscriraient dans une régulation marchande portée par les consommateurs.

Si diverses mesures d'atténuation sont déjà mises en place ou envisageables, il est toutefois nécessaire de s'interroger non seulement sur leurs attractivités et leurs implications en termes d'évolution des investissements forestiers, des structures foncières et des modes d'organisation collective mais aussi et surtout sur leurs compatibilités.

En effet, parallèlement à la promotion de la forêt « stock de carbone », les marchés et les soutiens économiques, nationaux ou régionaux, aux filières concourent actuellement à un développement de la biomasse forestière. Si ces processus visent à réduire la dépendance aux énergies fossiles, ils peuvent également favoriser l'essor de parcours sylvicoles (taillis à courte rotation), une réorganisation des filières et des bouleversements paysagers en contradiction avec les objectifs de séquestrations du carbone mais aussi les stratégies d'adaptation visant à améliorer la résilience des forêts et des territoires. La structuration et la mise en cohérence des diverses politiques d'atténuation au niveau des espaces forestiers constituent donc des enjeux majeurs. Cela suppose tout d'abord de réinsérer la problématique de la biomasse forestière dans une réflexion régionale sur le développement des différentes énergies renouvelables mais également de questionner les trajectoires envisagées, les portages privilégiés et les technologies déployées : fourniture de réseaux nationaux et internationaux par une production très centralisée, valorisation décentralisée à l'échelle des territoires [99].

Conclusion

Cette revue rappelle à quel point les forêts se trouvent aujourd'hui au centre d'enjeux écologiques et économiques considérables. Ces enjeux sont illustrés par la position duale des forêts dans le contexte du changement climatique. D'une part leur stabilité écologique est défiée par l'ampleur et l'intensité de ce changement. D'autre part elles peuvent contribuer de manière significative à l'atténuation du changement climatique. Cette revue a permis de dégager, au vu des observations actuelles et des prévisions futures,

quelques grandes tendances, qui caractériseront les formations forestières en Aquitaine. Il est presque certain que leur composition en espèces (qu'il s'agisse de la pinède landaise, des forêts de la vallée de l'Adour ou des plateaux calcaires de Dordogne), se modifiera graduellement au cours des prochaines décennies sous le forçage du changement climatique ou par intervention humaine. D'autre part tous les modèles prédisent que la productivité des forêts continuera à augmenter dans le futur proche avant de connaître un ralentissement et une nette décroissance et ce dès les années 2050. Au-delà de ces grandes tendances, des incertitudes demeurent cependant.

L'intensité à laquelle ces différents mécanismes se produiront reste peu connue. Par exemple, les vitesses respectives auxquelles se feront les mouvements migratoires et les disparitions de populations (qu'il s'agisse d'arbres ou d'espèces associées) restent méconnues si bien que leur bilan qui traduit la composition spécifique reste tout aussi spéculatif. Cette incertitude est renforcée par l'absence de cadre conceptuel et de modélisation des interactions interspécifiques stimulées ou inhibées par le changement climatique. Dans ce domaine le concept de communautés « non analogues » est le plus souvent invoqué pour évoquer l'évolution des compositions futures.

Les interactions entre les différentes composantes de l'ensemble atmosphère-forêts-climat et les réactions en cascades qui peuvent en découler ont été peu abordées, quelle que soit l'échelle spatiale considérée. L'inconnue portant sur les réactions en cascades s'applique également aux modifications de la biodiversité, en réponse aux modifications spécifiques à différents niveaux trophiques.

L'impact des événements climatiques extrêmes risque de perturber de manière considérable les changements graduels énoncés dans cette revue. L'intégration de ces événements, de leur occurrence comme de leurs effets reste un sujet majeur de recherche.

D'une manière générale la prise en compte de l'incertitude elle-même dans les modèles de prévision, ainsi que son intégration dans les politiques dites « adaptatives » méritera une attention plus grande. Une telle attitude nécessitera sans doute une grande diversité dans les approches prédictives, une flexibilité dans les décisions, et une volonté de réévaluer fréquemment l'état des lieux. Cette conduite sera d'autant plus efficace qu'elle se fonde sur un solide jeu d'indicateurs régulièrement observés dans les écosystèmes forestiers.

Enfin l'impact du changement climatique sur les forêts d'Aquitaine est indissociable de l'évolution des demandes sociétales portant par ailleurs sur les forêts. Les forêts d'Aquitaine sont en effet gérées et exploitées dans un milieu fortement et historiquement modifié par l'homme. Leurs réponses aux changements environnementaux en cours sont de ce fait conditionnées en grande partie par les activités humaines au contraire d'écosystèmes moins anthropisés. Les services écosystémiques attendus par les différentes composantes de nos sociétés auront tendance à s'accroître en réponse à l'urbanisation croissante et au développement du tourisme en Aquitaine. Cette surenchère risque par ailleurs d'augmenter les tensions autour de l'utilisation des terres à des fins forestières. Certaines de ces évolutions ont été explorées dans une étude de prospective récente portant sur la forêt landaise [99]. Elles illustrent également à quel point l'évolution des forêts résultera des modifications environnementales et de celles de nos sociétés. Elles appellent de ce fait à des analyses globales intégrant sciences de l'environnement et sciences humaines et sociales, qui restent pour l'essentiel à être développées.



La confluence de la Garonne et de la Dordogne au niveau du Bec d'Ambès, formant l'estuaire de la Gironde (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 6 :

Estuaires et domaine côtier

Préambule

Les océans couvrent 71 % de la surface de la Terre. Ils jouent un rôle clé dans le cycle global du carbone et déterminent largement différents processus comme la régénération des nutriments, la régulation des gaz et aujourd'hui le changement climatique global [1]. Ils abritent aussi une biodiversité remarquable, dont une partie a une valeur socio-économique considérable, notamment au travers des pêcheries [2]. Tous les océans du monde ont connu des changements majeurs depuis le siècle dernier notamment sous la pression des pêcheries, des pollutions (conséquences ponctuelles des marées noires par exemple) et du changement climatique global (ouverture progressive des Passages du Nord). Les changements climatiques survenus partout sont bien documentés, notamment pour les 50 dernières années [3]. Pourtant, les conséquences biologiques restent relativement mal décrites et insuffisamment comprises [4][5]. Ceci s'explique en partie par le nombre limité d'études à long terme capables de démêler spécialement les réponses biologiques, mais également parce que ces conséquences peuvent varier selon les groupes biologiques et s'exprimer avec un décalage parfois important (une ou plusieurs générations [6]). En outre, ces réponses biologiques peuvent être extrêmement complexes et varient selon les régions [7].

Le Grenelle de la mer définit le littoral comme une *zone charnière* à la rencontre de la terre et de l'océan. Au sens strict, on peut le restreindre à l'estran (partie de terre située entre les niveaux connus des plus basses et des plus hautes mers), mais de manière plus large on le considère comme une interface entre les écosystèmes terrestres, estuariens et marins. Ainsi, c'est un lieu de concentration des impacts, un domaine physique et biologique complexe à forte biodiversité. Du fait de leur position à l'interface continent/océan, les littoraux constituent des écosystèmes soumis à une forte variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques (ex. débit, cycle tidal, température, salinité et matières en suspension [8]). La rencontre de deux masses d'eau, marine et continentale, en fait des écosystèmes riches et complexes, de grande importance écologique et biologique : habitats de nombreuses espèces, zones de nourricerie, zones refuge ou lieu de croissance [9][10][11]. Yanagi estime que 70 % de la ressource halieutique passe une partie de son cycle de vie en zone côtière [12]. C'est le cas également pour les espèces exploitées par les flottilles de pêche d'Aquitaine (cf. chapitre 6.3) : soles, anchois, sardines, bars, maigres ou encore migrateurs amphihalins dépendent, pour tout ou partie de leurs cycles de vie, du fonctionnement et la connectivité des écosystèmes estuariens, littoraux et côtiers.

L'Aquitaine possède une grande diversité de milieux estuariens et littoraux qui influent aussi fortement sur la structuration physique du domaine côtier dont certaines parties soumises à l'influence des panaches estuariens constituent des zones de frayères propices aux espèces de poissons pélagiques tels que l'anchois ou la sardine [13][14]. Ainsi nous pouvons différencier, l'estuaire de la Gironde (635 km²), le plus grand d'Europe Occidentale, qualifié par Goosen *et al.* d'hétérotrophe [15][16], qui constitue un modèle d'estuaire *« macrotidal*[1] *type européen »*. Il est associé aux marais girondins et est

1. Subissant des amplitudes de marée importantes.

connecté aux basses vallées de l'Isle, de la Dordogne et de la Garonne pour une surface totale de bassin-versant de 56 000 km². Au sud de l'Aquitaine, le bassin de l'Adour (16 890 km² de superficie de bassin-versant) est associé aux barthes de l'Adour, zones humides aujourd'hui bien impactées par l'urbanisation et l'agriculture. Entre ces deux grands estuaires, les marais et bassin d'Arcachon prolongé en mer par le banc d'Arguin reçoivent les eaux du bassin de la Leyre et des landes humides et lagunes de Gascogne. Enfin sur les côtes girondine et landaise, courants et étangs de l'arrière-dune complètent la grande diversité des biotopes aquatiques aquitains.

L'adaptation des écosystèmes côtiers, littoraux et estuariens non seulement aux effets du changement climatique, mais plus largement à ceux du changement global est un questionnement majeur pour les équipes de recherche. En effet, le changement climatique ne constitue qu'un des facteurs de modification des écosystèmes aquatiques, en particulier pour ceux qui se situent dans ces domaines d'interface entre la terre et la mer. La pollution des océans vient principalement des influences terrigènes (80 % selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement), le phénomène de littoralisation (augmentation des mouvements migratoires de l'arrière-pays vers la côte) artificialise fortement le trait de côte et conduit à chenaliser les estuaires, à construire dans des zones exposées aux événements extrêmes dont la vulnérabilité aux risques induits par le changement global est accrue par l'élévation du niveau de la mer et/ou par l'augmentation de la fréquence des crues. Il nécessite une meilleure compréhension des processus mis en jeu dans la dynamique des écosystèmes et dans le couplage des socio-écosystèmes pour mieux appréhender l'adaptation des communautés aux facteurs de changement.

L'évolution déjà apparente des paramètres physico-chimiques qui contrôlent les écosystèmes côtiers a été analysée dans le chapitre 1. Nous présentons au début de ce chapitre (6.1) l'impact de l'évolution de ces forçages physiques sur les risques en termes d'érosion et de submersion des littoraux, puis nous montrons les conséquences en termes de modification de biodiversité (6.2) et enfin les impacts sur les ressources exploitées par la pêche et l'aquaculture (6.3).

6.1 Modification du littoral

Coordination : *Philippe Bonneton*
Rédacteurs : *Stéphane Abadie, Philippe Bonneton, Bruno Castelle, Jean Favennec, Cyril Mallet, Aldo Sottolichio*
Contributeurs : *Vincent Hanquiez, François Hissel, Vanessya Laborie, Philippe Maron, Jean-Pierre Tastet*

Les 270 km du littoral aquitain présentent une grande diversité d'entités géomorphologiques, ayant une forte valeur patrimoniale. Cet environnement, modelé par l'action de marées et de houles intenses, est sujet à de forts aléas naturels, tels que l'érosion et la submersion marine. Or ce milieu est soumis à une pression démographique et une urbanisation croissante. Il est donc essentiel d'avoir une bonne connaissance des aléas littoraux aquitains afin d'en limiter les risques, en particulier dans le cadre du changement climatique. Nous présentons dans cette section le fonctionnement des littoraux sableux et rocheux aquitains, ainsi que les aléas d'érosion et de submersion auxquels ils sont actuellement soumis. Nous analysons ensuite l'impact potentiel de l'élévation du niveau marin et des modifications du climat de houle en Aquitaine, liées au changement climatique, sur les aléas érosion et submersion.

Introduction

Le littoral aquitain est caractérisé par une longue façade maritime orientée approximativement nord/sud qui s'étend de l'embouchure de la Gironde à celle de la Bidassoa sur près de 270 km **(Figure 1)**. La côte aquitaine est caractérisée par différentes entités géomorphologiques. La plus au nord est l'estuaire de la Gironde, le plus vaste estuaire d'Europe occidentale. Plus au sud, de la Pointe de Grave en Gironde à la Pointe Saint-Martin dans le département des Pyrénées Atlantiques, un long système de plages et dunes sableuses s'étend sur 230 km. Cet environnement est interrompu principalement par le bassin d'Arcachon, le Gouf de Capbreton et l'estuaire de l'Adour. Au sud de l'Aquitaine, les falaises rocheuses de la Côte Basque alternent avec des plages sableuses de poche sur un linéaire de 40 km jusqu'à la frontière espagnole. La côte aquitaine est donc caractérisée par une grande diversité d'entités géomorphologiques et d'écosystèmes associés.

Une caractéristique commune à l'ensemble du littoral aquitain est sa forte variabilité induite par des forçages hydrodynamiques (houle et marée) très intenses. De ce fait ce littoral est sujet à de forts aléas naturels tels que l'érosion et la submersion marine **(Figure 1)**. L'érosion concerne aussi bien les côtes sableuses (ex. : Nord Médoc, **Figure 1**) que les falaises du Pays Basque **(Figure 1)**, alors que la submersion marine affecte les zones basses estuariennes et lagunaires (ex. : tempêtes Klaus, 2009 et Xynthia, 2010). Ces phénomènes ont des conséquences sociales et économiques de plus en plus importantes, car les espaces littoraux subissent une pression démographique et une urbanisation croissantes liées principalement au développement de l'économie des loisirs et du tourisme.

Dans ce contexte, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des aléas et de la vulnérabilité du littoral aquitain pour pouvoir prévoir et limiter les risques liés aux phénomènes d'érosion et de submersion. Ces enjeux sont renforcés par la problématique du changement climatique et l'évolution des forçages côtiers **(Tableau 1)**. En effet, le changement climatique induisant une élévation du niveau moyen de la mer, mais aussi un changement des climats de houle et des caractéristiques des tempêtes, devrait modifier les risques d'érosion et de submersion.



Figure 1 : *Littoral aquitain et aléas.*

Variable climatique	*Importance*	*Observations (tendances)*	*Observations (variabilité)*	*Projections*
Niveau marin moyen	Il s'agit d'une variable climatique qui a en général pour effet d'aggraver les aléas de submersion, d'érosion et d'intrusions salines dans les aquifères sur le long terme	Le niveau marin s'élève dans le golfe de Gascogne. Les mesures indiquent des tendances proches de la moyenne globale (de l'ordre de 2mm/an)	La variabilité du niveau marin est liée en premier lieu aux variations de température et de salinité des océans [1]	Chust et al. [2] prédisent des élévations de niveau marin de l'ordre de 0,28 à 0,48m de 2001 à 2100 mais ces évaluations ne prennent pas en compte les incertitudes
Vagues	La direction et la hauteur des vagues sont des paramètres importants pour les aléas de submersion et d'érosion marine	L'augmentation des hauteurs de vagues [3][4] n'a pas été confirmée par la régionalisation de Charles et al. [5][6]	La variabilité des vagues s'explique partiellement par des variables atmosphériques à l'échelle du bassin Atlantique Nord [7][4][5][6]	Baisse de l'énergie des vagues et décalage vers le nord de leur direction en été [5][6]
Surcotes marines	Les surcotes sont un paramètre important pour la submersion marine	Pas d'étude de tendance connue pour la côte Aquitaine	Pas d'étude de variabilité pluriannuelle connue pour l'Aquitaine	Pas d'étude de projection connue pour l'Aquitaine
Vent	Le vent agit sur le transport éolien, principalement lors des tempêtes [8]			Pas d'évidence de changement des régimes de tempêtes [9]
Précipitations	Variable climatique agissant sur l'érosion des sols et donc les apports sédimentaires. Ceci est cependant extrêmement délicat à quantifier			voir Déqué, 2007 [10]

Tableau 1 : *Synthèse des effets du changement climatique sur les principaux forçages contrôlant la dynamique du littoral (d'après Le Cozannet et al. [11]).*

Les recherches en France concernant l'impact du changement climatique sur l'évolution du milieu littoral se sont développées depuis 10 ans, en particulier dans le cadre des programmes ANR portant sur la vulnérabilité des milieux et le changement global. On peut citer par exemple le projet ANR MISEEVA qui a étudié la vulnérabilité du système côtier à la submersion marine dans le contexte du changement global, avec des applications centrées sur le Languedoc Roussillon. Le projet ANR VULSACO a permis d'avancer dans la compréhension de la vulnérabilité des plages sableuses françaises, avec une des applications concernant la Gironde. Les enjeux aquitains concernés par l'érosion marine et la submersion sont de plusieurs ordres : humains, économiques, sociétaux, environnementaux et patrimoniaux. Au niveau de la région Aquitaine, cette thématique est au cœur des préoccupations des chercheurs du RRLA (Réseau de Recherche Littorale Aquitain) en interaction avec les objectifs plus appliqués de l'Observatoire de la Côte Aquitaine et du GIP littoral Aquitain. Ces derniers acteurs ont ainsi caractérisé l'aléa érosion côtière (y compris les mouvements de terrain) aux horizons 2020 et 2040 dans le cadre de la mise en place de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière, sans toutefois prendre en compte explicitement l'impact du changement climatique.

Dans ce chapitre nous analysons l'impact potentiel des changements climatiques sur les différentes entités du littoral aquitain : côtes sableuses, côtes rocheuses, systèmes lagunaires et estuariens. Au préalable il est nécessaire d'introduire le fonctionnement actuel de ces entités.

I- Fonctionnement des principales entités du littoral aquitain et aléas

Côte sableuse

Évolution globale

Le littoral sableux aquitain s'est formé à la fin de la transgression post-glaciaire, il y a environ 6000 ans, lorsque le niveau marin s'est stabilisé à son niveau actuel (cf. chapitre 2). Lors de cette remontée, l'océan a entraîné de grandes quantités de sédiments détritiques qui s'étaient accumulées sur la plate-forme continentale pendant la période glaciaire. Cette abondance sédimentaire a conduit à la formation des plages et systèmes dunaires que nous connaissons aujourd'hui en Aquitaine [10]. Après une période de quasi-stabilité du littoral sableux, lié à un budget équilibré entre les flux sédimentaires océaniques,

fluviaux et terrestres, commence une période de restriction des apports sédimentaires. Celle-ci s'explique en grande partie par la diminution sur le plateau du stock sableux (transporté par les vagues jusqu'au rivage), et qui actuellement peut se limiter en certains endroits à de simples placages sableux [13]. Cette pénurie de sable se traduit par une érosion globale du littoral depuis au moins deux siècles et peut être – au moins sur certaines sections du littoral – depuis que la mer a atteint son niveau actuel [14]. Cette évolution naturelle a été renforcée par l'action de l'Homme telle que l'extraction de granulats marins ou fluviaux. Le système de plages et dunes sableuses de la côte aquitaine est actuellement globalement en érosion (recul de 1 à 3 m/an ; **Figure 1**) avec une assez forte variabilité spatiale et des vitesses de recul pouvant localement atteindre 6 m/an [15]. L'anthropisation de cet environnement ne devient significative vers le sud qu'à partir de Capbreton, et de manière très prononcée le long du littoral basque.

Si l'évolution du niveau marin et le transport des sédiments par le vent ont joué un rôle majeur dans l'évolution de notre littoral depuis la dernière glaciation, ce ne sont plus actuellement les facteurs majeurs contrôlant l'évolution du trait de côte. Par exemple l'élévation du niveau marin de 2 mm/an en Aquitaine n'explique que seulement 5 % du recul observé sur le littoral (estimation METHYS/EPOC, résultats non publiés). Le budget sédimentaire de cet environnement est principalement contrôlé par l'hydrodynamique littorale et plus particulièrement par l'action des vagues et des courants qu'elles induisent, et la disponibilité de stocks sédimentaires. Excepté au niveau des embouchures estuariennes (Gironde et Adour) et lagunaires (bassin d'Arcachon) les courants de marée sont de faibles intensités (<10 cm/s) et contribuent peu au transport sédimentaire. Le principal phénomène contrôlant les flux sédimentaires sur notre littoral est donc le courant parallèle à la côte, dénommé courant de dérive, généré par les vagues lorsqu'elles déferlent avec un angle d'incidence par rapport au rivage. Ce courant transporte de grandes quantités de sable le long du littoral, qu'on appelle dérive littorale. Sur nos côtes, les houles de directions dominantes ouest/nord-ouest vont générer un courant de dérive et une dérive littorale résultante orientée vers le sud pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de m^3 par an. Les variations spatiales de ces flux sédimentaires **(Figure 1)** vont déterminer les taux d'érosion ou d'engraissement des plages. Au nord, à la Pointe de la Négade, le changement d'orientation de la côte induit une divergence de la dérive littorale et donc une forte érosion de cette zone (le taux d'érosion peut localement atteindre 5 m/an d'après Aubié *et al.* [16]). De l'Anse du Gurp (située au sud de la Pointe de la Négade) jusqu'à la Pointe du Cap-Ferret, on observe une évolution du trait de côte passant progressivement d'un fort recul de 2 m/an au nord, à une quasi-stabilité au sud. Ceci s'explique par une forte augmentation de la dérive littorale au sud de l'Anse du Gurp puis à une quasi-constance à l'approche du Cap-Ferret. Les plages sableuses sont interrompues par l'embouchure du bassin d'Arcachon. Si à long terme le transport sédimentaire vers le sud induit par les vagues n'est pas interrompu, en revanche les mécanismes sédimentaires dans cet environnement mixte (houle et marée) sont beaucoup plus compliqués. Le transport sédimentaire se réalise en partie par la lente migration de structures morphologiques (bancs sableux, dunes hydrauliques…) du nord vers le sud de l'embouchure, puis vers les plages adjacentes. Au sud de Biscarrosse jusqu'à Capbreton, on observe un trait de côte proche de l'équilibre avec peu de zones en érosion. La dérive littorale moyenne annuelle est orientée vers le sud jusqu'à environ 2 km au nord du Gouf de Capbreton. Du Sud de Capbreton à Anglet, le sens de la dérive fluctue d'un point à un autre car la direction moyenne des houles est frontale. Le Gouf de Capbreton induit une circulation particulière. En effet, à l'approche du Gouf, les houles faiblement ou modérément énergétiques sont réfractées, conduisant à une forte diminution de la dérive littorale au nord du Gouf. Cette convergence des flux sédimentaires entraîne un engraissement des plages au nord du Gouf. Cependant lors de conditions énergétiques (hauteur significative des vagues supérieure à 2-3 m) la dérive littorale peut à nouveau s'orienter vers le sud, et de grandes quantités de sable finissent leur route en tête de canyon.

Dynamique sédimentaire des plages aquitaines

La géomorphologie des plages sableuses aquitaines, synthétisée en **Figure 2**, est caractérisée par un système dunaire [8][17], et deux systèmes de barres sableuses. Le premier, appelé système barre/baïne,

est observé en zone d'estran avec une rythmicité longitudinale d'environ 350 m et une migration dans le sens de la dérive littorale [18][19]. Le deuxième système, en zone subtidale, a une forme plus ou moins prononcée en croissant avec une rythmicité d'environ 700 m [20][21], et une migration dans le même sens mais plus lente que celle du système barre/baïne [22].

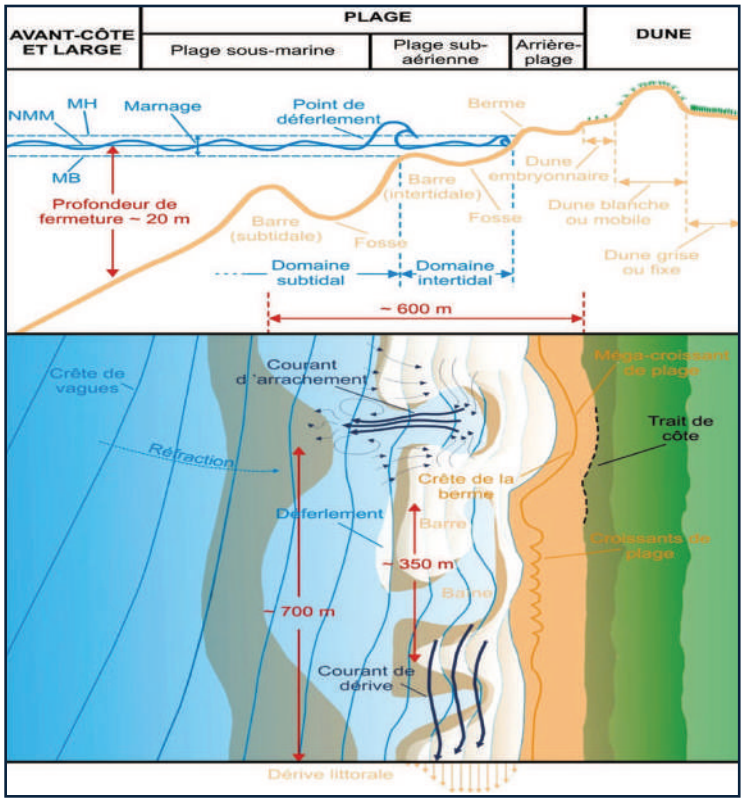


Figure 2 : *Morphologie des plages aquitaines et principaux processus hydrodynamiques. MH : marée haute, MB : marée basse, NMM : niveau moyen de la marée.*

Les échanges sédimentaires transversaux (perpendiculaires au littoral) jouent un rôle important sur la dynamique de la plage à des échelles de temps inférieurs à la décennie. Pendant les épisodes de tempête il y a une prédominance des flux sédimentaires vers le large, qui sont induits par le courant de retour (courant qui vient compenser l'apport de masse des vagues vers la plage). On observe alors une migration rapide (10 m/jour) des barres vers le large et une érosion du haut de plage. Pendant les épisodes de temps calme, il y a une prédominance des flux sédimentaires vers le bord induits par les vagues en eau peu profonde. On observe une migration lente (1 m/jour) des barres vers la côte et une lente reconstruction de la plage, en particulier matérialisée par la formation d'une berme. Ainsi on observe sur le littoral aquitain un quasi-équilibre dynamique du volume de la plage aérienne avec des cycles d'érosion/accrétion à l'échelle des tempêtes [21], à l'échelle saisonnière (en réponse à la forte modulation saisonnière de l'énergie des vagues [19][23]) mais aussi aux cycles de la NAO sur plusieurs années [23]. Cette variabilité de la réponse du trait de côte à des indices climatiques a déjà été documentée sur d'autres sites dans le monde [24][25].

On observe une très forte interdépendance entre les barres sableuses, le haut de plage et la dune. En effet, les plages alimentent les dunes par transit éolien et les dunes réalimentent les plages lors des épisodes d'érosion. Les données sur le littoral aquitain manquent cruellement pour quantifier ces rétroactions. Les barres sédimentaires protègent également la plage en dissipant l'énergie des vagues de tempête au large par déferlement bathymétrique, réduisant ainsi considérablement à la fois l'intensité des processus hydro-sédimentaires en zone de jet de rive et le risque de submersion. Castelle *et al.* [26] ont ainsi montré que la dégénérescence d'une barre sédimentaire suite à un événement extrême avait conduit à une érosion exceptionnelle de la plage pendant plusieurs mois après celle-ci, puisque la barre n'était plus présente et ne protégeait plus la plage. Ceci a de fortes implications quant à l'impact potentiel d'un changement de la

fréquence et de l'intensité des événements extrêmes dans le cadre du changement climatique. Ainsi, il est important de noter que les barres sableuses et le système dunaire sont des éléments « tampon » essentiels à la bonne santé des plages sableuses aquitaines.

Submersion

Sur les plages sableuses d'Aquitaine, caractérisées par la présence constante d'un système plage et dune, il n'y a risque de submersion que lorsque sont réunies les deux conditions suivantes : un cordon de dune littorale bas et étroit, et une zone d'arrière-dune de faible altitude. Sur la majeure partie de la façade sableuse d'Aquitaine, entre le Médoc et l'Adour, ces conditions ne sont pas réunies. En effet le système des dunes littorales y présente la succession suivante : plage, dune bordière de 10 à 25 mètres de haut, arrière-dunes et lettes de 5 à 15 m d'altitude et dunes modernes de 10 à 70 m. Ainsi, la façade sableuse d'Aquitaine est faiblement soumise au risque de submersion ; cependant une analyse plus fine doit être réalisée pour tenir compte de situations particulières : les zones basses qui bordent le bassin d'Arcachon, les estuaires de la Gironde et de l'Adour et les embouchures des courants et exutoires landais : Mimizan, Contis, Vieux Boucau, Huchet, et Capbreton **(Figure 1)**. Pour ces zones des Landes, le risque de submersion a donné lieu à une étude du Centre d'Études Techniques de l'Équipement pour la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Landes[2], et elles font l'objet d'études particulières en 2013 dans le cadre de la mise en place des PPRL et TRI par l'État. Les zones à risque occupent principalement les rives basses de ces émissaires. D'autre part, quelques secteurs de faible extension présentent des zones basses à l'arrière de cordons faibles et/ou en forte érosion, c'est notamment le cas du sud de Soulac (avec forts enjeux), et du secteur Capbreton/Labenne.

Côte rocheuse

La côte rocheuse basque, longue de 40 km se situe au fond du golfe de Gascogne. Elle est limitée au nord par l'embouchure de l'Adour et au sud par l'embouchure de la Bidassoa. Le littoral au nord, entre l'Adour et la Pointe Saint-Martin est constitué de plages sableuses de 4 à 5 kilomètres correspondant à la terminaison méridionale du système de dunes landais. Les falaises de la côte basque dominent des plages de fond de baie, c'est-à-dire situées entre deux caps rocheux. La hauteur de ces falaises varie entre 10 m et 70 m et leur pente est comprise entre 10° et 90°. Jusqu'à la Pointe Sainte-Barbe (Saint-Jean-de-Luz), de petites criques découpent les falaises sub-verticales, atteignant jusqu'à 40 m de hauteur. Plus au sud, les falaises sont interrompues par la baie de Saint-Jean-de-Luz. De Socoa à la baie de Loya, les falaises constituent la Corniche Basque, avec des hauteurs variant entre 20 et 40 m.

Il est délicat de définir une direction générale de la dérive littorale sur la côte basque, les houles dominantes de nord-ouest étant orientées perpendiculairement à la côte. Chaque plage est donc soumise à des conditions de circulations sédimentaires particulières dépendant de la configuration géomorphologique (baie, plage frangeante, platier rocheux, etc.) et des conditions de houles, de marée et de tempête. De manière générale, les transports sédimentaires (sables, graviers surtout) sont préférentiellement cross-shore (transverses) et chaque plage de poche peut être considérée comme étant une cellule sédimentaire fermée vis-à-vis des plages ou baies adjacentes en conditions d'énergie moyenne.

L'aléa érosion côtière se caractérise sur la côte basque par des mouvements de terrain localisés affectant les falaises rocheuses [27]. Les plages situées entre deux pointes rocheuses et non dominées par des falaises (Grande Plage de Biarritz, baies de Saint-Jean-de-Luz et Hendaye) sont soumises à l'aléa érosion de plage et/ou submersion marine.

2. http://www.landes.equipement-agriculture.gouv.fr/littoral-r183.html

Les falaises résultent des processus d'érosion littorale (mouvements de terrain et érosion marine). Au contact des formations géologiques, l'océan façonne une côte sous forme d'une falaise associée à une plate-forme d'abrasion. Cette action marine s'exprime de différentes manières, selon qu'il s'agit de formations dures ou de formations meubles. Dans les formations meubles, elle entraîne principalement des coulées boueuses et la purge des matériaux glissés en falaise. Dans les formations compétentes (dures), elle provoque des phénomènes de dissolution et d'abrasion produisant des cavités et des sous-cavages en pied de falaise. La dynamique marine locale a également une action de déblaiement du pied de falaise, empêchant la formation d'un profil d'équilibre. L'eau douce continentale joue également un rôle important dans les processus d'instabilité de la côte rocheuse aquitaine. Sur le long terme (milliers d'années) elle intervient en effet dans l'altération des matériaux offrant des formations géologiques meubles altérées sur un grand linéaire de côte (« altérites »). Et de manière combinée, l'eau douce est un facteur déclencheur de mouvements de terrain ainsi qu'un agent de transport des matériaux érodés. L'érosion de la côte rocheuse est donc à la fois d'origine marine et continentale.

En moyenne, la côte rocheuse aquitaine recule de 20 cm/an [16]. La vitesse de recul moyenne mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre plus de 50 cm/an, par exemple dans les fonds de baies souvent constituées de formations meubles (sables ou roches altérées), comme celle d'Erromardie. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente environ 15 % de la côte rocheuse aquitaine. Sur certains secteurs, un événement peut se produire approximativement tous les 10 ans. Le linéaire concerné par un aléa faible représente 45 % (16 km sur un total de 36 km), 42 % (15 km) pour un aléa moyen et 13 % (5 km) pour un aléa fort.

II- Impact potentiel des changements climatiques sur le littoral aquitain

Erosion

Côte sableuse

Si on considère uniquement une lente augmentation du niveau moyen des mers, on peut alors estimer le recul du trait de côte le long des plages sableuses par la loi de Bruun (1962)[28]. En considérant une augmentation du niveau moyen de 0,5 m à l'horizon 2100 et en s'appuyant sur les caractéristiques morphologiques du système plage/dune aquitain, cette loi prédit un recul du trait de côte de seulement 15 m. Toutefois les conditions d'application de cette loi sont limitées et il est généralement admis qu'elle ne représente pas correctement les processus de transfert sédimentaires cross-shore [29]. Par ailleurs, elle ne prend pas en compte les gradients de dérive littorale qui sont souvent le moteur principal de l'évolution du trait de côte sur de grandes échelles spatio-temporelles. À titre d'exemple, sur une section du littoral australien Cowell *et al.* [30] ont montré qu'un petit déficit de 1 % des apports de la dérive littorale a le même impact sur le trait de côte qu'une augmentation du niveau moyen des mers de 0,5 m.

Une approche plus pertinente consiste alors à faire l'hypothèse que le changement climatique va accélérer les tendances évolutives en cours. Les tendances érosives actuelles sur la côte sableuse aquitaine ont été définies en 2011 par l'Observatoire de la Côte Aquitaine dans le document « Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la côte aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte ». C'est l'une des bases sur laquelle s'est appuyé le GIP Littoral Aquitain pour établir la « Stratégie régionale de gestion de la bande côtière ». La méthode utilisée pour estimer les évolutions prévisionnelles s'appuie sur le prolongement des tendances passées (mesures du trait de côte *in-situ* et par photo-interprétation pour la période 1966/2009). Dans l'étude précitée, il a été choisi de ne pas ajouter de facteur d'impact du changement climatique, cependant cet impact se manifeste déjà dans la période de référence, il est donc partiellement pris en compte. La façade sableuse d'Aquitaine a été divisée en une série de tronçons homogènes quant à leur tendance évolutive passée, et pour chacun de ces tronçons ont

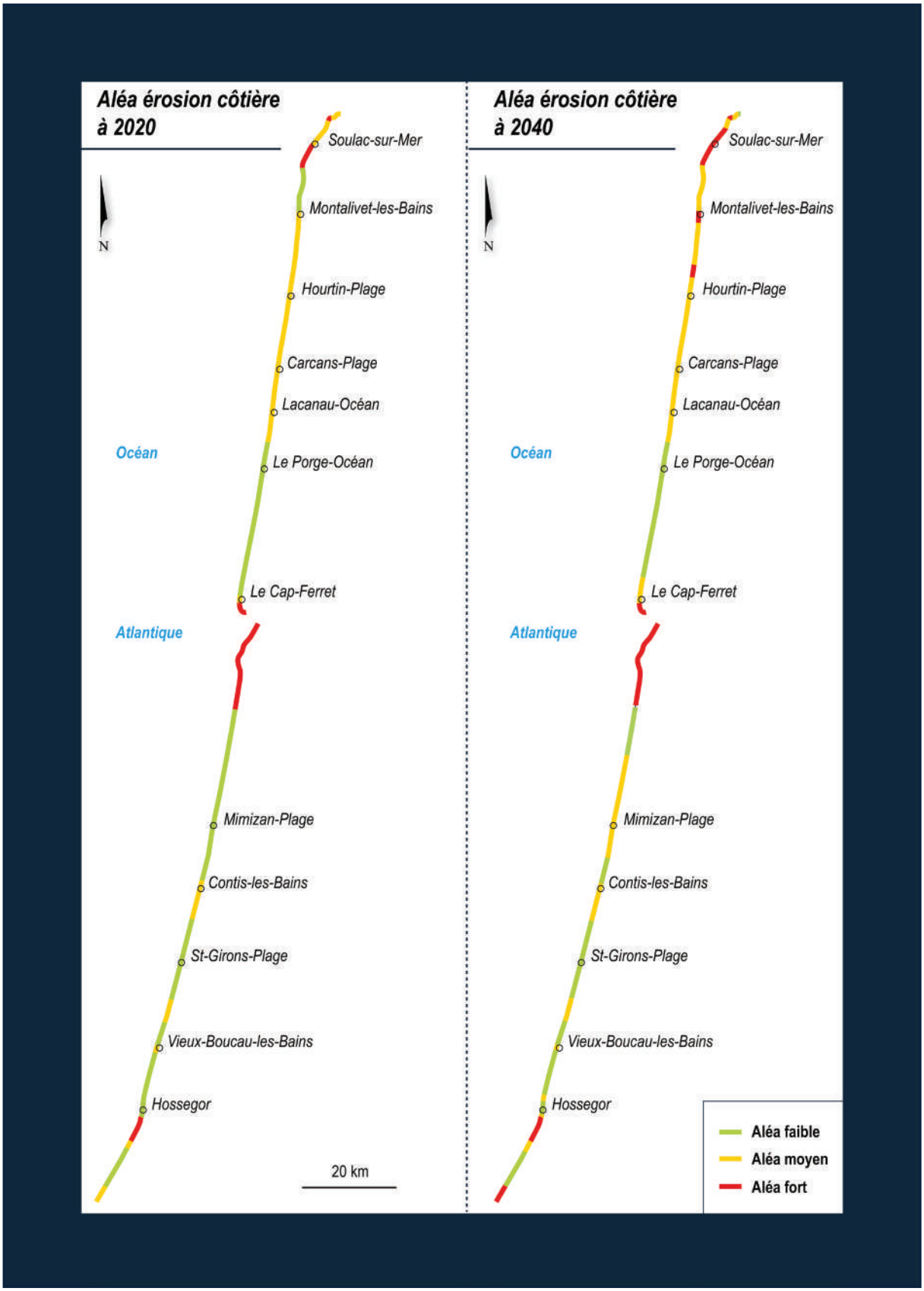


Figure 3 : *Cartographie de l'aléa érosion côtière sur la côte sableuse aux horizons 2020 et 2040 (Aubié et al. [16]).*

été déduits les traits de côte prévisible en 2020 et 2040. Cette projection linéaire des tendances passées comporte bien entendu un degré d'incertitude. Cette évaluation a permis de cartographier l'aléa érosion côtière pour l'ensemble de la côte sableuse aquitaine **(Figure 3)**.

Un changement d'intensité de la dérive littorale dans le cadre du changement climatique affectera très certainement ces projections. D'après les projections du forçage des vagues (cf. chapitre 1), qui indiquent une baisse de l'énergie des vagues et un décalage de l'ordre de 5° de leur orientation, il n'est pas évident de conclure sur l'évolution future de la dérive littorale (un changement compensant l'autre). Une autre grande source d'incertitude concerne la disponibilité des stocks sableux sur le plateau ou encore sur les bancs au large de l'estuaire de la Gironde. Ces stocks, essentiels si on veut évaluer de façon fiable le budget sédimentaire du littoral aquitain, sont très mal connus.

Dans certains secteurs, la projection est encore plus incertaine, en particulier au voisinage des embouchures et des estuaires (Soulac, Biscarrosse, Cap-Ferret, Capbreton, Anglet) où le *bypass* de sédiment, même s'il existe, est fortement perturbé. En effet, les passes et bancs tidaux ont des propriétés cycliques. Les bancs peuvent parfois s'accoler au rivage induisant une accrétion massive, et parfois le positionnement des passes proches des littoraux adjacents induit une forte érosion des plages. On connaît assez bien la cyclicité des 2 principales passes du bassin d'Arcachon (environ 80 ans [31]), mais beaucoup moins celle des réseaux « secondaires » de chenaux ni ceux au large de l'estuaire de la Gironde.

Côte rocheuse

L'impact du réchauffement climatique sur l'érosion de la côte rocheuse aquitaine aurait probablement pour conséquences :

- Une plus grande disparition des sédiments des plages de poche, des plages frangeantes et des matériaux en pied de falaise qui contribuent à alimenter l'estran,
- Une augmentation de l'impact des vagues qui intensifierait l'action mécanique d'arrachement et de dégradation des falaises (sous-cavage notamment),
- Une mise en pression de l'eau continentale contenue dans les cavités karstiques (hypothèse de travail).

Des changements de direction de houle ou des tempêtes auraient des conséquences localisées à l'échelle de chaque plage ou baie qui ne sont pas connues à l'heure actuelle. L'augmentation des fréquences de tempêtes conduirait à une augmentation de la vulnérabilité des falaises et des plages.

L'augmentation des pluies pourrait favoriser le ruissellement, la fracturation (effet à court terme, l'eau étant un facteur déclencheur) et l'altération des roches (long terme). Cependant, les modifications éventuelles de ces forçages n'ont pas été étudiées.

De manière plus pragmatique, l'étude précitée d'Aubié *et al.* [16] cartographie le trait de côte de la façade rocheuse aquitaine aux horizons 2020 et 2040 par projection dans le futur des tendances d'évolution passées des instabilités des falaises, des baies et des plages sableuses. Aucune hypothèse relative au changement climatique spécifique n'est faite, cependant l'étude historique permet d'intégrer les tendances éventuellement en cours. Cette étude permet de caractériser les niveaux d'aléas mouvements de terrain et érosion **(Figure 4)**.

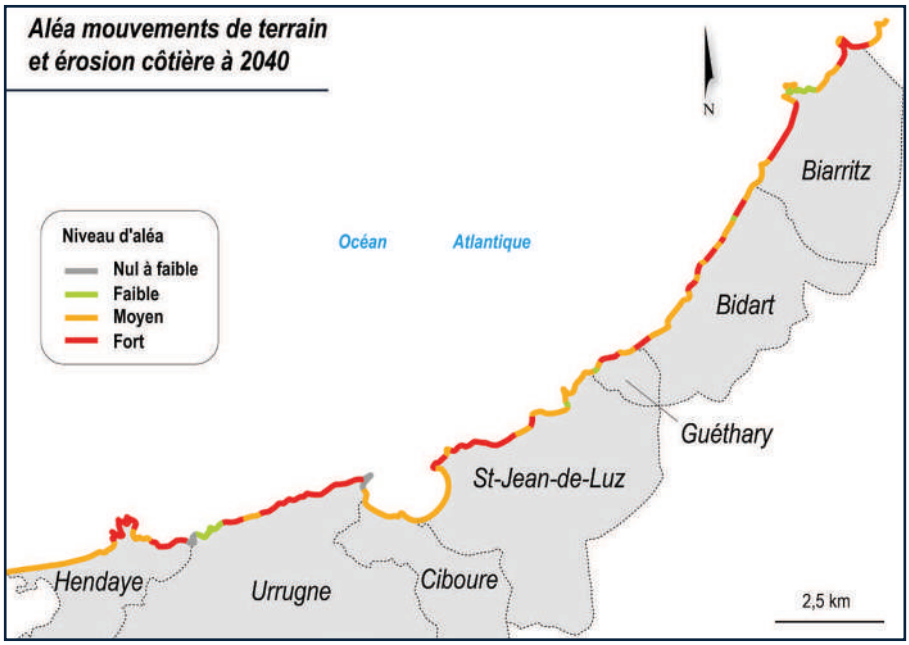


Figure 4 : *Cartographie de l'aléa mouvements de terrain et érosion à échéance 2040 sur la côte rocheuse aquitaine (Aubié et al. [16]).*

Submersion

Pour les côtes rocheuses basques et les plages sableuses aquitaines l'impact direct des submersions marines est faible par rapport aux autres types d'aléas (mouvements de terrain et érosion). Par conséquent l'impact potentiel du changement climatique sur l'action de la submersion marine sur ces environnements est sans doute négligeable. En revanche, les zones basses estuariennes et lagunaires de la côte aquitaine sont concernées par les risques de submersions marines. Contrairement au littoral ouvert, ce sont des systèmes protégés de la houle océanique, mais soumis fortement à la marée et aux courants associés, ainsi qu'aux apports d'eaux douces par les fleuves.

Estuaire de la Gironde

C'est un environnement qui accumule des sédiments fins et se comble sur le long terme (échelle du siècle et au-delà). Les marais estuariens sont d'anciennes baies, qui se sont comblées au cours des derniers 5 000 ans [32]. Ce sont des zones basses, donc très vulnérables à la submersion. Ces zones ont été progressivement protégées par des digues, qui représentent actuellement 130 km de linéaire (source Eurosion). Lors de la tempête de décembre 1999, la surcote liée à la dépression de 987 hPa et au vent de 130 km/h a été de 2 m environ, inondant une bonne partie des marais, notamment à l'est, à l'emplacement de la centrale Nucléaire du Blayais. Des digues ont cédé, comme dans le marais de Mortagne, en aval de l'estuaire. L'aléa érosion existe donc, mais il est moins bien quantifié dans la littérature scientifique, et semble beaucoup plus faible que sur le littoral ouvert. Lors des ruptures de digues, comme dans le marais de Mortagne en 1999 ou dans l'Île Nouvelle plus récemment, des secteurs très localisés subissent des reculs par arrachement ou effondrement de mini-falaises. Ceci montre que les ouvrages de l'estuaire ont une efficacité dans la stabilisation de la ligne de rivage. Les secteurs érodés évoluent ensuite de manière à retrouver un ajustement morphodynamique et un profil d'équilibre avec les agents hydrodynamiques. De manière générale, l'élévation du niveau de la mer aura un fort impact sur la submersion. Dans l'estuaire de la Gironde, cet impact a été évalué récemment par le Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, dans le cadre du projet THESEUS [33]. Un modèle simplifié de calcul des surcotes à partir des champs de vent et de pression du CLM/SGA a été construit au Verdon. En particulier, les cartes d'inondation correspondant aux périodes de retour de 2 à 100 ans pour les périodes [1960 ; 1999], [2010 ; 2039], [2040 ; 2069] et [2070 ; 2099] sur 3 sites particuliers de l'estuaire ont été produites. Des zones qui ne sont aujourd'hui pas inondées pour de faibles périodes de retour le deviennent à l'horizon 2100, en particulier dans la basse Garonne **(Figure 5)**. À noter que dans cette étude les effets des débits fluviaux et des ruptures de digues n'ont pas été évalués.

Estuaire de l'Adour

Les berges au niveau de Bayonne sont à une cote assez faible ce qui entraîne déjà parfois des inondations. Dans la perspective d'une montée des eaux voire d'une augmentation des événements de pluies extrêmes, ces inondations pourraient devenir assez fréquentes pour justifier des aménagements nouveaux.

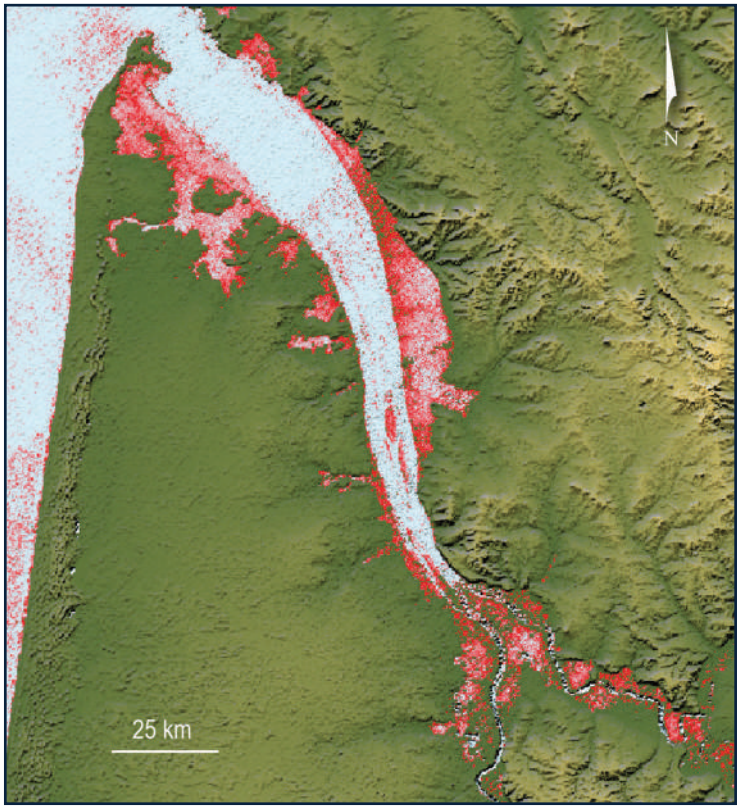


Figure 5 : *Cartes des marais et zones vulnérables à la submersion dans l'estuaire de la Gironde (doc. EAUCEA [34]).*

Bassin d'Arcachon

C'est une lagune dont le fonctionnement hydrosédimentaire est à mi-chemin entre celui d'une baie tidale et celui d'un estuaire. Il est soumis aux actions conjuguées de la marée, des vents et clapots associés, et des apports d'eau douce. La houle est efficace surtout dans les passes, la flèche sableuse du Cap-Ferret constituant la frontière naturelle entre le domaine océanique et le domaine lagunaire. Les rives de la lagune d'Arcachon sont constituées d'estrans sablo-vaseux et de plages artificielles, bordant des marais et des zones urbaines. Globalement, ce sont des zones basses, vulnérables à la submersion. De nombreux secteurs sont protégés par des ouvrages, perrés ou digues. Les ouvrages sont continus sur la portion externe des rivages, et plus discontinus à l'intérieur du bassin **(Figure 6)**. La tempête Xynthia (27-28 février 2010) a atteint l'ensemble du pourtour du bassin d'Arcachon. La submersion marine a concerné l'ensemble des zones basses du bassin. Les hauteurs d'eau maximales ont atteint 0,90 m sur des distances de plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres ([35], OCA). En ce qui concerne l'érosion, comme pour l'estuaire de la Gironde, celle-ci est plutôt faible à l'intérieur de la lagune, et tout aussi peu documentée dans la littérature. Les zones vulnérables à l'érosion sont le sud de la flèche du Cap-Ferret et le littoral du Pyla-sur-Mer, soit des secteurs sous l'influence des vagues et de l'interaction morphodynamique des courants de marée et des passes. L'intérieur du bassin est plutôt stable, et les secteurs modifiés récemment sont les marais de Certes, Graveyron et Malprat, davantage exposés au clapot et à la submersion suite aux ruptures de digues en 1999 et lors des tempêtes de 2009 et 2010.

Des projets tels que Theseus ou Barcasub, du programme LITEAU, ainsi que les études de mise en place des PPRL et TRI, tentent d'évaluer quantitativement les submersions dans la Gironde ou le bassin d'Arcachon, en considérant les morphologies et configurations actuelles des rivages. Cependant, pour prédire l'impact des changements climatiques sur les estuaires et les lagunes, les incertitudes scientifiques sont encore nombreuses. Outre les incertitudes sur le niveau de la mer et de la houle aux embouchures, il existe des incertitudes sur les régimes fluviaux en amont, qui entraîneront des modifications des flux de matières en suspension. De cet ensemble dépendent les bilans sédimentaires et les ajustements morphologiques des fonds et des berges. Cette incertitude peut s'étendre aux effets en retour sur la modification de l'onde de marée ; sa propagation dans les estuaires ou dans le bassin d'Arcachon peut se trouver significativement transformée, modifiant ainsi la configuration ou l'emplacement des zones vulnérables par rapport à ce qu'elles sont à l'heure actuelle.

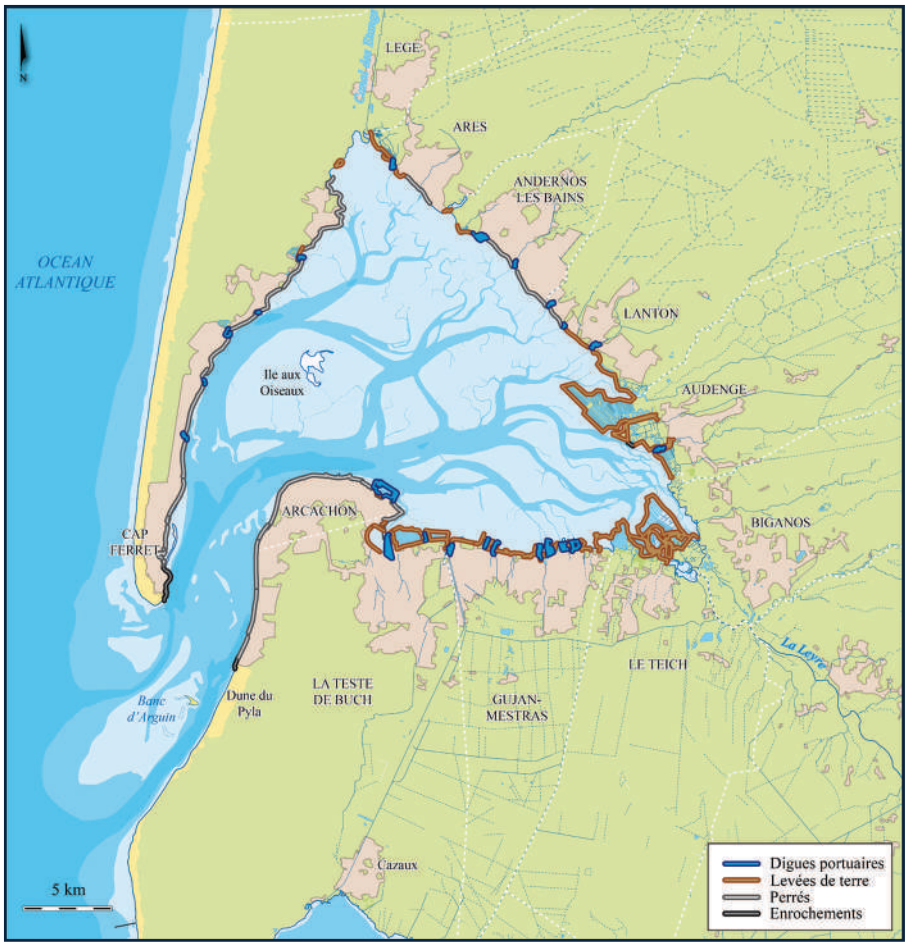


Figure 6 : *Ouvrages de protection sur les rives du bassin d'Arcachon (d'après P. Laymond, in T. Auly et J. Veiga, 2010, le Bassin d'Arcahon, un mileu naturel menacé ?, Editions Confluences).*

Conjonction avec les événements exceptionnels

La tempête du 27 décembre 1999 a été un événement marquant dans l'estuaire de la Gironde, par les niveaux exceptionnels de surcote atteints, ainsi que par son impact en termes de submersion et d'érosion des rives. Pourtant, les niveaux atteints pourraient être encore plus élevés si une conjonction de conditions favorisant la surcote venait à se produire. En extrapolant linéairement les conditions de décembre 1999, il est possible d'estimer sommairement les niveaux théoriques extrêmes pouvant être atteints dans ces conditions exceptionnelles.

Lors de la tempête, la hauteur d'eau enregistrée par les marégraphes au droit de Blaye et Pauillac, a atteint 4,52 m au-dessus du niveau NGF. Le coefficient de marée était de 77, soit une marée moyenne, dans une gamme allant de 20 à 120. Pour un coefficient de 77, le niveau de la marée haute prédit à Pauillac, sous des conditions atmosphériques normales, est de 2,51 m NGF. On peut en déduire que, lors de la tempête de 1999, l'effet de surcote liée à la dépression atmosphérique (987 hPa), et au vent (130 km/h) était de 2,01 m.

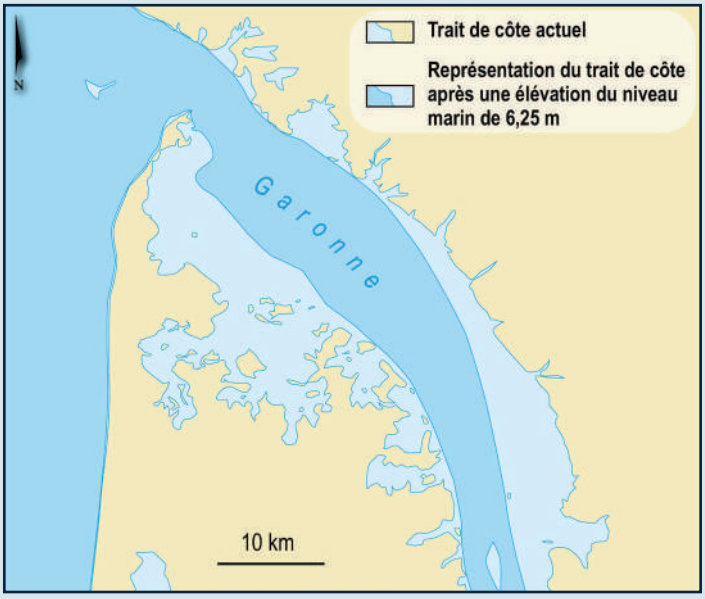


Figure 7 : *Estuaire de la Gironde, prévisions de l'élévation du niveau de la mer en 2100. Les zones en bleu, d'altitude inférieure à 6,25 m, sont susceptibles de se trouver en dessous du niveau statique des eaux de l'estuaire dans des conditions de tempête extrême.*

La pression atmosphérique minimum enregistrée dans la région lors de la tempête était de 955 hPa. Elle induirait sur l'estuaire, avec les mêmes conditions de vent, une surcote totale de 2,59 m, soit 0,58 m de plus que celle enregistrée en 1999. Par ailleurs, une marée théorique de coefficient 120 (vives-eaux), atteindrait une hauteur de 3,66 m. Si on suppose une conjonction de ces conditions extrêmes de pression et de marée (dépression de 955 hPa, vents de 130 km/h et marée de grandes vives-eaux), le niveau de l'estuaire à Pauillac ou Blaye atteindrait donc à marée haute une hauteur de 2,59 + 3,66 = 6,25 m, soit 1,73 m de plus que le niveau enregistré en décembre 1999.

Il faut souligner que cette estimation a minima tient compte uniquement de la marée et des effets atmosphériques, et ne tient pas compte des effets dus aux vagues se propageant dans l'estuaire. Celles-ci ont été peu étudiées, et leur effet de surcote reste à évaluer précisément. Toutefois, les constats faits à partir du franchissement des digues lors de la tempête de 1999 ont permis d'attribuer à l'action des vagues une surcote de 2,30 m. Enfin, l'apport d'eau douce de la Garonne et la Dordogne en régime de crue peut contribuer également à une élévation globale de la hauteur d'eau, mais celle-ci serait importante surtout en amont du Bec d'Ambès, et serait plus faible en aval.

L'hypothèse du scénario pessimiste du GIEC prévoit une élévation du niveau de la mer de l'ordre du mètre. Si conjoncturellement plusieurs phénomènes se superposent (une tempête d'ouest induisant une surcote, une marée haute, un fort coefficient de marée et enfin une crue de l'ensemble Dordogne-Garonne), alors on pourrait atteindre une surcote totale dépassant largement 6,25 m au milieu de la Gironde. Une telle élévation provoquerait l'invasion par la mer des marais du Médoc, transformant en île la Pointe de Grave ainsi que les marais de la rive droite **(Figure 7)**. La situation serait similaire à celle déjà enregistrée par l'estuaire lors de son histoire géologique, il y a 6 000 ans ou il y a 130 000 ans.

III- Adaptations/Mitigations

Côtes sableuses

Les structures en « dur » (épis, brise-lames, etc.) ont la particularité le plus souvent de déplacer le problème d'érosion aux littoraux adjacents. Sur le plan international, les techniques de protection dites « souples » (rechargements de plage, accompagnement de la mobilité des dunes, géotextiles, drainage de plage, [36][37]) sont progressivement apparues à la fin du siècle dernier, traduisant enfin une évolution de la doctrine du génie côtier. Une grande richesse du littoral aquitain est d'avoir été jusqu'à présent peu affecté par la mise en œuvre de structures en dur, et d'être caractérisé par un système plage/dune particulièrement préservé.

La gestion des dunes bordières par l'Office National des Forêts a pour mission d'optimiser les différents services écologiques et sociétaux rendus par les dunes, en particulier le contrôle de la mobilité des sables et la conservation d'écosystèmes originaux et rares par le maintien d'une mosaïque diversifiée et mouvante sans fixation excessive. Ce n'est que récemment que le rôle des dunes en matière de défense contre les risques d'origine marine (érosion et submersion) a été officiellement pris en compte dans les stratégies d'aménagement du territoire. En effet la dune influence le comportement de la plage par le maintien d'une partie du sédiment au plus près de la plage, ce qui contribue au soutien du budget sédimentaire côtier, facteur clé des tendances évolutives. Le système de dune joue donc un rôle « tampon » essentiel dans la réponse de la plage. À titre d'exemple, Castelle *et al.* [38] ont montré sur une section du littoral australien qu'une plage bordée par une dune végétalisée résistait beaucoup mieux aux épisodes de tempête que des plages sans dune ou des plages présentant des ouvrages de protection côtière (récif artificiel, épis).



Figure 8 : *Plantation d'oyats sur la dune littorale sud de Lacanau.*

D'autres mesures dites souples existent. Le rechargement de plage, réalisé par exemple sur le littoral basque, est efficace le long des plages sableuses en particulier si celles-ci ne sont pas soumises à un transit littoral trop important (le rechargement est sinon diffusé assez rapidement). C'est le cas par exemple des plages d'Anglet qui ont été régulièrement rechargées en sables issus des dragages de l'embouchure de l'Adour durant les dernières décennies. L'efficacité de cette méthode est démontrée pour ce site qui a fait l'objet de clapages réguliers à un taux approximatif de 500 000 m^3/an entre 1980 et 1990. Durant cette période, les plages se sont réengraissées de manière continue, tandis que l'arrêt ultérieur de ces clapages a rapidement entraîné une érosion significative des plages sous marine [39]. Le choix des stocks sableux pour l'extraction (plateau, estuaire, etc.) doit aussi tenir compte de nombreux facteurs environnementaux et écologiques. Lorsque le transit sédimen-taire est interrompu par une structure en dur (*e.g.* digue), un système de *bypass* de sédiment peut être mis en place comme c'est le cas depuis 2008 à Capbreton. Sur un système similaire sur le littoral australien, Castelle *et al.* [40] ont montré à partir de 30 ans de données que ce système, si le sable était rejeté en zone de déferlement, était beaucoup plus efficace que le rechargement de plage classique. De plus, il est possible d'estimer (*e.g.* mensuellement) les quantités à pomper en fonction des données de houle et de gérer les quantités de sable pompé par le système de *bypass* pour reproduire au plus proche la dérive littorale naturelle [40], ce qui répond complètement aux recommandations sur les nouvelles pratiques à développer en ingénierie côtière [36]. D'autres méthodes souples ne semblent pas adaptées aux plages sableuses d'Aquitaine. La mise en place de récifs artificiels est très coûteuse et ces structures n'induisent typiquement une avancée du trait de côte, assez localisée, que de l'ordre de la dizaine de mètres [41]. Les systèmes de drainage ne semblent pas non plus adaptés aux plages ouvertes et très énergétiques du littoral aquitain.

L'analyse de l'impact du changement climatique doit tenir compte de la capacité d'ajustement du système plage/dune face aux perturbations. Le système plage/dune évolue constamment pour s'adapter aux diverses contraintes : les formes sont modifiées par les processus qu'elles influencent à leur tour. Cette aptitude à réagir aux perturbations est nommée résilience, elle permet d'assurer la continuité fonctionnelle du système en le rapprochant de la situation initiale (exemple post-tempête). Cette « auto défense » n'est opérationnelle que lorsque le système dispose de tous ses compartiments (de la plage immergée à la dune bordière) et de tous ses attributs fonctionnels (échanges transversaux et longitudinaux…). Les systèmes tronqués (absence des entités « tampon ») perdent cette capacité d'ajustement : c'est par exemple le cas lorsque les échanges entre plages et dunes sont interrompus par des murs d'enrochements. Cette capacité d'ajustement n'est possible que si le système dispose d'un « espace de liberté » pour se développer : les équipements rigides proches du littoral réduisent, ou suppriment, la résilience du système.

En Aquitaine, une réflexion a été menée depuis 2009 pour prendre en compte l'érosion côtière dans la gestion du littoral. Le GIP Littoral Aquitain, réunissant l'ensemble des gestionnaires issus des collectivités et des services de l'État, a finalisé cette étude en juin 2012 et proposé une stratégie régionale de gestion de la bande côtière[3] en cohérence avec la stratégie nationale adoptée par l'État le 2 mars 2012[4].

Quatre familles de mode de gestion sont identifiées :

- Évolution naturelle surveillée ;
- Accompagnement des processus naturels ;
- Lutte active contre l'érosion ;
- Repli stratégique - relocalisation des activités, des biens et des personnes.

Ces familles regroupent toutes les possibilités d'intervention sur le littoral (souples, dures, etc.). À ces familles d'action il faut rajouter le cas de l'inaction (absence de gestion) qui est un non-choix.

3. http://www.littoral-aquitain.fr/spip.php?rubrique20
4. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Strategie_nationale_de_gestion_integree_du_trait_de_cote.pdf

Côtes rocheuses

Les commentaires précédents relatifs à l'adaptation et à la mitigation des côtes sableuses s'appliquent également aux côtes rocheuses, en particulier aux plages de poche et frangeantes.

En termes d'ouvrage ou de méthode de protection face aux instabilités des falaises, il est en revanche plus délicat de distinguer les notions de solutions souples et dures.

Dans l'outil didactique du projet ANCORIM[5] consacré aux solutions douces de protection des côtes, toutes les solutions géotechniques classiquement utilisées pour stabiliser les falaises (végétalisation, géogrilles, filets, bétonnage, cloutage, etc.) sont considérées comme potentiellement souples si leur impact négatif reste peu important compte tenu de leur faible emprise spatiale et de la réversibilité de la méthode et des matériaux employés.

Sur les falaises, les méthodes de stabilisation combinent souvent plusieurs parades géotechniques entre elles et associent des solutions plus « souples » telle que le drainage qui réduit le rôle de l'eau continentale, ou la végétalisation qui limite le ruissellement et l'érosion des sols (attention toutefois à ne pas favoriser l'installation d'espèces invasives). Ces interventions souples permettent de maintenir une fonctionnalité naturelle des falaises vis-à-vis de l'érosion et notamment un recul contrôlé permettant une alimentation des stocks sédimentaires des plages adjacentes (de poche et frangeantes).

Efficacité des « ouvrages »

La côte Aquitaine comporte relativement peu d'ouvrages en comparaison d'autres régions côtières françaises. Cette caractéristique s'explique par le long linéaire sableux peu urbanisé qui s'étend du nord de la Gironde au Sud des Landes. Les ouvrages se situent principalement sur la côte Basque (Hendaye, Saint Jean de Luz, Biarritz, Anglet) et au nord de la Gironde (Soulac, Le Verdon). Au niveau des Landes, les principaux sites sont Capbreton et les abords des courants landais. D'une façon générale, toutes les zones à enjeux urbains ou portuaires font l'objet d'ouvrages de protection en dur.

Les ouvrages côtiers aquitains regroupent les typologies suivantes selon leurs vocations (protection face à l'érosion, la submersion, etc.) :

- Des épis en enrochement dont la fonction est de limiter le transit sédimentaire le long de la côte (Anglet, Capbreton, Lacanau) et ce, afin de stabiliser localement la plage.
- Des jetées (digues à talus à carapace en blocs béton cubiques, Hendaye, Bayonne) dont la fonction est de stabiliser l'embouchure locale.
- Des brises lames (digue verticale mixte de Saint Jean de Luz) qui protègent les zones en arrière de l'ouvrage de l'action des houles.
- Des ouvrages de front de mer (perrés de Capbreton, de Soulac, tubes conteneurs à l'Amélie/Soulac [42]) qui sont censés jouer un double rôle vis-à-vis de la submersion et de l'érosion.

Dans la plupart des cas, bien que la fonction primaire de l'ouvrage soit au moins partiellement remplie, il existe des effets secondaires qui peuvent être néfastes. Ainsi, il est communément admis que les épis contribuent à augmenter l'érosion à une certaine distance en aval de l'ouvrage par rapport à la dérive littorale. De même, les jetées d'embouchure imposent une dynamique sédimentaire complexe parfois mal contrôlée (ex. : Bayonne, [39]).

Sur la côte rocheuse basque, les stratégies de protection mises en œuvre contre les mouvements de terrains sont des parades géotechniques classiquement utilisées qui sont plus ou moins souples suivant

5. http://ancorim.aquitaine.fr/

les sites (maçonnerie, cloutage, béton projeté, drainage, profilage, curage, géotextile, végétalisation, etc.). Face à l'érosion et à la submersion, on retrouve les mêmes types de parades que pour la côte sableuse et les zones basses : épis, digues, perrés, rechargements, etc.

De nombreuses parades souples sont entreprises sur le littoral aquitain pour limiter l'érosion marine et éolienne (rechargement de plage, brise-vent, végétation, etc.).

Le changement climatique peut avoir une influence sur la fonction de l'ouvrage ainsi que sur sa stabilité structurelle. Trmal et Lebreton [43] donnent un exemple de cet effet sur une digue à talus (e.g. Bayonne). Il est aisé de comprendre que la remontée du niveau d'eau moyen due au changement climatique aurait une influence certaine sur les débits de franchissement de l'ouvrage avec des aléas associés dans la zone protégée et pour les usagers de la digue. Pour revenir à l'état de service initial il conviendrait alors de rehausser l'ouvrage d'une hauteur supérieure à la remontée du niveau d'eau comme le montrent les simulations de Trmal & Lebreton [43]. Les formules de dimensionnement qui permettent de calculer les poids des enrochements naturels ou artificiels des carapaces d'ouvrages dépendent également de la hauteur de houle en pied d'ouvrage. Or dans le cas des ouvrages français et donc aquitain, qui sont en général construits en faible profondeur relative, la hauteur de houle est écrêtée par le déferlement. Une hausse du niveau d'eau moyen permettrait le passage d'une houle dimensionnante plus énergétique qui pourrait nécessiter en certains endroits le changement de la carapace actuelle pour des blocs plus lourds.

Conclusion

Au niveau des plages sableuses et des embouchures aquitaines, soumises à des vagues de fortes amplitudes et où les fonds sédimentaires sont extrêmement mobiles, la caractérisation des flux sédimentaires et de l'évolution morphologique des fonds sableux représente un véritable défi scientifique et technique. Pour mieux caractériser le budget sédimentaire et prévoir l'évolution du littoral aquitain, il est nécessaire de disposer de davantage d'information sur les stocks sableux disponibles sur le plateau et surtout sur l'évolution morphologique des côtes à une fréquence suffisamment élevée (périodicité mensuelle mais incluant aussi l'observation d'événements exceptionnels comme les tempêtes). Ceci va demander la mise en œuvre d'observations régulières associant des suivis lidar avec le développement de méthodes permettant de cartographier la bathymétrie littorale et son évolution, à partir de systèmes vidéos terrestres et de l'imagerie satellitaire multi – et hyper-spectrale. L'étape finale est l'assimilation de ces données dans un modèle prédictif d'évolution morphodynamique du trait de côte à l'échelle de l'Aquitaine.

Les instabilités des falaises et l'érosion de la côte rocheuse aquitaine dépendent de trois agents essentiels : 1) le rôle de l'eau douce (altération des roches, déclenchement des mouvements de terrain, et transport de matériaux), 2) les stocks sédimentaires des plages de poche et frangeantes et 3) l'action des vagues (impact et déblaiement des matériaux). Un enjeu majeur de la compréhension de l'impact du réchauffement climatique vis-à-vis de l'érosion des côtes rocheuses est donc d'étudier de manière quantitative l'évolution de chacun de ces paramètres selon des approches combinant les suivis quantitatifs *in-situ* (plages, falaises) et les outils de modélisation (géotechniques et hydrosédimentaires).

6.2 Biodiversité marine

Coordination : *Benoit Sautour*
Rédacteurs : *Guy Bachelet, Philippe Boet, Nathalie Caill-Milly, Iker Castège, Aurélie Chaalali, Valérie David, Yolanda Del Amo, Marie-Noëlle de Casamajor, Jean D'Elbée, Xavier De Montaudouin, Roger Kantin, Mario Lepage, Eric Rochard, Benoit Sautour.*

À l'échelle du golfe de Gascogne et de ses zones côtières et littorales, les suivis de la biodiversité montrent d'importantes variations annuelles d'abondance et de répartition géographique des espèces en relation avec le climat. Ces évolutions font apparaître des phases brutales d'accélération en relation avec des variations de même type des forçages climatiques ou en relation avec l'existence d'effets de seuil chez les organismes. Cet environnement subit des impacts d'autant plus marqués qu'il est proche de la limite biogéographique de nombreux peuplements. Les tendances actuelles montrent que la biodiversité va évoluer vers une augmentation de représentativité des espèces tempérées chaudes, une modification de la phénologie des espèces (modification de la saisonnalité du développement, raccourcissement de la phase larvaire planctonique mais parfois plusieurs reproductions par an...) et de la productivité des écosystèmes.

Introduction

Si les conséquences du changement climatique global sont maintenant avérées (ex. marinisation des systèmes littoraux, réchauffement des eaux de surface (SST) : [1][2][3][4][5]), la question de son impact sur les organismes aquatiques peuplant ces zones reste posée. Dans un environnement donné (ici estuarien et/ou marin), c'est un ensemble de facteurs qui conduit aux variabilités écologiques observées. Deux faits sont à présent bien connus à ce sujet : premièrement, le climat affecte non seulement les abondances de certaines espèces mais également leur répartition ; deuxièmement, l'origine du phénomène est liée à un mélange de variables météorologiques. Les caractéristiques physiques de l'atmosphère et de l'océan telles que la température, la pression, le vent, les précipitations, l'agitation de la mer, sont liées entre elles de manière plus ou moins forte et déterministe. Au-delà des variations à court terme, les conditions atmosphériques et océaniques montrent des tendances à plus ou moins long terme de l'ordre de la décennie ou du siècle. C'est le cas bien connu sur de vastes échelles pour le Pacifique (phénomène ENSO : El Ninõ Southern Oscillation) et pour l'Atlantique (oscillation NAO : North Atlantic Oscillation). Ces deux indices ENSO et NAO reposent sur la mesure de la différence de pression atmosphérique entre deux stations ponctuelles géographiquement éloignées en latitude. Leur avantage réside dans l'étendue géographique prise en compte et la simplicité de leur interprétation météorologique et climatique.

I- Les impacts

Une variabilité en relation avec des indices climatiques à grande échelle

À grande échelle spatiale (golfe de Gascogne) les suivis ont notamment été réalisés sur les communautés de prédateurs supérieurs (cétacés et oiseaux marins). Ceux-ci sont connus pour être de bons indicateurs de la structuration du réseau trophique et des communautés qui le composent [6][7].

Les informations recueillies[1] ont permis de montrer d'importantes variations annuelles d'abondance et de répartition géographique des espèces en relation avec le climat[2] : 40 % à 60 % des variations temporelles sont « expliquées » par celui-ci.

À l'échelle des zones côtières et littorales[3], les communautés de prédateurs supérieurs ont été suivies (poissons) ainsi que leurs proies planctoniques. Les schémas concordants des évolutions du climat d'une part et des communautés de proies et de prédateurs d'autre part ont permis de confirmer récemment l'importance des forçages globaux sur le fonctionnement de l'écosystème [10].

Des évolutions non linéaires

Les évolutions des écosystèmes en réponse au changement climatique sont rarement linéaires du fait d'une variabilité des forçages climatiques elle-même non linéaire, mais aussi du fait de l'existence, pour les organismes, de barrières thermiques/physiologiques qui conduisent fréquemment à des changements abrupts dans les populations [11][12][13]. Une étude récente [10] portant sur différents compartiments biologiques de l'estuaire de la Gironde (des producteurs primaires aux prédateurs supérieurs : phytoplancton, zooplancton et poissons) a permis la mise en évidence de deux changements climatiques rapides et importants (fin des années 1980 et fin des années 1990, **Figure 1**) qui se sont répercutés de l'environnement (physico-chimie) jusqu'aux organismes (y compris prédateurs supérieurs : poissons).

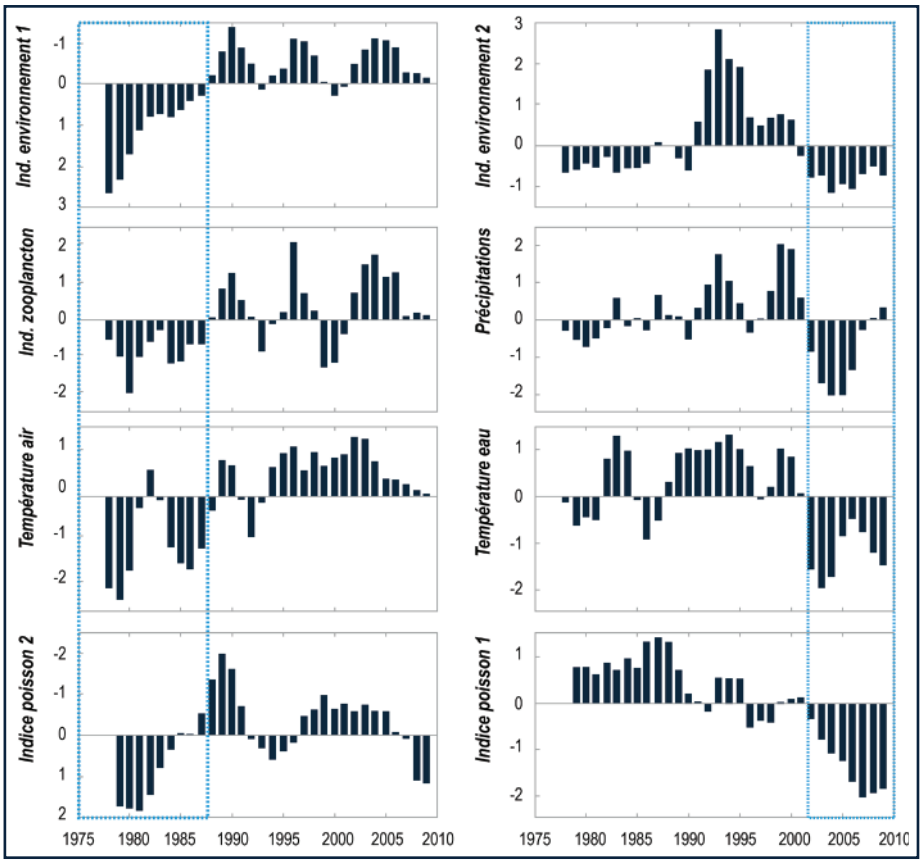


Figure 1 : *Estuaire de la Gironde, évolution temporelle (respectivement de haut en bas) : À droite : d'un indice (ACP) descripteur de la physico-chimie du système, de la diversité/composition de la communauté zooplanctonique, d'une série de données locales de températures de l'air et d'un indice (ACP) reflétant la composition de l'ichtyofaune ; À gauche : d'un second indice décrivant la physico-chimie du système, des données de précipitations locales, des températures de surface de la mer et d'un second indice poissons.*

1. Suivant un protocole standardisé depuis 1976 : Castège et Hémery, [8], coopération technique des Douanes, Affaires Maritime et Marine Nationale.
2. Index climatique SBC : Hémery *et al.* [9].
3. Chronique de données estuaire de la Gironde (protocole standardisé, 34 ans).

Le premier changement serait principalement lié à une intensification du réchauffement global perceptible sur les températures de surface de la mer (SST : [14][15][16]) alors que le second répondrait à la hausse de température des océans après ~2000 [16] et/ou à un changement de circulation atmosphérique principalement associé aux vents méridionaux affectant *in fine* le patron local des précipitations [1].

Les modifications peuvent aussi s'exprimer en relation avec les événements extrêmes comme par exemple la canicule de 2003 qui peuvent constituer de relativement « bons témoins » de ce que sera le climat futur et d'une partie des impacts attendus. Les conséquences particulières de cette canicule ont pu être observées sur les compartiments planctoniques avec notamment un développement anormalement important de cyanophycées [17].

Les grandes tendances récentes d'évolution de la biodiversité

À l'échelle des zones littorales, la modification des habitats en relation avec le climat est une des causes majeures de la modification de biodiversité. Celle-ci est notamment induite par la diminution des apports en eau douce, l'élévation du niveau de la mer et une fragmentation des habitats qui en découle et se superpose à l'impact induit par les activités humaines. La diminution des apports en eau douce se traduit par une marinisation des systèmes et une réduction des habitats estuariens, qui conduisent à une colonisation accrue par les espèces marines [10][18]. La fragmentation des habitats, liée par exemple à l'assèchement des zones humides, en réduisant la connectivité entre les populations locales, est une des causes notables de la perte de biodiversité des communautés benthiques et pélagiques. Enfin, l'élévation du niveau de la mer impacte les trajectoires d'évolution de ces systèmes. Celles-ci ont, par exemple, été bien étudiées pour les zones de marais maritimes[4] dont les trajectoires montrent une possible adaptation due à l'accrétion ([19] : 3,7 mm an^{-1}), mais aussi des d'effets « négatifs » (marais de Gipuzkoa : [20]). Si l'accrétion est inférieure à l'élévation de la mer, l'habitat disponible pour certaines espèces peut diminuer. Ce pourrait être le cas pour *Zostera noltii*, dont l'habitat pourrait être réduit significativement à la fin du XXI^{e} siècle sur les estuaires basques [21]. Il faut rappeler que cette espèce est très répandue dans le bassin d'Arcachon, dans lequel la surface des herbiers diminue depuis 2007, sans que les causes ne soient clairement identifiées.

De manière plus précise les conséquences se font sentir sur tous les compartiments biologiques. Le développement des *communautés phytoplanctoniques* de surface a décru de manière significative sur l'ensemble des côtes métropolitaines françaises [1] et pour ce qui nous concerne aussi bien en milieu côtier que milieu littoral depuis les années 1990 jusqu'à l'époque actuelle (ex : côtes du Pays Basque [22] et estuaire de la Gironde [23]). Cette décroissance n'est pas linéaire et montre une accélération nette en 2001 [1]. En revanche, une augmentation de la biomasse a été détectée entre 0 et 50 m de profondeur, pour la même période dans les eaux côtières du Pays Basque, avec une augmentation de 6,2 10^{-3} $\mu g \cdot L^{-1} an^{-1}$ [24], ce qui suggère une modification de la distribution verticale des communautés phytoplanctoniques durant la période (probablement en relation avec l'évolution de la structure verticale de la colonne d'eau, cf. Chapitre 1).

Une attention particulière doit être portée au phytoplancton toxique dont les blooms (épisodes de forte prolifération) semblent de plus en plus fréquents, ce qui est souvent mis en relation avec le changement climatique actuel. Les efflorescences observées sur le littoral aquitain doivent être regardées de la même manière en relation, aussi, avec la dispersion des panaches fluviaux pouvant influer les zones littorales adjacentes. La mise en relation de faits avérés reste à faire afin de caractériser les moteurs de ces évolutions, ex. : fortes concentrations en phytoplancton toxique dans le panache de l'Adour – panache pouvant remonter vers le Nord (Arcachon) – modification du régime de vents dans l'Atlantique nord [1][25].

4. Les marais maritimes sont des marais de basse altitude, à très faible pente et partiellement submergés par la mer. Ils sont en général créés par accumulation de vase dans des zones peu soumises à l'érosion marine.

L'évolution des *communautés zooplanctoniques* des zones littorales (estuaire de la Gironde : chronique de 34 ans, **Figure 2**) n'a pas révélé d'évolution significative des abondances des espèces dominantes [18]. En revanche, une remontée des populations vers l'amont (avec une hypothèse forte de colonisation de l'estuaire fluvial ; travaux en cours) en lien avec la marinisation du système est avérée, ainsi que l'établissement d'espèces introduites (ex : les crustacés copépodes *Acartia tonsa* et *Pseudodiaptomus marinus*) qui prolifèreraient maintenant en relation avec leurs caractéristiques thermophiles et/ou la salinisation du milieu ([26] et Sautour et Dessier, non publié).

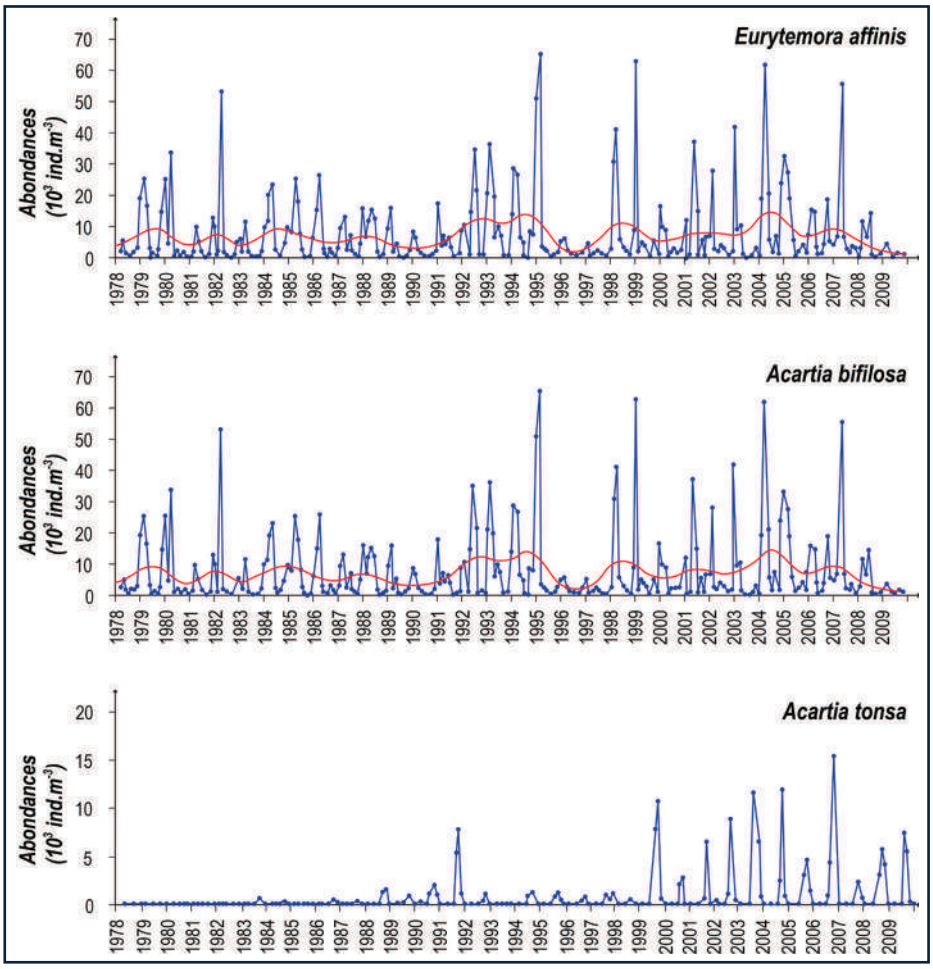


Figure 2 : *Estuaire de la Gironde : évolution des abondances de trois espèces de copépodes entre 1978 et 2009 dans la zone centrale de l'estuaire (entre Pauillac et Blaye, PK 52). Eurytomora affinis et Acartia bifilosa sont des espèces autochtones, Acartia tonsa a été introduit dans l'estuaire en 1983 (probablement via des eaux de ballast). Après une période de colonisation modérée, cette dernière présente depuis le début des années 2000 des densités estivales importantes dans cette zone de l'estuaire. Données brutes en bleu : valeurs mensuelles et moyennes mobiles (9 mois) en rouge, d'après [23] .*

Ces dernières années (depuis 2010) sont aussi marquées, notamment dans les parties les plus « marines » des eaux littorales, par des modifications notables de représentation de groupes zooplanctoniques habituellement « peu représentés » dans ces zones et provenant du golfe de Gascogne (exemples les plus marquants : les physalies en 2011 ou encore les cténaires en 2012). L'invasion des physalies, organismes complexes extrêmement dangereux proches des méduses, pendant l'été 2011 est actuellement interprétée comme une illustration possible d'un changement de régime des vents et des courants. L'Aquitaine n'avait certainement jamais connu de tels phénomènes, le centre antipoison de Bordeaux enregistrant près de 1 000 cas d'envenimation **(Figure 3)**. Il reste à savoir s'il s'agit d'un événement isolé et accidentel ou d'une tendance liée au changement global et si l'augmentation de représentativité d'autres groupes originaires du golfe de Gascogne (ex. : cténaires) est susceptible d'avoir la (les) même(s) cause(s) (modification du régime des vents ? température ?).



Figure 3 : *Communiqué de presse InVS, ARS Aquitaine et CHU de Bordeaux du 18/07/11 : Depuis plusieurs années, les plages d'Aquitaine sont le témoin de l'apparition d'animaux marins venimeux habituellement peu présents sur nos côtes. À l'approche de l'été, alors que le littoral se remplit peu à peu de touristes et de familles, l'ARS Aquitaine, en collaboration avec le Centre Antipoison et de Toxicovigilance du CHU de Bordeaux et l'Institut de Veille Sanitaire via sa cellule en région Aquitaine (Cire), entament une campagne d'information et de sensibilisation aux envenimations marines par physalie, méduse pélagique et vive. Même si aucun décès en lien avec ce type d'envenimation n'a été rapporté à ce jour en France, les effets toxiques de ces organismes marins peuvent entraîner des complications chez certaines victimes. Ainsi, l'ARS Aquitaine, le Centre Antipoison et de Toxicovigilance du CHU de Bordeaux et la Cire Aquitaine appellent les baigneurs à la vigilance. Une surveillance sanitaire, aux plans toxicologique et épidémiologique, sera d'ailleurs assurée tout au long de la saison estivale.*

L'évolution des *communautés de poissons* est essentiellement marquée par une présence accrue d'espèces marines (ex. l'anchois ou le sprat dans l'estuaire de la Gironde [27]) en réponse à l'augmentation des températures et à la marinisation du système. Cette augmentation des températures est également la cause avancée pour expliquer le déclin de certaines espèces d'eaux dites tempérées jusqu'à leur quasi-disparition, comme c'est notamment le cas de l'éperlan ([28], **Figure 4**).

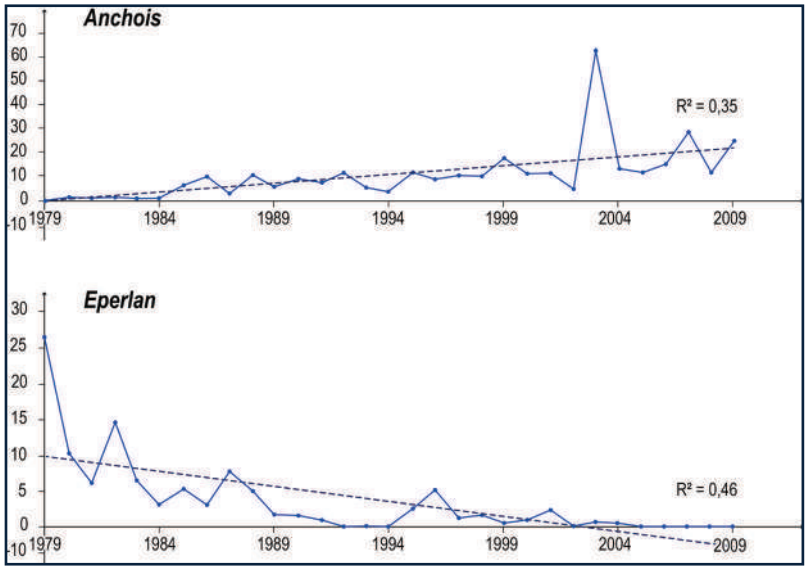


Figure 4 : *Estuaire de la Gironde : évolution des abondances de l'anchois (espèce marine) et de l'éperlan (espèce d'eau tempérée) entre 1979 et 2009 dans la zone centrale de l'estuaire (entre Pauillac et Blaye, PK 52). Valeurs annuelles et tendances linéaires.*

Enfin, l'apparition de nouveaux vecteurs d'*épizooties*[5] est une autre caractéristique de l'évolution actuelle des écosystèmes littoraux qui sont aussi marqués par la recrudescence de maladies d'organismes marins (ex. : huîtres et Dermo [*Perkinsus marinus*] et MSX [maladie à spores plurinucléaires], palourdes et perkinsose [*Perkinsus olseni*]), qui sont directement mises en relation avec l'augmentation des températures.

5. Propagation rapide d'une maladie contagieuse dans une population animale.

Modifications des aires de répartition

Les modifications de biodiversité observées dans un écosystème donné sont la conséquence de différents processus amenant à une modification de la représentation des espèces : dynamique de population, relations proies-prédateurs, déplacement de l'aire de distribution en relation avec la modification de l'habitat, introduction d'espèces, évolution de la distribution des températures... Quels que soient les environnements et les communautés biologiques, une des évolutions majeures actuellement bien identifiée est la modification de diversité spécifique en relation avec l'élévation des températures, qui a pour effet direct une modification des aires de distribution des espèces à grande échelle spatiale (remontée des isothermes et facilitation d'implantation d'espèces invasives thermophiles).

Évolution des isothermes et modification des limites biogéographiques

Le golfe de Gascogne et ses zones littorales subissent des impacts d'autant plus marqués qu'ils se situent à proximité de la limite entre provinces biogéographiques (boréales [ou tempérées froides]) et (lusitaniennes [ou tempérées chaudes]) et constituent ainsi la limite biogéographique de nombreuses populations. L'effet du réchauffement climatique le plus souvent attendu est un glissement des limites de distribution des espèces vers le nord, associé à un remplacement des espèces d'eaux froides par des espèces d'eaux chaudes. Il est ainsi possible d'envisager l'effet d'une augmentation de température sur la modification de répartition d'une espèce donnée.

Le compartiment planctonique est concerné par ce changement avec une remontée vers le nord des espèces tempérées froides [28] et l'arrivée ou le développement plus marqué d'espèces plus thermophiles tant dans le golfe de Gascogne qu'en zone littorale [29][30].

Les espèces appartenant au phytoplancton toxique n'échappent pas à la règle, comme par exemple le genre *Ostreopsis* **(Figure 5)**, identifié dans le golfe de Gascogne et connu sous les tropiques pour être à l'origine d'intoxications alimentaires sévères par accumulation de toxines (palytoxines[6]) dans la chaîne alimentaire[7]. Dans des conditions favorables, *Ostreopsis* peut se multiplier dans de grandes proportions et donner lieu à des efflorescences, qui constituent depuis 2008 un problème émergent pour les eaux littorales de Méditerranée française[8]. Les cas repérés ont permis d'identifier comme facteurs favorables : la présence de substrats durs, des eaux peu profondes, des températures élevées (> 26 °C), une mer calme et l'absence de vent pendant plusieurs jours.

Les invertébrés benthiques des substrats rocheux sont aussi concernés. De nombreux représentants de ce groupe se situent en limite d'aire de répartition sur les côtes aquitaines et plus particulièrement sur la Côte Basque [31]. Beaucoup d'entre eux, sont originaires de Méditerranée ou de l'Atlantique du Sud-est. L'accumulation d'eaux chaudes au sud du golfe de Gascogne se traduit par des conditions favorables, pour la colonisation des habitats locaux, par les larves pélagiques, conditions qu'elles ne retrouvent pas dans les régions plus septentrionales. Bien qu'il n'y ait pas de suivi récurrent de ces espèces (les données restent ponctuelles [32][33]), cette méridionalisation est connue de longue date [34] mais semble s'accentuer au cours des dernières décennies [35].

---

6. Les palytoxines figurent parmi les toxines naturelles les plus toxiques connues.
7. Les risques identifiés sont principalement sanitaires. Ils ont été documentés par des avis récents de l'Anses et de l'InVS :
- Inhalation ou contact sur la peau, pour les personnes exposées aux aérosols marins ou effectuant des activités nautiques dans le secteur affecté par un épisode d'efflorescence (signes variés : bénins jusqu'à pouvant justifier une courte hospitalisation ; irritations et/ou des difficultés respiratoires).
- Ingestion, pour les personnes ayant consommé des produits de la mer ayant été en contact avec *Ostreopsis*, avec un risque d'intoxication potentiellement mortel en cas notamment d'ingestion de gastéropodes, échinodermes ou tuniciers (aucune intoxication à ce jour en Europe).
8. Affectant en général des secteurs limités, elles sont caractérisées par la présence de mucilage sur les rochers et les macroalgues littorales, de mousse couleur marron à la surface de l'eau, accompagnés de signes de souffrance voire de mortalité de certains organismes marins.



Figure 5 : *Phytoplancton toxique, Ostreopsis ovata : algue microscopique (50 µm) unicellulaire (groupe des dinoflagellés), benthique et épiphyte (cliché IFREMER, Nézan et Chomérat).*

Deux groupes biologiques illustrent particulièrement bien cette méridionalisation [31][36] : les mollusques opisthobranches et les cnidaires. Chez les Cnidaires, parmi les Octocoralliaires deux espèces originaires de l'Atlantique du sud-est (côtes africaines) côtoient les espèces Aquitaines : *Paramuricea grayi* (Johnson, 1861) dans la zone circalittorale du large et *Eunicella gazella* (Studer, 1878) dans les zones infra- à circa-littorales. Chez les mollusques opisthobranches, des espèces particulièrement remarquables, endémiques de la Méditerranée sont signalées en Aquitaine **(Figure 6)** : *Peltodoris atromaculata* (Bergh, 1880) et *Marionia blainvillea* (Risso, 1818).

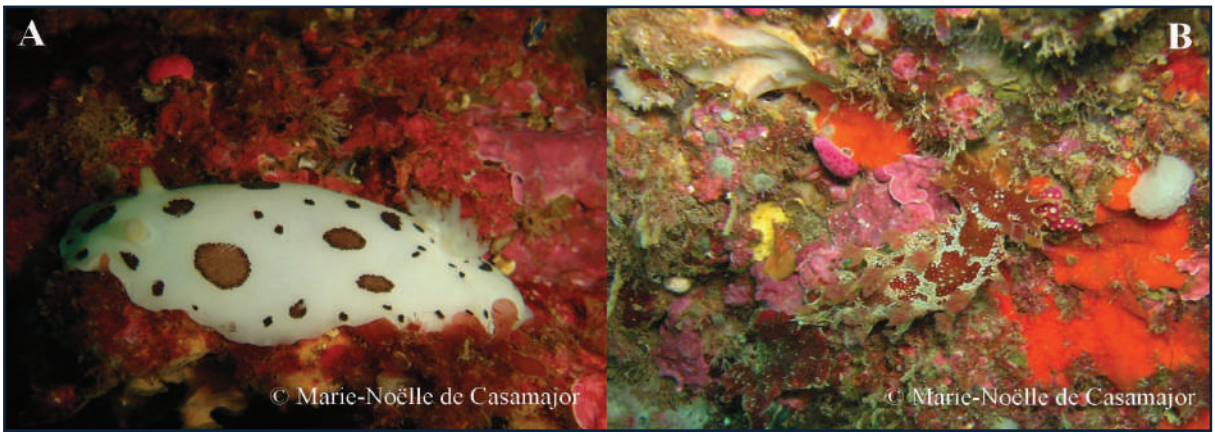


Figure 6 : *Macrofaune benthique, (A) Peltodoris atromaculata (Bergh, 1880) et (B) Marionia blainvillea (Risso, 1818) observés sur les plateaux rocheux de la côte basque.*

Les poissons représentant d'espèces tropicales inconnues des eaux européennes avant les années 1960 sont de plus en plus souvent observés dans le golfe de Gascogne. Les premiers à être signalés appartenaient à des espèces vivant entre 200 et 600 m de profondeur venues grâce au courant de pente sud nord.

Ces espèces sont à présent régulièrement observées dans le golfe depuis 1975 (14 espèces tempérées chaudes sont recensées pour 13 espèces d'eaux tempérées froides et 27 en limite de répartition dans le golfe). Sur le plateau continental, les espèces tropicales n'ont été signalées qu'à partir de 1981 et en moins grand nombre : plus de 65 % d'entre elles dans le sud-est du golfe dont les eaux se réchauffent ([37] – **Figure 7**). De la même manière, la distribution spatiale des communautés de poissons estuariens (estuaire de la Gironde) présente actuellement un changement brusque latitudinal en relation avec le réchauffement des eaux marines et les pressions anthropiques à plus petite échelle [38].

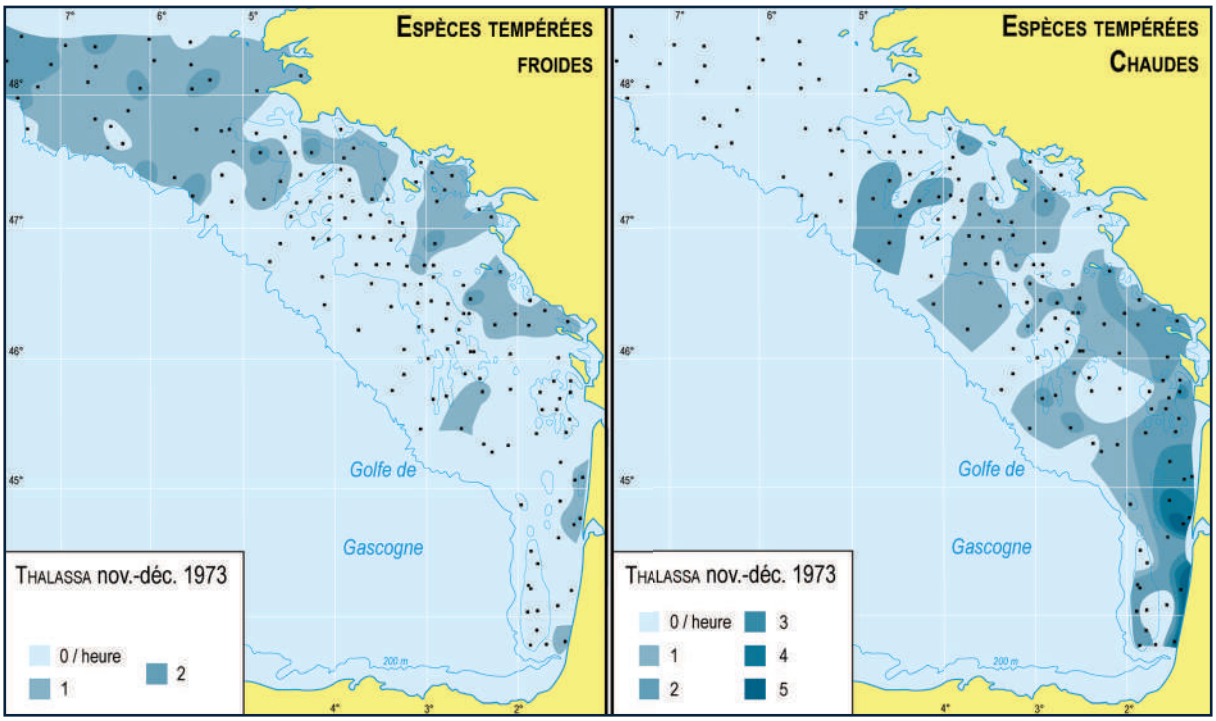


Figure 7 : *Espèces en limite de leur aire de répartition dans le golfe de Gascogne. À gauche : espèces tempérées froides ; À droite : espèces tempérées chaudes [37].*

L'avifaune. Pour le sud du golfe de Gascogne, les changements climatiques apparaissent aussi comme une cause majeure des évolutions observées chez les populations d'oiseaux marins [8]. De très fortes décroissances apparaissent chez les espèces préférant essentiellement les eaux tempérées froides telles que l'océanite tempête *Hydrobates pelagicus* et le pingouin torda *Alca torda* (**Figure 8**). Des disparitions temporaires, au moins en Aquitaine, se produisent chez le macareux moine *Fratercula arctica*.

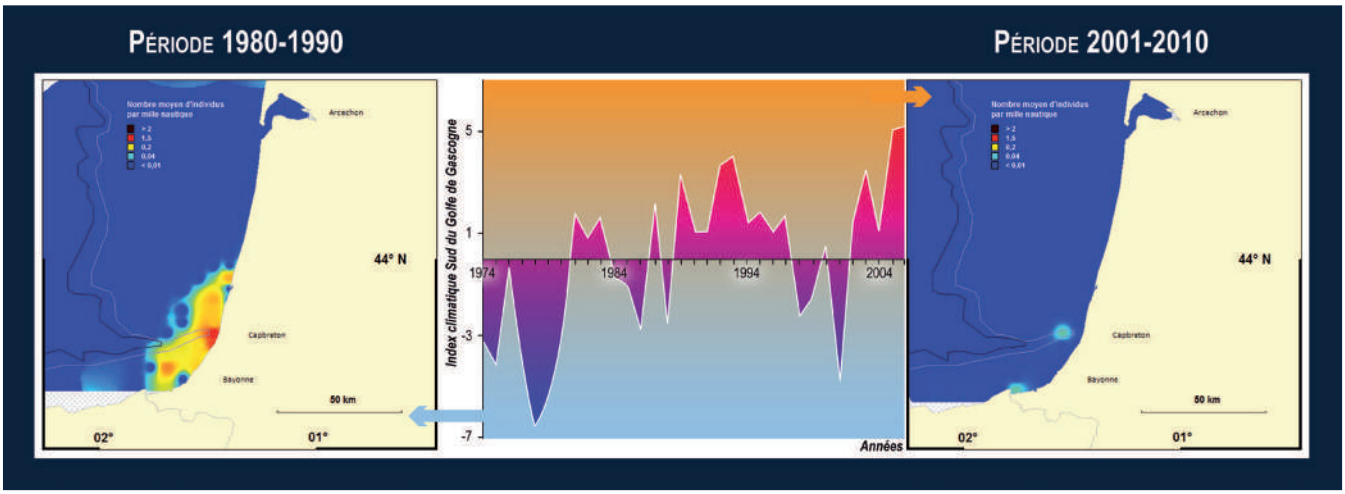


Figure 8 : *Exemple de la diminution d'une espèce boréale, le Pingouin torda, hivernant dans les eaux d'Aquitaine (d'octobre à avril) en relation avec les changements océano-climatiques (index SBC) [6].*

L'évolution d'abondance des *mammifères marins* présente de fortes corrélations avec les changements océano-climatiques observés en Aquitaine [8]. Une disparition temporaire dans les eaux d'Aquitaine de l'orque épaulard *Orcinus orca*, espèce caractéristique des eaux tempérées froides est à signaler alors que l'espèce était régulièrement observée jusque dans les années 1980. En revanche, les espèces liées aux eaux tempérées chaudes comme le dauphin commun *Delphinus delphis* [39], affichent globalement une tendance à la croissance de leurs populations **(Figure 9)**.

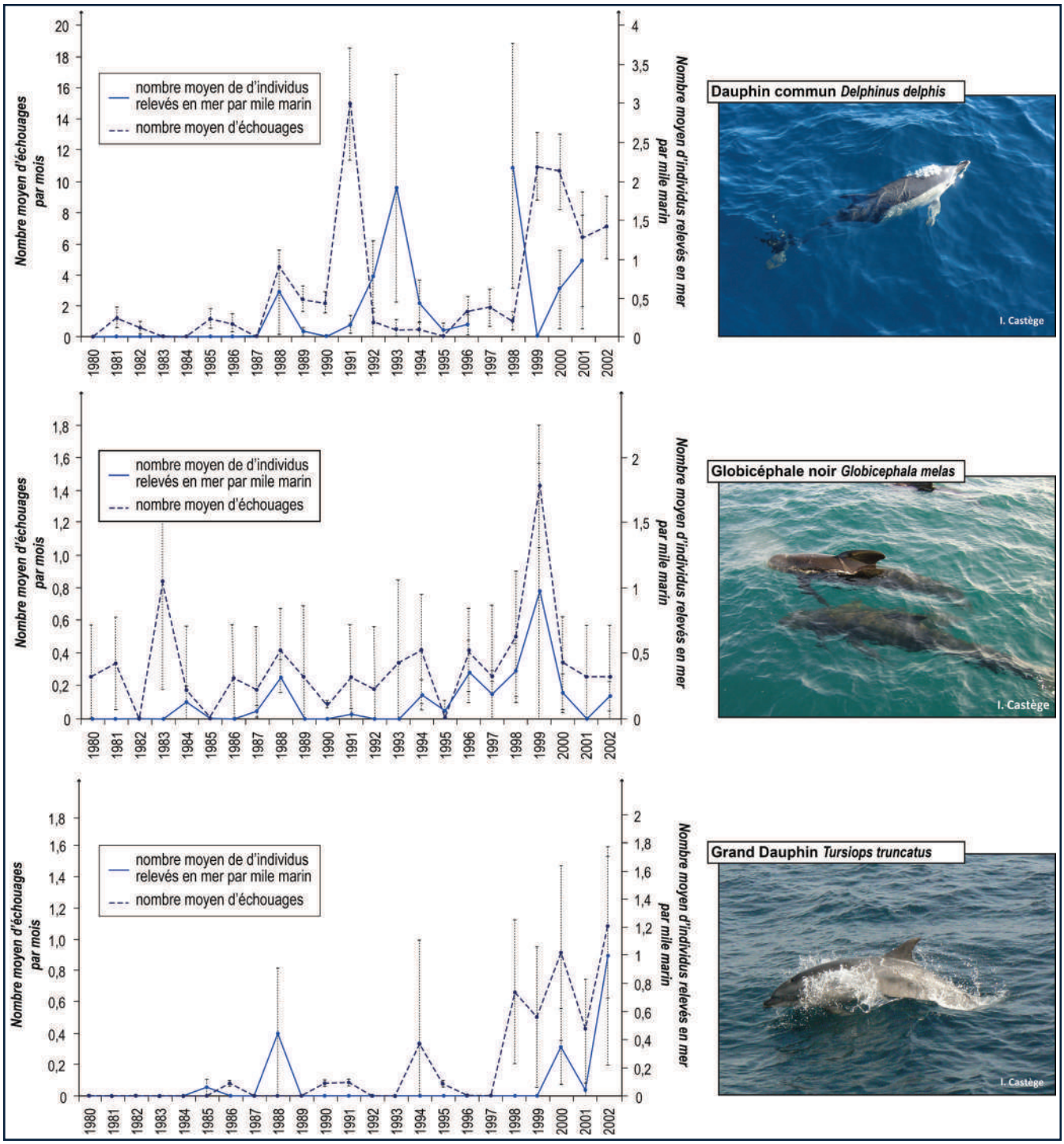


Figure 9 : *Augmentation de l'abondance en mer (traits pleins) et des échouages (traits pointillés) de mammifères marins en Aquitaine. De haut en bas : Dauphin commun Delphinus delphis ; Globicéphale noir Globicephala melas ; Grand Dauphin Tursiops truncatus [39].*

Évolution des températures et espèces invasives

En milieu marin, comme dans les écosystèmes terrestres et dulcicoles, les *espèces non-indigènes*, introduites volontairement (aquaculture) ou accidentellement (coques des navires, eaux de ballast, transferts d'espèces aquacoles, etc.) par les activités humaines, constituent l'une des principales causes d'atteinte à la biodiversité. Goulletquer *et al.* [40] ont ainsi recensé 104 espèces introduites (tous phyla confondus, végétaux et animaux, des protistes aux poissons) sur les côtes françaises de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord. Ces introductions se sont fortement accélérées à partir des décennies 1960-1970. Malgré diverses réglementations nationales et internationales, ce phénomène est loin de se

ralentir puisque, une décennie après l'évaluation de Goulletquer *et al.*, un nouveau recensement réalisé dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin fait état de 143 espèces « exotiques » sur les côtes Manche-Atlantique, soit un accroissement de près de 40 % en 10 ans ! Les sites conchylicoles, les estuaires et les ports, où s'exerce l'essentiel des activités anthropiques en mer, constituent des « hot spots » d'introduction d'espèces. Dans notre région, le bassin d'Arcachon et l'estuaire de la Gironde hébergent ainsi respectivement un minimum de 68 et 18 espèces non-indigènes.

Sachant que l'essentiel des espèces introduites (et maintenant établies) dans nos écosystèmes provient de régions tempérées-chaudes, le risque d'un accroissement du rythme de développement de ces espèces dans nos régions est extrêmement probable dans le cas d'un réchauffement des eaux. Des températures plus élevées peuvent favoriser l'établissement de nouvelles espèces exotiques, y compris celles qui arrivent actuellement mais qui ne trouvent pas pour l'instant des conditions optimales à leur implantation.

Fort heureusement, la plupart des espèces introduites ont peu d'impact (au moins, apparemment) et contribuent simplement à accroître la biodiversité. Certaines peuvent cependant devenir invasives (ou envahissantes), excluant alors des espèces autochtones ou modifiant le fonctionnement des écosystèmes. L'huître japonaise *Crassostrea gigas* – dont l'introduction volontaire a certes été positive pour les économies locales – est devenue l'une des espèces marines les plus envahissantes sur les côtes européennes. À la faveur du réchauffement climatique amorcé, elle se reproduit à des latitudes de plus en plus élevées, y compris en Scandinavie à la faveur d'étés particulièrement chauds, et entre en compétition avec les moulières en Mer du Nord. Dans notre région, en particulier dans le bassin d'Arcachon, malgré les fortes mortalités de naissain observées ces dernières années, cette espèce constitue des récifs d'individus « sauvages », dont le développement modifie la biodiversité benthique locale, en permettant l'installation de certaines espèces et en éliminant d'autres [41].

Évolution des températures et parasites

Les études cherchant à identifier l'impact d'un réchauffement climatique sur les *organismes parasitaires marins* sont encore très rares à l'échelle internationale. Les travaux concernant l'impact du changement climatique sur la diversité des parasites et leur impact sur d'autres espèces suivent pour la plupart un raisonnement basé sur l'extrapolation : une estimation expérimentale du taux de reproduction et d'émission des parasites en fonction de la température permet d'envisager ce que deviendraient ces taux, dans un milieu naturel se réchauffant. Ce qui est vrai pour les systèmes parasites-hôtes qui ont co-évolué depuis des millénaires le devient peut-être moins dans le cas d'espèces nouvellement introduites dans les écosystèmes, parasites et/ou hôtes. Dans ce cas la relation est plus fragile et mène très souvent à des pathologies sévères. Les deux espèces de bivalves les plus produites dans le monde, l'huître japonaise et la palourde japonaise, sont aussi les deux bivalves les plus produits en Aquitaine. La palourde japonaise subit l'emprise d'un parasite qui développe chez elle une maladie, la Perkinsose. Ce parasite se développe plutôt dans des conditions « chaudes » : si en Bretagne le nombre de parasites est de l'ordre de 10^3 cellules par gramme de chair, il atteint 10^4 en Aquitaine (Arcachon) [42]. Des mortalités significatives sont attendues lorsque ce nombre passe à 10^5 comme cela a été le cas en Espagne. Une augmentation de température apparaît donc dans ce cas comme une menace pour cette espèce et la pêche associée.

Modification de la phénologie

Les caractéristiques des populations de divers groupes biologiques (insectes, mollusques, oiseaux…) s'exprimant à l'échelle annuelle (phénologie) sont, de manière globale, actuellement modifiées principalement sous l'effet des changements : 1) des caractéristiques du cycle climatique saisonnier (début de période chaude plus précoce, débits, régimes de vents) et 2) de l'amplitude des variations thermiques annuelles (ex. [42][43]). Les travaux sont souvent menés à l'échelle de populations : les changements observés varient de manière importante suivant les groupes fonctionnels considérés [44] et ont un impact sur le fonctionnement de l'écosystème.

Les traits d'histoire de vie des organismes et la *dynamique de leurs populations* sont affectés. Ceci a été, en particulier, étudié chez les poissons estuariens, notamment en relation avec leur phase migratoire [45]. À l'échelle populationnelle, certains effets sont maintenant bien connus : l'augmentation des températures et la modification du cycle saisonnier ont ainsi des conséquences sur la survie des organismes (œufs de poissons et ensuite indirectement développement des larves et des alevins durant leurs premiers jours et mois de vie), sur la croissance des organismes notamment ectothermes qui est plus rapide et a pour conséquence une augmentation du nombre de cohortes annuelles [18].

La base du réseau trophique est profondément impactée notamment *via* la modification de dynamique des floraisons phytoplanctoniques en relation avec la réduction des apports en eau douce [18][23]. La diminution des apports en nutriments (ex. bassin d'Arcachon [17]), particulièrement marquée durant les années sèches (printemps 2002) induit des limitations par le silicium très précoces et en conséquence des floraisons de flagellés également plus précoces (alors que la phénologie du développement des diatomées semble globalement inchangée [44][9]).

Cette tendance est aussi soutenue par une stratification accrue des eaux de surface (modifications de température et de turbulence) induisant une augmentation des abondances de dinoflagellés et une diminution de celles des diatomées [46]. Par ailleurs, les apports continentaux, plus concentrés en composés dissous et particulaires, exacerbent par ailleurs les risques de sous oxygénation, d'eutrophisation et de contamination des écosystèmes [47], phénomène amplifié par une modification du temps de résidence des masses d'eau qui conduit aussi à une maturation accrue du réseau trophique.

La temporalité des relations trophiques est elle aussi perturbée par la modification des cycles saisonniers de développement des consommateurs par rapport à une situation de « normalité » (ex. : crustacés en Gironde : maturité sexuelle atteinte plus rapidement chez les mysidacés ou encore les *Corophium*, **Figure 10**).

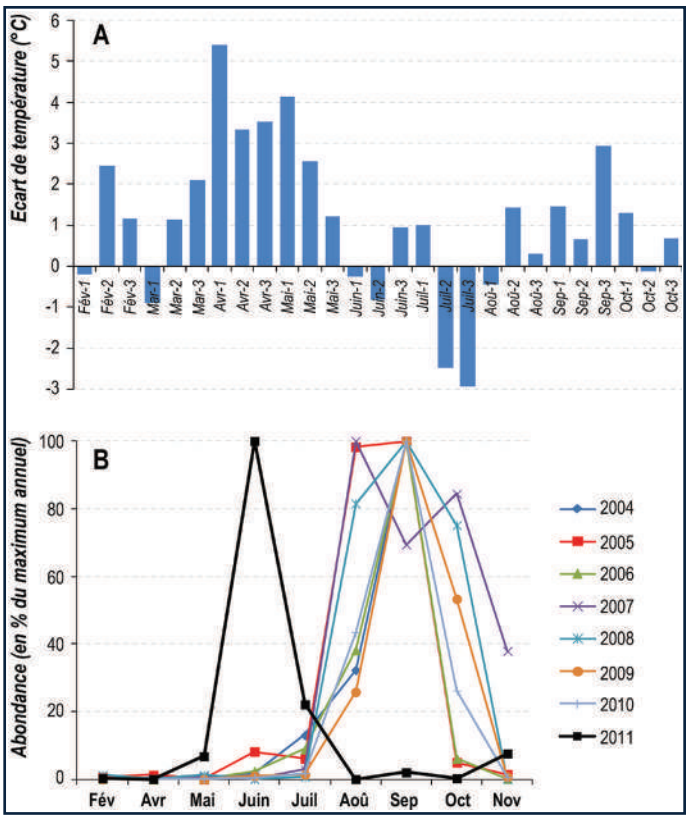


Figure 10 : *Les températures anormalement élevées lors du printemps 2011, avec des écarts de +2,6 à +5,4 °C des moyennes décadaires de début avril à mi-mai par rapport à la normale (A, écarts des températures de l'air à Bordeaux par rapport à la période 1981-2000 ; données Météo France), ont été à l'origine d'un développement précoce en 2011 (juin) par rapport aux années 2004-2010 (août-septembre) chez le crustacé amphipode Corophium volutator (B) qui colonise les vasières intertidales de l'estuaire de la Gironde (Bachelet, non publié).*

9. Lien possible avec la recrudescence de dinoflagellés toxiques, ou le développement important de *Phaeocystis* sp en 2010 ?

De manière globale, le développement de certains consommateurs primaires (planctoniques) plus précoce [18] alors que celui des consommateurs d'ordre supérieur semble moins modifié quel que soit le milieu envisagé [48], renforce le risque de décalage temporel entre périodes de présence des proies et des prédateurs. Cette désynchronisation effective des périodes de développement des communautés de proies et de prédateurs [49] qui conduit à un « mismatch » peut annuler le lien trophique et avoir des répercussions sur l'ensemble du fonctionnement du réseau trophique [50]

Relations hôtes/parasites : les espèces parasitaires chez qui on peut observer une émission de larves quand l'eau atteint 17 °C ([51], bassin d'Arcachon) qui est multipliée par 6 au-dessus de 19 °C (mais s'annule de nouveau au-delà de 23 °C), une augmentation de production de larves est donc attendue ainsi qu'un possible décalage de la période d'émission ; la question de la présence dans le milieu de l'hôte au stade de développement adéquat dans cette nouvelle fenêtre temporelle restant posée **(Figure 11)**.

Les modifications explicitées ci-dessus en termes de diversité spécifique et de phénologie ont un impact direct sur le fonctionnement de l'écosystème au travers notamment d'une modification potentiellement profonde des relations trophiques qui constituent un lien extrêmement structurant.

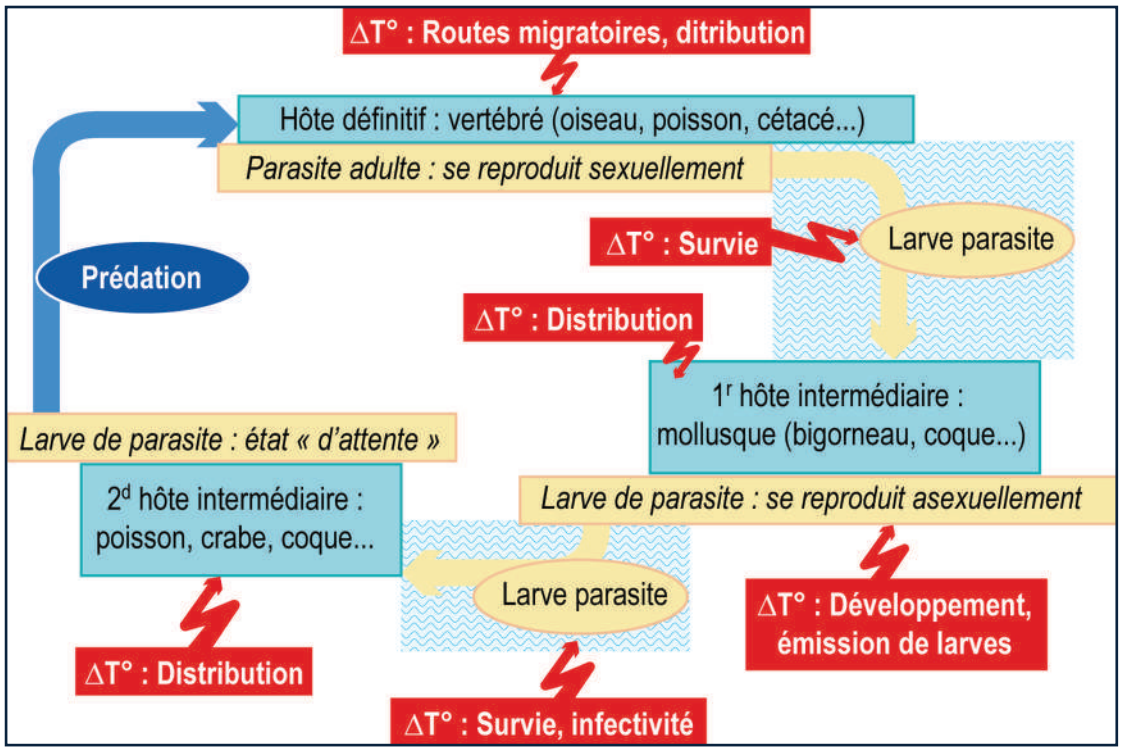


Figure 11 : *Cycle théorique d'un parasite trématode passant par trois organismes hôtes et deux phases larvaires libres : le parasite adulte se reproduit sexuellement dans un vertébré. Ses œufs sont émis dans l'eau avec les fèces de l'hôte et la larve va devoir trouver le 1er hôte intermédiaire, un mollusque. Le parasite y sporule et va émettre de nouvelles larves qui vont infecter le 2nd hôte intermédiaire. Le cycle sera complet quand cet hôte sera ingéré par l'hôte définitif. En rouge : les différentes étapes où la température de l'environnement a une importance particulière.*

II- Prédictions et Incertitudes

Les changements explicités ci-dessus s'amplifieront encore vraisemblablement au regard des différents scénarios climatiques prévus.

Les facteurs importants de l'évolution de l'environnement sont : la température (modification des aires de répartition des espèces, de la phénologie...), la diminution des débits et l'élévation du niveau de la mer (modification de l'habitat, érosion des zones littorales, marais maritimes...)[10]. Les impacts possibles sur le milieu marin à partir de prédictions pour la fin du XXI^{e} siècle indiquent une augmentation de la température de la mer, entre 0 et 100 m de profondeur, entre 0,015 et 0,020 ^{o}C an^{-1} [24] ainsi qu'une élévation du niveau de la mer (Côte Pays Basque outre Bidassoa, [24]) entre 29 et 49 cm estimée même jusqu'à une valeur extrême de 62 cm (sur le niveau de la marée maximale astronomique) avec une période de retour de 50 années [52].

Le golfe de Gascogne constitue la limite biogéographique de nombreuses populations et l'impact à venir sur la biodiversité de ces changements océano-climatiques risque d'y être d'autant plus prononcé. Les évolutions actuelles (cf. sections précédentes) montrent que la biodiversité va évoluer vers une augmentation de représentativité des espèces tempérées chaudes, une modification de la phénologie des espèces et de la productivité des écosystèmes.

Le phytoplancton, base de la productivité des écosystèmes marins (99 % de la matière organique utilisée dans les réseaux trophiques marins), subira des effets antagonistes dus au réchauffement : augmentation de la stratification thermique des eaux, réduction des apports en nutriments d'origine continentale, diminution du mélange vertical mais aussi augmentation de la fréquence des événements exceptionnels (ex. : tempêtes). Les conséquences[11] seront très variables suivant les environnements et leurs caractéristiques climatiques et hydrodynamiques. À l'échelle globale la production primaire phytoplanctonique diminuerait de 2 à 20 % d'ici à la fin du 21° siècle ([53], scénario A2). La modification de dominance diatomées/dinoflagellés, doit amener à une évolution vers le développement de phytoplancton de plus petite taille, avec pour conséquence une augmentation de représentativité du microzooplancton et de manière globale une augmentation du nombre de maillons trophiques. Les conséquences attendues sont liées à une réduction de l'efficacité de transfert de matière et d'énergie vers les maillons trophiques supérieurs pélagiques et benthiques (diminution de l'exportation de matière vers le fond), dont les maillons exploités par l'homme. Cette évolution combinée à l'exploitation des ressources marines pélagiques pourrait amener au développement accru de méduses (prédateurs supérieurs : [54]).

La sensibilité aux variations de pH et de CO_2 est principalement documentée chez les organismes invertébrés et chez les poissons. Celle-ci est hautement variable d'une espèce à l'autre et certains effets sont encore peu connus. Néanmoins les connaissances actuelles permettent de dégager un consensus indiquant une recomposition des communautés [49].

Difficulté de déconvolution des signaux

Les organismes vivants étant des témoins intégrateurs de la variabilité de l'environnement, les modifications observées sont toujours dues à l'action combinée de différents facteurs du milieu. La relation entre la variabilité d'un facteur environnemental pris isolément et les modifications de biodiversité qui lui sont attribuées est donc souvent difficile à caractériser avec précision. Ainsi, les observations de biodiversité faites en relation avec l'évolution de température sont à interpréter en considérant que (1) des paramètres environnementaux autres que la température sont aussi modifiés (précipitations,

10. Mais aussi pluviosité, régime de vents, upwellings.
11. Conséquences complexes à déterminer du fait de la multiplicité des effets induits et des échelles spatiales et temporelles impliquées.

débits fluviaux dans les zones sous influence continentale, apports en nutriments et éléments minéraux, circulation des eaux, turbidité, etc.), (2) toutes les espèces ne réagissent pas de la même manière à ces modifications et (3), conséquence du précédent point, le réseau d'interactions entre espèces, construit sur une durée correspondant à la coévolution des espèces, peut être profondément altéré.

Parmi les facteurs de l'environnement influant sur la biodiversité il est important de mentionner les facteurs anthropiques « régionaux », comme par exemple les accidents pétroliers (ex. : Erika et Prestige dans le golfe de Gascogne), dont les impacts ont été notoires sur les oiseaux marins [55][56], dont les effets sur l'environnement ne peuvent être traités séparément des évolutions océano-climatiques actuelles, ou encore les zones de réchauffement ponctuel des eaux (ex. : eaux de refroidissement de centrale nucléaire), qui doivent maintenant être considérées comme des zones « réservoirs » d'espèces thermophiles (majoritairement à déterminer) dont les frontières avec le milieu naturel sont de plus en plus ténues en raison du réchauffement global des eaux.

Rareté des prédictions et manque de données

Les difficultés de caractérisation des causes d'évolution de la biodiversité en relation avec les caractéristiques environnementales, dont le climat, rendent difficiles les prédictions. À ce premier verrou s'ajoute le manque quasi récurrent de données acquises sur des durées suffisamment longues permettant de préciser les évolutions à partir d'états dits « de référence ».

Les travaux permettant de prédire l'évolution de la biodiversité se multiplient néanmoins et permettent de confirmer les évolutions décrites pour la période actuelle en abordant les conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes (ex : [13]). À l'échelle de l'Aquitaine l'ampleur de l'évolution attendue peut être perçue à partir des changements prévus pour les communautés benthiques des côtes rocheuses basques pour lesquelles les variables climatiques (température, précipitations, NAO, etc.) expliquent une part de variabilité plus grande que les sédiments ou la pollution dans la variabilité de biodiversité observée [57]. Les conséquences pourront être observées pour de nombreux organismes de cette communauté benthique :

- La communauté de macro-algues de la côte rocheuse basque, structurée (entre 0 et 15 m) par l'algue *Gelidium corneum*[12], verra sa biomasse diminuer au cours de ce siècle [24] en relation avec les changements prédits pour les facteurs déterminant son développement (lumière, température et houle : [58]) ;
- Pour d'autres algues (*Saccorhiza polyschides*, *Laminaria*, *Fucus*, *Bifurcaria*) ou animaux benthiques (*Patella*, *Balanus*, *Littorina*), pour lesquels la température s'avère être un facteur déterminant, les aires de distributions seront modifiées [59] : *Patella rustica* et *Pollicipes pollicipes* s'étendront vers le nord, et des espèces comme *Patella vulgata*, *Nucella lapillus*, *Semibalanus balanoides*, *Pelvetia canaliculata*, *Fucus vesiculosus*, *Fucus serratus* et *Laminaria ochroleuca* disparaîtront du golfe de Gascogne [59].

Acquisition de données - modélisation

Chroniques de données

La première démarche consisterait à effectuer des inventaires faunistiques dans des environnements représentatifs et avec des fréquences d'acquisition cohérentes avec les échelles de variabilité des compartiments biologiques suivis et des paramètres environnementaux susceptibles de les impacter. Ces observations, doivent être soutenues et confrontées à des approches similaires à plus large échelle spatiale afin d'identifier, dans les variations, ce qui relève du global ou du local.

12. Utilisée pour la production d'agar sur toute la côte basque.

Ces dispositifs relèvent parfois de la surveillance lorsque les organismes peuvent impacter la santé humaine. Un dispositif de surveillance et d'alerte a ainsi été mis en place en Méditerranée française, à l'initiative des autorités sanitaires nationales[13]. *Ostreopsis* (microalgue) a été observée à l'heure actuelle une seule fois sur le littoral Aquitain en 2007 (IFREMER, Saint-Jean-de-Luz) en faible quantité (40 cellules/litre). Ces dispositifs impliquent que les espèces recherchées soient connues dans la zone étudiée ou puissent potentiellement s'y développer (lien avec les activités d'observation mentionnées ci-dessus).

Ces suivis effectués à petite échelle spatiale doivent être menés en parallèle d'acquisition de données à une échelle plus large (échelle du golfe de Gascogne, de l'Atlantique Nord, avec des outils adaptés et pour des variables environnementales porteuses d'informations à ces échelles).

Relation environnement/organismes

Cette acquisition récurrente doit s'accompagner de travaux spécifiques sur des modèles biologiques permettant de caractériser les impacts croisés des facteurs environnementaux agissant en synergie ou de manière antagoniste sur les êtres vivants (approches expérimentales et de terrain).

De même des travaux en écologie fonctionnelle devraient être promus afin de pouvoir mieux caractériser l'effet des modifications de biodiversité en termes de fonctionnement de l'écosystème.

Cette dernière approche permettrait en outre, en croisant avec des approches similaires faites dans d'autres écosystèmes, de dégager les principales évolutions fonctionnelles actuelles des environnements.

Modélisation

Ces deux types d'acquisition permettraient de compléter de manière utile les approches de modélisation prédictive, actuellement incomplètes du fait de la difficulté à caractériser les effets et à les quantifier.

De manière globale les prédictions devraient s'appuyer dans l'avenir sur une modélisation croisée hydrodynamique/processus écologiques/biogéochimiques, encore trop peu développée.

Une approche par les modèles de niche à large échelle sur l'ensemble des espèces est actuellement en cours de développement régionalement, avec, en perspective, une approche théorique par des modèles mécanistes pour une prise en compte plus réaliste de la dispersion et de la dynamique des extinctions/colonisation.

Conclusion

En Aquitaine l'impact à venir des changements océano-climatiques sur la biodiversité sera d'autant plus prononcé que le golfe de Gascogne se situe à proximité de la limite entre provinces biogéographiques boréales tempérées froides et tempérées chaudes et constitue ainsi la limite de distribution de nombreuses populations. L'effet du réchauffement climatique le plus souvent observé est donc un glissement des limites de distribution des espèces vers le nord, associé à un remplacement des espèces d'eaux froides par des espèces d'eaux chaudes, ceci, du phytoplancton (dont phytoplancton toxique : présence d'Ostreopsis) aux mammifères marins (raréfaction de l'orque, présence accrue du

13. La présence d'*Ostreopsis* (microalgue) en quantité importante peut conduire à une interdiction de baignade et de consommation des produits de la mer. L'examen de différents épisodes a montré que les concentrations d'*Ostreopsis* dans l'eau ayant donné lieu à l'observation d'effets sanitaires vont de quelques milliers à un million de cellules par litre.

dauphin commun), en passant par le zooplancton, les invertébrés benthiques (notamment cnidaires), les poissons (présence d'espèces tropicales) ou encore l'avifaune (décroissance importante d'espèces d'eaux tempérées froides, ex. : pingouin torda). Outre cette évolution, l'introduction volontaire ou accidentelle d'espèces non-indigènes par les activités humaines, constitue l'une des principales causes d'atteinte à la biodiversité. Les sites conchylicoles, les estuaires et les ports, où s'exerce l'essentiel des activités anthropiques en mer, constituent des « hot spots » d'introduction d'espèces. Sachant que l'essentiel des espèces introduites (et maintenant établies) dans nos écosystèmes provient de régions tempérées-chaudes, le risque d'un accroissement du rythme des implantations nouvelles est extrêmement probable dans le cas d'un réchauffement des eaux. À l'échelle des espèces les traits d'histoire de vie sont modifiés, notamment la saisonnalité du développement. Ceci a des répercussions sur le fonctionnement de la base du réseau trophique avec une modification de la dynamique des floraisons phytoplanctoniques en relation avec la réduction des apports en eau douce, jusqu'au développement plus précoce de certains consommateurs primaires alors que celui des consommateurs d'ordre supérieur semble moins modifié. Cette variabilité dans la réponse renforce le risque de décalage temporel entre périodes de présence des proies et des prédateurs en annulant les liens trophiques.

6.3 Ressources exploitées par la pêche et l'ostréiculture

Coordination : *Nathalie Caill-Milly, Patrick Prouzet*
Rédacteurs : *Isabelle Auby, Angel Borja, Iker Castège, Guillem Chust, Nathalie Caill-Milly, Marie-Noëlle De Casamajor, Jean d'Elbée, Nicolas Goñi, Mario Lepage, Danièle Maurer, Gilles Morandeau, Patrick Prouzet, Jean-Claude Quéro, Tristan Renault*
Contributeurs : *Marie-Laure Bégout, Gérard Biais, Roger Kantin, Muriel Lissardy, Florence Sanchez*

En Aquitaine, l'exploitation des ressources de la mer (pêche et ostréiculture) est caractérisée à double titre par une forte dépendance à la bande côtière et aux estuaires. D'une part, près de 80 % des navires de pêche aquitains exercent une activité dans un rayon d'action inférieur à 12 milles. D'autre part, la région présente également, dans sa zone littorale et dans les estuaires, des habitats essentiels pour le bon déroulement des cycles biologiques pour les espèces exploitées à la côte mais également au large.

Après un rapide descriptif de l'activité de pêche (engins mis en œuvre, saisonnalité des captures…), un bilan des connaissances actuelles de l'impact du changement climatique pour les espèces d'importance halieutique en Aquitaine est présenté. La synthèse repose sur les derniers travaux scientifiques disponibles pour chacune de ces espèces.

Une vision synthétique des effets du changement climatique sur les espèces exploitées demeure délicate car de nombreux facteurs (y compris des facteurs non liés au climat) difficilement dissociables influent simultanément sur les populations. De plus, il ressort un manque de connaissances sur l'effet cumulé des changements liés au climat sur les différentes phases du cycle biologique de chacune des espèces d'intérêt halieutique en Aquitaine. Alors qu'au sein du golfe de Gascogne, les côtes d'Aquitaine présentent déjà un caractère méridional, de nouvelles espèces à affinité tropicale sont observées depuis plusieurs années. Les informations recueillies mettent néanmoins en évidence à l'échelle régionale des enjeux de gestion au niveau d'habitats essentiels.

Ce chapitre permet de faire le point sur les orientations de recherche à envisager pour améliorer l'état des connaissances sur les effets de changements climatiques sur les communautés d'intérêt halieutique et les perspectives de gestion pour le maintien de l'activité économique qui en découle.

Introduction

On entend par ressources vivantes de la mer, les espèces marines utilisables économiquement par l'homme. Bien que le tourisme et les activités de loisir aient introduit de nouvelles formes d'usage des ressources vivantes marines, on se limite ici aux ressources exploitées par la pêche ou l'aquaculture dans leurs milieux naturels[1], le poids économique et social de ces activités dépassant largement celui des autres usages.

L'état de ces ressources dépend à la fois de facteurs naturels (température, salinité, courants…) et anthropiques (prélèvements, modification des habitats…). Ainsi, les fluctuations de la NAO (North Atlantic Oscillation) et des pics de plancton associés, ou l'abaissement du pH des océans et ses répercussions

1. Hors aquaculture marine en milieu contrôlé telle que l'élevage de turbot à Anglet.

sur les organismes marins, sont encore mal connus. Les premières études expérimentales montrent que l'acidification des océans pourrait affecter la construction et la solidification des squelettes et coquilles d'animaux marins zooplanctoniques comme les ptéropodes [1] qui constituent une part conséquente du bol alimentaire des juvéniles de saumons pink (*O. gorbusha*) en Alaska dont la taille est comparable à celle des post-smolts[2] de saumon atlantique (15 à 20 cm).

Par ailleurs, les usages liés au milieu marin (pêche, aquaculture, activités nautiques de loisir, transport maritime…) et ceux liés au milieu terrestre (agriculture, tourisme littoral…), ont des répercussions sur le milieu marin qui se conjuguent avec ceux du changement climatique. La distinction entre les différents effets (anthropiques et climatiques) est difficile à évaluer ce qui engendre des difficultés en matière de prévisions.

Pour les secteurs de la pêche professionnelle et de l'aquaculture qui dépendent directement des ressources vivantes marines, la viabilité de ces activités résulte non seulement des conditions d'accès à la ressource et de l'état des stocks, des marchés…, mais aussi de la capacité des entreprises à s'adapter aux changements intervenant dans les écosystèmes.

Au côté des possibles adaptations génétiques des espèces (sur le long terme), les réponses biologiques aux changements physico-chimiques, des populations et des communautés sont essentiellement de quatre types [2] : il s'agit de déplacements de limites bio-géographiques, de décalages temporels de la phénologie, de modification de la physiologie liée à l'augmentation de la température et au déficit d'oxygène, et de mécanismes d'adaptation ou non face à l'acidification des eaux marines (avec une sensibilité attendue plus forte chez les invertébrés les moins évolués par rapport aux poissons, céphalopodes…).

Une approche un peu différente a été développée dans le cadre du projet européen RECLAIM (REsolving CLimAtic IMpacts on fish stocks, 2007-2009) qui a considéré l'impact du changement climatique attendu sur les habitats, la physiologie des organismes, la dynamique des populations, ainsi que la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Au cours de cette démarche, une liste d'hypothèses a été élaborée et les réponses possibles sont rassemblées dans le **tableau 1**.

Les populations situées en limite de leur aire de distribution vont présenter des réponses plus fortes que les populations situées dans une position médiane par rapport à leur aire de distribution.
L'abondance des espèces boréales en limite biogéographique sud va décroître ; celle des espèces méridionales en limite biogéographique nord va augmenter.
Les populations de poissons des systèmes océanographiques présentant une grande variété de fonctionnalités à méso -échelles seront moins dépendantes du changement climatique.
Les espèces pélagiques et démersales vont réagir différemment. Les espèces pélagiques pourront plus facilement suivre les changements intervenant dans les masses d'eau ainsi que les conditions biotiques et abiotiques associées. Les espèces démersales présenteront généralement des conditions en termes d'habitats plus restreintes d'un point de vue géographique.
Les espèces à vie courte vont présenter des réponses plus fortes et sont mieux armées pour s'adapter aux changements de l'environnement que les espèces à vie longue.
Les espèces requérant des habitats spatialement restreints pour une phase de leur cycle de vie vont être plus touchées par le changement climatique que les espèces ne nécessitant pas d'habitats spécifiques.
Les stocks halieutiques soumis à une exploitation intense répondront plus fortement au changement climatique que ceux exploités de manière limitée.
Les écosystèmes avec des réseaux trophiques simples vont présenter des réponses plus simples et plus rapides au changement climatique que ceux avec des réseaux trophiques complexes.
Les modifications induites par le changement climatique dans la structure des écosystèmes peuvent être brusques.

Tableau 1 : *Hypothèses des réponses possibles au changement climatique au niveau des habitats, de la physiologie des organismes, de la dynamique des populations, ainsi que de la structure et du fonctionnement des écosystèmes (projet RECLAIM, www.climateandfish.eu).*

2. Phase postérieure à celle du jeune saumon qui vient de subir la smoltification et qui migre vers la mer (smolt étant un terme anglais synonyme de saumoneau).

I- Exploitation des ressources marines et estuariennes en Aquitaine - Un état de la situation

Les activités de pêche (pêche des bivalves compris)

Avec un peu plus de 300 navires de pêche et près de 1 000 marins pêcheurs en équivalents temps plein, l'Aquitaine contribue pour respectivement 6 % à la flottille de pêche nationale métropolitaine et 9 % à l'effectif des pêcheurs. Ces dernières années, le chiffre d'affaires annuel global est estimé être compris entre 30 et 50 M€ pour la première vente. Les retombées économiques de l'activité dépassent largement ce premier maillon de la filière que sont les producteurs. Une étude locale concernant les Pyrénées-Atlantiques et les Landes [3] a ainsi estimé les emplois générés par la pêche compris entre 810 et 860 emplois directs (ETP) auxquels s'ajoutent 120 à 150 emplois indirects (30 à 40 en amont de la filière et 60 à 70 en aval).

L'outil de production moyen est un navire d'une longueur de 12 m (près des ¾ de la flottille sont de longueur inférieure à 12 m – sources DDTM – CRPMEM Aquitaine), de puissance totale de 172 kW, de jauge de 44 UMS et d'âge 21 ans. En termes d'engins de pêche, l'activité exprimée en cumul des mois de pêche est dominée par les filets, la pêche à la main (pour les palourdes), les chaluts, les tamis et les casiers (86 % de l'activité) **(Figure 1)**.

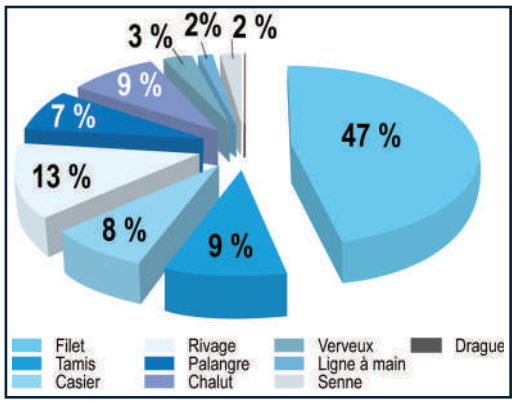


Figure 1 : *Nombre de mois d'activité des navires aquitains (données 2009).*

Des métiers parfois très anciens et/ou emblématiques sont pratiqués en Aquitaine tels que (par ordre alphabétique) le balai à crevette, la bolinche à anchois, le chalut à céteau, les filets maillants dérivants pour les captures de lamproies marines et d'aloses, de maigres ou encore de saumons, le filet à seiche, la palangre à merlu, la pêche de thonidés à l'appât vivant et le tamis à civelle.

La flottille de pêche est très dépendante du milieu côtier puisque près de 80 % des unités exercent une activité dans un rayon d'action inférieur à 12 milles, 16 % des navires à l'extérieur et 5 % opèrent à la fois « en côtier » et plus au large. Au niveau des captures totales, sur les quelques 15 000 tonnes d'apports annuels, un tiers provient de la zone CIEM VIIIB qui comprend notamment les estuaires de la Gironde et de l'Adour dans leur partie maritime, le bassin d'Arcachon et le plateau jusqu'à l'isobathe des 200 m au large de la côte d'Aquitaine **(Figure 2)**.

Les principales espèces capturées dans le VIIIB sont présentées dans le **Tableau 2**. Les captures de bivalves, palourdes et moules, sont intégralement réalisées dans le bassin d'Arcachon. Plus au large, les captures concernent surtout les thonidés (thon blanc – *Thunnus alalunga* et thon rouge – *Thunnus thynnus*), les baudroies (baudroie blanche ou commune – *Lophius piscatorius* et baudroie noire ou rousse – *Lophius budegassa*), le merlu européen ou commun (*Merluccius merluccius*) et les cardines (*Lepidorhombus spp*).

Parmi les espèces principales, et mis à part le cas des amphihalins (anguille stade civelle et lamproie marine), les espèces présentant une forte saisonnalité des captures sont essentiellement pélagiques[3] (maquereau commun, thon blanc, thon rouge) et démersales[4] (dorade royale – *Sparus aurata*, maigre commun).

3. Qualifie une espèce, des individus vivant en pleine eau [13].
4. Qualifie une espèce qui vit près des fonds marins tout en pouvant les quitter ponctuellement.

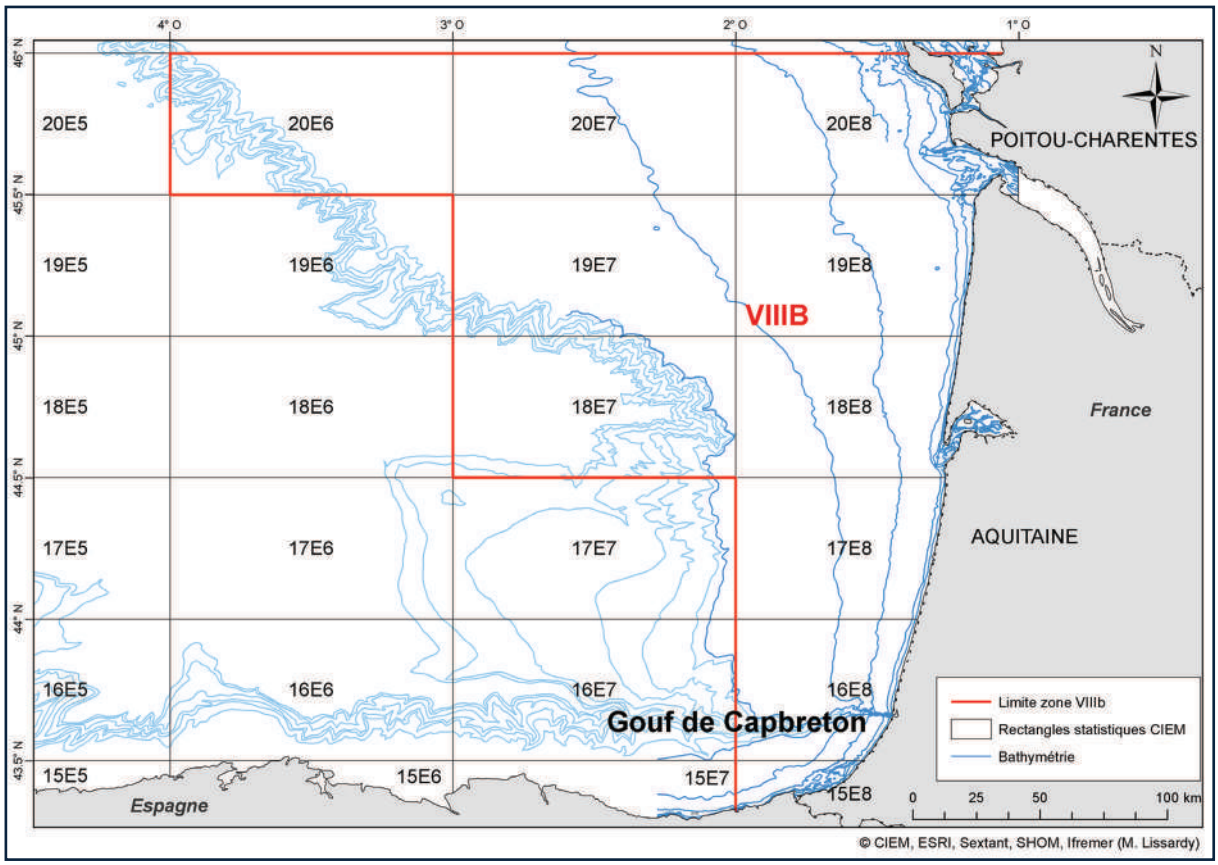


Figure 2 : *Découpage de la zone CIEM VIIIB au large de l'Aquitaine.*

En poids	Merlu commun (*Merluccius merluccius*), maquereau commun (*Scomber scombrus*), palourde japonaise (*Venerupis philippinarum*), sole commune (*Solea solea*), chinchards d'Europe (*Trachurus spp*), baudroies d'Europe, lamproie marine (*Petromyzon marinus*), bar commun (*Dicentrarchus labrax*), sardine commune (*Sardina pilchardus*), calmars (*Loliginidés essentiellement*) + algue rouge (*Gelidium corneum*)
En valeur	Sole commune, merlu commun, lamproie marine, palourde japonaise, bar commun, anguille européenne (*Anguilla anguilla*) au stade civelle essentiellement, baudroies d'Europe, crevettes (Palémonidés essentiellement), maigre commun (*Argyrosomus regius*), maquereau commun

Tableau 2 : *Les 10 principales espèces (ou groupes d'espèces) capturées dans la zone CIEM VIIIB en poids et en valeur estimée (données 2009).*

Les activités de pêche estuarienne (espèces amphihalines)

Parmi les espèces halieutiques qui peuvent être largement impactées par le changement climatique, figurent les espèces amphihalines dont une grande diversité est présente en Aquitaine. Elles ont une forte valeur patrimoniale et sont exploitées par des pêches commerciale et de loisir [4][5][6][7][8] : saumon atlantique (*Salmo salar*), truite de mer (*Salmo trutta*), grande alose (*Alosa alosa*), alose feinte (*Alosa fallax*), lamproie marine (*Petromyzon marinus*), lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*), anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Le bassin de la Gironde est le seul en France où l'on peut encore rencontrer à l'état sauvage l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*) que l'on trouvait également dans l'Adour jusqu'au milieu du XX^{e} siècle [9]. Trois espèces supplémentaires sont exploitées par la pêcherie et peuvent être considérées comme de « petits migrateurs amphihalins ». Il s'agit du flet (*Plathychtys flesus*), du mulet porc (*Liza ramada*) et de l'éperlan (*Osmerus eperlanus*). Cette dernière espèce a déjà subi de plein fouet les effets du réchauffement depuis les années 1950 [10] et a disparu de l'estuaire de la Gironde au cours des 15 dernières années. La plupart de ces espèces sont anadromes ; elles remontent les rivières pour se reproduire. L'anguille européenne, le flet et le mulet sont des espèces dites catadromes et migrent dans le milieu marin pour assurer leurs reproductions [11].

Ces espèces migratrices ont subi au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle une forte pression anthropique [12] avec une fragmentation importante de leurs habitats, une perte de milieux essentiels pour la reproduction (cas de la grande alose, des salmonidés migrateurs, de l'esturgeon), une diminution des surfaces d'accueil en partie basse des estuaires (cas de l'anguille, du flet et du mulet) ou en partie haute pour les salmonidés migrateurs (saumon et truite de mer).

Les effets de ces pertes de milieux ont été amplifiés par la contamination des cours d'eau (par les PCB, des contaminations polymétalliques notamment), par la dégradation de la qualité des estuaires à certaines saisons (hypoxie), par la chenalisation des cours inférieurs des bassins versants, par le ralentissement ou le blocage des migrations de montaison ou d'avalaison. Cela a provoqué une diminution très forte de l'abondance de ces espèces emblématiques et de leurs capacités de résilience [14][15][16]. Compte tenu des objectifs de Johannesburg en 2002 (convergence vers l'objectif du Rendement Maximal Durable pour 2015), la durabilité de la pêche ne peut être dissociée pour ces populations ichtyologiques de la régulation des autres usages qui impactent la productivité et la résilience des écosystèmes littoraux, estuariens et continentaux [17][18][19]. La surexploitation des populations halieutiques constitue un facteur aggravant aux possibilités d'adaptation de ces populations aux effets du changement climatique [20][21].

Du point de vue de l'activité halieutique et de l'état des stocks de poissons amphihalins, la situation actuelle est plus que préoccupante. Les salmonidés migrateurs remontent les bassins versants de la Gironde-Garonne-Dordogne et de l'Adour, mais leurs pêches professionnelles ou de loisirs ne sont permises que sur le bassin de l'Adour et des Gaves [22]. Les captures d'aloses ont fortement décliné sur le bassin de l'Adour et la pêche a été arrêtée sur celui de la Gironde en 2008 [22][23]. La pêche de l'anguille européenne est fortement contrainte par la mise en place d'une réglementation européenne et l'interdiction d'exportation des civelles sur le marché asiatique suite à une décision de la CITES[5]. Par voie de conséquence, la valeur de la pêcherie civellière s'est effondrée depuis 2005 passant, au niveau national, de 85 à 6 millions d'euros actuellement [24]. Les concentrations en PCB dans les tissus de l'anguille ont amené les autorités sanitaires à interdire la commercialisation de l'anguille dans certains secteurs de la Garonne et de l'Adour [25][26].

L'ostréiculture en Aquitaine

L'Aquitaine est également une région ostréicole avec comme principale zone de production, le bassin d'Arcachon (732 ha de concessions en 2009) [27]. La production annuelle se situe autour de 8 000 t, ce qui représente environ 7 % de la production nationale. Les caractéristiques finales du produit sont dépendantes du travail de l'ostréiculteur (précocité du détroquage, fréquence de manipulation des poches, tris) et des conditions environnementales (températures, floraisons phytoplanctoniques, matière particulaire en suspension, stocks d'huîtres…). À plus petite échelle, le lac d'Hossegor dispose aussi de quelques parcs ostréicoles.

Le bassin d'Arcachon intervient par ailleurs, avec le bassin de Marennes Oléron, de manière prépondérante au plan national dans l'approvisionnement en naissains d'huître creuse issus du captage naturel. Les facteurs environnementaux (en particulier la température) jouent un rôle prépondérant dans le bon déroulement de ce captage [28].

Depuis 2008, le bassin d'Arcachon et le lac d'Hossegor sont concernés par les épisodes de mortalités d'huîtres creuses qui touchent l'ensemble des bassins ostréicoles français et certains pays européens. Ils se manifestent par des mortalités massives (40 à 100 %) chez les jeunes individus et sont attribués à la combinaison de facteurs défavorables avec la présence d'agents infectieux. Le « microvariant » de l'herpès-virus OsHV-1 apparaît comme jouant un rôle prépondérant dans les épisodes rapportés.

5. CITES : Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction.

II- Les habitats essentiels de la zone CIEM « VIIIB » pour les espèces exploitées

Les espèces exploitées ont des cycles de vie complexes (œuf, larve, juvénile, adulte) et ces différents stades ontogéniques[6] peuvent requérir des habitats spécifiques. Alors que ces habitats et leur connectivité sont des éléments déterminants pour le bon déroulement du cycle de ces espèces ; ils peuvent être tous deux affectés par le changement climatique [29]. En faisant référence aux travaux du projet BEEST, les fonctions de ces habitats peuvent être distinguées en différentes zones : d'alimentation, de refuge, de nourricerie[7], de transit ou de reproduction. Pour ces habitats essentiels (également appelés habitats clés), les notions d'existence, de disponibilité et d'accessibilité sont des critères d'intérêt sur le plan fonctionnel [30].

L'Aquitaine compte certains de ces habitats essentiels pour les principales espèces exploitées dans le VIIIB **(Figure 2)** ; ces derniers sont présentés en fonction de leur localisation dans le **Tableau 3**.

	Estuaire Gironde	Estuaire Adour	Étangs	Bassin d'Arcachon	Côte/Plateau	Talus
Sole commune	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie Reproduction	
Merlu européen					Alimentation des 3 ans et plus	Reproduction
Lamproie marine	Transit	Transit			Alimentation	
Palourde japonaise			Intégralité du cycle de vie	Intégralité du cycle de vie		
Bar commun	Nourricerie Refuge	Nourricerie Refuge	Nourricerie	Nourricerie Refuge	Reproduction	
Anguille européenne (stade civelle)	Transit Nourricerie	Transit Nourricerie	Nourricerie	Alimentation Nourricerie Transit	Transit	Transit
Baudroies d'Europe					Reproduction	Alimentation
Maigre commun	Reproduction Nourricerie				Nourricerie	
Maquereau commun					Reproduction	Reproduction
Huîtres				Intégralité du cycle de vie		

Tableau 3 : *Habitats essentiels localisés en Aquitaine pour les espèces principales capturées dans le VIIIB.*

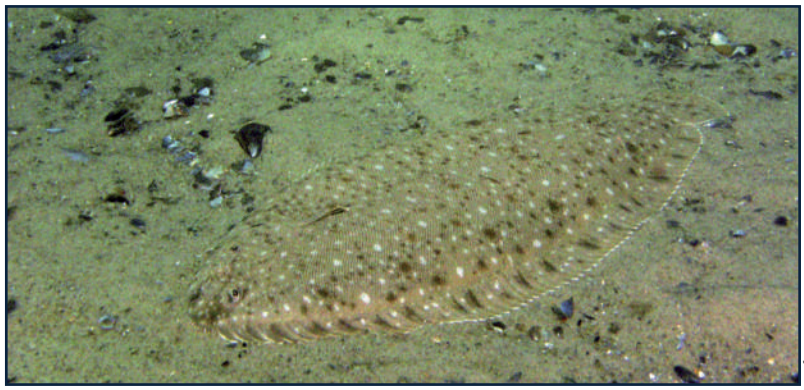
Les habitats côtiers et estuariens jouent, pour bon nombre d'espèces exploitées sur le plateau continental, un rôle déterminant car il s'agit de zone de reproduction et/ou de nourricerie. Dans certains cas, des espèces réalisent l'ensemble de leur cycle dans un seul et même habitat (cas des bivalves par exemple). Certaines espèces euryhalines peuvent pénétrer très loin à l'intérieur des estuaires dans des eaux de très faibles salinités [23][31]. L'importance relative de ces différents habitats pour chacune des espèces n'est pas présentée ici ; leur hiérarchisation tenant compte à la fois des surfaces maritimes concernées mais aussi de l'importance de la zone pour le bon déroulement du cycle biologique.

6. Relatif au développement de l'animal, de la fécondation de l'œuf à l'état adulte.
7. Zone dans laquelle les juvéniles d'une espèce se concentrent pour se nourrir.

III- Impact du changement climatique sur les poissons marins

Pour chaque espèce commerciale, sont pris en compte les impacts observés et attendus (nourricerie, reproduction). D'une manière générale, en ce qui concerne les espèces de poissons à pontes pélagiques (majorité des espèces exploitées) recensées dans la partie méridionale du golfe (une soixantaine de taxons), l'impact se fera vraisemblablement ressentir sur le maximum d'abondance des œufs (centré en février) et celui des larves (en juin). On assiste, depuis une dizaine d'années, à un étalement des pontes sur l'année entière avec une pérennisation du compartiment ichthyoplanctonique [32].

Sole commune



© M.N. de Casamajor

Mature entre 3 et 5 ans, la sole commune se reproduit dans le golfe de Gascogne sur des profondeurs comprises entre 60 et 80 m, de janvier à avril et à une température voisine de 8-9 °C [33]. Sur l'ensemble des zones de ponte de l'Atlantique Nord-Est, un décalage temporel est observé et ce, d'autant plus que la latitude de la zone augmente. Un effet de la température a été observé dans le cas de la Mer du Nord avec une période de ponte avancée par rapport à la moyenne en cas d'année chaude [34]. Pour cette zone, les fluctuations de la température ne semblent pas influencer la croissance des individus les plus âgés ; les facteurs corrélés étant l'abondance de la population, l'eutrophisation et la pêche [35].

À la différence d'autres stocks européens de sole, et même d'autres espèces de poissons, le stock du golfe de Gascogne présente des variations du taux de recrutement[8] limitées [36][37], avec dans le cas des travaux les plus récents, un coefficient de variation de 24 établit sur 13 campagnes scientifiques. L'explication avancée est la durée limitée des jeunes stades pélagiques (œufs et larves) qui sont, d'après Van der Veer *et al.* [38], considérés comme des facteurs prépondérants pour expliquer cette variabilité chez les poissons plats.

Cependant, les travaux de Le Pape *et al.* [37] ont montré que dans le golfe de Gascogne, le débit des rivières peut être un facteur positif influant fortement sur l'abondance des jeunes soles pour certaines nourriceries estuariennes (démontré dans le cas de la Vilaine). Pour l'Aquitaine, alors que pour la période hivernale, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'évolution des débits des rivières, la diminution attendue des débits aux cours des périodes d'étiages pourrait avoir un impact négatif sur les zones de nourriceries (estuaires de la Gironde et de l'Adour). Ces effets à l'échelle régionale seront à replacer par rapport aux effets des modifications hydriques sur les autres zones de nourriceries de ce stock. Pour l'instant, et à l'échelle du golfe de Gascogne, il n'a pas été mis en évidence de relations entre les débits des rivières et le recrutement [39].

Concernant l'effet de la température sur le recrutement, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de connaissance potentiellement transférable à l'Aquitaine puisque des effets divergents ont été observés : un effet négatif dans le cas de la Mer du Nord ; un effet positif dans le cas du Canal de Bristol [40][41]. Pour des espèces de poissons plats présentant une large répartition autour du golfe de Gascogne, des travaux récents ont mis en évidence des corrélations entre les abondances de ces espèces et l'augmentation de la température [42]. Pour les espèces boréales, l'abondance décroît dans le golfe alors que pour les espèces méridionales elle augmente. Le recrutement apparaît comme le principal processus impacté. Dans le

8. Le nombre de jeunes entrant dans le stock chaque année.

golfe de Gascogne, la sole commune se situe au centre de son aire de répartition (latitude moyenne 44,5°N) ; les travaux effectués n'ont pas permis de dégager une tendance nette concernant l'évolution de cette répartition. Un effet de la température a par ailleurs été mis en évidence, pour la Mer du Nord, avec une augmentation de la longueur de la sole commune à la fin de la première année de son cycle, liée à l'augmentation de la température [34].

Bar commun


© M.N. de Casamajor

Le bar commun fréquente les zones d'estuaires, le bassin d'Arcachon et les étangs au stade juvénile essentiellement. Adulte, il peut également fréquenter ces zones, mais de manière plus sporadique. Cette espèce est caractérisée par un comportement grégaire surtout dans sa phase juvénile, il est capable de supporter d'importantes variations de salinité et de température (2 °C à 32 °C). Sa croissance au stade juvénile (mais également au stade adulte) est cependant marquée par une forte saisonnalité liée à la température (pas d'alimentation en dessous de 7 °C et/ou migration au large et en profondeur). Sur les zones de nourricerie, les jeunes s'alimentent essentiellement de crustacés [43] avec un comportement décrit comme généraliste et opportuniste. Les travaux de Lafaille *et al.* [44] ont, par ailleurs, mis en évidence le rôle fondamental des productions primaires et secondaires des zones de marais salants sur l'alimentation des jeunes individus.

Le fonctionnement des zones de nourriceries dépend fortement de leur localisation géographique [45]. Par comparaison avec des écosystèmes plus septentrionaux, il semble que les nourriceries méridionales de juvéniles de bar commun soient fréquentées plus longtemps (au-delà de la fin d'été), permettant ainsi d'augmenter la période de croissance. Une évolution dans ce sens pourrait être observée pour l'Aquitaine.

Maigre commun

Le maigre est un poisson semi-pélagique côtier dont les adultes, après s'être regroupés dans les eaux côtières basques ou landaises en avril [46], remontent vers le nord pour se reproduire dans l'estuaire de la Gironde de mi-mai à juillet[9]. Il est aussi présent dans l'estuaire pour se nourrir au stade juvénile d'avril-mai à novembre-décembre. Lorsque les eaux se refroidissent, les juvéniles quittent l'estuaire. Ils se répartissent, principalement sur des profondeurs comprises entre 20 et 40 m des pertuis Charentais au bassin d'Arcachon, ne revenant pour certains dans l'estuaire que lorsque la température augmente. En dehors des périodes de ponte, la distribution des adultes s'étend principalement de la Vendée au Pays Basque [46][47]. En Aquitaine, une zone d'hivernage des adultes est signalée au sud, dans la zone d'influence du panache de l'Adour [47].

La température de l'eau serait ainsi le facteur déterminant des migrations trophiques et de la reproduction [46]. Concernant le succès de la reproduction, des travaux récents n'ont pas confirmé l'hypothèse de valeurs seuil [48] chez cette espèce eurytherme[10] qui supporte par ailleurs des variations importantes de salinité (euryhaline). La température est également importante pour la croissance avec une température optimale se situant entre 17 et 21 °C ([49] cité par [50]). En dessous de 13-15 °C, l'alimentation est considérablement ralentie. Pour les larves, une température supérieure à 20-21 °C est requise pour leur alimentation [48].

9. Pour la Gironde, la zone de frayère se situerait à partir des observations des pêcheurs entre Meschers et Mortagne-sur-Gironde dans la moitié droite de l'estuaire à proximité du banc des Marguerites [48].
10. Organismes capables de supporter sans dommage notable d'importantes et rapides modifications de la température du milieu extérieur.

Peu d'informations sont disponibles dans la littérature à propos d'un impact possible du changement climatique sur cette espèce. Le maigre fait partie des espèces méridionales pour lesquelles une augmentation de l'abondance a été décrite pour l'estuaire du Tage [51].

Maquereau commun et autres petits pélagiques

Le maquereau commun présent au large des côtes d'Aquitaine appartient au stock de maquereau de l'Atlantique Nord-Est. Le frai se déroule entre fin février et juin, sur le plateau continental (jusqu'à environ 120 m de profondeur) et à une température de 12-13 °C. Les pontes sont fractionnées, tout au long de la période de reproduction, ce qui est interprété comme une adaptation aux facteurs environnementaux changeant. De manière générale, chez les espèces pélagiques, la disponibilité en nourriture et les contraintes physiques comme la turbulence sont considérées comme prépondérantes pour la survie des larves et le recrutement [52][53].

Pour la population de la Mer du Nord, deux phénomènes ont été observés : un déplacement vers le nord des zones de pontes et d'alimentation, une précocité de la ponte et une augmentation de la variabilité du recrutement par rapport aux années antérieures [54]. Un effet de la température sur la distribution de cette population a été avancé. Jansen and Gislason [55] ont confirmé cette hypothèse. Ces résultats suggèrent qu'une augmentation de la température devrait affecter la période et l'importance de la croissance, du recrutement et de la migration pour cette population de la Mer du Nord. Pour la partie de la population de la Mer Celtique qui fréquente le nord des côtes espagnoles, pendant le frai, des effets négatifs de périodes de vents forts et des phénomènes d'advection sur la survie des larves ont été observés [56].

Pour le sud du golfe de Gascogne, Hémery *et al.* [57] ont mis en évidence une corrélation entre un descripteur d'abondance de maquereaux (*Scomber scombrus* et *Scomber japonicus*) issu de données de capture par la pêche (antérieures à 2000) et la variabilité climatique observée dans le sud-est du golfe synthétisé par l'index climatique multivarié SBC (Southern Biscay Climate index). Cette corrélation s'accompagne d'une tendance à la hausse du descripteur d'abondance.

Au côté du maquereau, l'anchois commun (*Engraulis encrasicolus*) est une autre espèce de petit pélagique qui est présent sur le plateau continental aquitain (jusqu'à - 150 m) et dans la zone côtière (au printemps). La pêche a été interrompue entre juillet 2005 et mars 2010 en raison de l'état préoccupant du stock ; ceci alors qu'elle représentait une part très importante du chiffre d'affaires des chalutiers pélagiques et des bolincheurs aquitains. De nombreux travaux ont montré la sensibilité de cette population aux variations climatiques, subissant les effets du pattern de l'Atlantique Est [58], de l'upwelling (*ibid.*), de la turbulence [59][60], du débit des fleuves [61] et du transport d'Ekman [62]. Pour cette espèce, les travaux d'Hémery *et al.* [57], Castège *et al.* [63] et Castège et Hémery [64] n'ont pas mis en évidence de corrélation du descripteur d'abondance avec l'index climatique SBC.

Baudroies d'Europe

Deux espèces sont exploitées par les pêcheurs professionnels aquitains : la baudroie blanche ou commune (*Lophius piscatorius*) et la baudroie noire ou rousse (*Lophius budegassa*). Chez la baudroie commune, les jeunes effectueraient des migrations depuis les accores vers le littoral entre le printemps et l'hiver (- 200 m à - 70 m) alors que chez la baudroie rousse, les déplacements seraient plus limités (- 200 m à - 110 m). La plupart des grands individus vivent entre - 600 et - 900 m. Plusieurs périodes de pontes ont été décrites pour la baudroie commune dans le golfe de Gascogne : mai-juin et novembre-décembre sur des fonds de - 160 m à - 200 m. Espèces à comportement bathydémersal (après une phase larvaire pélagique d'une centaine de jours), le régime alimentaire des adultes est essentiellement composé de poissons (tacauds, chinchards, fausses limandes, soles-perdrix…) voire de céphalopodes et de crustacés.

En raison des connaissances limitées sur la biologie de ces espèces, il n'est actuellement pas possible de présenter des effets constatés ou attendus du changement climatique sur ces dernières. Peu de travaux existent à l'image de ceux menés sur la baudroie commune en Mer du Nord qui décrivent un déplacement de la distribution vers le Nord concomitante (mais non significative) d'une augmentation de la température hivernale [65]. Pour cette même espèce, et pour le plateau Celtique, une septentrionalisation de l'aire de répartition avait auparavant été posée en hypothèse par Gaertner [66].

Merlu commun

Le merlu commun, poisson démersal, effectue des migrations entre la côte et le large qui sont fonction de l'âge et de la saison. Les deux premières années, les juvéniles sont rassemblés sur les vasières. Pour le stock Nord (qui concerne le merlu présent au large de nos côtes), les plus importantes zones de nourriceries sont situées dans le golfe de Gascogne : Grande Vasière depuis Penmarc'h jusqu'au plateau de Rochebonne (- 80 à -120 m), vasière de la Gironde et, plus secondairement, vasière au large des Landes [8]. Au printemps de la troisième année, ils migrent vers la côte pour ensuite se disperser sur tout le plateau continental à l'automne [67]. Les individus les plus âgés recherchent des profondeurs plus importantes et se déplacent vers le nord après le printemps. Les zones de canyons et de fonds rocheux au niveau du talus continental constituent des zones de concentration d'adultes [68]. Pour l'Aquitaine, des captures importantes sont réalisées à la palangre sur la zone du gouf de Capbreton [69].

Pour l'Atlantique Nord-Est, la température apparaît comme un facteur prépondérant dans la détermination de la saison de ponte ; Alvarez *et al.* [70] rappelant que pour le golfe de Gascogne l'occurrence d'œufs est associée à des eaux de surface de température comprise entre 10 et 12,5 °C. Les travaux de Fernandes *et al.* [71] ont mis en évidence l'influence de la turbulence et de la température sur la phase de recrutement de cette espèce. La distribution et la taille des zones de concentration des recrues semblent influencées par la production primaire [68].

À l'échelle du golfe de Gascogne et à partir de campagnes de chalutages de fond, les travaux de Persohn *et al.* [72] ne mettent pas en évidence de relation entre les variations de la distribution de juvéniles de merlu et les températures de fond enregistrées pendant les campagnes. À partir d'autres données (captures des professionnels) et pour la zone sud du golfe, les travaux d'Hémery *et al.* [57] et Castège et Hémery [64] indiquent une corrélation du descripteur d'abondance de merlu avec l'index climatique SBC. Pour la période considérée, cette relation s'accompagne d'une diminution des débarquements chez le merlu.

Thon rouge et thon blanc

Le thon rouge, grand poisson pélagique, effectue une migration annuelle durant les mois d'été dans le golfe de Gascogne. Il y est présent, et traditionnellement exploité par la pêche à l'appât vivant, à proximité du talus continental. Il est par ailleurs exploité par les chalutiers pélagiques français. L'anchois juvénile constitue une proie essentielle pour les jeunes thons rouges dans le golfe de Gascogne, cette proie représentant plus de 95 % de leur alimentation d'août à l'automne [73]. Après une phase larvaire au niveau du plateau continental, les anchois juvéniles sont habituellement présents à partir d'août au-delà du plateau, où ils font l'objet de la prédation par les thons rouges. Les fluctuations d'abondance de l'anchois peuvent donc impacter la constitution de réserves d'énergie et la croissance des jeunes thons, comme cela a pu être observé pour les individus de 1 an – au fort taux de croissance – lors d'années de faible recrutement de l'anchois [74]. La variabilité climatique, si elle n'a pas d'effet direct mesuré, à l'heure actuelle, sur le thon rouge présent dans le golfe de Gascogne, peut donc avoir un effet indirect, par le biais des variations de l'abondance et de la distribution spatiale de l'anchois.

Si le golfe de Gascogne constitue une aire d'alimentation estivale bien connue pour cette espèce, il est également une zone d'hivernage, partiel ou total, pour une partie des immatures, comme l'ont montré des travaux récents menés par marquage électronique [75].

Parmi les poissons migrateurs présents dans le golfe de Gascogne en période estivale, le germon (thon blanc) subit quant à lui l'influence de la NAO sur son recrutement [76]. Cette influence serait d'ailleurs une des causes du déclin des captures de germons depuis les années 1960 [77][78], l'ordre de grandeur des niveaux observés depuis la fin des années 1980 étant inférieur de moitié à celui des années 1960. Outre une influence sur le recrutement, la NAO pourrait induire dans le golfe de Gascogne des anomalies thermiques pouvant affecter la capturabilité des germons [77]. En termes d'habitat vertical, l'effet de l'ensoleillement et de l'agitation de la mer dans le golfe de Gascogne a été mis en évidence pour certaines classes d'âge [79]. La variabilité du climat influence également la précocité des migrations saisonnières du germon et du thon rouge vers le golfe de Gascogne [80], de même que la latitude moyenne de la distribution estivale du germon (*ibid.*). Les causes de la récente raréfaction du germon dans ses zones de pêche traditionnelles du golfe de Gascogne ne sont pas encore démontrées, mais la question de l'effet de facteurs océano-climatiques sur la longitude de sa distribution peut être posée.

IV- Impact du changement climatique sur les migrateurs amphihalins

De manière globale, il est prévu, sous l'effet du changement climatique, la contraction de l'aire de répartition de 14 espèces de migrateurs amphihalins européens sur les 22 répertoriées à l'horizon 2100 [81]. Les évolutions projetées sont différentes selon les espèces : *1) Alosa fallax* devrait s'étendre au Nord et à l'Est de son aire de répartition telle qu'observée en 1900 ; *2) Anguilla anguilla* devrait voir son abondance augmentée en Méditerranée autour de la mer Noire et en mer Égée ainsi qu'en Scandinavie ; *3) Petromyzon marinus* devrait être assez sensible au changement climatique avec une diminution modérée à forte de son abondance dans le golfe de Gascogne ; *4) Salmo salar* ne devrait plus coloniser certains bassins du sud de la France ; *5) Alosa alosa* devrait subir une forte diminution de son abondance dans le sud de son aire de répartition incluant le Maroc, le Portugal, l'Espagne et la France. L'étude mentionnée [81] met en avant l'importance d'une échelle d'analyse plus locale afin d'intégrer les effets des pressions anthropiques sur l'évolution de ces populations sous pression climatique.

Si l'on excepte l'éperlan [10], peu de travaux ont été faits sur les autres espèces amphihalines pour ce qui concerne l'impact du changement climatique sur leur survie et leur comportement dans les eaux marines. Cependant on peut supposer que des clupéidés comme la grande alose ou l'alose feinte seront, aux stades jeunes, fortement impactées par les changements phénologiques de différents groupes fonctionnels planctoniques, avec des risques de désynchronisation des interactions biologiques [2]. De même, l'anguille véhiculée au stade leptocéphale par le Gulf Stream et la dérive Nord-Atlantique risque d'être affectée par une modification de la circulation thermo-haline [14].

Comme précédemment, pour chaque espèce commerciale, sont présentés un descriptif succinct ainsi que les impacts observés et attendus.

Saumon atlantique

Cette espèce anadrome (*Salmo salar*), se reproduit au cours de l'hiver (décembre-janvier), avec une phase de croissance en eau douce de 1 à 2 années, une phase de croissance marine de 1 ou 3 années (rarement 4). C'est une espèce territoriale dont la survie des œufs et des larves est liée à la perméabilité des zones de gravière. L'accessibilité aux zones les plus hautes (et de meilleures qualités) est fonction de la libre circulation des géniteurs (obstacles équipés de passes alimentées en eau). En estuaire, des bouchons thermiques peuvent différer les remontées de certaines catégories de saumons remontant pendant la période estivale surtout si ceux-ci sont associés à des eaux chargées en matières organiques.

Les effets des variations des températures marine et continentale ou des débits sur la croissance, l'âge de première maturité des populations de saumon atlantique dans l'Atlantique Nord-Est et en mers du

Nord et de Norvège sont bien documentés [82][83][84][85][86]. Par extension, l'influence du changement climatique sur ces deux variables est analysée sur des séries longues depuis au moins 3 ou 4 décennies.

Une augmentation de la température marine coïncide avec une meilleure croissance des post-smolts aboutissant à une augmentation de la proportion de saumons revenant après seulement 1 hiver de séjour en mer [85]. Cette augmentation de la température est reliée à la NAO (North Atlantic Oscillation). Ces variations climatiques coïncident également avec des variations de l'abondance du plancton : une augmentation de la NAO en hiver est liée à une élévation de la température en surface, un accroissement de la fréquence des fortes tempêtes et une déstructuration de la colonne d'eau qui impliquent une diminution de l'abondance des proies planctoniques et de leurs disponibilités pour les prédateurs comme les post-smolts de saumons [83]. Ces interactions entre effets climatiques et caractéristiques des stocks de saumons ne sont pas si simples ni linéaires [87] et mettent en jeu d'autres variables telles que les caractéristiques de la rivière de production des juvéniles (longueur et débit) et du positionnement en latitude du bassin-versant [88].

En France, les principaux stocks de saumon atlantique ont été décrits avec précision et la variabilité des structures en âge, taille et sex-ratio des populations ont été précisées [89][90][91][92][93][94]. Une relation entre la structure en âge et la taille des géniteurs a été observée, confortant en cela l'hypothèse d'Elson et Schaffer [95] reliant l'abondance des saumons de plusieurs hivers de mer à l'éloignement des zones de frayères et donc à la taille de la rivière [94]. L'évolution des populations du bassin des Gaves au cours du XX^{e} siècle, parallèlement à l'édification de barrages interdisant la reproduction sur les cours supérieurs de ce bassin, s'est caractérisée par une diminution des saumons ayant séjourné plusieurs hivers en mer [96]. L'influence de la température sur la croissance des juvéniles et leur âge de moltification a été également mise en évidence [89]. Des travaux récents effectués en Bretagne montrent des effets conjugués de la température de l'eau et des densités de salmonidés migrateurs sur les croissances des juvéniles de saumons et signalent l'effet prépondérant sur la croissance des variations de densités plutôt que celles de la température liées à un changement climatique [97]. Ils notent également l'accroissement des *grilses* (saumons d'un hiver de mer) lié à l'augmentation du réchauffement climatique (augmentation de la vitesse de croissance en eau douce entraînant une maturation précoce des saumons en mer). Des études sur les populations de saumon atlantique en limite sud de leurs aires de répartition (Cantabrique et Pays Basque) montrent des effets du changement climatique sur l'accroissement du taux de divagation des saumons avec un mélange de populations entre rivières proches et un taux de maturation précoce chez les *parr* mâles [98].

Le calendrier des périodes à forte probabilité d'hypoxies et d'anoxies en Gironde tel qu'actuellement observé [99] peut perturber physiologiquement la montée des grands migrateurs non seulement le saumon, mais également la truite de mer. L'augmentation de la température, l'intrusion saline liée à la montée du niveau de la mer, la diminution des débits printaniers et estivaux devraient accroître à la fois la longueur de cette période critique et les fréquences d'apparition d'épisodes hypoxiques et anoxiques qui influent sur la physiologie de ces espèces et leurs comportements de migration.

Sur l'Adour inférieur, estuaire sans bouchon vaseux, le niveau des températures déjà observé en été (juillet à septembre) est situé entre 20 et 25 °C en moyenne. Des migrations de saumons ont été observées dans l'estuaire de l'Adour à des températures supérieures à 20 °C, mais les remontées de saumons cessent généralement en août, mois où les températures journalières approchent les 25 °C [100]. L'accroissement de la température dans l'estuaire au moment de la remontée des saumons d'un hiver de mer en début d'été pourrait ralentir leur pénétration et prolonger leur temps de résidence en zone littorale et côtière basco-landaise où ils peuvent être capturés par les filets côtiers [101].

Sur la Garonne, l'augmentation des températures, la diminution des débits pourraient affecter la vitesse de remontée des saumons. Signalons que, de plus en plus ces dernières années, des autorisations

exceptionnelles de rejets d'eau de refroidissement des centrales nucléaires sont données pour permettre le relâcher d'eau à des températures supérieures à 28 °C : 14 jours à Golfech en 2003 et 19 jours en 2006 [102]. Les frayères naturelles sont situées au-delà de Toulouse dans les parties supérieures de la Garonne, mais la ponte pourrait être affectée par le réchauffement climatique. Cela pourrait modifier la durée de la fenêtre de ponte qui se situe dans une période où les températures de l'eau sont comprises entre 3 et 12 °C sous nos latitudes. Notons qu'au cours de ces 20 dernières années, la probabilité d'avoir des températures supérieures à 11,5 °C durant la période de reproduction de l'espèce est passée de 4 à 11 %. En outre, les maxima journaliers égaux ou supérieurs à cette limite haute créant un stress physiologique inhibiteur affectent 60 % des jours de la période de reproduction [103].

Sur le bassin des Gaves, les risques pour la reproduction de l'espèce sont moindres compte tenu des cours d'eau aux débits spécifiques plus soutenus [104] et à des régimes alimentés en partie par des eaux de fonte de neige (régime nival). Cela nécessite, cependant, le maintien de la libre circulation des migrateurs vers les cours supérieurs des Gaves et le respect des DOE (Débits Objectifs d'Étiages permettant d'assurer le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques) pour l'alimentation suffisante des passes à grands migrateurs sur les cours inférieurs et moyens des Gaves afin que le maximum de reproduction puisse se faire sur les frayères des cours supérieurs pour limiter l'effet du réchauffement climatique [105].

Pour les espèces anadromes comme les salmonidés migrateurs et les aloses (cf. ci-après), une des phases critiques de leurs cycles de vie est constituée par le changement de milieu et les premiers mois de vie marine [82].

Des modifications concomitantes entre les anomalies de températures de l'hémisphère Nord et les changements de dominance du phytoplancton, zooplancton et de certaines espèces de poissons (dont le saumon) à l'échelle de l'Océan Atlantique Nord-Est, ont été montrées. Une diminution des prises de saumons autour des îles britanniques est ainsi notée parallèlement à l'accroissement des températures et de la diminution du copépode subarctique : *Calanus finmarchicus* [106]. La raréfaction de ce copépode correspond à une migration rapide vers le Nord du zooplancton entre les latitudes correspondant au sud du golfe de Gascogne et à l'Islande [107].

Cette diminution du plancton reliée à l'accroissement de la NAO est également associée à une survie moindre des jeunes saumons atlantiques issus des rivières irlandaises [83]. La relation entre l'importance de l'espèce *Calanus finmarchicus* et la survie des saumons serait indirecte car ces copépodes sont retrouvés en faible proportion dans le bol alimentaire des saumons au stade post-smolts [108].

Ceci met en lumière, la complexité des mécanismes que le changement climatique induit au niveau océanique avec des effets de contrôle du type bottom-up[11] [109] et sans relation simple entre la fluctuation de la NAO et l'abondance des stocks de saumon atlantique [87].

Aloses (grande alose, alose feinte)

Deux espèces sont exploitées (grande alose, *Alosa alosa*, et alose feinte, *Alosa fallax*), avec une migration génésique[12] qui se fait entre les mois de mars et de juin, périodes où elles sont capturées en estuaire. La reproduction de l'alose feinte a lieu dans des zones situées plus en aval que celles choisies par la grande alose. Elle est plus précoce : début mai pour l'alose feinte jusqu'à juillet et début juin pour la grande alose. L'âge des reproducteurs varie principalement entre 4 et 7 ans pour la grande alose et 3 et 8 ans pour l'alose feinte. Les juvéniles naissent en plein été et restent en estuaire 5 à 7 mois environ, ou y transitent (grande alose) avec une migration principale à l'automne pour les deux espèces. La phase de croissance est plutôt côtière, mais l'alose feinte semble faire des allers et retours entre les zones estuariennes et littorales.

11. Selon un principe ascendant.
12. Migration de retour vers les zones de reproduction.

Comme pour tous les clupéidés, la survie des jeunes est dépendante de facteurs environnementaux qui jouent sur la phénologie des communautés planctoniques. La production de grande alose est liée à la disponibilité de frayères fonctionnelles qui ont été sur la Garonne comme sur l'Adour fortement perturbées ou détruites par l'extraction de granulats dans les lits des rivières.

Pour la grande alose et l'alose feinte, on note pour la Gironde, les mêmes perspectives de blocage des migrations des géniteurs en zone estuarienne [110] au moins pendant la période estivale compte tenu des conditions d'hypoxies et d'anoxies actuellement constatées ou prévisibles. La dévalaison des juvéniles des deux espèces pourrait être perturbée voire différée compte tenu de conditions encore très critiques en oxygénation que l'on peut rencontrer au mois d'août et en début d'automne. Cette période correspond au séjour estuarien des juvéniles d'alose feinte avant leur migration marine et au transit estuarien des juvéniles de grande alose vers la mer [111].

Pour le bassin de l'Adour, les phases de migration génésique et de dévalaison des juvéniles ne devraient pas être trop affectées (pas de bouchon vaseux ni de déficit d'oxygénation répertoriés actuellement). Leur présence est détectée dans le bas estuaire, près de l'embouchure, dès le mois de juillet pour l'alose feinte et de novembre à décembre pour la grande alose dans l'estuaire maritime [112], zones où les températures devraient rester compatibles à la survie de ces populations, même après élévation thermique.

La reproduction de ces espèces se fait dans les cours moyens des bassins versants de la Dordogne [113], de la Garonne [114] ou de l'Adour et des Gaves [115], l'alose feinte frayant sur des zones plus en aval comme c'est le cas sur la Dordogne ou la Garonne [116].

Le croisement des informations concernant l'évolution des débits, des températures et des prélèvements en eau particulièrement sur les corridors de la Garonne et de l'Adour, déjà caractérisés par des situations très critiques en matière de respect des DOE [117], laisse augurer non pour la reproduction (des *bulls* de grande alose ont été observés à des températures de 25 °C [115]), mais pour la survie des alevins des deux espèces, des conditions probablement préjudiciables à leur maintien. La situation ne devrait pas être aussi délicate sur le bassin des Gaves pour la grande alose avec des températures qui n'excèdent pas en août les 25 °C [115] et des débits plus soutenus.

Les juvéniles d'aloses, au moment de leur migration marine, sont très probablement dépendants de la structure de la chaîne trophique et de l'abondance et de la taille des proies. Les modifications induites par le changement climatique au niveau des productions primaire et secondaire provoquent des phénomènes de décalage (« mismatch ») [118] entre les pics de production des différents niveaux du réseau trophique. C'est une des causes de la variabilité du recrutement d'espèces comme la morue [119], mais aussi de clupéidés du golfe de Gascogne comme l'anchois [120]. Il est probable que les juvéniles d'aloses soient, comme tous clupéidés au stade jeune, fortement dépendants de la quantité et de la qualité des premiers maillons de la chaîne et très sensibles aux changements phénologiques [121].

Anguille européenne

La reproduction de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), se fait en mer des Sargasses en hiver. Les larves dites leptocéphales sont véhiculées par la circulation océanique *au prorata* des volumes circulants, son activité natatoire étant limitée. La vitesse de migration est de ce fait liée à la vitesse de la circulation thermo-haline dans l'Atlantique Nord. La dispersion des larves au moment de leur métamorphose en civelle à proximité du plateau continental est mal connue, mais il est probable que compte tenu des périodes principales de migration dans les estuaires, l'arrivée des leptocéphales au nord et au sud du golfe de Gascogne se fasse selon deux branches différentes de la dérive Nord-Atlantique. La durée de migration des leptocéphales est comprise entre 1 et 3 ans selon les auteurs et les sites

d'arrivée. La pénétration des civelles dans les estuaires se fait principalement entre le mois de novembre et le mois d'avril. Ce stade de pénétration lié aux conditions hydroclimatiques est suivi d'une phase de sédentarisation en partie basse des estuaires, puis de colonisation des bassins versants pendant laquelle l'anguille dite « jaune » va grossir durant 5 à 10 années environ sous nos latitudes. L'anguille jaune se transforme en anguille argentée et migre en automne, vers la mer, pour se reproduire.

Les eaux estuariennes et continentales constituent des zones de grossissement. La diminution des débits durant les périodes printanières et automnales dans les zones hydrologiques soumises à de forts prélèvements en eau et caractérisées par de nombreux obstacles plus ou moins franchissables, devrait aboutir à un ralentissement de la vitesse de diffusion des juvéniles vers les zones encore accessibles à cette espèce. Soulignons que les zones situées en amont des grands bassins versants produisent surtout des anguilles de grande taille qui sont en majorité des femelles [14].

De manière plus globale, c'est une espèce qui devrait être moins affectée par l'élévation de température [81], sous réserve de ne pas se trouver dans des tronçons hydrologiques déjà caractérisés par des épisodes longs d'hypoxies et d'anoxies : cas de l'estuaire de la Gironde par exemple [99].

Concernant la phase océanique, le changement climatique en affectant la circulation thermo-haline dans l'Atlantique Nord pourrait ainsi réduire de 30 % l'intensité du flux transocéanique [121] et allonger la durée de migration des larves leptocéphales, provoquant un accroissement de leur mortalité lorsqu'elles rejoignent leurs bassins de colonisation allant de la Mauritanie à la Baltique. La diminution de la disponibilité trophique pourrait être également une cause de mortalité pendant la migration transocéanique.

La montée du niveau de la mer telle qu'annoncée par l'IPCC se situerait en 2100 « entre 15 cm et 80 cm au-dessus de l'actuel » selon les scénarios du SRES (Special Reports on Emissions Scenarios), la valeur la plus probable étant de 44 cm [122]. L'augmentation du niveau de la mer devrait permettre d'accroître les surfaces des zones humides estuariennes dans la Gironde, mais l'intrusion marine risque fortement de déplacer le bouchon vaseux vers l'amont avec une augmentation de la consommation en oxygène, une solubilité moindre de l'oxygène liée à l'accroissement de température et une dilution plus faible des pollutions provenant des agglomérations par réduction des débits des bassins versants [123]. Cette conjonction de facteurs devrait rendre la productivité de cet écosystème estuarien moins favorable à la production d'anguille, même si celle-ci est assez résistante aux fortes températures et désoxygénations temporaires.

Lamproie marine

Sa reproduction a lieu dans les eaux douces en fin de printemps et en début d'été sur des gravières qui sont comparables à celles utilisées par les salmonidés migrateurs, mais situées plus à l'aval des bassins versants. Le cycle comprend une phase larvaire longue : larve ammocète qui est microphage et fichée dans la vase durant une période estimée, selon les zones de colonisation, entre 4 et 8 ans. Cette larve se transforme en lamproie qui gagne la mer, vers la fin de l'été, à une taille de 20 cm environ. La lamproie marine est un ectoparasite qui se fixe sur la paroi de grands vertébrés et reste en mer environ 2 années, puis revient pondre en eau douce. Aucun phénomène de homing (retour) n'est observé comme pour les salmonidés migrateurs ou les aloses.

V- Impact du changement climatique sur les bivalves et algues exploités

Palourde japonaise


© IRHA, Ifremer

Espèce introduite dans le bassin d'Arcachon à des fins de vénériculture dans les années 1980, la palourde japonaise s'est répandue dans le bassin où elle réalise désormais de manière naturelle l'ensemble de son cycle biologique et fait l'objet d'une exploitation par la pêche professionnelle et la pêche de loisir. Chez cette espèce, les facteurs environnementaux sont connus pour influencer fortement le déroulement des différentes phases ontogéniques. La température joue, en particulier, un rôle important notamment sur la ponte (température minimale 14 °C-[124]), le développement larvaire et le recrutement, la croissance (pas de croissance en dessous de 6 °C, croissance optimale estimée entre 12 et 20 °C sous nos latitudes-[125]). L'influence d'autres facteurs a également été mise en évidence par différents auteurs dans le monde, comme les ressources trophiques, la nature du sédiment, l'oxygène, la salinité, les courants…

Concernant l'acidification des eaux, ce phénomène pourrait avoir des effets néfastes sur des organismes aquatiques, dont les organismes marins calcifiés [126] avec des conséquences sévères pour certaines espèces benthiques (coraux) ou planctoniques [127][128]. Cependant, des travaux menés récemment sur la palourde européenne (*Venerupis decussata*) n'ont pas mis en évidence de différence de croissance larvaire en réponse à des environnements aux pH réduits [129].

Pour le bassin d'Arcachon, des travaux récents [130] montrent que les deux principaux facteurs environnementaux corrélés aux variations d'état du stock sont la température, notamment au moment de la reproduction et les ressources trophiques (avec des relations différant entre les jeunes stades et les individus plus âgés).

Un partenariat entre les régions frontalières d'Aquitaine et d'Euskadi a permis d'adapter localement un modèle de simulation sur la dynamique de ce stock à des fins de gestion [131][132]. Les processus modélisés ont été calibrés à partir d'expérimentations réalisées sur le bassin et le facteur température a été spécifiquement pris en compte pour son effet sur le déclenchement de la période de ponte. Des simulations d'augmentations de température concomitantes ou non à des modifications de pratiques de pêche ont été considérées dans le cadre d'un travail préliminaire [31]. La tendance prédite est marquée par une dégradation de l'état du stock ; elle s'explique par une période de ponte raccourcie sous l'effet de l'augmentation de température. Les ressources trophiques constituent un second facteur d'importance pour la dynamique de ce stock ; il a été récemment intégré au modèle pour son effet sur la phase de reproduction et de ponte. Ces travaux sont en cours actuellement et les résultats à venir devraient préciser ces observations.

Huître creuse japonaise

L'espèce *Crassostrea gigas* a été introduite dans le bassin d'Arcachon au début des années 1970 en remplacement de l'huître creuse portugaise *Crassostrea angulata*, décimée par une épizootie (elle-même introduite pour pallier une épizootie de l'espèce locale, l'huître plate). Ses caractéristiques physiologiques, légèrement différentes de celles de l'huître portugaise, se sont avérées mieux adaptées au site, avec un cycle de développement plus rapide conduisant à une forte augmentation de la production par entreprise. Par ailleurs, cette espèce semblait avoir trouvé dans le bassin d'Arcachon les conditions optimales à sa reproduction. Si l'on fait abstraction des années 1977 à 1982 (perturbations liées au TBT), le captage était d'un niveau élevé et s'effectuait précocement dans l'été.

Comme pour la palourde, les facteurs environnementaux sont connus pour influencer fortement le déroulement des différentes phases ontogéniques. La température joue un rôle déterminant sur la ponte (température minimale 19 °C) et la survie larvaire (d'autant plus importante que la température de l'eau est élevée) [28]. Un suivi de la reproduction de l'huître japonaise dans le bassin d'Arcachon est mené (par l'ISTPM puis l'Ifremer) depuis son introduction. Les résultats obtenus montrent, depuis une dizaine d'années, une augmentation de la variabilité du succès de la reproduction, des années de déficit important du captage alternant avec des années de recrutement pléthorique [133]. Cette variabilité est notamment expliquée par des causes thermiques (étés très froids ou très chauds), conditionnant la survie larvaire [28]. Par ailleurs, la diminution de l'intensité des pontes observée depuis 2008 pourrait être expliquée, entre autres, par une modification des populations phytoplanctoniques [134], celles-ci étant sous la dépendance des conditions hydroclimatiques.

Comme sur tous les organismes marins calcifiés, l'acidification des océans pourrait avoir un impact sur la formation de la coquille de l'huître, et ce, dès les plus jeunes stades larvaires qui présentent déjà la coquille typique des bivalves.

Gelidium corneum

L'algue *Gelidium corneum* qui structure les populations rocheuses submaréales importantes, entre 0 et 15 m, est utilisée pour la production d'agar agar sur toute la côte basque. Les facteurs environnementaux qui sous-tendent la production de biomasse sont la lumière, la température et l'énergie de la houle [135]. D'après les changements prédits pour ces facteurs, la biomasse de *Gelidium* diminuera probablement au cours de ce siècle [136].

VI- Comment le climat peut-il affecter le devenir des ressources marines ?

L'évolution rapide du climat est un des éléments des facteurs de changement et ne constitue pas actuellement la principale cause de dégradation de la biodiversité, mais ses impacts seront à considérer dans un contexte de changement plus global qui s'exerce en particulier dans les écosystèmes de transition entre milieux océanique et terrestre et dans les milieux dulçaquicoles [137].

Sans être exhaustif, le **tableau 4** récapitule les effets (décrits dans ce document) observés du changement climatique sur les populations, ainsi que les tendances générales d'évolution de la biomasse de reproducteurs et de la mortalité par pêche d'après les dernières évaluations scientifiques (hors amphihalins).

La région Aquitaine présente, par sa configuration, des habitats essentiels pour la plupart des espèces exploitées à l'image des zones d'estuaires, du bassin d'Arcachon et de la zone littorale. Or, ces zones sont également utilisées et impactées par d'autres usages et une attention devra être portée sur la cohérence de leur gestion. L'Aquitaine présente également la particularité d'avoir des écosystèmes profonds, le Canyon du Cap-Ferret et celui de Capbreton (avec pour ce dernier une proximité immédiate de la côte) où de fortes productions primaire et secondaire sont répertoriées [140][141]. Ces premiers maillons du réseau trophique sont impactés par le changement climatique mais l'appréciation des conséquences sur l'ensemble du réseau trophique (par exemple sur les petits pélagiques, les thonidés, les espèces démersales comme le merlu…) n'existe pas actuellement. À l'échelle du golfe de Gascogne, Blanchard et Vandermeirsch [142] ont corrélé le déplacement d'une espèce vivant sur des fonds de 100 à 300 m et non exploitée (poisson sanglier *Caspro aper*) avec une augmentation de la température de fond. Dans le cas des espèces profondes exploitées dans la zone du gouf de Capbreton, les conséquences du changement climatique ne sont pour l'instant pas connues, elles seront plus difficiles à appréhender que pour le domaine côtier.

	Effets observés du changement climatique sur la population	Tendance biomasse de reproducteurs	Tendance mortalité par pêche
Sole commune	?	→ +	→ -
Bar commun	?	?	↗
Maigre commun	Oui ?	?	?
Maquereau commun	Oui	↗ -	→
Anchois commun	Oui	↗	↗ ?
Baudroies d'Europe	?	↘	?
Merlu commun	Oui ?	↗	↘
Thon rouge	Oui	→	↘ pour les adultes, incertaine pour les juvéniles
Thon blanc	Oui	→ -	→ -
Palourde japonaise	Oui ?	↘ +?	?

Tableau 4 : *Effets observés du changement climatique et tendances générales d'évolution les plus récentes de la biomasse de reproducteurs et de la mortalité par pêche (d'après [138] et [139]) pour les principales espèces. Les signes + ou - venant compléter les tendances indiquent respectivement une évolution de l'indicateur à la hausse ou à la baisse et constatée sur les 2 dernières années.*

Peu de travaux ont été consacrés à la modélisation et la prédiction à une échelle régionale de la production des espèces halieutiques en réponse aux modifications du climat ([72][143]...). Pour le sud du golfe de Gascogne, les seuls travaux s'étant intéressés à l'évolution de populations d'espèces exploitées en lien avec la variabilité climatique sont ceux d'Hémery *et al.* [57], Castège et Hémery [64] et de Castège *et al.* [144]. Ils reposent sur des données de captures déclaratives et mettent en évidence sur un nombre défini d'espèces que celles préférant les eaux tempérées froides présentent une diminution significative d'abondance, alors que celles d'eaux tempérées chaudes sont stationnaires ou augmentent. Bien que le facteur climatique ne soit pas le seul facteur à influencer l'évolution de l'indicateur suivi, notamment par l'effet pêche, les corrélations obtenues sur la période considérée avec l'index climatique régional sont importantes pour plusieurs espèces (40 % à 60 % des changements d'abondance, **Tableau 5**) et soulignent le rôle additionnel essentiel joué par les variations océano-climatiques dans l'évolution des populations. Ce constat, visible également dans d'autres secteurs du globe, rappelle les répercussions majeures des changements climatiques et la nécessité de les prendre en compte dans un objectif de développement durable. Le **tableau 5** donne des exemples d'évolution de populations de poissons et crevettes grises en Aquitaine en relation avec les conditions climatiques.

Au-delà des espèces principales présentées précédemment, de nombreuses espèces nouvelles pour la faune ichtyologique française ont été capturées sur les côtes d'Aquitaine au cours des dernières décennies [145][146]. La présence de ces nouvelles espèces ne peut pas être seulement attribuée au réchauffement des eaux du golfe de Gascogne car il est important de noter, également, qu'au cours de cette même période, l'effort d'échantillonnage a augmenté, que ce soit en criée ou à bord des bateaux, dans un contexte de volonté d'amélioration des suivis de l'activité de pêche et des stocks de poissons. La progression des espèces de poissons à affinité méridionale vers le nord (qu'ils soient commerciaux ou non) est particulièrement marquée dans le sud du golfe de Gascogne puisque 62,5 % des observations y sont effectuées (Quéro comm pers.).

En parallèle, les techniques de pêche ont évolué permettant aux bateaux de travailler de nouveaux secteurs ce qui est considéré comme favorable à la diversité biologique des captures. En Aquitaine, la présence des deux implantations de l'Ifremer à proximité des principaux ports de débarquement aquitain permet d'avoir des informations régulières sur ces captures inhabituelles. Les synthèses sont réalisées par l'Ifremer de La Rochelle et plus récemment par l'Université de La Rochelle.

	Espèces	Evolution des populations		Corrélation avec index climatique
		Tendance	Variation Annuelle	
Eaux Froides	Merlu d'Europe *Merluccius merluccius*	↘	-3.3%	-0.5
	Tacauds *Trisopterussp.*	↘	-3.4%	ns
	Lieu jaune *Pollachius pollachius*	↘	-4.1%	-0.6
	Crevette grise *Crangon crangon*	↘	-2.5%	-0.5
Sans préférence	Mulets *Mugil sp.*	↘	-9.7%	-0.4
	Sardine *Sardina pilchardus*	↘	-10.2%	ns
	Anchois *Engraulis encrasicolus*	→	-	-
Eaux Chaudes	Thon rouge *Thunnus thynnus*	→	-	-
	Crinchards *Trachurus sp.*	→	-	-
	Maquereaux *Scomber**	↗	+11.8%	+0.4

* *Maquereau espagnol principalement*

Tableau 5 : *Exemples d'évolutions (basées sur les données de captures) de populations de poissons et crevettes grises en Aquitaine en relation avec les conditions climatiques (index SBC), ↗ croissance, → stabilité, ↘ décroissance durant la période d'étude (1974-2000) ; les flèches en gras indiquent les tendances hautement significatives p<0.01, sinon seulement significatives p<0.05 ; ns : non significatif p>0.05, [57][63].*

Les effets des changements climatiques sur la faune ichtyologique pour la partie sud du golfe de Gascogne restent difficiles à dissocier des effets liés à l'activité halieutique ou encore aux fluctuations naturelles des populations. Cependant, les espèces à affinité tropicale présentent l'intérêt de ne pas être encore ciblées et les tendances observées sont supposées être liées à des modifications d'ordre climatique ou tout au moins d'ordre naturel. Les principaux groupes concernés par ces changements du milieu dans le sud du golfe de Gascogne sont les Tétraodontiformes (6 espèces), les Carangidés (10 espèces) ainsi que les grands pélagiques à affinité tropicale et de façon plus générale les espèces en limite nord de répartition pour l'Aquitaine.

Ils témoignent de changements climatiques à travers différents paramètres :

- Une extension de leur aire de répartition vers le Nord, l'apparition de nouvelles espèces ;
- Une augmentation du nombre d'individus capturé par espèce, certaines espèces considérées comme rares sont aujourd'hui abondantes ;
- Une augmentation de la diversité biologique au sein de chacun de ces groupes ;
- Une modification de leur répartition bathymétrique.



© LRHA, Ifremer

Exemples de deux espèces à affinité tropicale capturées en Aquitaine (la daurade coryphène – Coryphaena hippurus et la Carangue coubali – Caranx crysos).

La fréquentation accrue de grands pélagiques s'accompagne également par l'apparition d'autres espèces méridionales comme le rémora *Echeneis naucrates* ou le poisson pilote *Naucrates ductor* qui est de plus en fréquent.

Ces dernières décennies se caractérisent par une augmentation de leur diversité biologique ainsi que de leur fréquence d'observation, particulièrement au sud de la Gironde. Même si ces observations sont à relativiser par rapport à l'attention accrue qui leur est portée dans le contexte actuel, certaines de ces espèces, telles que les grands pélagiques et les carangidés, pourraient constituer de nouvelles ressources halieutiques d'intérêt pour les professionnels dans un contexte de réchauffement climatique.

Conclusion

Les informations présentées pour les espèces principales exploitées par les pêcheurs aquitains au large de l'Aquitaine mettent en évidence une sensibilité différente selon les espèces et selon les stades ontogéniques au changement climatique. Ces éléments restent valables pour d'autres zones que celle considérée dans cet ouvrage. Ils mettent également en exergue des lacunes dans les connaissances actuelles entre les conditions environnementales et la réponse biologique. Une des raisons réside dans l'existence simultanée de plusieurs facteurs (environnementaux mais aussi anthropiques) qui restent très difficiles à dissocier. La prédiction de l'effet du changement climatique sur le développement des écosystèmes marins et par conséquent la productivité de certains stocks à la lumière d'une autre pression, l'exploitation, constitue un challenge scientifique [147]. Dans le cas d'un effet négatif attendu du changement climatique, une attention particulière devra être portée aux stocks considérés comme surexploités.

En ce qui concerne les amphihalins, le défi est d'apprécier comment ces facteurs de changement peuvent jouer sur les capacités d'adaptation, la vulnérabilité et la résilience de ces populations dans les eaux marine et continentale, notamment par le croisement des connaissances sur la biologie et les caractéristiques (usages) de la zone considérée (milieu aquatique et bassin-versant de référence). La question se pose de savoir quelles sont les zones de fortes vulnérabilités au changement climatique et par voie de conséquence quelles sont les populations (ou phase du cycle biologique) qui risquent d'être fortement impactées.

Un certain nombre d'incertitudes demeurent. Elles sont liées au scénario retenu et à ses conséquences sur la gestion de la ressource en eau et des zones humides mais également à la difficulté de dissocier les effets du changement climatique au sein du changement global.

En matière de connaissance, les principaux défis à relever sont 1) la compréhension de la connectivité entre les milieux de vie (côte, estuaire, milieu profond, large) et les facteurs qui la contrôlent ; 2) l'intégration du changement climatique sur l'ensemble du cycle de vie et à l'échelle de la population ; 3) l'appréhension les effets du changement climatique sur le réseau trophique ; 4) et en complément l'observation suivie (temporelle et spatiale) d'espèces nouvelles dont celles à affinité tropicale.



Les réservoirs à poissons des domaines de Certes et de Graveyron (© J. Haas, Fédération Départementale des Chasseurs de la Gironde).



Le Pic du Midi d'Ossau, vu du col du Pourtalet (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 7 :

La montagne

Coordination : *Frank D'Amico*
Rédacteurs : *Agnès Bardonnet, Frank D'Amico, Sylvain Delzon, Richard Michalet, Vincent Vles*
Contributeurs : *Matthieu Berroneau, Gérard Largier, Yoan Le Bagousse Pinguet, Jean-Paul Maalouf, Anne Sota, Blaise Touzard, Jean-Paul Urcun*

Montagne sous influence climatique océanique, la partie des Pyrénées située sur le territoire administratif de la région Aquitaine se démarque du reste des Pyrénées. Avec une altitude moyenne inférieure à celle des pics pyrénéens en région Midi-Pyrénées, la montagne aquitaine possède plusieurs caractères remarquables, construits sur deux entités montagneuses aux identités physiques et humaines fortes : la montagne basque (culminant à 2 017 m au Pic d'Orhy) et la montagne béarnaise (« flirtant » avec les 3 000 m au Pic Palas affichant 2 974 m – **Figure 1***).*



Figure 1 : *La haute vallée d'Ossau sous la mer de nuage tandis que le Pic Palas (2974 m, à gauche) et le Pic Balaïtous (3144 m, au centre) émergent. Le glacier du Balaïtous, comme les autres glaciers des Pyrénées françaises, subit un retrait généralisé de sa surface glaciaire ; à ce rythme, et dans l'hypothèse d'un maintien ou d'une accentuation des bouleversements observés, tous pourraient avoir totalement disparu en 2050 (cliché F. D'Amico).*

Fruits d'une histoire longue et complexe, mêlant facteurs locaux et changements historiques globaux, les activités humaines des hautes terres du Pays Basque et du Haut-Béarn mais aussi les biocénoses qui s'y imbriquent font du milieu montagnard aquitain un ensemble d'anthroposystèmes et d'écosystèmes (on parle alors de « socio-écosystèmes ») importants pour notre région. Hot-spots reconnus de biodiversité et d'endémisme, ils délivrent également des services uniques. Le paysage montagnard n'a jamais été figé. Il continue de se transformer en permanence sous les forces à la fois d'évolutions naturelles et d'une pression anthropique associée au changement climatique global. La déprise agricole, le développement urbain et touristique, sont à l'origine de transformations rapides des paysages et

de changements dans la biodiversité. Les variations amorcées du régime des pluies, les changements des températures estivales et les modifications du manteau neigeux auront des conséquences sur la biodiversité dont nous avons hérité, sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes et au final sur l'usage du milieu montagnard par les hommes (agropastoralisme, hydroélectricité, tourisme…). Ces signes pourraient aller en s'amplifiant, avec des inconvénients redoutés ou redoutables mais aussi des avantages possibles. Pour dissocier les possibilités des certitudes et décrire les effets actuels et futurs du changement climatique dans nos montagnes, ce chapitre emprunte à la démarche scientifique pluridisciplinaire les outils de mesure et d'analyse disponibles à l'échelle de l'Aquitaine et commente plusieurs évolutions documentées.

Introduction

Le milieu montagnard, en tant que mosaïque de « socio-écosystèmes », recouvre un ensemble d'anthroposystèmes et d'écosystèmes extrêmement exposés au changement climatique [1][2]. Fruits d'une histoire longue et complexe, mêlant facteurs locaux et changements historiques globaux, les activités humaines qui s'y trouvent et les biocénoses qui s'y développent sont uniques. *Hot-spots* reconnus de biodiversité et d'endémisme, ils délivrent également des services uniques. Implicitement, du fait des gradients élevés de température, ce milieu agit comme un ensemble de refuges climatiques d'autant plus importants que les zones montagneuses pourraient connaître un réchauffement plus prononcé que les zones de plaine [3].

Les zones montagneuses abritent 28 % des forêts et sont parmi les écosystèmes les plus vulnérables aux changements climatiques [4][5][6]. En effet, ces écosystèmes concentrent sur de courtes distances des milieux de fortes hétérogénéités climatiques et géologiques [7]. Ainsi, en parcourant un gradient de 3 000 m d'altitude, on peut traverser autant de zones climatiques différentes qu'au long de 3 000 km de latitude, passant par exemple d'un climat tempéré à un climat subarctique. Les montagnes, avec leurs gradients altitudinaux mais aussi la diversité topographique et la diversité des expositions, apparaissent donc comme des sites particulièrement intéressants pour évaluer les effets possibles du changement climatique : les bouleversements y sont intenses et le climat est un facteur limitant pour les écosystèmes qui s'y développent [8]. La relation entre climat et croissance des forêts évolue avec l'altitude et la croissance est le plus souvent limitée par les précipitations et le déficit de pression de vapeur de l'air à basse altitude et par les températures froides aux hautes altitudes [9][10][11][12]. Ainsi la courbe de réponse de la croissance à l'altitude présente généralement un optimum correspondant à une altitude où la température n'est pas encore limitante et où le stress hydrique n'affecte pas encore la croissance [13]. Le réchauffement ou les fortes chaleurs accompagnées de sécheresse sont susceptibles de provoquer une remontée en altitude de la courbe de réponse de la croissance à l'altitude [12][14]. Par ailleurs, la limite supérieure forestière apparaît comme très sensible au changement climatique, bien que tous les résultats ne concordent pas (cf. [15]). Une des explications possibles tient au fait que tous les travaux ne prennent pas en compte, ou pas de la même façon, les variations de pressions des usages, en particulier la déprise pastorale. Par ailleurs, des avancées des dates de débourrement foliaire et des reculs de dates de coloration des feuilles ont été observés depuis les 50 dernières années [16] ; un allongement de la saison de végétation des végétaux de plusieurs jours par décades a été mis en évidence [17][18], principalement du fait de l'avancée de la phénologie printanière [19].

La biodiversité des milieux montagnards revêt des caractéristiques uniques. La plupart des espèces inféodées au milieu montagnard n'ont que peu de marge de manœuvre (on parle d'espèces sténotopes) et possèdent de ce fait des adaptations souvent originales. Le port en coussinet observé chez certaines plantes (par exemple chez *Silena acaulis*) représente une convergence adaptative en réponse aux conditions de vie extrêmes qui règnent en montagne et caractérise une adaptation à la dessiccation et à la déperdition calorique. Chez les insectes de montagne, plusieurs espèces ont tout bonnement perdu leurs ailes, devenues un handicap à haute altitude, dans un environnement exposé au vent **(Figure 2)**.

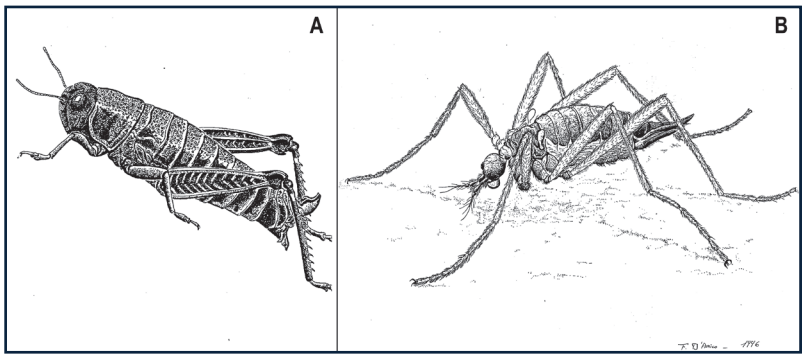


Figure 2 : *L'aptérisme (perte de l'aptitude au vol) est particulièrement éloquent chez certains criquets endémiques (ex. Cophopodisma pyrenea 1-A) ou des Diptères comme la mouche des neiges Chionea pyrenea 1-B dont la première mention vient d'être signalée en Aquitaine – D'Amico & Ooesterbroek (2013 ; Dessins originaux : F. D'Amico).*

Les impacts les plus notoires du changement climatique sur la biodiversité sont la contraction et/ou le déplacement de l'aire de distribution de plusieurs espèces – comme dans d'autres écosystèmes de plaine, mais de façon exacerbée – et une augmentation de leur probabilité d'extinction à basse comme à haute altitude [20][21][22][23]. Le changement climatique pourrait modifier l'étagement altitudinal de certaines espèces par une migration en altitude et par une possible exclusion des espèces sommitales. Ce déplacement *a priori* logique des aires de distribution vers des altitudes plus élevées a été appelé l'effet « *Escalator* » [24][25]. Pour tempérer ces propos, certains auteurs suspectent l'existence pour certaines espèces de tendances inattendues voire contrintuitives comme le déplacement vers des altitudes inférieures de leur aire [26] en raison notamment d'un relâchement de la compétition, lui-même expliqué par le déplacement d'autres espèces vers le haut des montagnes. Il faut réaliser que les effets du changement climatique sur les espèces – végétales notamment – sont variables selon les massifs montagneux étudiés en Europe [27] et que plusieurs effets subtils, insoupçonnés, sont révélés progressivement. Il en va ainsi des modifications du rythme d'invasions d'espèces [28] et de l'évolution des taux d'attaque des insectes ravageurs [29]. De façon assez générale toutefois, sur les massifs montagneux étudiés, les espèces végétales à affinité thermique froide déclinent tandis que les espèces à affinité thermique chaude deviennent plus abondantes, un phénomène appelé *thermophilisation* [28].

Pour éclairer les effets actuels et futurs du changement climatique dans les montagnes basques et béarnaises, ce chapitre propose des éléments basés sur la démarche scientifique pluridisciplinaire. Tour à tour, ce sont les effets possibles du changement climatique sur les activités économiques, la biodiversité et les écosystèmes de montagne qui sont examinés. Compte tenu du rôle prépondérant du manteau neigeux sur les activités économiques (tourisme hivernal, agriculture, pastoralisme…) et sur la disponibilité en eau (cf. chapitre 8 également), les perspectives d'une modification de sa persistance et de son épaisseur sont discutés en premier, avec au passage une digression sur la disparition annoncée des glaciers proches, puisqu'aucun n'existe aujourd'hui sur le territoire aquitain.

Face à l'absence significative d'informations pour les perspectives d'évolution de la majorité des espèces animales et végétales présentes en Aquitaine, faute de suivis solidement structurés sur le long terme, les effets documentés sur la biodiversité se focalisent ici sur : 1) les poissons dans l'espace montagnard Aquitain, avec une mise au point plus précise sur le Saumon et l'Anguille bien étudiés par le laboratoire Ecobiop (INRA – Université de Pau et Pays de l'Adour), 2) les oiseaux de montagne et les changements observés dans le calendrier de la migration, tels qu'ils sont étudiés par différents chercheurs en Aquitaine et dans le cadre les travaux à long terme de l'Observatoire Régional de la Migration des Oiseaux (Programme d'étude de la migration en Aquitaine coordonné par la LPO Aquitaine avec Organbidexka Col Libre), 3) certaines espèces vulnérables, indicatrices et/ou emblématiques comme le Desman des Pyrénées suivi de près dans le cadre d'un Plan National d'Actions pour cette espèce, avec l'appui de différentes équipes de recherche des régions Aquitaine, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, et 4) le suivi programmé des espèces végétales des combes à neige, pour le compte de l'OPCC, par le CENMA et le CBNMP.

Les connaissances disponibles sur les impacts observés et attendus du changement climatique à l'échelle des écosystèmes sont déroulées pour les forêts de la vallée d'Ossau et les écosystèmes prairiaux de la haute vallée d'Aspe, étudiées notamment par les laboratoires Biogeco et Epoc (Université de Bordeaux I, INRA et CNRS).

Pour préparer les mutations, le chapitre se termine par une liste de solutions possibles de moyens de mitigation adaptées aux écosystèmes et espèces de montagne face au changement climatique. Il s'agit de pistes de réflexions à partager avec les décideurs et acteurs œuvrant aux différentes échelles géographiques et décisionnelles.

I- Contexte

Culminant à 2 974 mètres, le pic Palas est le point culminant de la région Aquitaine **(Figure 1)**. Il est séparé du pic de Balaïtous (3 144 m) à l'est et du pic d'Arriel (2 824 m) à l'ouest par de petits cirques auparavant occupés par des glaciers. Située sur la ligne de partage des eaux, la crête des pics d'Arriel-Palas-Balaïtous a servi de tracé pour la frontière franco-espagnole. En allant vers la côte Atlantique, plus à l'est, l'altitude des principaux pics s'abaisse progressivement (Pic d'Anie 2 504 m) pour ne dépasser au Pays Basque l'altitude du Pic d'Orhy à 2 017 m.

L'agriculture, le pastoralisme et l'hydroélectricité localement, activités inscrites au cœur des territoires de montagne aquitaine, y ont façonné les paysages actuels en permettant le maintien d'activité et donc de tissu social en zone rurale. Dans l'espace montagnard Aquitain, Gaves et Nives désignent ces torrents et rivières tumultueuses dont la montagne accouche respectivement dans le Béarn et au Pays Basque. Les montagnes basques étant moins hautes et escarpées que celles du Béarn, les Nives coulent sur des pentes moins fortes, et étant plus à l'Ouest, les distances à parcourir pour les poissons diadromes cherchant à rejoindre des habitats montagnards sont plus courtes. Gaves et Nives constituent des milieux fragiles et réputés pour la pêche ; ils abritent encore une faune diversifiée où coexistent différentes espèces endémiques ou d'intérêt patrimonial élevé : Grenouille des Pyrénées, Desman des Pyrénées, Saumon atlantique, Anguille (cf. *infra*). L'activité hydroélectrique y est très développée en répondant à d'importants besoins de développement énergétique certes, mais aussi sociaux. Son développement dans le cadre du changement climatique doit donc se faire de façon durable, dans une logique de partage de la ressource ; il peut être envisagé pour des besoins d'alimentation en eau potable, pour les activités agro-pastorales et industrielles, pour les besoins en neige de culture des stations de ski, ainsi que pour le maintien des services écosystémiques, dans le respect de la biodiversité héritée.

Par la diversité de ses paysages, et sa situation frontalière avec la montagne aragonaise et basque espagnole, la montagne Aquitaine est une destination touristique prisée. En matière de tourisme, la neige constitue sans aucun doute une des principales ressources valorisées par les activités touristiques et la plus vulnérable au changement climatique **(Figure 3)**.

L'exemple des retombées économiques du piémont pyrénéen est révélateur d'une tendance générale : pour le Haut Béarn tout entier (Piémont Oloronais, vallées d'Ossau, d'Aspe, de Barétous et de Josbaig), le tourisme représente 76 millions d'euros de recettes, 1 300 emplois, 2 millions de nuitées. La vallée d'Ossau compte pour 58 % dans cette activité. En chiffre d'affaires, l'activité ski est le moteur économique principal de l'économie, même si depuis 2003 le nombre de journées ski a baissé de plus de 18 %. Le chiffre d'affaire généré par les activités touristiques confondues est estimé à 30 millions d'€ en Ossau, principale destination ski, auxquels s'ajoutent les diverses taxes locales. Quatre-vingts pour cent de l'activité économique de la commune des Eaux-Bonnes sont liés au tourisme (sports d'hiver, tourisme estival, activités thermales) et seulement 10 % liés à l'hydroélectricité, 10 % à l'agriculture (deux secteurs en fort déclin). Ici comme souvent ailleurs en Pyrénées, le tourisme permet de maintenir une économie et une démographie stables : 500 à 600 emplois, dont 2/3 de saisonniers (hivernaux principalement) vivent



Figure 3 : *Le cirque d'Aneü, en haute vallée d'Ossau, le 28 novembre 2009 (cliché : F. D'Amico).*

des activités touristiques sur la seule commune des Eaux-Bonnes (Gourette). Outre les activités proposées dans les stations de ski alpin d'Arette-La Pierre-Saint-Martin, de Gourette, d'Artouste-Fabrèges, ou sur les espaces nordiques du Somport-Candanchu, d'Issarbe, d'Iraty, la neige permet la pratique de nombreuses autres activités et structure l'offre touristique. Les activités plus importantes sont sans aucun doute le ski nordique et la randonnée en raquettes, mais de nombreux guides et accompagnateurs de moyenne montagne proposent des produits touristiques dérivés de ces activités d'hiver **(Figure 3)**.

En matière de biodiversité, la montagne aquitaine constitue également un espace préservé car en grande partie inscrit dans le territoire du Parc National des Pyrénées et au sein du réseau Natura 2000. Rappelons que les espaces protégés ont été désignés de longue date par l'État antérieurement aux préoccupations du changement climatique : le Parc National des Pyrénées a été créé en 1967 et la constitution du réseau Natura 2000 s'est faite en application des Directives Européennes « Oiseaux » et « Habitat » de 1979 et 1992 respectivement. Une question légitime est de savoir en quoi et comment les espaces protégés (ceux d'Aquitaine en l'occurrence) peuvent contribuer dès aujourd'hui à la préservation de la biodiversité et des espaces montagnards.

L'intérêt des zones de conservation dans le contexte du changement climatique

Face au changement climatique, les espaces protégés nationaux (e.g. Parcs Nationaux, Réserves Naturelles…) sont plus à même de préserver la biodiversité (à l'exception des Amphibiens dans l'hypothèse du scénario A1F1) que les zones ne bénéficiant pas de mesure particulière [30]. La raison est probablement que ces espaces protégés nationaux se trouvent le plus souvent dans les zones de montagne, souvent considérées comme des refuges climatiques soumis malgré tout à d'intenses changements. D'ici 2080, 58 % (valeur médiane) des espèces de plantes et de vertébrés étudiés [à savoir 1883 espèces européennes : 1298 plantes, 136 mammifères, 343 oiseaux nicheurs, 42 amphibiens et 64 reptiles] devraient perdre des conditions favorables de niche climatique au sein des espaces protégés existants. Ce chiffre s'élève à 63 % pour les sites du réseau Natura 2000. Les espèces présentes dans les sites du réseau Natura 2000 apparaissent comme plus vulnérables parce qu'il y a une proportion plus grande de zones non montagneuses et que les pertes de niche climatique favorable y sont proportionnellement plus grandes aussi [31][32]. Les proportions varient toutefois selon le groupe taxonomique et le scénario. Il y a plus d'espèces « perdantes » que « gagnantes » chez les oiseaux et les mammifères quel que soit le scénario. Chez les amphibiens, seulement les scénarios climatiques extrêmes (A1F1, A2) apparaissent comme défavorables. Les reptiles se trouveraient gagnants (plus forte proportion

d'espèces « gagnantes » : 67 %) quel que soit le scénario, ce qui n'est pas une surprise puisque les reptiles sont des organismes ectothermes qui trouvent une amélioration de leur condition de vie quand un réchauffement survient en région tempérée. Ectothermes également, le cas des amphibiens est différent puisque ces organismes ont besoin d'humidité ambiante alors que les projections faites pour le Sud-Ouest de l'Europe sous les scénarios A1F1 et A2 font état d'une aridité croissante [33] avec des nuances locales ou régionales à prendre cependant en compte puisque le régime des précipitations dans la partie nord et nord-ouest des Pyrénées devrait rester inchangé ou pourrait même s'intensifier sous l'hypothèse des scénarios SRES B2 et SRES A2 [34].

Pour l'ensemble de l'Europe, une comparaison par massif montagneux suggère que c'est dans les Alpes, les Pyrénées et les Carpathes qu'il y aurait proportionnellement le plus d'espèces « gagnantes », un phénomène à associer au processus de thermophilisation.

À côté de l'exploitation forestière et de l'hydroélectricité, d'histoire plus récente, le pastoralisme est resté une activité traditionnelle prépondérante dans les montagnes béarnaises et dans les montagnes basques. Les communautés herbacées de pelouses et prairies, utilisées par les ovins, bovins et équins, y présentent un triple intérêt : biologique (par leur contribution à la biodiversité montagnarde), culturel (par leur contribution à la qualité des paysages traditionnels qu'elles constituent) et socio-économique (par les services qu'elles apportent aux sociétés humaines, notamment comme herbage pour les herbivores). Les communautés herbacées à forte diversité sont particulièrement développées en Europe sur les roches calcaires où la sécheresse du sol, liée au caractère filtrant des calcaires, et la faible disponibilité en nutriments qui l'accompagne, limitent fortement la productivité et donc la compétition. En général ces communautés à maigre herbage sont pâturées par des ovins et/ou faiblement fauchées. Cependant l'importance de la déprise agricole affectant l'Europe depuis plus d'une centaine d'années représente une menace certaine pour ces écosystèmes de grand intérêt patrimonial. En Aquitaine ces communautés ne sont bien représentées que dans les Pyrénées et sur les bordures du Massif Central (Dordogne et Lot-et-Garonne).

Parmi les autres particularités de notre territoire de montagne, il faut insister sur le fait qu'avec une altitude moyenne inférieure aux Pyrénées en région Midi-Pyrénées, l'Aquitaine, dans ses confins sud, constitue un point de convergence majeur le long des routes migratoires d'oiseaux en Europe occidentale. Le col d'Organbidexka, au Pays Basque (43°02'19.06"N, 1°00'21.68"W ; altitude 1 283 mètres) constitue la voie de passage la plus importante pour les rapaces, les cigognes, les grues et les palombes.

Observatoire pyrénéen du changement climatique (http://www.opcc-ctp.org)

Lancé par la Communauté de Travail des Pyrénées qui a souhaité organiser les structures administratives et scientifiques du Massif autour de la compréhension et de la lutte face au changement climatique, l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique a pour mission de devenir un outil opérationnel d'information et d'aide à la décision pour une meilleure appropriation territoriale du phénomène et pour une meilleure adaptation. Dans l'objectif de suivre et de comprendre les évolutions du climat à l'échelle des Pyrénées et anticiper ses effets, différents outils seront mis en place afin de permettre un suivi spécifique d'indicateurs du changement climatique dans les domaines du climat, la forêt, la biodiversité, l'eau, et l'enneigement. Sur cette base, des premières pistes de recommandations afin d'accompagner l'adaptation des secteurs socio-économiques et des espaces naturels les plus vulnérables seront proposées.

Dans une des actions en cours, « Évolutions Climatiques et Forêt de Montagne », dans le cadre des axes « Forêt » et « Risques Naturels » le Groupement transfrontalier FORESPIR et son réseau (ONF-RTM, CNPF, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Generalitat de Catalunya et Sociedad de Desarrollo Medioambiental de Aragón) mettra en place le suivi des indicateurs d'impact du changement climatique sur le rôle de protection des forêts de montagne et sur les incidences qu'il aura sur les écosystèmes forestiers Pyrénéens. Les partenaires prévoient de travailler sur un réseau de zones de référence réparties sur le Massif, dont une sera située sur le département des Pyrénées-Atlantiques (Aquitaine). Ces zones, de la taille d'un bassin versant, serviront à analyser les différentes techniques sylvicoles de protection contre les risques naturels et à mettre en œuvre des outils et des méthodes de suivi des indicateurs du Changement Climatique et, enfin, à procéder aux relevés et mesures. L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette action permettra notamment la définition de critères et de recommandations pour une gestion adaptée des forêts de montagne face aux évolutions climatiques et en fonction des différents contextes géographiques, socio-économiques, écologiques et forestiers.

II- Impacts observés et attendus du changement climatique

Impacts sur l'enneigement

La neige est l'un des éléments les plus sensibles aux changements climatiques. Au niveau quantitatif, la réduction de la hauteur de neige pourrait être de 50 à 100 % dans la plupart des montagnes de l'Europe d'ici la fin du XXIe siècle [35]. Les études du Centre d'Étude de la Neige de Météo France montrent clairement une érosion du manteau neigeux en montagne depuis 1961 [36] et ce phénomène va considérablement se renforcer dans les Alpes et les Pyrénées, en particulier au-dessous de 2000 mètres d'altitude. À 1 500 mètres (altitude moyenne de l'ensemble des domaines skiables en Aquitaine), la saison enneigée passerait de trois à deux mois dans les Pyrénées, la hauteur de neige ne serait plus que d'une vingtaine de centimètres. Sur le terrain, on voit déjà se profiler des difficultés pour nombre de stations de moyenne altitude : certaines observations d'exploitants de stations d'altitude sont alarmantes sur la réalité déjà prégnante de ce phénomène [37]. L'épaisseur de la couche est un facteur majeur limitant, la durée de l'enneigement en est un autre, bien plus grave. D'après Météo France, les stations de moyenne altitude des Pyrénées-Atlantiques ne devraient plus avoir qu'entre 70 et 80 jours d'enneigement à cette altitude dans l'hypothèse basse d'un réchauffement de +1,8 °C en moyenne.

Le cas des glaciers proches : Vignemale, Balaitous et Infiernos

Bien que n'étant pas situés sur le territoire Aquitain, ces glaciers tout proches méritent quelques lignes. En effet, ils contribuent (cas du Vignemale et du Balaïtous – **Figure 1**) au régime hydrologique des cours d'eau qui traversent l'Aquitaine. Pour les glaciers des Pyrénées françaises[1], depuis 1850 qui marque la fin d'une période de « mini-glaciation » appelée Petit Age Glaciaire (1550-1850), un retrait généralisé des surfaces glaciaires est observé ; à ce rythme, et dans l'hypothèse d'un maintien ou d'une accentuation des bouleversements observés, ils pourraient même avoir totalement disparu en 2050. Côté espagnol, les glaciers les plus proches sont les deux glaciers du massif des Infiernos (Central Infiernos et Oriental Infiernos) dont les superficies actuelles sont respectivement de 5,83 ha et de 1,13 ha, ce qui représente 64,3 % et 14,4 % de leur extension mesurée en 1981 [38].

Impacts sur l'activité touristique

L'impact du changement climatique sur l'activité touristique est attendu essentiellement sur l'activité des stations de ski, moteur économique des vallées des Pyrénées occidentales. Pour ce qui est de l'enneigement, on constate en effet sur le long terme une lente mais permanente diminution de l'épaisseur moyenne de la couche et une montée en altitude de la limite pluie-neige. Les domaines skiables ont toujours subi les aléas de l'enneigement naturel, problèmes que ne compense qu'en partie la production de neige de culture. Or dans les Pyrénées l'évolution de la fréquentation et des pratiques est fortement tributaire des conditions climatiques : d'une année à l'autre, on peut enregistrer des variations de près de 2 millions de journées/skieurs. Dans les Alpes, cet aléa caractéristique de la neige est moins marqué et le poids dominant des très grandes stations, bien enneigées et positionnées dans le marché mondial, les rendent moins tributaires d'un marché de proximité.

La Compagnie des Alpes place le seuil minimal à un enneigement minimal de 100 jours pas an pour assurer un domaine viable économiquement, et un retour sur investissement suffisant de l'équipement d'un domaine skiable.

1. L'association « Moraine », créée en 2001, a pour objectif d'étudier les glaciers des pyrénées françaises et leur environnement proche en vue de les connaître et de suivre annuellement leur évolution (http://asso.moraine.free.fr).



Figure 4 : *Quand l'enneigement naturel fait défaut, le recours à la « neige de culture » concerne des superficies de plus en plus importantes sur la majorité des domaines skiables pour compenser les aléas climatiques, comme l'illustre cette photo prise au cœur de l'hiver (14 janvier 2007) du domaine skiable de Gourette (1350-2350 m). Toutefois, cela ne saurait amortir totalement l'impact du réchauffement (cliché : F. D'Amico).*

Si l'enneigement naturel fait défaut, l'enneigement artificiel ne saurait amortir totalement l'impact du réchauffement **(Figure 4)**. Le recours aux enneigeurs couvre des superficies de plus en plus importantes (désormais la presque totalité des pistes des grandes stations) sur la majorité des domaines skiables pour compenser les aléas climatiques [39] et préparer la sous-couche neigeuse. Toutefois, cette technologie ne permet pas de lutter indéfiniment contre la diminution de l'enneigement, elle ne remplace pas, pour les skieurs, l'attrait du cadre merveilleux de la montagne totalement immaculée [41] et surtout elle est coûteuse en énergie et en eau, rompant les équilibres des micro-bassins versants de montagne [42]. Les prélèvements sur les torrents peuvent naturellement impacter les écoulements naturels, la vie aquatique et, par voie de conséquence, les réseaux alimentaires associés [43]. Le nivellement des pistes de ski modifie la perméabilité des sols. La neige de culture représente un agent supplémentaire d'érosion non négligeable [44]. Enfin, en période des restrictions budgétaires publiques, le coût de la production de neige de culture pose de manière toujours plus délicate la question du remboursement de la dette des collectivités qui ont investi [45]. Si, au-dessus de 2 500 mètres, les différents scénarios de Météo France montrent au contraire l'évolution probable de précipitations plus abondantes, cette augmentation n'est pas jugée suffisante par les climatologues pour compenser la fonte liée à la hausse des températures. Déjà aujourd'hui, le produit neige, indispensable au bon fonctionnement de toute station de sports d'hiver, est des plus incertains en dessous de 2000 mètres, à l'exemple des saisons sans neige du début des années 1990, de la saison 2006-2007, 2007-2008 ou encore de l'ouverture de la saison 2009-2010 [37]. Dans ces cas « d'accidents climatiques » (*sic*) dans les stations de sports d'hiver de la chaîne pyrénéenne, les baisses du chiffre d'affaires ont été en moyenne de 36 % par rapport à la saison précédente, les pratiquants des sports de glisse ont été beaucoup moins nombreux et les annulations des séjours en hausse [46].

Par ailleurs, les recherches montrent que si la quête de la diversification touristique est un objectif consensuel, d'une part cette orientation n'est pas dotée de crédits incitant l'innovation et à la recherche d'autres modèles mieux adaptés à la fois aux traditions des vallées et aux marchés et, d'autre part, les



Figure 5 : *D'ici à la fin du XXIe siècle, à 1 500 mètres (altitude moyenne de l'ensemble des domaines skiables en Aquitaine), la saison enneigée passerait de trois à deux mois dans les Pyrénées, la hauteur de neige ne serait plus que d'une vingtaine de centimètres. La pertinence des ouvrages de protection hivernaux, l'effort et le coût d'entretien hivernal du réseau routier seraient différents : (A) fosse de réception d'avalanche, (B) ouvrage paravalanche et (C) panneau de signalisation sur la route d'accès au col du Pourtalet, en vallée d'Ossau (cliché : F. D'Amico).*

enquêtes de terrain montrent que les acteurs et opérateurs sont très nombreux à penser que « sans le ski, tout est fini » [41] [45]. La réelle nécessité de diversification des activités n'a pas encore fait l'objet d'une vraie prise de conscience locale : l'accent est toujours mis sur les prouesses technologiques (remontées mécaniques, restaurants d'altitude, enneigement artificiel…), les collectivités continuent d'investir dans un équipement lourd, onéreux pour la collectivité, peu économe de la ressource énergétique, peu soucieux du cycle local de l'eau et on produit de la « neige de culture » sur des pistes qui apparaissent de plus en plus anachroniques. Tant sur le plan technique qu'en termes de représentations et de pratiques, le changement climatique est encore fort peu pris en compte dans la prospective territoriale à long terme de la montagne touristique aquitaine **(Figure 5)**.

Pour la majorité des acteurs rencontrés, le changement climatique est un fait, envisagé comme marginal, lié à la cyclicité naturelle plutôt qu'humaine et le nombre de ceux qui nient – sans le dire ainsi – semble supérieur à celui de ceux qui s'accordent sur son existence. Malgré un système d'observation spécifique (l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique, cf. *supra*) qui produit des données et des simulations futures de grande qualité. La pratique des sports d'hiver est toujours envisagée à long terme comme la poursuite de sa forme actuelle, les projets d'anticipation des effets négatifs des changements à venir restent rares. Dans ce changement global, les stations de ski alpin constituent sans aucun doute la ressource économique la plus vulnérable. La performance des exploitants de remontées ne suffit déjà plus à assurer, à elle seule, le renouvellement des équipements (le dépassement du « grand équilibre » financier des exploitations est rare dans les Pyrénées) ; en outre, le coût moyen de la journée-skieur croît plus vite que son prix de vente et le coût de l'énergie resserra encore ce ciseau des prix. Les capacités de réinvestissement sont modestes dans le massif, le risque d'obsolescence de l'outil de production est élevé et s'accroît. Ce modèle économique hivernal reste donc tributaire de soutiens publics dont la pérennité est loin d'être garantie. La concurrence entre stations est croissante, dans un contexte de marché européen mature et d'une offre très fournie. Les territoires pyrénéens tout entiers, c'est-à-dire les vallées solidaires de leurs stations, auraient intérêt à élaborer une stratégie à moyen et long terme pour entamer d'urgence leur transition énergétique : il s'agit surtout ne pas rester enfermé dans une posture ne soutenant que le vieux modèle économique des « trente glorieuses » fondé sur le « tout ski alpin », un modèle mis à mal.

Impacts sur la biodiversité

À l'échelle des Pyrénées, et à plus forte raison pour l'Aquitaine, il semble qu'aucune analyse ne permette pour l'instant des estimations quantitatives de risque d'extinction pour les espèces confrontées au changement climatique. De telles estimations restent hors de portée encore compte tenu des capacités actuelles de modélisation et de la nature des données disponibles ou collectables. On dispose de peu de données mesurées sur le long terme pour quantifier les effets du changement climatique sur la biodiversité de la montagne aquitaine et il faut le plus souvent s'appuyer sur certains outils d'aide et se fier aux projections qui en découlent, en dépit du fait qu'elles sont en général faites à l'échelle européenne et dans le meilleur des cas *transférables à des échelles compatibles avec l'objet de l'ouvrage.*

Différents groupes d'espèces montagnardes ont fait l'objet de suivis relativement complets à l'échelle européenne et autorisent une modélisation des changements de distribution en lien avec l'évolution du climat. Il s'agit notamment des oiseaux [47][48], des papillons [49], des libellules [50], des insectes pollinisateurs [51] considérés comme très sensibles au changement climatique et pour lesquels d'importantes bases de données existent. Parmi les projets les plus aboutis, l'Atlas climatique des papillons d'Europe a utilisé les cartes de distribution du projet[2] « *Mapping European Butterflies* ». L'ensemble des résultats porte sur 293 espèces de papillons (sur un total d'environ 450 espèces présentes en Europe). L'enveloppe climatique de chaque espèce de papillon a été modélisée en envisageant trois scénarios de climat futur : (1) scénario modéré [B1 - SEDG : Sustainable Europe Development Goal] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 2,4 °C d'ici à 2080, (2) scénario intermédiaire [A2- BAMBU : Business As Might Be Usual] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 3,1 °C d'ici à 2080 et (3) scénario extrême [A1F1 - GRAS : GRowth Applied Strategy] prenant en compte une élévation attendue de température en Europe de 4,1 °C d'ici à 2080. Sur la base de ces scénarios, une projection des changements attendus dans la distribution des papillons a été faite sur l'ensemble de l'Europe, en autorisant deux possibilités (possibilité totale de dispersion des individus ou absence de dispersion dans le nouvel espace climatique) et en considérant deux périodes (2021-2050 et 2051-2080). L'étude montre clairement que le changement climatique poserait un problème indéniable, mais dont l'intensité varierait selon le scénario considéré. Sous l'hypothèse la plus extrême (et sans dispersion possible), 24 % des espèces étudiées perdraient plus de 95 % de leur niche climatique actuelle en 2080 et 70 % perdraient plus de 50 % tandis que seulement 6 % apparaîtraient comme peu menacées par ce risque. Sous l'hypothèse la plus modérée (et toujours sans dispersion possible), seulement 3 % des espèces étudiées perdraient plus de 95 % de leur niche climatique actuelle en 2080 et 54 % perdraient plus de 50 % tandis que 43 % apparaîtraient comme peu menacées par ce risque.

L'application de ces connaissances à la prise en compte des impacts du changement climatique sur l'entomofaune montagnarde d'Aquitaine doit être faite de façon prudente, compte tenu des transferts délicats d'échelle. Avec ces précautions à l'esprit, la plupart des espèces pour lesquelles il existe des modèles de distribution future seraient impactées par le changement climatique d'ici à 2080 et certaines espèces emblématiques pourraient avoir disparu des Pyrénées occidentales.

	Scénarios climatiques (2080)			
Espèce	Scénarios de dispersion des individus	**Modéré** + 2,4 °C (A1)	**Intermédiaire** + 3,1 °C (B2)	**Extrême** + 4,1 °C (A1F1)
Parnassius apollo	possible	- 35,61 %	- 52,91 %	- 63,32 %
	impossible	- 54,69 %	- 66,59 %	- 75,85 %
Parnassius phoebus	possible	- 47,26 %	- 32,7 %	- 51,75 %
	impossible	- 67,83 %	- 57,95 %	- 72, 24 %
Parnassius mnemosyne	possible	- 1,92 %	- 27,84%	- 23,75 %
	impossible	- 48,45 %	- 68,82 %	- 77,12 %

Changements projetés dans l'espace climatique de 2080 pour trois espèces de Papilionidae emblématiques et vulnérables de montagne : les Apollons.

2. Projet basé sur une grille de 50 x 50 km de résolution, couplée à des modèles climatiques de distribution actuelle utilisant 22 variables dont la température, l'humidité du sol etc.

Les poissons dans l'espace montagnard Aquitain

Les études sur l'impact du changement climatique sur les poissons d'eau courante sont peu nombreuses [52]. À l'échelle mondiale, en lien avec les diminutions de débit, 15 % des rivières perdraient 20 % de leur richesse spécifique et jusqu'à 75 % à l'horizon 2070 pour les hydrosystèmes les plus impactés [53]. La distribution actuelle des espèces devrait se déplacer vers des latitudes plus nordiques, pouvant entraîner des extinctions en cas de barrière au déplacement ou d'habitat favorable trop réduit [54][55]. D'autres études à large échelle ciblent certaines catégories de poissons, comme les poissons diadromes [56] ou encore les espèces invasives [57]. L'évolution de ces communautés au cours des 15-25 dernières années dans les grands fleuves français se traduit par une augmentation de la richesse spécifique et de la proportion de poissons méridionaux et thermophiles, accompagnée d'une proportion plus élevée de petits poissons [58][59] ; cette augmentation de la richesse spécifique est sans doute transitoire, en lien avec le déséquilibre lié au changement climatique. Ces études à large échelle bien qu'intéressantes pour établir de grandes tendances sont cependant difficilement transposables à des prédictions locales, notamment en système montagnard. Décrire des scénarios d'évolution à l'échelle locale nécessite un important travail préalable de modélisation des paramètres abiotiques pour tenter d'évaluer le plus justement possible l'impact du changement climatique sur les caractéristiques hydrologique et thermique du cours d'eau. Récemment, un tel travail de modélisation sur l'évolution thermo-hydro-chimique du bassin Adour-Garonne selon 3 scénarios climatiques a conclu que c'est dans les zones de montagne que la sévérité des étiages pourrait être maximale (jusqu'à -20 % des débits actuels) et que l'enrichissement en azote pourrait être le plus important [60][61]. Cette augmentation des nitrates pourrait cependant n'apparaître qu'à partir du métarhithron, car à l'amont la pente limite le développement de l'agriculture. Malgré tout, le risque d'eutrophisation reste présent car la productivité du cours d'eau peut aussi augmenter du fait de l'augmentation de la température (qui devrait être plus sensible dans les petits cours d'eau à faible inertie thermique) et du démarrage plus précoce de la productivité primaire. Ces modifications des conditions climatiques et de l'usage des sols pourraient entraîner la perte d'une espèce en moyenne (la richesse spécifique passant de 5 à 4) sur les zones amont [62]. L'augmentation de la température induirait une remontée des espèces d'eau chaude vers l'amont des rivières, au détriment des espèces d'eau froide [62][63]. Les espèces d'eau froide comme la truite commune ou le saumon pourraient ainsi voir leur aire de distribution se restreindre du fait de la diminution des espaces où l'habitat est hydrologiquement et thermiquement favorable. Par ailleurs, quels que soient les scénarios climatiques testés, les changements sur la biodiversité seront sensiblement équivalents jusqu'à la première moitié du XXI^{e} siècle [62]. Ce n'est qu'à partir de la deuxième moitié que des différences apparaîtraient avec une intensité des perturbations plus marquée et plus rapide dans le cas du scénario le plus pessimiste (A2).

Il est très probable que les ruisseaux et rivière de tête de bassin prenant leurs sources dans les montagnes basques et béarnaises serviront de refuge aux espèces d'eau froide de grande valeur halieutique comme le saumon et la truite. L'anguille, autre espèce à forte valeur halieutique et patrimoniale et déclarée par l'UICN en danger critique d'extinction devrait, sur la zone considérée, bénéficier des évolutions climatiques [56]. Il n'existe pas dans la piscifaune de cette zone d'espèces endémiques dont le risque d'extinction serait alors très élevé. Des espèces sans grande valeur halieutique, mais importantes pour la conservation de la biodiversité comme le chabot, devraient être particulièrement touchées. Cette espèce fait partie comme le saumon, des espèces ciblées par le programme du GICC[3] et les prévisions établies dans le contexte des montagnes ardéchoises font état d'une forte réduction des effectifs sous l'effet conjugué du changement climatique et de la présence d'obstacles à la migration [64]. Dans le cas du chabot, la conjonction de ces deux facteurs est particulièrement négative car les capacités de dispersion vers l'amont de cette espèce sont faibles en présence d'obstacles. D'une manière générale, la capacité de dispersion des individus est un des principaux éléments qui permettra aux populations de se déplacer et se localiser conformément aux dimensions thermique et hydrodynamique de leur niche écologique. Les espèces étaient adaptées au contexte du réseau hydrographique et les modifications anthropiques qui ont accompagné la révolution industrielle ont fortement réduit certaines populations,

3. GICC : Programme du MEDDM sur changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles, n° de contrat 000767, APR Thème IV « biodiversité et changement climatique ».

comme celles du saumon atlantique en réduisant drastiquement son aire de distribution du fait de l'érection des grands barrages. Le réchauffement climatique devrait encore mettre à l'épreuve la capacité des espèces à s'adapter au nouveau contexte anthropisé. Cependant, les individus ont une certaine capacité à modifier leur comportement et/ou leur physiologie selon leur environnement. Ainsi, chez la truite, la demande en oxygène des embryons peut varier largement en fonction des pontes [65]. Tous les individus n'ont pas les mêmes capacités, mais suivant l'efficacité du processus de sélection, le temps nécessaire à la capacité d'adaptation des populations pourrait excéder le temps nécessaire à la mise en place de processus évolutifs. La dispersion génétique des individus peut cependant accélérer ces processus d'adaptation en mixant à la population locale des individus provenant de populations plus au sud. Sur les 15 dernières années, la population de saumon de la Nivelle (rivière la plus chaude abritant une population de saumon) semble évoluer vers plus de flux de gènes favorisant un fonctionnement en métapopulation, et vers une augmentation de la dichotomie entre les sexes concernant l'âge à la première maturation. Le laboratoire *Ecobiop* de l'INRA a réalisé une modélisation individu-centré prenant en compte les différentes stratégies de vie et des facteurs de croissance et de survie densité-dépendants, pour prévoir les risques d'extinction de cette population sous différents scénarios ([66] – **Figure 6**).

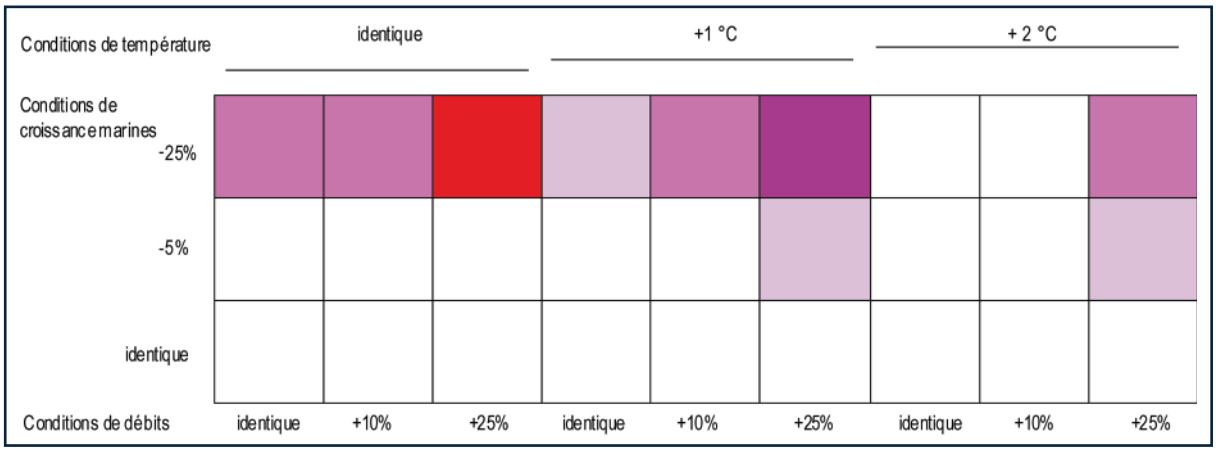


Figure 6 : *Simulation par modélisation individu-centrée des risques d'extinction de la population de saumon de la Nivelle à 50 ans (1990-2040) sous trois scénarios climatiques en combinaison (soit 27 conditions) : une augmentation linéaire sur 50 ans pour la température de 0°, +1° et +2 °C ; une variation des amplitudes de débit : nulle, de +10 % et de +25 % ; une variation des conditions de croissance marines : nulle, de -5 % et de -25 %. En blanc, probabilité d'extinction nulle ; en rose clair à rose foncé = 1%, 2%, 3% et en rouge = 19%.*

Les résultats sont contre-intuitifs car la croissance densité-dépendante contre-balance les effets potentiellement négatifs de l'augmentation des variations de débit, et des moins bonnes conditions de croissance marine. Il est aussi important pour évaluer les risques d'extinction des populations de cibler et d'étudier les phases critiques afin de mieux renseigner ce type de modèle. Ainsi, l'étude de l'impact d'une température de reproduction de 13 °C (soit 3° au-dessus de l'optimum pour la population considérée) sur la fraie du saumon a montré que les comportements de cour et de creusement étaient moins bien synchronisés et allongés, ce qui pourrait diminuer le succès de la reproduction ; malgré tout, il n'y a pas inhibition et la ponte a bien lieu [67]. La température pourrait aussi atteindre des valeurs critiques pour les géniteurs lors de la phase estivale d'attente des crues automnales pour rejoindre les zones favorables à la reproduction, notamment sur des zones très anthropisées où le débit de l'eau est ralenti par des barrages et réduit par le pompage agricole. La modélisation des évolutions de température de l'eau par rapport à celle de l'air est un des points de recherche cruciaux pour établir les prédictions concernant la faune pisciaire. La Nivelle a ainsi pu fournir un jeu de données sur 20 ans permettant de prédire la température de l'eau à l'échelle hebdomadaire avec comme variables explicatives la température de l'air et le débit [68].

Même si l'étude de Tisseuil [62] ne prenait pas en compte le saumon atlantique, elle suggère que les principales divergences de scénarios apparaîtront en seconde moitié du XXI^{e} siècle et porteront essentiellement sur la sévérité des étiages automnaux. Cette hydrologie automnale est particulièrement

importante pour les salmonidés, car les crues sont des facteurs déclenchant de la migration, et des niveaux d'eau réduits peuvent interdire l'accès aux ruisseaux d'ordre 1 ou 2, situés en tête de bassin versant. Des travaux en cours sur la Nivelle permettent de suivre par radio-pistage la localisation des adultes de saumon depuis leur entrée en rivière au printemps ou en l'automne et jusqu'à la reproduction. Ils devraient nous éclairer dans un proche avenir sur la relation entre la température, l'hydrologie, la localisation des saumons et leur succès reproducteur dans le contexte d'une rivière localisée en limite sud de l'aire de répartition de cette espèce.

Les effets possibles sur les oiseaux de montagne

De nombreuses études décrivent les diverses réactions des oiseaux face au changement climatique : modifications de la dynamique locale de leurs populations, changements dans leur distribution géographique, ajustements ou découplage de leur calendrier de reproduction et/ou de migration, etc. Ces effets avérés ou projetés du changement climatique se manifestent au niveau des espèces et au niveau des assemblages d'espèces (par exemple [69][70][71]). Entreprise à l'échelle de l'Europe ou à l'échelle nationale, et disponible sous forme d'Atlas climatique et de publications (par exemple [47] [48]), cette information ne traite pas spécifiquement de la situation de la biodiversité dans les massifs montagneux et encore moins de celle souhaitée ici à l'échelle des montagnes d'Aquitaine. À l'échelle de l'Europe, pour la période 2070-2099, les projections réalisées à partir de modèles de distribution d'espèces font état d'effets variables sur la vulnérabilité et les changements possibles de distribution, selon le scénario climatique pris en compte. En théorie, l'aire potentielle future de distribution pour ces espèces pourrait atteindre 72 à 89 % de l'aire actuelle, et si cela se réalise, le nombre moyen d'espèces nicheuses par maille de 50 x 50 km baisserait de 6,8 à 23,2 % [47]. Les changements les plus dramatiques concerneraient les espèces endémiques pour lesquelles il y aurait un chevauchement très limité ou nul entre aire actuelle et aire future ; ces espèces seraient donc les plus vulnérables et présenteraient le plus haut risque d'extinction. *A contrario*, des espèces à affinité thermique chaude pourraient étendre leur aire de distribution et coloniser de nouveaux sites, en rapport avec le processus de *thermophilisation* évoqué plus haut [27].

En montagne Aquitaine, quelques études illustrent ces diverses tendances. L'installation toute récente, en 2001, du Monticole bleu *Monticola solitarius* dans les montagnes basques illustrerait la thermophilisation en cours de notre région. Il s'agit d'une espèce de Merle typiquement xéro-montagnarde confinée aux régions méditerranéennes qui ne trouvait pas jusqu'à présent dans les Pyrénées occidentales françaises, avec ses printemps à forte pluviosité, des conditions climatiques favorables et qui s'y reproduit désormais [72]. Le Grand Tétras *Tetrao urogallus* est l'une des espèces d'oiseaux bien étudiée aux Pyrénées pour laquelle différents indices témoignent du fait que les changements climatiques en cours jouent un rôle déterminant dans le devenir de ses populations [73][74]. La période des accouplements aurait été légèrement plus précoce au cours des 10 années écoulées que durant les années 1980-1997. Une baisse sensible du succès de la reproduction sur les versants français et espagnols a été mise en rapport avec les changements observés dans les conditions atmosphériques estivales depuis 1980 (notamment l'augmentation des précipitations entre mai et août) tandis que les changements dans les conditions d'enneigement et la phénologie de la végétation sont suspectés d'avoir également un impact important.

Des effets indirects sur la biologie des oiseaux existent mais sont moins connus et plus subtils, car ils s'exercent sur les déterminants physiques du milieu par exemple. Plusieurs études réalisées en vallée d'Ossau indiquent que les stratégies comportementales et les dépenses énergétiques du Cincle plongeur, espèce inféodée aux cours d'eau et abondante dans les Pyrénées [75], sont dictées directement par les caractéristiques du régime hydrologique naturel [76], elles-mêmes profondément affectées [77] par le changement climatique (cf. chapitre 8) et de façon variable par les différents modes de gestion hydro-électriques possibles [78].

Les travaux à long terme de l'Observatoire[4] Régional de la Migration des Oiseaux et les changements amorcés dans le calendrier de la migration des oiseaux en montagne Aquitaine.

Les suivis effectués lors de la migration des oiseaux depuis plus de 30 ans au col d'Organbidexka ont été mis à profit pour documenter les décalages temporels (phénologiques) consécutifs ou susceptibles d'être liés au changement climatique [79][80]. L'analyse pondérée des dates moyennes de passage de 14 espèces de rapaces entre 1981 et 2008 a démontré un décalage temporel statistiquement significatif pour 8 d'entre elles, avec une avancée significative de 10 jours pour le Busard des roseaux *Circus aeruginosus* et un retard significatif de 9 jours pour le Faucon crécerelle *Falco tinnunculus* [79]. De façon générale, le décalage phénologique est plus prononcé chez les espèces migratrices sur de longues distances (par rapport à celles migrant sur des distances plus courtes).

L'analyse des dates de passage de la Grue *Grus grus* indique également une avancée significative de la migration automnale (20 jours en l'espace de 30 ans) et ce indépendamment des variations des conditions météorologiques locales. L'explication envisagée tient à l'augmentation des températures printanières à plus haute latitude en Europe, ce qui pourrait affecter à la fois la migration de printemps et le calendrier de la reproduction [80].

Cas particulier des espèces vulnérables, indicatrices et/ou emblématiques

Pour certaines espèces menacées, l'information disponible – issue en majorité de travaux de modélisation – à l'échelle européenne ou nationale permet de poser des bases réalistes de réflexion pour anticiper une évolution probable [49]. C'est le cas du papillon Apollon (*Parnassius apollo*), une des espèces menacées des espaces supra-forestiers pyrénéens et classée « Vulnérable » dans la liste rouge de l'IUCN (catégorie Vu A1cde). Comme annoncé plus haut, en 2080, elle aurait disparu des montagnes d'Aquitaine sous l'hypothèse la plus extrême (élévation attendue de température de 4,1 °C) tandis que sous l'hypothèse la moins défavorable (élévation de 2,4 °C), la distribution en Aquitaine serait au mieux la même, bien qu'une légère contraction de la distribution soit plus plausible **(Figure 7)**.

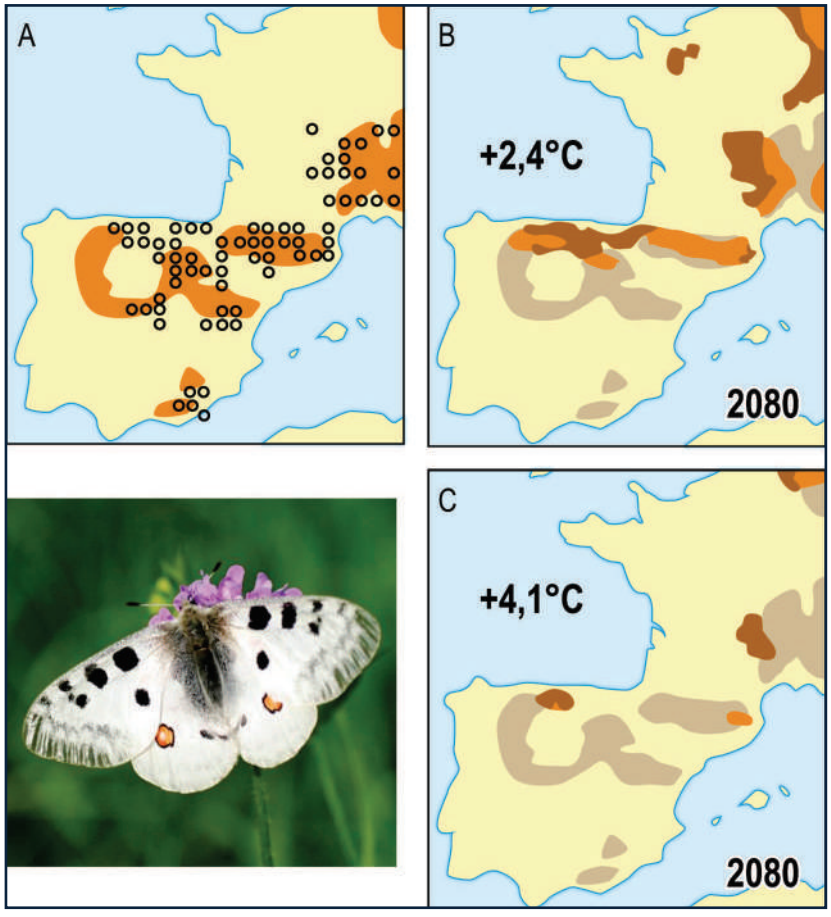


Figure 7 : *Exemple d'effet projeté, après transfert d'échelle, de l'évolution du climat sur la distribution d'un papillon emblématique des montagnes Pyrénées : l'Apollon (Parnassius apollo). (a) Distribution observée (cercles noirs/maille UTM de 50 x 50 km²) et distribution obtenue par modélisation de la niche climatique (orange). (b) et (c) Distribution d'espace climatique de niche projetée en 2080 sous deux scénarios d'évolution : (b) modéré – B1 et (c) extrême – A1F1. Légende : orange : pas de changement ; gris : perte prévisible ; marron : gain prévisible (source : Settele et al. 2008, http://www.pensoft.net/journals/biorisk/issue/1-1/).*

4. Programme d'étude de la migration en Aquitaine coordonné par la LPO Aquitaine avec Organbidexka Col Libre.

Pour la plupart des espèces en fait, l'information n'existe cependant pas, à aucune échelle. Cet état de fait est particulièrement problématique pour certaines espèces dont la distribution en montagne aquitaine reste méconnue (par exemple le criquet *Cophopodisma pyrenea* **(Figure 2-A)** et la grenouille des Pyrénées *Rana pyrenaica* - [81]) ou dont la présence vient juste d'être signalée comme c'est le cas de la mouche des neiges, aptère, *Chionea pyrenaica* (**Figure 2-B,** [82]), ou dont l'écologie est encore insuffisamment explorée comme c'est le cas des espèces végétales des combes à neige (communautés retenues dans le cadre des actions de l'OPCC – cf. § ci-dessous), du Desman des Pyrénées qui bénéficie pourtant de mesures établies à l'échelle nationale (cf. § ci-dessous) ou de certaines espèces de lézards. Des trois lézards montagnards pyrénéens, *Iberolacerta bonnali* est la plus répandue et la seule dont la présence soit signalée en Aquitaine (dans le massif de l'Ossau ; Pyrénées-Atlantiques). Plus répandue que les deux autres, l'espèce est moins menacée [Classification IUCN : I. *aranica* (CR), I. *aurelioi* (EN) et I. *bonnali* (VU)]. Les principaux facteurs de menaces sont liés au fait qu'elle ait une aire de distribution réduite, qu'elle connaisse une fragmentation croissante de ses populations en raison de fortes pressions anthropiques locales en haute montagne et qu'elle possède une stratégie de reproduction exigeante [83]. Le changement climatique exacerberait probablement le confinement de sa distribution à des zones isolées de superficie plus réduites, à plus haute altitude [84] ; combiné à la progression en altitude d'autres espèces compétitrices telles que le Lézard des murailles, il en résulterait probablement une raréfaction accrue en Aquitaine dans un futur proche. Au même titre que l'Espagne, et que les régions Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, la région Aquitaine a une responsabilité forte vis-à-vis de ces espèces.

Le cas du Desman des Pyrénées

Bénéficiaire d'un Plan National d'Actions (2010-2015) basé sur 25 actions de conservation [85] et emblématique des Pyrénées, le Desman des Pyrénées (*Galemys pyrenaicus*) est un mammifère unique, totalement inféodé aux cours d'eau. Endémique, rare, très difficile à voir et à étudier, il est en déclin généralisé. L'Aquitaine abrite la population présente à l'altitude la plus basse enregistrée de son aire naturelle de distribution. La priorité des études[5] est donnée à l'actualisation de son aire de distribution et à la compréhension de l'influence des facteurs de l'environnement. Contrastant avec d'autres travaux menés à l'échelle européenne, les travaux d'une équipe internationale [86] démontrent l'importance majeure du facteur « précipitations » et l'absence relative d'influence du facteur « température » **(Figure 8)**. Dans ce cas, l'Aquitaine, en abritant la population la plus au nord-ouest, jouerait un rôle refuge capital dans la préservation de l'espèce face au changement climatique.

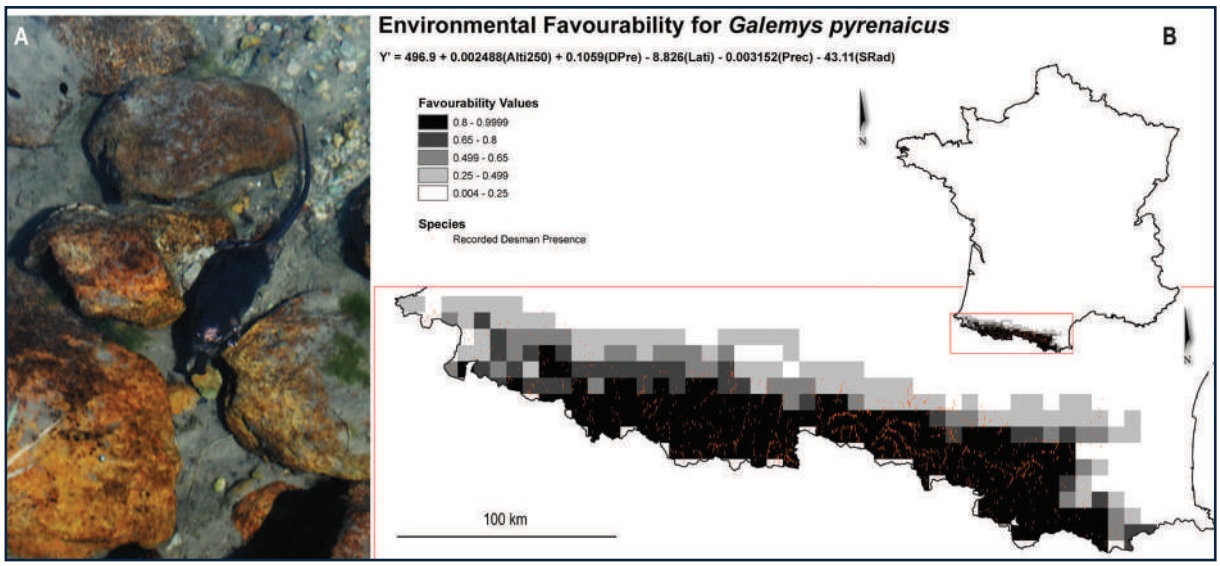


Figure 8 : *La distribution de l'endémique Desman des Pyrénées (Galemys pyrenaicus). (a) individu nageant (b) Distribution observée (cercles orange) et distribution obtenue par modélisation de la niche climatique (niveaux de gris). La favorabilité environnementale des cours d'eau en Aquitaine est en moyenne plus faible qu'ailleurs dans les Pyrénées. [Source : Williams-Trip, D'Amico et al. 2012].*

5. Programme partenarial entre l'INP-ENSAT, l'Université Paul Sabatier (Laboratoire Ecolab), l'Université de Pau & Pays de l'Adour, le CREN Midi-Pyrénées et divers partenaires industriels dont EDF.



Port de Castet, vallée d'Ossau (© F. D'Amico, UPPA).



Rocher d'Aran, vallée d'Ossau (© F. D'Amico, UPPA).

Le suivi des espèces végétales des combes à neige

L'étude des communautés végétales des combes à neige est proposée[6] pour comprendre les effets du réchauffement climatique global sur la végétation des Pyrénées. Ces communautés végétales, avec une flore très particulière, seraient particulièrement sensibles aux changements climatiques du fait de conditions pédoclimatiques exigeantes. *Salix herbacea* est une des rares espèces de chaméphytes avec S. *retusa* et S. *reticulata*, présente dans les combes à neige pyrénéennes. C'est également une des espèces les mieux connues de ces habitats [87][88]. Si les scénarios hypothétiques s'avéraient réels, les combes à neige seraient probablement l'habitat alpin où les conditions méso-climatiques changeraient le plus rapidement [89][90]. Un des principaux scénarios pour les combes à neige prévoit une fonte des neiges plus précoce qui exposerait la végétation à des changements brusques des températures atmosphériques et à une dessiccation plus importante du sol en période estivale. La fonte de la neige et l'augmentation des températures du sol contribueraient à l'évolution du milieu, sur le plan écologique, qui pourrait alors être occupé par d'autres espèces plus opportunistes. Le choix de suivre l'évolution des populations de S. *herbacea* pour évaluer les effets du climat est renforcée par le fait que la plante se situe dans des zones de faibles influences anthropiques, où les modifications d'utilisation des espaces n'ont quasiment aucun effet sur la communauté contrairement aux perturbations induites par le changement climatique.

Impacts sur les écosystèmes

Impacts observés et attendus du changement climatique sur les forêts de montagne

L'analyse de la croissance des peuplements forestiers, totalisant une surface importante dans les montagnes béarnaises notamment, est un bon indicateur de l'impact des changements environnementaux car la croissance des arbres présente une réponse rapide aux variations environnementales [8] et permet de révéler les tendances à long terme sous l'influence des changements climatiques [91][92][93]. C'est avec cet objectif que l'UMR Biogeco de l'INRA a conduit une analyse dendrochronologique qui a mis en en évidence une remontée altitudinale de l'optimum de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica*) dans les Pyrénées occidentales entre 1970 et 2009. Le long de gradients altitudinaux situés dans les Pyrénées françaises, l'optimum de croissance de cette espèce, qui est ici dans sa limite sud d'aire de répartition, s'est déplacé à la vitesse de 34 m par décennie passant de 420 m d'altitude en 1970 à 550 m d'altitude quatre décennies plus tard. Ce déplacement de l'optimum s'explique d'une part par un déclin de croissance à basse altitude (en dessous de 600 m) et d'autre part par un gain de croissance au-dessus de 600 m au cours des quatre dernières années **(Figure 9)**. De plus, la comparaison des années selon leur climat a permis de constater que les faibles précipitations tout comme les hautes températures pendant la saison de croissance conduisent à un optimum de croissance plus élevé le long du gradient.

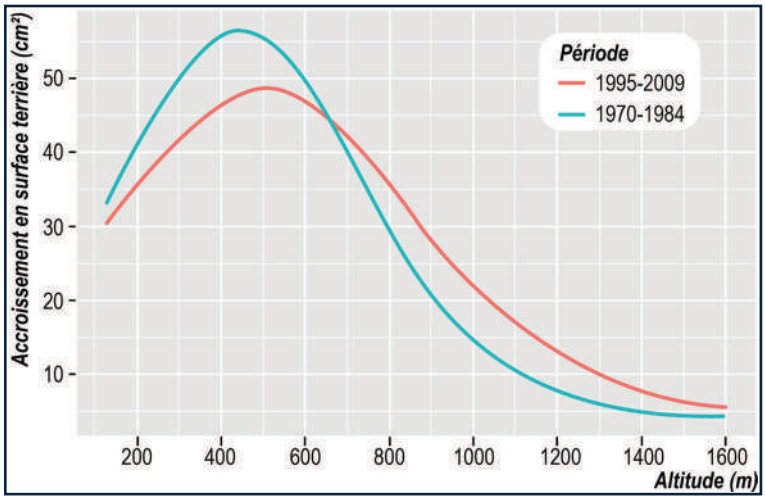


Figure 9 : *Comparaison des patrons de croissance moyenne le long du gradient au cours des périodes 1970-1984 et 1995-2009, ajustés sur les accroissements individuels des arbres. La croissance des 15 dernières années présente un déclin sensible en dessous de 600 m d'altitude par rapport à celle de 1970-1984. Au-dessus de 600 m, la croissance des arbres a par contre augmenté lors de la période récente. Le déclin à basse altitude et le gain de croissance à haute altitude induisent un déplacement altitudinal de l'optimum de croissance.*

6. Proposé pour l'OPCC par le CENMA et le CBNPMP.

Dans le cadre d'une expérimentation de transplantations réciproques du hêtre le long du même gradient altitudinal **(Figure 10)**, les populations de hêtre, transplantées à toutes les altitudes, ont été suivies pour leur croissance et leur phénologie durant plusieurs années [93].

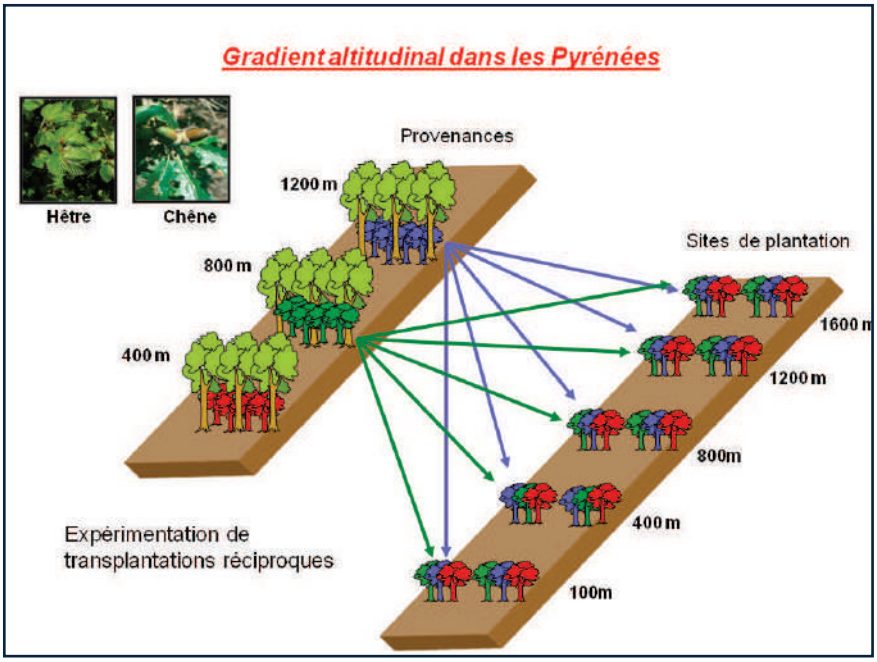


Figure 10 : *Représentation schématique du dispositif de transplantations réciproques du hêtre mis en place le long du gradient altitudinal dans les Pyrénées.*

Pour la croissance du hêtre, on observe une courbe en cloche vis-à-vis du gradient altitudinal avec des accroissements en hauteur plus faibles aux extrémités du gradient. L'optimum de croissance des juvéniles estimé sur cette courbe se situe en moyenne à 789 m, correspondant ici à une température annuelle de 9,54 °C. La température optimale estimée pour la saison de végétation est plus élevée et comprise entre 10 et 13 °C [93], correspondant à une altitude moyenne de 750 m. Les optimums altitudinaux estimés pour la saison de végétation et la croissance sont donc semblables, suggérant que la phénologie et la longueur de saison de végétation sont de bons indicateurs de la croissance et de la *fitness* des individus et des populations. Le changement climatique a d'ores et déjà affecté la croissance des populations de hêtre dans les Pyrénées et les populations de cette espèce à basse altitude pourraient être défavorisées au profit d'espèces plus thermophiles ou plus résistantes à la sécheresse **(Figure 11)**.

Les optimums de croissance et de saison de végétation sont similaires entre les différentes populations de hêtre **(Figure 12)**. Ces résultats démontrent que les populations naturelles ont tendance à vivre dans un climat suboptimal [95]. Les populations de haute altitude vivent au sein d'un climat plus froid que leur optimum et pourraient ainsi bénéficier positivement du réchauffement ; au contraire, les populations de basse altitude vivent déjà dans une zone où le climat est plus chaud que leur optimum ce qui pourrait engendrer un déclin de croissance lors d'un réchauffement. Les résultats obtenus sur les modifications du patron de croissance le long du gradient altitudinal en population naturelle et dans l'expérimentation de transplantations réciproques suggèrent que le réchauffement sera bénéfique pour les populations de haute altitude et qu'il affectera négativement celles de basse altitude. Ainsi, l'optimum de croissance et de présence/absence du hêtre devrait remonter en altitude au cours des prochaines décennies et nous pourrions même observer une extirpation (= extinction locale) à basse altitude dans un futur très proche, ce qui a d'ailleurs déjà été constaté au sein de populations de hêtre à basse altitude en Catalogne [8][96].



Figure 11 : *Le changement climatique a d'ores et déjà affecté la croissance des populations de hêtre (en arrière-plan sous l'imposante stature du Pic du Midi d'Ossau – 2 885 m) et les populations de cette espèce à basse altitude pourraient être défavorisées au profit d'espèces plus thermophiles ou plus résistantes à la sécheresse (au premier plan de la photographie, cliché : F. D'Amico, 9 mai 2012).*

Impacts observés et attendus du changement climatique sur les écosystèmes prairiaux

C'est dans les situations environnementales moyennement stressées et moyennement perturbées, par les herbivores ou la fauche traditionnelle, que les communautés herbacées de pelouses et prairies sont les plus diverses (**Figure 13** : graphique du bas). En effet, conformément au modèle de Grime [97], dans les milieux plus stressés et/ou perturbés la diversité est très faible du fait de l'importance des contraintes environnementales (partie droite de la **Figure 13**), alors que dans les milieux à faible stress et/ou perturbation c'est l'intensité de la compétition entre les plantes qui fait chuter la diversité (partie gauche de la **Figure 13**). Ce modèle de maximum de diversité au milieu des gradients de productivité herbacée a été particulièrement discuté très récemment [98] mais il demeure encore largement reconnu dans la littérature scientifique [99]. Néanmoins, les interactions entre les plantes ne sont pas toujours négatives et l'importance des interactions biotiques positives est maintenant également largement reconnue, en particulier dans les environnements très contraints par le stress ou la perturbation [100]. Michalet *et al.* [101] ont notamment proposé que ce seraient les interactions

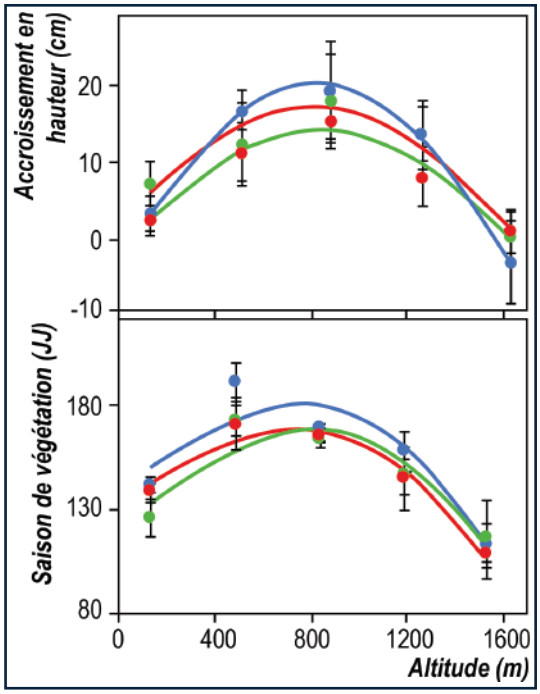


Figure 12 : *Accroissement en hauteur et longueur de saison de végétation en fonction de l'altitude. Les valeurs correspondent aux moyennes par population mesurées dans l'expérimentation de transplantations réciproques. En rouge, les populations de hêtre provenant de 400 m, en vert, celles de 800 m et en bleu, celles de 1 200 m.*

positives (facilitation) qui pourraient également expliquer la forte diversité de ces pelouses, de par une augmentation de la facilitation depuis les environnements les plus contraints jusqu'aux environnements moyennement contraints (**Figure 13** : graphique du haut).

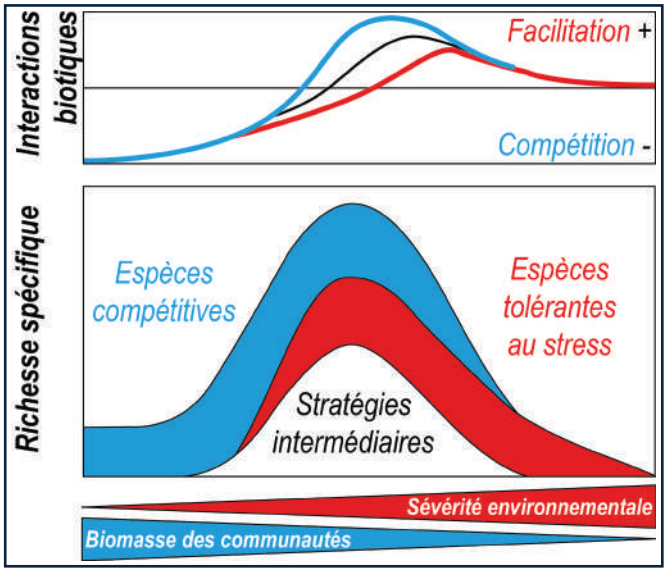


Figure 13 : *Évolution des interactions entre plantes le long d'un gradient complexe de contrainte environnementale croissante (stress et perturbation physique) et de biomasse végétale décroissante (graphique du haut). Le graphique du bas représente l'évolution en parallèle de la richesse spécifique des communautés herbacées proposée par Grime (1973) D'après Michalet et al. (2006).*

Les recherches internationales effectuées sur les effets du changement climatique sur les communautés herbacées visent à étudier les effets du changement climatique sur leur diversité et/ou leur productivité mais la plupart se sont intéressées aux seuls effets d'une augmentation de température ou éventuellement d'une diminution des précipitations [102][103][104]. Cependant, dans ces milieux la diversité étant également sous la dépendance des pratiques de gestion (perturbation par fauche ou pâturage), il est important d'étudier les interactions entre les changements de perturbation et les changements climatiques. Ceci est particulièrement vrai dans les écosystèmes du sud de l'Europe où de nombreuses études théoriques et de modélisation ont prédit que l'interaction du stress (sécheresse par exemple) et de la perturbation pourrait entraîner des effets catastrophiques sur le fonctionnement des écosystèmes et la diversité [101][105]. D'autre part, ces études de changement climatique se sont rarement intéressées aux changements éventuels d'interactions entre les plantes au sein des communautés en ne ciblant que sur les changements de productivité et les réponses des espèces dominantes, alors qu'il est maintenant admis que les interactions entre les organismes pourraient fortement moduler les réponses des communautés et des écosystèmes au changement climatique [106][107][108]. En particulier, dans les écosystèmes stressés du sud de l'Europe il est prédit que l'interaction du stress d'origine climatique et des perturbations devrait entraîner l'effondrement des écosystèmes et de la diversité par effondrement des interactions positives entre plantes ([101][105] et **Figure 13**).

Conduites en Aquitaine par les chercheurs de l'UMR 5805 *EPOC* (Université Bordeaux 1)[7] les expérimentations mises en place en 2010 dans les estives des Pyrénées-Atlantiques à la Pierre-Saint-Martin (1 900 m, commune d'Arette) permettront de comprendre les interactions entre (1) l'augmentation de la sécheresse d'origine climatique due à l'effet combiné du changement climatique et des perturbations liées aux activités anthropiques et (2) le rôle modulateur des interactions biotiques. Diverses communautés de pelouses d'humidités édaphiques contrastées ont été asséchées en installant des tunnels interceptant les précipitations estivales **(Figure 14)** et en appliquant une perturbation de type fauche. Pour les conditions d'humidité, un gradient de seize communautés a été choisi ; il s'échelonne depuis des pelouses très xérophiles sur rocher affleurant jusque des pelouses très mésophiles dans des dépressions sur sol profond. Dans chaque parcelle, la réponse aux traitements sécheresse et fauche d'espèces représentatives de ces communautés a été étudiée soit en présence de voisins ou dans des microsites où les voisins ont été éliminés. A également été suivie la réponse des communautés en termes de diversité, de productivité et de fonctionnement des écosystèmes (décomposition des litières). Au niveau de ce site d'étude

7. 2009-2012, dans le cadre d'un projet ANR SYTERA coordonné par Laurent Hazard, INRA Toulouse.

pyrénéen, les résultats sont encore provisoires **(Figure 15)** et l'expérimentation est toujours en cours. Les premiers résultats au niveau des interactions biotiques indiquent que dans les parcelles les plus humides la compétition est dominante, aussi bien avec que sans fauche. Au milieu du gradient d'humidité la compétition cède la place à la facilitation, conformément aux modèles théoriques. Cette dernière semble persister à l'extrémité du gradient de sécheresse où la fauche a alors un effet négatif significatif sur la survie des espèces.



Figure 14 : *Installations expérimentales de simulation d'une augmentation de l'aridité estivale par interception des précipitations au niveau des estives de la commune d'Arette (Col de la Pierre-Saint-Martin, 1 900 m, Pyrénées-Atlantiques).*

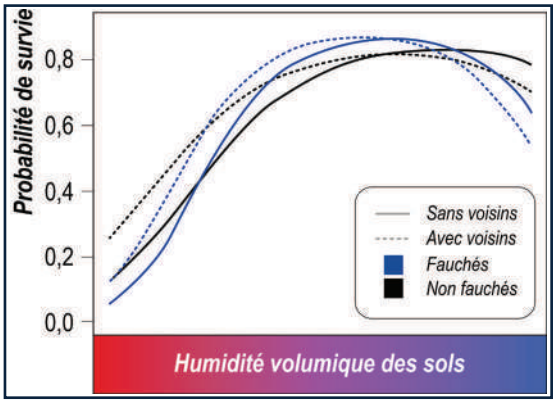


Figure 15 : *Probabilités moyennes de survie de cinq espèces (ou phénotypes d'espèces) herbacées des estives de la Pierre-Saint-Martin le long d'un gradient complexe (naturel et expérimental) d'humidité du sol, avec et sans fauche et avec et sans voisins.*

Comme cela a été montré dans les anciens parcours ovins de Dordogne, la diversité, la productivité et le fonctionnement des écosystèmes pourraient être très négativement affectés par le seul effet de la sécheresse estivale. Par contre, dans les situations les plus xérophiles la perturbation par la gestion (pâturage, fauche) ne semble pas augmenter les risques de détérioration des propriétés de ces écosystèmes et ce d'autant plus que ces parcours sont déjà fortement abandonnés par les éleveurs. Les premiers résultats obtenus dans les estives pyrénéennes sont identiques en ce qui concerne les communautés les plus mésophiles et soulignent la nécessité de conserver une pression de gestion importante. Par contre au niveau des situations les plus sèches, l'importance de la facilitation entre les plantes, semble constituer une assurance pour la diversité face à l'augmentation de la sécheresse induite par le changement climatique. Des études plus longues pourraient néanmoins démontrer que l'ajout de la perturbation par la gestion entraînerait un effondrement des propriétés des communautés et des écosystèmes, conformément aux modèles théoriques et mathématiques les plus récents.

III- Adaptations/Mitigation

Quelques pistes générales possibles, à des degrés d'opérationnalité et de réalisme éthique à conforter, d'adaptation ou de mitigation adaptées aux écosystèmes et espèces de montagne face au changement climatique :

- Réévaluer les objectifs de gestion à la lueur du challenge du changement climatique et réduire dans la mesure du possible les stress anthropiques locaux représentant des facteurs susceptibles d'altérer la capacité de résistance de la biodiversité à s'adapter aux changements globaux (fragmentation,

pollution…). Utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique.

- Maintenir les usages traditionnels des sols là où ils ont été les formes majoritaires de gestion, en garantissant les missions originelles en harmonie avec le maintien des cultures et traditions locales historiques. Protéger les traditions et les héritages culturels, ceux en connexion avec les territoires, qui sont les mieux à même de garantir un maintien de la diversité spécifique locale et des écosystèmes sensibles (pastoralisme…).

- Promouvoir les initiatives originales qui associent « faible pression en terme de gestion » et « création d'hétérogénéité spatiale ». Par exemple, comme dans les pays du nord de l'Europe, il apparaît crucial de continuer à faucher et où pâturer les pelouses les plus mésophiles, afin d'éviter l'envahissement par des espèces compétitrices qui menacent fortement la diversité des communautés et des paysages.

- Préserver en priorité les caractéristiques écosystémiques essentielles (celles qui en déterminent la structure et le fonctionnement intrinsèques) et protéger les espèces (notamment les espèces clé de voûte) les plus à même de s'adapter et d'être une source pour toute récupération éventuelle. Préserver les espèces identifiées comme redondantes (« doublons »), de telle façon qu'en cas de perturbation locale, l'une d'elles au moins subsiste. Protéger les variables (ressources, espèces) qui puissent œuvrer comme des tampons, avec un tempo de persistance adapté au changement climatique [109].

- Reconnaître et améliorer les missions des espaces protégés. Préserver les zones identifiées comme « refuges » par exemple les localités de développement de populations d'espèces rares ou menacées ou les stations moins susceptibles d'être concernées par le changement climatique. Ces zones pourraient être utilisées comme sources pour le repeuplement ou comme zones-cibles pour établir des populations transplantées [110].

- Dans les cas les plus extrêmes, pour les espèces les plus sévèrement impactées, certaines stratégies de mitigation recommandent 1) le maintien et la reproduction en captivité d'espèces à haut risque d'extinction et/ou 2) la translocation (migration assistée) de populations, le déplacement d'organismes d'une zone à une autre, séparée par une barrière (zone urbaine, aménagée…).

- Malgré les effets positifs attendus sur la biodiversité en termes de mitigation du changement climatique consécutifs directement à la réduction de l'émission de GES, certains auteurs [30] appellent à un changement majeur de paradigme dans les politiques de conservation et au déploiement d'approches plus efficaces que celles mises en œuvre actuellement : requalification des zones de conservation existantes, création de nouvelles zones et développement de mécanismes plus opérationnels de gestion intégrée facilitant la connectivité entre zones de conservations dans leur dimension verticale (altitudinale) mais aussi horizontale. Cela peut se traduire pour l'Aquitaine par un maintien ou un renforcement des échanges avec les territoires situés plus à l'Est (région Midi-Pyrénées notamment) et au Sud (Euskadi, Navarra…).

Conclusion

Plusieurs travaux scientifiques témoignent déjà d'impacts significatifs, tant sur les activités économiques – pronostic ou diagnostic plutôt incertain pour le futur des stations de ski béarnaises sans adaptation particulière – que sur l'évolution des quelques espèces animales étudiées pour l'instant en Aquitaine (qui de ce fait, a une responsabilité forte en terme de conservation de celles-ci) et sur le fonctionnement des forêts et des estives. Certes les glaciers du massif sont menacés de disparition d'ici 2050, mais le côté le plus alarmant de ces constats n'est pas nécessairement dans la dramatisation des

impacts possibles et/ou avérés mais plutôt dans la révélation d'un manque de scénarios fiables à l'échelon des massifs et des vallées des Pyrénées occidentales (Ossau, Aspe, Barétous, Aldudes…). Les résultats observés et décrits ici pour le milieu montagnard relèvent de recherches encore souvent préliminaires et nécessitent parfois une prise de recul prudente. Ils montrent que les effets possibles du changement climatique sur les communautés (notamment herbacées) sont très dépendants des situations locales et qu'il faut se garder de généraliser trop rapidement des observations ou expérimentations réalisées dans des contextes spécifiques. Il reste indispensable de faire la part des choses entre les travaux qui s'appuient réellement sur des mesures et travaux de terrain et ceux (plus nombreux souvent, et à des échelles trop grandes) qui s'appuient sur des modèles uniquement. La prise de recul sur les modèles est absolument nécessaire car les effets possibles du changement climatique sur les communautés (notamment herbacées) sont très dépendants des situations locales. Qui plus est, ce sont pour l'instant des modèles centrés sur l'espèce elle-même, et *a fortiori*, ils n'intègrent pas encore, ou pas suffisamment les entrées « écosystème », « communauté » ou « diversité génétique » et ils s'appuient peut-être de façon excessive sur les données de répartition actuelle, elle-même largement conditionnée par les activités anthropiques passées et actuelles. Il n'en demeure pas moins que la modélisation est un outil extrêmement précieux pour accroître la connaissance, permettre l'anticipation et la préparation des mutations.

Les manifestations à venir du changement climatique mettent en jeu des systèmes complexes propres à l'altitude, intriquant processus nombreux physico-chimique, écologiques et socio-économiques. À côté des premières certitudes, de nombreuses inconnues subsistent pourtant : qu'en est-il des effets (régionaux voire globaux) de l'écobuage ? Que dire de la prolifération algaire et de l'eutrophisation visibles dans les ruisseaux des estives : effets combinés du changement climatique et des modifications locales des pressions de pâturage ? Quels seront les effets sur certaines pratiques artisanales comme l'apiculture ? Quelle est l'ampleur des effets réels sur l'intégralité de la biodiversité d'altitude dans les Pyrénées-Atlantiques ?

De façon indubitable, les premiers résultats démontrent l'importance de construire des projets expérimentaux de longue durée dans des contextes écologiques diversifiés et invitent à la promotion de recherches concertées et basées sur des observations de terrain, complémentaires aux travaux de modélisation, dans le cadre d'Observatoires notamment.



Cascade de travertin dans la vallée d'Aydius, Pyrénées-Atlantiques (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 8 :

L'air et L'eau

Préambule

On ne peut pas évoquer le changement climatique sans s'arrêter sur le rôle de l'atmosphère ou celui des océans, ni sur les échanges continus entre les deux compartiments. Si les impacts de la composition de l'air ou ceux du moteur océanique sur le climat sont globalement aujourd'hui bien appréhendés, ce n'est pas toujours le cas des effets rétroactifs que les changements climatiques peuvent exercer sur la qualité de l'air ou l'hydrosphère en général. Dans ce chapitre, l'eau sera plutôt envisagée en tant que ressource (qualité de l'eau, eaux de surface et souterraines) qu'en milieu de vie, aspect traité par ailleurs dans le chapitre 6.

Les qualités de l'air et de l'eau font partie depuis plusieurs années des préoccupations majeures de la société. Leurs évolutions sont très souvent directement reliées au développement économique et à l'accroissement de la population mondiale. S'il est déjà reconnu que l'accessibilité aux ressources comme l'eau, la nourriture ou l'énergie n'est pas distribuée équitablement, il est également attendu que les changements climatiques contribueront à détériorer cette situation dans un futur proche. En outre, les conséquences des changements climatiques ne seront pas les seules priorités auxquelles notre société devra faire face. Les changements progressifs mais rapides de la composition de l'air que nous respirons ou de l'eau affecteront, en premier lieu, la santé humaine, mais également la production agricole, et par conséquent l'économie dans sa globalité. Les enjeux autour de l'air et de l'eau sont donc déjà multiples et il apparaît indispensable d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur leur évolution.

L'objectif du chapitre 8.1 est de résumer quels peuvent être les impacts du changement climatique sur la qualité de l'air en terme de pollution, quelles sont les limites des législations et réglementations mises en place pour contraindre les émissions atmosphériques face aux polluants formés de façon indirecte dans l'air, en se focalisant particulièrement sur les spécificités de l'Aquitaine, même si, contrairement aux autres compartiments environnementaux, l'atmosphère ne présente horizontalement pas de frontière réelle.

Du fait du rejet direct de nombreux polluants, de leur transport atmosphérique, des processus de dépôts et des phénomènes de ruissellement qui en découlent, l'eau, élément indispensable à la vie est et deviendra de plus en plus une ressource rare à protéger. Au cours des temps, les usages de l'eau se sont peu à peu diversifiés et intensifiés. La préservation de la qualité de l'eau est donc un enjeu majeur tant pour l'environnement que pour l'Homme. Dans cette optique, il est important de comprendre les facteurs qui peuvent l'altérer. Le chapitre 8.2 fait le point sur les connaissances encore incomplètes des impacts sur la qualité de l'eau via l'évaluation de différents paramètres, des plus simples aux plus complexes.

Au-delà de la qualité intrinsèque de l'eau qui est primordiale, la prise en compte de l'ensemble des composantes du cycle de l'eau est fondamentale pour toute réflexion sur une gestion efficace des eaux. Or, la diminution globale de la ressource en eau devrait se confirmer si les modifications du climat annoncées, ajoutées aux diverses pressions anthropiques, sont avérées, ce qui semble d'ores et déjà se vérifier. Le partage de l'eau entre ses différents usages affecte directement les fluctuations temporelles des débits des fleuves et des rivières. Comprendre les tendances évolutives des débits des dernières décennies et prévoir par modélisation ce qui pourrait advenir dans un futur proche, afin de mettre en place des politiques de gestion pertinentes, font l'objet du chapitre 8.3.

Si les eaux de surface sont pour partie directement liées au climat actuel, les eaux souterraines le sont moins directement. Le contexte du changement climatique et les modifications engendrées notamment sur les températures et les précipitations, induisent aussi des questionnements sur le devenir des ressources en eau souterraine, leurs disponibilités futures et leurs multiples utilisations ainsi que les futurs conflits d'usage potentiels. Si les aquifères profonds des grands bassins sédimentaires constituent une ressource potentielle considérable tout en étant quasiment insensible aux phénomènes anthropiques de surface, ils représentent aujourd'hui un véritable enjeu analysé dans le chapitre 8.4, dans le contexte d'un développement durable des ressources.

8.1 Qualité de l'air

Coordination : *Eric Villenave*
Rédacteurs : *Emilie Perraudin, Eric Villenave*
Contributeurs : *Gwenaël Abril, David Amouroux, Eric Lamaud, Denis Loustau*

Climat et qualité de l'air sont intimement liés. Si certains composants atmosphériques ont un impact reconnu sur la santé humaine, d'autres, tels que les gaz à effet de serre, ont un impact direct sur le réchauffement climatique. Parfois, lan diminution des émissions de gaz à effet de serre ou de certains polluants ne va pas dans le sens d'une amélioration de la qualité de l'air. Il est important de rappeler qu'une difficulté majeure rencontrée dans la description des processus physico-chimiques impliqués dans la pollution de l'air est non seulement leur complexité mais leur caractère éminemment non-linéaire. Ainsi, un des enjeux majeurs lors des prochaines décennies, en termes d'impact du changement climatique sur la qualité de l'air au niveau régional, sera la bonne appréhension du problème des polluants atmosphériques secondaires, tels que l'ozone ou les particules ultrafines, qui ne peuvent être réglementés directement à l'émission, et dont les impacts à la fois sanitaires et climatiques ne peuvent plus être traités de façon dissociée.

Introduction

La Loi sur l'air de décembre 1996 définit le droit à chacun de respirer un air qui ne nuise pas à la santé et d'en connaître sa qualité. Ainsi, constitue une pollution atmosphérique au sens de la présente loi, l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives [1]. Au-delà du contenu de cette loi, la qualité de l'air fait partie depuis plusieurs années des préoccupations majeures de la société, au même titre par exemple que la qualité de l'eau ou les nuisances sonores.

L'évolution de la qualité de l'air est en lien direct avec le développement économique de la population mondiale et son augmentation. S'il est déjà reconnu que l'accessibilité aux ressources comme l'eau, la nourriture ou l'énergie n'est pas distribuée équitablement, il est également attendu que les changements climatiques contribueront à détériorer cette situation dans un futur proche. En outre, les conséquences des changements climatiques ne seront pas les seules priorités auxquelles notre société devra faire face. Les changements progressifs mais rapides de la composition de l'air que nous respirons affecteront, en premier lieu, la santé humaine, mais également la production agricole, et par conséquent l'économie. Les enjeux de la qualité de l'air sont donc déjà multiples et il apparaît indispensable d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur son évolution.

L'objectif de ce chapitre est donc de résumer quels peuvent être les impacts du changement climatique sur la qualité de l'air avec un focus particulier sur la région Aquitaine.

Composition de l'atmosphère

L'atmosphère n'est pas figée mais dynamique et contrairement aux autres compartiments environnementaux, celle-ci ne présente pas de « frontière » réelle dans ses basses couches ; aussi, elle ne peut être abordée, dans une première approche, que de façon globale avant toute focalisation sur ses spécificités régionales. L'ensemble des espèces composant l'atmosphère est en perpétuelle interaction et des substances chimiques y sont continuellement formées ou détruites ainsi qu'échangées avec les autres compartiments comme les océans et la biosphère **(Figure 1)**. Ainsi, la composition atmosphérique n'est pas homogène, ni spatialement, ni temporellement, et varie, par exemple, selon l'altitude, la latitude, l'heure de la journée ou la saison et la spécificité ou le contexte géographique rencontré localement (ville, industrie, etc.).

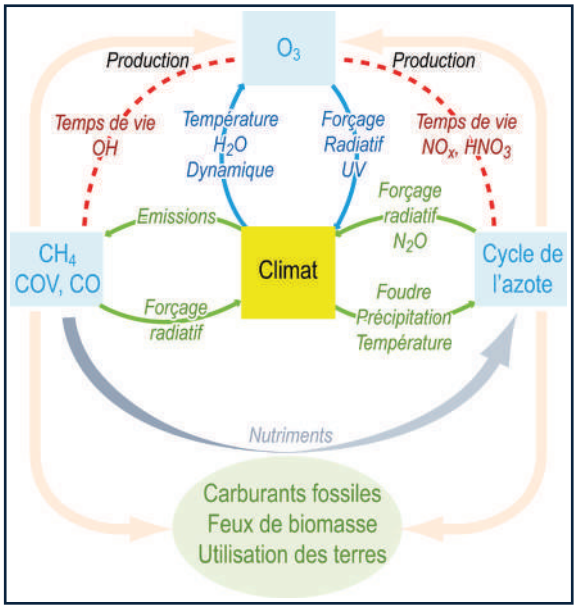


Figure 1 : *Représentation schématique des interactions entre les processus physico-chimiques se déroulant dans l'atmosphère, les cycles biogéochimiques et le système climatique terrestre (IPCC, 2007).*

L'air contient essentiellement de l'azote, de l'oxygène, de l'eau, des gaz rares comme l'argon (Ar) et du dioxyde de carbone (CO_2)[1]. Viennent ensuite d'autres constituants gazeux, présents à des teneurs beaucoup plus faibles, comme le méthane (CH_4)[2], le monoxyde de carbone (CO)[3], les oxydes d'azote (NO_x)[4], l'ozone (O_3)[5], le dioxyde de soufre (SO_2)[6], l'ammoniac (NH_3)[7]. Les durées de vie moyennes des composés atmosphériques sont très variables et s'étendent de la seconde pour les espèces radicalaires très instables (comme le radical hydroxyle (OH)[8]), à 8 ans pour le méthane, 120 ans pour CO_2 ou plus de 50 000 ans pour une espèce aussi stable que CF_4[9]. Par ailleurs, l'atmosphère est aussi constituée d'aérosols qui sont des particules solides ou liquides plus ou moins finement dispersées en suspension dans l'air. Ces particules peuvent contenir des acides, des métaux, des composés organiques, de la suie, etc. Le temps de vie des particules dans l'atmosphère est de quelques jours en moyenne.

Parmi les nombreux composés présents dans l'atmosphère, certains ont un impact reconnu sur la santé humaine (comme les composés organiques volatils (COV), le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, etc.), alors que d'autres, tels que les gaz à effet de serre (H_2O, CO_2, CH_4, N_2O, etc.) (qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre) ont un impact direct sur le réchauffement climatique. Néanmoins, un composé associé aux problématiques de la qualité de l'air, peut aussi avoir un impact sur le climat : c'est par exemple le cas de l'ozone troposphérique. De même, les particules atmosphériques peuvent aussi avoir un impact sur la santé, notamment les plus fines, et le climat : celles qui contiennent une fraction importante de carbone élémentaire (ou « black carbon ») ont globalement un effet positif sur la température moyenne tandis que celles qui contiennent une fraction importante de sulfates contribuent plutôt à un refroidissement global. Ainsi, il apparaît de plus en plus clairement que les impacts climatique et sanitaire des polluants atmosphériques ne peuvent plus être traités de façon dissociée.

1. Usuellement appelé gaz carbonique : d'origine naturelle ou résultant des processus de combustion.
2. Constituant principal du gaz naturel.
3. Issu principalement des processus de combustion incomplète (pauvres en oxygène).
4. Issus principalement des processus de combustion.
5. Composé issu principalement dans la basse atmosphère de processus photochimiques en lien avec l'activité humaine.
6. Libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de combustibles fossiles.
7. Issu principalement des activités agricoles.
8. Considéré comme le « nettoyeur » principal de l'atmosphère car très réactif.
9. Composé à usage industriel (électronique, réfrigération).

Sources des principaux constituants atmosphériques

Les sources d'émission de composés gazeux ou de particules dans l'atmosphère peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques. Les sources naturelles principales sont la végétation, les sols, les océans, les émissions biologiques aérobies et anaérobies pour les gaz et l'érosion des sols par le vent, les embruns marins, les éruptions volcaniques et les feux de forêt pour les particules. Les sources d'origine humaine sont, à la fois pour les composés gazeux et particulaires, principalement la combustion de la matière organique (bois, pétrole, gaz, charbon) que l'on retrouve dans les secteurs du transport routier, du chauffage résidentiel, des procédés industriels, du traitement des déchets, mais aussi les cimenteries, les papeteries, la fabrication/utilisation de solvants, etc.

Les polluants peuvent être primaires lorsqu'ils sont directement issus de sources d'émission (comme les oxydes d'azote par exemple lors de combustions) ou secondaires quand ils sont formés dans l'atmosphère suite à des processus physico-chimiques plus ou moins complexes. C'est le cas de l'ozone troposphérique, qui n'est pas directement émis dans l'atmosphère mais formé par une série de réactions photochimiques impliquant les hydrocarbures, les oxydes d'azote et le rayonnement solaire.

Qualité de l'air et santé[10]

Plusieurs polluants atmosphériques comme l'ozone ou les aérosols sont connus pour générer des affections respiratoires ou cardiovasculaires. Les symptômes sont souvent multipliés autour ou à l'intérieur des grandes villes, du fait de la forte concentration de polluants et de la proximité de leurs sources. Mais ces niveaux élevés de pollution peuvent aussi impacter les écosystèmes comme les forêts ou le rendement des cultures. Du fait de la propension à ce qu'une majorité de la population mondiale se réunisse au sein de mégapoles dans les prochaines décennies, la qualité de l'air devrait être grandement affectée, malgré les efforts déployés dans l'optimisation des développements technologiques comme par exemple pour rendre plus propres les procédés de combustion. Selon le temps de résidence dans l'atmosphère des polluants et leur transport dû à la circulation atmosphérique des masses d'air, les changements induits de la qualité de l'air peuvent s'étendre au-delà des milieux urbains et péri-urbains, à une échelle régionale, voire continentale ou globale. Les émissions locales de polluants primaires et la formation de polluants secondaires dans les panaches de pollution contribuent ainsi à l'augmentation des teneurs de fond des polluants atmosphériques.

Les changements climatiques et la dégradation de la qualité de l'air peuvent simultanément affecter la santé, par exemple lors d'événements extrêmes comme les vagues de chaleur, dont la fréquence devrait augmenter dans le futur [2]. Ainsi, la canicule qui s'est étendue sur toute l'Europe de l'Ouest lors de l'été 2003 a entraîné une surmortalité d'environ 35 000 personnes [3]. Cette canicule a par ailleurs créé des conditions propices à une formation et à une accumulation importantes d'ozone. Même si la cause de la surmortalité observée est évidemment multifactorielle, cet épisode souligne qu'il devient, par conséquent, primordial d'évaluer les impacts des changements climatiques sur la qualité de l'air et, en particulier, lors d'événements extrêmes, de chaleur ou de précipitations.

Or, il est essentiel, pour comprendre les conséquences de ces changements climatiques, de mieux appréhender la physico-chimie de l'atmosphère en lien avec la qualité de l'air. Il est important de rappeler qu'une difficulté majeure pour la description des processus physico-chimiques impliqués dans la qualité de l'air est liée à leur complexité et à leur caractère non-linéaire. Ainsi, une évaluation précise des impacts des changements climatiques sur la qualité de l'air nécessite une connaissance détaillée des processus physico-chimiques atmosphériques.

10. cf. aussi le chapitre 9.

Quelle politique de gestion des émissions atmosphériques ?

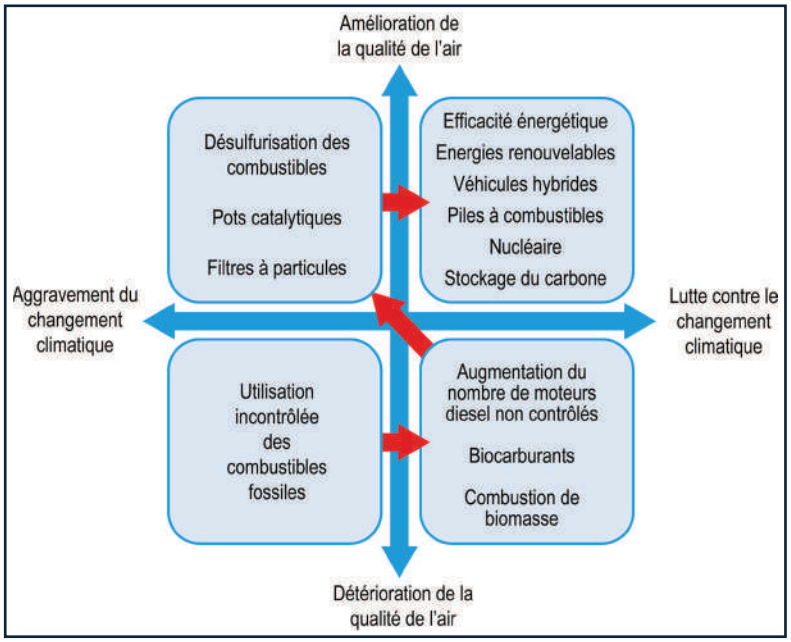


Figure 2 : *Synergies et compromis entre les politiques de gestion de la qualité de l'air et de lutte contre les changements climatiques (d'après Monks et coll. [5]).*

Bien que climat et qualité de l'air soient intimement liés et qu'il paraisse indispensable que les politiques de gestion des émissions anthropiques prennent en compte ces deux enjeux majeurs, il est extrêmement difficile de les traiter par une seule approche, simultanément.

En effet, la diminution des émissions de gaz à effet de serre ou de polluants ne va pas toujours dans le sens d'une amélioration de la qualité de l'air. Par exemple, les émissions de NOx, CO et CH_4, en modifiant les concentrations d'oxydants, notamment celles du radical OH, ont des impacts indirects par exemple sur l'oxydation de SO_2 en sulfates et par conséquent sur la formation de particules secondaires, dont les effets sur la santé et le climat ont été évoqués précédemment [4]. Ceci est très bien illustré sur la **Figure 2** où sont décrits les synergies et les compromis entre les politiques de gestion de la qualité de l'air et de lutte contre les changements climatiques [5]. Ainsi, résoudre les problèmes liés à la qualité de l'air n'a pas systématiquement un impact positif sur le réchauffement climatique, et inversement.

I- Interactions Climat – Qualité de l'air globale

Dans la troposphère[11], qui correspond à la couche atmosphérique dans laquelle nous vivons, les masses d'air se déplacent et se mélangent rapidement, selon la température, le vent, l'humidité, les nuages, etc. À des latitudes moyennes, le temps moyen de transport d'une masse d'air autour de la Terre est d'environ quelques semaines. Ce temps est beaucoup plus court que celui, de quelques décennies, associé aux changements climatiques. À cette échelle de temps, des polluants s'ils ont un temps de vie suffisant, comme l'ozone ou les aérosols, ont le temps de se répartir sur les deux hémisphères pour atteindre des zones éloignées des sources d'émission. Plus près des sources et pour des échelles de temps inférieures, la distribution des polluants est moins homogène : elle est influencée par le relief, les différentes émissions, la réactivité photochimique et le climat régional ou local. La qualité de l'air résulte alors des interactions entre la composition atmosphérique de fond, influencée par les émissions globales et les changements globaux, et les polluants d'origine régionale [6].

En dépit de la littérature abondante sur la relation entre la qualité de l'air et le climat, la contribution respective des facteurs à l'origine des changements climatiques pouvant influencer la composition de l'atmosphère que sont les émissions de polluants (primaires ou secondaires) ou des paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité relative, la couverture nuageuse et/ou particulaire, la circulation atmosphérique, etc., est relativement incertaine et dépendante de la localisation géographique [2]. Par exemple, l'augmentation prévue de température et de vapeur d'eau

11. Couche atmosphérique comprise entre le sol et environ 15 km d'altitude. La stratosphère, où se situe notamment la couche d'ozone qui nous protège des rayonnements UV nocifs, se situe au dessus, entre 15 et 50 km d'altitude.

devrait entraîner une diminution de l'ozone troposphérique en régions tropicales et équatoriales, mais la récurrence d'épisodes de sécheresse dans nos latitudes moyennes devrait favoriser la photochimie et donc la formation d'ozone [7]. Les processus impliqués dans les changements climatiques vont également perturber de façon efficace les émissions naturelles de différents composés précurseurs. C'est le cas par exemple des oxydes d'azote formés lors des orages, ou relargués par la décomposition thermique du PAN (le peroxyacetylnitrate, qui agit comme espèce-réservoir pour les NO_x), des émissions biogéniques[12] de composés organiques volatils ou semi-volatils (COSV) ou du protoxyde d'azote (N_2O), issu de l'activité microbienne dans les sols [8][9][10]. De la même façon, les émissions de méthane issues des terres inondées/humides et du pergélisol seront impactées même si l'effet est encore difficile à quantifier.

Émissions de gaz à effet de serre par le fleuve et les zones inondées dans l'estuaire de la Gironde et le bassin d'Arcachon

Les émissions de gaz carbonique, de méthane et de protoxyde d'azote par l'estuaire de la Gironde et le bassin d'Arcachon ont fait l'objet de nombreuses études. L'estuaire de la Gironde émet en moyenne 0,7 million de tonnes de CO_2 par an [11], que l'on peut comparer au 1,9 million de tonnes émis par l'agglomération bordelaise en 2005 [12]. Ces émissions estuariennes sont alimentées en majorité par du carbone érodé sur l'ensemble du bassin-versant de la Garonne et la Dordogne, mais aussi par des rejets d'eaux usées au niveau de Bordeaux. La lagune d'Arcachon au contraire, se comporterait de manière pratiquement neutre vis-à-vis du CO_2, en grande partie grâce à la présence du plus grand herbier de zostères naines d'Europe qui fixe des quantités importantes de CO_2 atmosphérique [13].

Les émissions de CH_4 de la Gironde et du bassin d'Arcachon sont modestes, les conditions physico-chimiques de ces milieux (salinité, oxygène, turbidité…) limitant la production de ce biogaz et favorisant au contraire son oxydation [14][15].

Un autre effet des changements climatiques sur la qualité de l'air est leur impact sur les retombées (dépôts) des polluants. Les dépôts secs, qui sont des puits majeurs pour des espèces comme l'ozone, peuvent en effet être perturbés par la modification de la turbulence dans les couches basses atmosphériques et leur impact sur les écosystèmes [16]. La façon dont va s'adapter la végétation face aux changements climatiques et à l'augmentation des niveaux de concentration en CO_2 est très complexe et non linéaire, et dépendra non seulement de la disponibilité en eau [17] mais aussi de la concentration en ozone [18]. En effet, l'influence du stress hydrique, combinée aux dommages causés par de forts niveaux d'ozone sur la végétation, entraîne des modifications de la couverture végétale qui tendent à limiter le dépôt et augmenter l'érosion éolienne, entraînant une rétroaction positive sur la concentration en O_3 mais aussi en aérosols [19].

La concentration moyenne d'ozone de surface devrait augmenter d'ici la deuxième moitié du XXI^{e} siècle de 5 à 10 ppb (partie par milliard) aux latitudes moyennes [20], comme le montre la **Figure 3**, du fait principalement de l'augmentation de l'irradiation solaire et de la température, et ce malgré l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (et la destruction associée de l'ozone). L'augmentation de la concentration d'ozone de fond pose un vrai problème car elle pourrait réduire l'efficacité des mesures locales de contrôle des émissions, rendant les objectifs de qualité de l'air encore plus difficiles à atteindre [21].

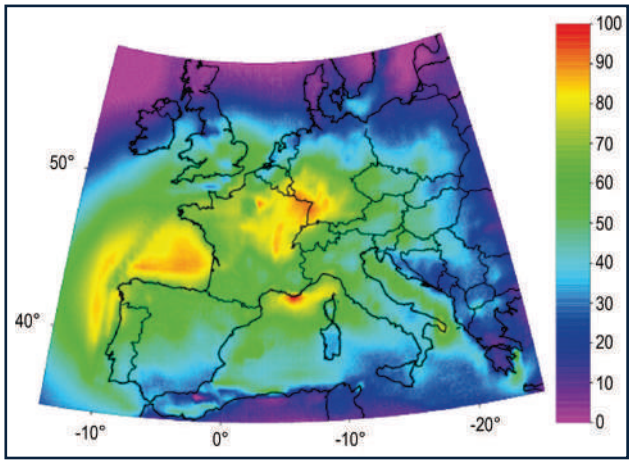


Figure 3 : *Différence estivale près de la surface entre la concentration moyenne journalière d'ozone simulée (en ppb) pour la période A2 (2071-2100) et pour l'époque actuelle (1961-1990) [20] (© 2007, Académie des Sciences, publié par Elsevier Masson SAS, tous droits réservés).*

Les émissions des COV et des COSV biogéniques devraient augmenter d'ici 50 ans du

12. Composés chimiques émis par des processus impliquant le vivant.

fait de l'effet de fertilisation du CO_2 sur la végétation et de la hausse des températures. Indépendamment des effets inhérents aux composés eux-mêmes (isoprène, terpènes, sesquiterpènes, etc.), il est aujourd'hui bien connu que les composés biogéniques sont parmi les précurseurs les plus importants d'aérosols organiques secondaires [22]. Ces derniers résultent en effet de l'oxydation atmosphérique par l'ozone (et dans une moindre mesure par les radicaux nitrate (NO_3) et hydroxyle) des terpènes émis par la végétation (arbres, arbustes et cultures).

La formation supplémentaire d'aérosols or-ganiques due au changement climatique va avoir elle-même une répercussion immédiate (rétroaction) sur la cause de leur origine. Si cet effet n'est pas encore bien évalué [2], on sait cependant que deux types d'effets (direct et indirect) dus aux aérosols affectent de façon significative le bilan radiatif terrestre[13] **(Figure 4)**. La présence de particules supplémentaires dans l'atmosphère va donc entraîner une diminution du flux incident qui arrive sur la surface de la Terre (tel un parasol) et donc globalement, un refroidissement. Les effets indirects résultent des interactions entre les nuages et les aérosols : lors de la formation des nuages, les aérosols peuvent servir de noyaux de condensation. Ainsi, pour un contenu en eau fixé, un nuage issu d'une masse d'air pollué contiendra plus de gouttelettes qu'un nuage « classique ». Un tel nuage sera alors plus réfléchissant que celui issu d'une masse d'air sans ces aérosols, modifiant ainsi l'albédo[14] planétaire et diminuant donc le flux lumineux arrivant à la surface terrestre. De plus, le nombre de gouttelettes et leur taille ne pourront pas permettre au nuage d'atteindre rapidement la taille critique au-delà de laquelle il y a précipitation (pluies, etc.). Ainsi, l'augmentation de la durée de vie du nuage entraînera une hausse de la couverture nuageuse sur Terre, ce qui aura, selon l'altitude du nuage, un effet refroidissant ou réchauffant. Les modèles concluent aujourd'hui qu'une nette réduction des émissions/générations d'aérosols aggraverait le réchauffement climatique [23]. Or, bien qu'étant la cible d'un effort de recherche important de la part de la communauté scientifique, les aérosols organiques secondaires sont encore mal caractérisés, non seulement pour leurs impacts climatiques direct et indirect, mais aussi pour leurs sources et quantités formées dans l'atmosphère (voir ci-après).

Les changements climatiques peuvent aussi influer sur les émissions anthropiques, même si cet effet est lui aussi encore difficile à quantifier. Les émissions supplémentaires de COV par évaporation (transport routier, remplissage de réservoirs) vont augmenter avec la température jusqu'à 30 % d'ici la fin du XXI^{e} [24]. Or, la majeure partie de ces COV est des hydrocarbures dont certains comme les composés monoaromatiques (BTEX ou benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) présentent des activités cancérigènes, mutagènes[15] ou teratogènes[16]. Les émissions de particules primaires (poussières) issues de l'érosion des sols seront favorisées par les épisodes de sécheresse. La demande de production énergétique suivra un cheminement moins saisonnier : dans les latitudes moyennes, les hivers moins rigoureux devraient limiter l'utilisation de chauffage, mais les étés plus chauds devraient augmenter les besoins en climatisation.

La composition atmosphérique globale évoluera aussi indépendamment des changements climatiques, du fait de l'augmentation de certaines émissions primaires, dues au développement économique et à l'augmentation de la population dans plusieurs pays en voie de développement. Ceci a déjà été démontré par l'augmentation des émissions en CO_2 [25], mais il reste bien sûr une large incertitude quant à l'amplitude de cette variation [2]. Néanmoins, l'ensemble des scénarios tend vers une détérioration de la qualité de l'air, particulièrement illustrée par les évolutions dans les prochaines décennies des concentrations d'ozone et d'aérosols atmosphériques. Et comme l'ozone (qui est aussi un gaz à effet de serre) et les aérosols ont un effet sur le bilan radiatif terrestre [2], ces évolutions auront à leur tour un impact sur les changements climatiques démontrant ainsi, de nouveau, que le climat et la qualité de l'air ne peuvent être envisagés de façon séparée.

13. Quantité d'énergie reçue par le système climatique Terre-atmosphère et quantité d'énergie réémise vers l'espace. Lorsque le bilan est nul, la température moyenne de la planète est stable.
14. Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface (comme celle de la Terre).
15. Qui change le génome (en général l'ADN) d'un organisme.
16. Qui provoque le développement de cellules anormales au cours de la croissance fœtale.

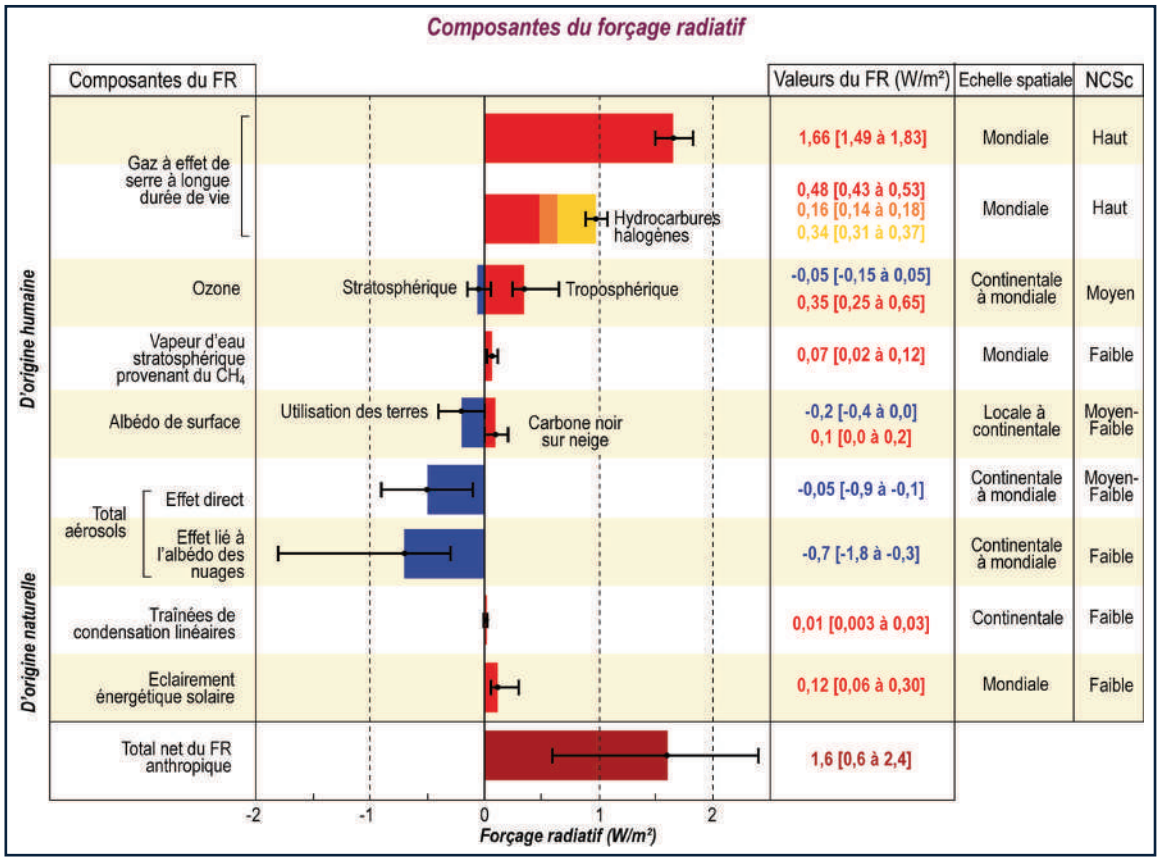


Figure 4 : *Forçage radiatif[1] moyen à l'échelle globale, ainsi que l'étendue géographique et le niveau de compréhension scientifique [2].*

1. Variation de l'éclairement énergétique net due à une modification externe du rayonnement solaire ou de la concentration d'un composé dans l'atmosphère.

II- Qualité de l'air et climat à l'échelle régionale

Dans la problématique des changements climatiques en lien avec la qualité de l'air, il y a aujourd'hui un intérêt de plus en plus grand à se focaliser sur l'échelle régionale, en raison de la différence des conditions atmosphériques, de la composition et de l'évolution des masses d'air, entre par exemple les latitudes moyennes, les régions tropicales ou les régions polaires. La qualité de l'air en milieu urbain et péri-urbain (problématique exacerbée dans les mégapoles) focalise particulièrement l'attention depuis une quinzaine d'années maintenant. En Europe, les agences de surveillance de la qualité de l'air mesurent les principaux polluants réglementés. En France, cette mission est assurée par le réseau national ATMO, chargé entre autre de mesurer les concentrations en ozone, oxydes d'azote, particules PM_{10} (matière particulaire dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm) et dioxyde de soufre. Si cette approche est indispensable, dans le sens où elle permet d'alerter la population du dépassement des seuils sensibles de concentrations en polluants atmosphériques, elle est aussi limitée par le peu d'espèces régulièrement suivies, le choix de ces espèces et parfois par les méthodologies utilisées pour les mesurer.

Dans beaucoup de régions européennes ou américaines, si les émissions de polluants ont globalement largement diminué, ce n'est pas toujours le cas par exemple des polluants secondaires comme l'ozone ou les aérosols organiques secondaires (AOS) dont la présence est toujours mal prise en compte. Il est particulièrement difficile de prendre en compte l'effet des changements climatiques sur l'évolution de la qualité de l'air à l'échelle régionale lorsque l'on se focalise sur les aérosols atmosphériques. Peu d'études sont encore proposées aujourd'hui. Cela est notamment dû à la complexité de l'objet à considérer dans les approches de modélisation, les aérosols n'ayant ni les mêmes sources, ni la même taille (diamètre aérodynamique) ou la même composition chimique. Une étude récente de Kleeman

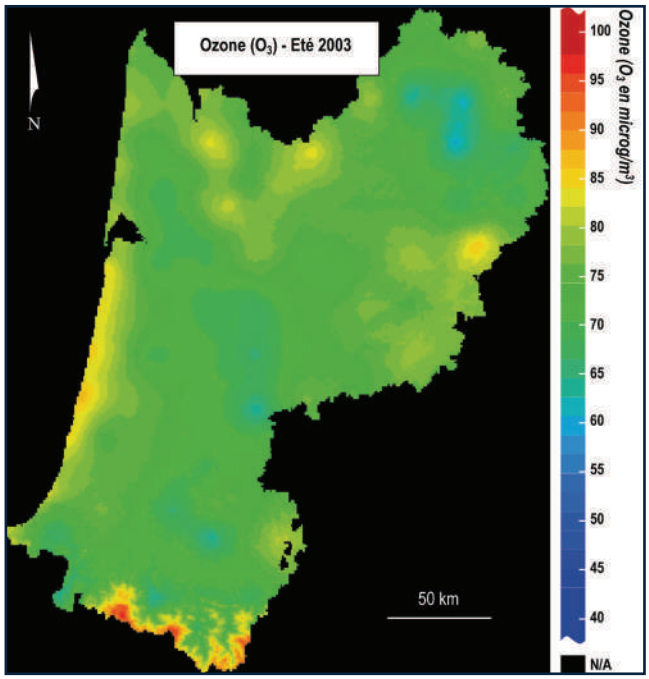


Figure 5 : *Carte de la concentration d'ozone (en µg.m-3) en Aquitaine suite à la canicule de l'été 2003 (AIRAQ).*

[26] a par exemple montré qu'une hausse de la température peut réduire les concentrations en particules fines du fait de la plus grande volatilisation du nitrate d'ammonium qui est un de leurs composants majeurs. Mais cette hausse peut aussi dans l'autre sens entraîner une augmentation de leur concentration du fait de l'augmentation des concentrations en sulfates dues à la chaleur [26].

Si, en Europe du Nord, le climat devrait au-delà de 2030 être plus humide [27], ce qui est favorable à l'amélioration de la qualité de l'air, ce n'est pas le cas de l'Europe du Sud qui devrait présenter un climat beaucoup plus sec qu'aujourd'hui. La multiplication des événements extrêmes devrait favoriser la présence de plus en plus courante de grandes vagues de chaleur dont celle de l'été 2003 peut servir de modèle pour comprendre et mieux modéliser l'effet d'épisodes de sécheresse sur la composition atmosphérique (**Figure 5** ; [28]). D'autres événements extrêmes devraient affecter la qualité de l'air, comme par exemple l'augmentation des risques de feux de forêt. Ces derniers devraient amener notamment à une augmentation des émissions de particules de suies et de monoxyde de carbone dans l'atmosphère. Une étude réalisée en Californie en 2006 montre par exemple qu'une hausse de 12 à 53 % de l'occurrence de grands incendies de forêt est envisageable d'ici la fin du siècle [29].

Cas de l'Aquitaine

Pour aller plus loin dans la compréhension de l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air régional, il est nécessaire malgré l'évaluation des variations globales des principaux polluants atmosphériques détaillée précédemment, d'étudier plus particulièrement les spécificités de l'Aquitaine en termes d'émission de polluants. Il n'existe aujourd'hui que peu de travaux publiés dans la littérature scientifique, sur l'évolution de la qualité de l'air en Aquitaine, hormis ceux concernant les émissions de gaz à effet de serre d'origine naturelle (et qui font l'objet ici d'autres chapitres dont ceux sur l'agriculture ou la forêt).

Les inventaires d'émissions atmosphériques en Aquitaine ont été coordonnés par AIRAQ qui est le réseau de surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine. Ces données sont nécessaires pour permettre une meilleure modélisation de la qualité de l'air régionale et les plus récentes actuellement disponibles ne sont que pour l'année de référence 2006 [30].

Les sources fixes comprennent principalement les industries, les activités et surfaces agricoles, le secteur résidentiel et le secteur tertiaire. Les sources mobiles sont essentiellement le transport (routier, ferroviaire, aérien, fluvial et maritime).

En Aquitaine, les substances les plus particulièrement prises en compte sont :

- Les substances relatives à l'acidification, l'eutrophisation et à la pollution photochimique : dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, ammoniac et composés organiques volatils non méthaniques (COVNM).
- Les substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre : le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote.

- Les métaux lourds : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium, zinc.
- Les particules en suspension : poussières, PM_{10} et $PM_{2,5}$.
- Le benzène, les dioxines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Rappelons que l'ozone n'apparaît pas dans cette liste, du fait qu'il ne présente pas de sources d'émission directe (primaire).

Le bilan des émissions atmosphériques en Aquitaine est présenté dans le **Tableau 1** ci-dessous :

2010 en t/an	Industrie manufacturière, déchets, construction	Extraction, distribution et transformation d'énergie	Résidentiel, tertiaire, commercial	Agriculture, sylviculture	Transport routier	Autres transports	Biotique	*Aquitaine*
SO_2	10 471		1 964	323	54	589	0	***13 402***
NO_x	4 519	1 056	4 826	8 714	35 679	1 795	834	***57 422***
CO	6 852	319	97 701	7 840	41 227	449	0	***154 388***
NH_3	2 380	6	0	25 761	452	0	0	***28 599***
COVNM	11 616	689	24 417	2 282	5 788	127	227 255	***272 174***
Benzène	38	9	2 350	78	191	12	0	***2 678***
TSP	5 934	29	6 984	17 182	6 067	655	0	***36 851***
PM10	2 941	27	6 516	5 473	4 029	349	0	***19 335***
PM2,5	1 907	23	6 344	2 138	2 881	211	0	***13 504***
CO_2	3 728 330	1 172 370	6 781 149	602 255	7 908 942	149 100	0	***20 342 145***
CH_4	13 353	605	5 183	58 623	438	6	10 786	***88 993***
N_2O	498	71	246	5 506	219	5	5	***6 544***

Tableau 1 : *Bilan des émissions en Aquitaine en 2010 (en tonnes/an ; version revue en 2012) (AIRAQ [30]).*

Écotoxicité des polluants atmosphériques et changement climatique

Afin d'améliorer les projections climatiques régionales, il est nécessaire de se focaliser sur les sources des différents polluants, qu'ils soient primaires ou secondaires. La prise en compte de grandes familles de polluants comme les polluants organiques persistants ou les métaux lourds, dont la présence dans l'atmosphère est intimement liée à la matière particulaire, doit aussi être mieux considérée dans les modèles [31].

Par exemple, dans le contexte de l'accroissement du trafic routier transfrontalier entre la France et l'Espagne, les dépôts secs azotés et en métaux lourds, transportés par les particules atmosphériques ont été suivis à proximité d'axes routiers comme dans la Vallée d'Aspe et le Tunnel du Somport pendant plusieurs années dans le but de connaître leurs sources et d'évaluer l'impact du transport routier sur les écosystèmes [32][33].

Une autre étude liée à l'impact de la pression anthropique croissante sur le littoral aquitain, conduite actuellement dans le cadre du projet régional OSQUAR, étudie les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) gazeux et particulaires afin de mieux évaluer les apports atmosphériques à la pollution globale du bassin d'Arcachon [34].

Un exemple de cartographie des émissions de particules en suspension (PM_{10}) par communes en Aquitaine en kg/km^2 est proposé sur la **Figure 6**. Comme on peut le voir, les particules se répartissent essentiellement au niveau des grandes agglomérations, laissant entrevoir l'importance des secteurs résidentiels, du transport routier mais aussi des secteurs industriels et agricoles.

Si on étudie attentivement la répartition des différents polluants atmosphériques sur l'ensemble du territoire aquitain [30], on conclut que le dioxyde de soufre est essentiellement émis dans les Pyrénées-Atlantiques (secteur industriel de Lacq), que les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone sont principalement émis en Gironde (avec comme source majoritaire le transport routier), que l'ammoniac est principalement émis dans les Pyrénées Atlantiques et le Lot-et-Garonne (source agricole quasi exclusive), tandis que les émissions des COVNM sont relativement réparties sur l'ensemble de la Région.

Si les sources de gaz à effet de serre restent essentiellement agricoles pour le méthane et le protoxyde d'azote, elles sont clairement identifiées comme liées au transport routier, au chauffage et à l'industrie dans le cas du dioxyde de carbone.

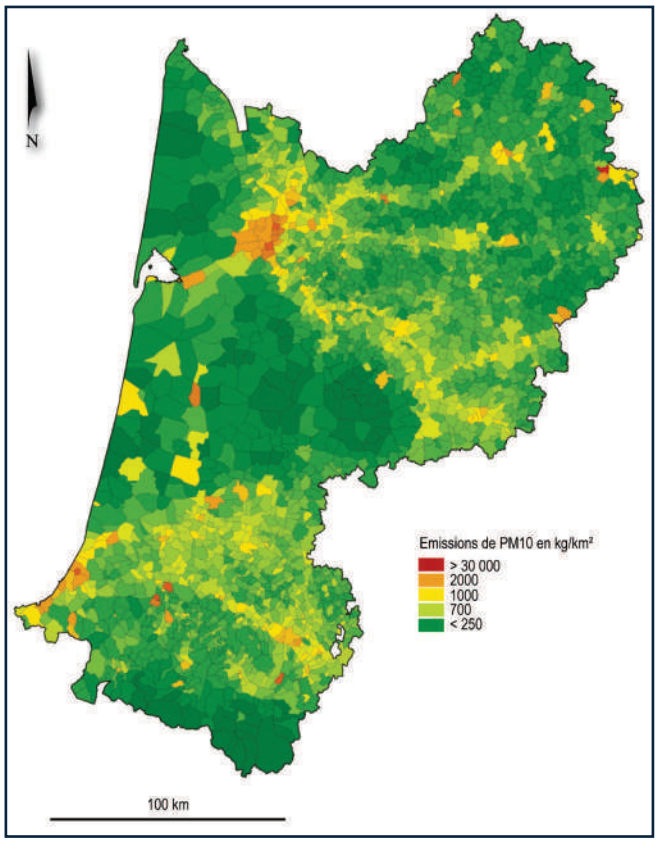


Figure 6 : *Cartographie des émissions de particules en suspension (PM_{10}) en Aquitaine en 2010, par communes en kg/km² (AIRAQ [30]).*

Devant le peu de travaux ayant modélisé de façon spécifique à l'Aquitaine les concentrations en polluants atmosphériques, il est intéressant de regarder les tendances des variations des espèces réglementées, mesurées sur les dix dernières années [35].

La concentration en ozone de fond a par exemple augmenté en Aquitaine de 5 % entre 2001 et 2010. Cette augmentation est à rapprocher de la baisse globale de 15 % observée pour les stations installées en zone rurale (au Temple et à Iraty). Il est à noter que la norme relative à la protection des végétaux en ce qui concerne les niveaux d'ozone (AOT 40) n'a été respectée pour aucune des stations concernées en Aquitaine en 2010. Comme expliqué précédemment, l'augmentation attendue d'ici la fin du siècle des niveaux d'ozone de fond de 5 à 15 ppb du fait de la hausse des températures et de l'irradiation solaire aura des conséquences importantes à la fois sur la santé mais aussi sur les écosystèmes. Même si les émissions de dioxyde d'azote et de composés organiques volatils qui sont à l'origine de la formation de O_3 sont limitées, la législation ne permettra pas une diminution des concentrations d'ozone du fait de la non-linéarité de sa réponse aux variations en concentration de ses précurseurs.

La diminution observée depuis dix ans des concentrations massiques en particules de type PM10 en Aquitaine est de -10 à -30 % selon le type de stations de mesure (respectivement de fond ou de proximité). Si ce chiffre est très encourageant, et correspond à une amélioration des procédés de combustion et des méthodologies de traitement des effluents atmosphériques, il ne doit pas masquer le fait que la masse des particules atmosphériques, dont le suivi est jusqu'ici préconisé par les référentiels de mesure, n'est pas le paramètre le plus pertinent pour juger de leur impact, par rapport au suivi de leur distribution en taille. En effet, les particules ultrafines, de diamètres inférieurs à 100 nm, ont un impact direct très important sur la santé en pouvant pénétrer dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires, alors que leur masse est négligeable par rapport à celles de particules plus grossières (micrométriques), issus par exemple de l'érosion des sols ou de certaines catégories d'industries. De plus, comme cité plus haut, les mécanismes de rétroaction entre les changements climatiques et les aérosols sont particulièrement actifs, même s'ils vont plutôt dans le sens d'un refroidissement global du climat.

La forêt source d'ozone et de particules ultrafines ?

Une des particularités de l'Aquitaine est sa forêt de pins maritimes. Les premiers travaux de recherche menés régionalement [36][37][38] ont permis d'identifier les composés organiques biogéniques générés par la forêt des Landes et de mesurer leurs concentrations. Il a été observé que celles-ci variaient selon un cycle journalier, allant de 0,5 ppbV (partie par milliard en volume) le jour à 2-4 ppbV la nuit pour l'α- et le β-pinène[17]. Ceci est principalement dû à la forte réactivité de ces composés qui vont réagir le jour avec les principaux oxydants atmosphériques (dont le radical hydroxyle) pour notamment former secondairement de l'ozone [39]. Ensuite, leur réaction avec l'ozone formé entraîne la formation d'aérosols organiques secondaires dont on sait aujourd'hui l'importance dans le bilan particulaire global [22]. D'un autre côté, la forêt est le siège d'un flux de dépôt d'ozone à la fois sur sa surface mouillée par les pluies et à travers les stomates des aiguilles [16]. Face aux changements climatiques, il faudra surveiller les émissions de terpènes, dont on sait qu'elles sont largement corrélées avec la température et l'intensité lumineuse [38].

17. Composés chimiques de la famille des terpènes, produits en particulier par des conifères.

Des recherches sont aujourd'hui conduites en Aquitaine pour mieux évaluer la formation des aérosols secondaires à partir des composés biogéniques, afin notamment de mieux appréhender la contribution des émissions d'origine naturelle au bilan particulaire global.

Les concentrations en dioxyde d'azote dans l'atmosphère enregistrent une nette diminution globale **(Figure 7)** même si celles-ci se maintiennent à un niveau constant pour les stations mesurant la pollution automobile. Ces variations sont essentiellement dues à l'amélioration des procédés de combustion (industrie), à l'optimisation des systèmes de chauffage et à la baisse de la consommation des véhicules malgré l'augmentation du trafic. Notons que si l'épisode de la canicule de 2003 est envisagé comme modèle simplifié de climat futur (à émissions constantes), il n'a pas été mesuré de hausses notables de concentrations en NO_x à cette période sur l'Aquitaine [40], ce qui est plutôt positif au niveau sanitaire.

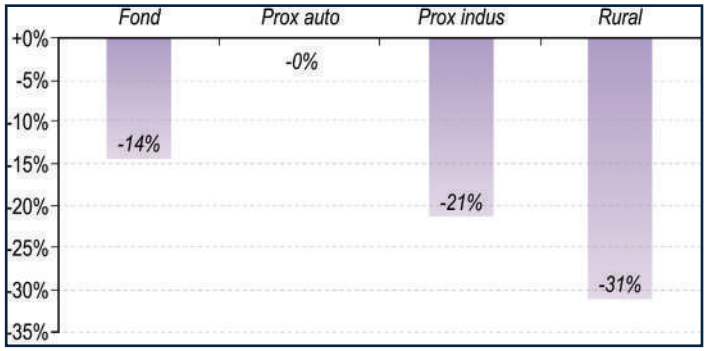


Figure 7 : *Évolutions en pourcentage des concentrations en dioxyde d'azote en Aquitaine entre 2001 et 2010 (AIRAQ).*

La complexité des liens entre les changements climatiques et la qualité de l'air peut particulièrement s'illustrer dans le cas du dioxyde de soufre. Si les émissions de soufre sont en baisse constante (de -50 à -60 % en 10 ans sur l'Aquitaine) grâce à la mise en place de législation ayant imposé une baisse des émissions industrielles (à cause notamment du rôle joué par SO_2 dans la formation des pluies acides) mais aussi la désulfurisation des produits pétroliers, cette diminution couplée à l'augmentation de la température et à la baisse de l'humidité relative entraîne une diminution de la couverture nuageuse due au smog (= smoke + fog) au-dessus des villes européennes, favorisant l'augmentation de la pénétration du rayonnement solaire au-dessus du tissu urbain. Néanmoins, tout n'est pas si simple et des travaux ont montré par exemple que la modélisation des impacts d'une hausse de température sur le cycle de vie des acides dans l'atmosphère prévoit une production supplémentaire de sulfates d'un facteur 2,5 par tranche d'augmentation (locale) de 10 °C [41]. Mais pour conclure, la diminution progressive des activités de Lacq en lien avec les émissions de soufre a un impact beaucoup plus important que ne l'auront les changements climatiques sur sa concentration.

En France, dans le cadre de la Loi Grenelle II, les schémas régionaux Climat Air Énergie (SRCAE [42]) imposent de mettre en place la cartographie des zones sensibles en termes de dépassement des valeurs réglementaires en polluants atmosphériques, de façon à notamment anticiper au mieux l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air. En Aquitaine, ce travail effectué par AIRAQ [43] a mis en évidence l'importance du couloir routier Nord-Sud (vers l'Espagne) et dans une moindre mesure l'axe Bordeaux-Toulouse, qui se traduisent par des surémissions d'oxydes d'azote dus au transport routier [32]. En recoupant ces trajets avec la carte des zones protégées en Aquitaine (protection de biotope, réserve naturelle, parc national), ce travail a abouti à définir la cartographie des communes dites sensibles, où la qualité de l'air sera jugée prioritaire dans les prochaines années **(Figure 8)**.

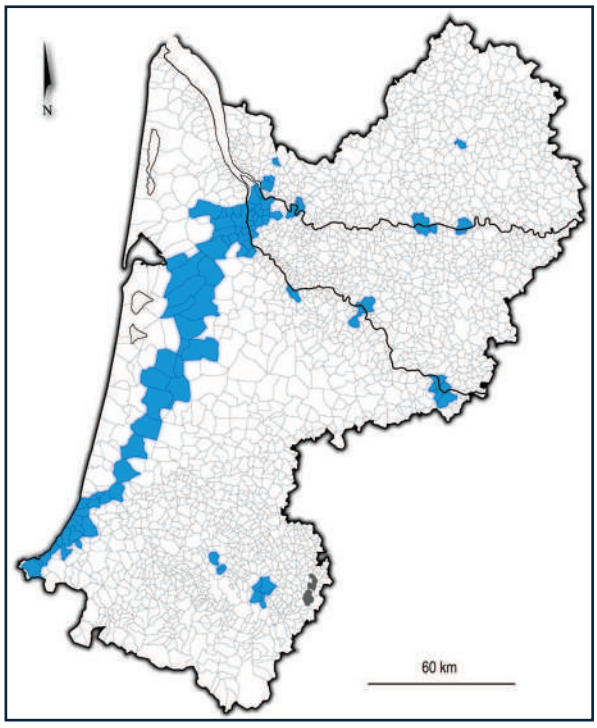


Figure 8 : *Cartographie des communes dites sensibles à la pollution atmosphérique en Aquitaine [43].*

Malgré tout l'intérêt de cette démarche de zonage, celle-ci est néanmoins limitée par la non-prise en compte de l'ozone dont les émissions ne peuvent être réglementées directement, mais dont la concentration sera un des enjeux majeurs, avec celle des particules fines, en termes d'impact du changement climatique sur la qualité de l'air au niveau régional.

Conclusion

Jusqu'à maintenant, la majorité des études sur l'atmosphère s'est plutôt intéressée à l'impact de la qualité de l'air sur le changement climatique, du fait notamment du rôle des gaz à effet de serre ou encore plus récemment de celui de la matière particulaire en suspension. Les différents processus décrivant leurs actions sont extrêmement complexes car souvent imbriqués, entraînant certaines rétroactions qu'on ne pourra limiter par la seule diminution des émissions atmosphériques. Une meilleure compréhension de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air au niveau régional passera notamment par une bonne maîtrise de la connaissance des processus physico-chimiques formant les polluants atmosphériques secondaires, tels que l'ozone ou les aérosols organiques secondaires, dont les impacts sur le climat et la santé ne peuvent être envisagés de façon dissociée.

8.2 Qualité de l'eau

Coordination : *Hélène Budzinski*
Rédacteurs : *Magalie Baudrimont, Gérard Blanc, Hélène Budzinski, Nicolas Mazzella, Patrick Mazellier, Soizic Morin, Jörg Schäfer*
Contributeurs : *Alexandra Coynel, Marie-Hélène Devier, Patrice Gonzalez, Jean-Pierre Rebillard*

Climat et qualité de l'eau sont liés. Si l'impact du climat sur la qualité de l'air a été depuis longtemps étudié et documenté, celui sur l'eau n'est étudié que depuis peu. Ce chapitre fait le point sur les connaissances encore incomplètes concernant cet impact sur la qualité de l'eau via *différents paramètres des plus simples comme les paramètres physico-chimiques (pH, salinité) aux plus complexes comme l'apport et la présence des micro-polluants organiques et inorganiques. S'il est communément admis que le changement climatique ira dans le sens d'une diminution de la qualité des eaux (et ce pour l'ensemble des paramètres), il est encore impossible de rationaliser les choses d'un point de vue général. Les études apparaissent essentiellement mono-factorielles et manquent d'un positionnement dans un contexte global. Ainsi, un des enjeux majeurs lors des prochaines décennies, en termes d'étude et de prédiction d'impact du changement climatique sur la qualité de l'eau au niveau régional, sera la bonne appréhension du problème des pollutions aquatiques en lien avec les usages, occupations des sols, et modes de consommation au-delà de l'aspect climatique seul.*

Introduction

L'eau, élément indispensable à la vie (elle est en effet indispensable à la vie humaine et à de très nombreuses espèces comme source d'eau potable et sous-tend également la vie de très nombreuses espèces en tant que milieu de vie) recouvre plus de 70 % de notre planète. Malgré tout, seul un très faible pourcentage de cette eau est directement disponible pour notre consommation. Ainsi l'eau douce représente seulement 2,6 % de l'ensemble de la ressource, dont 1,6 % est actuellement sous forme de glace. À l'heure actuelle la planète compte environ 6 milliards d'habitants à se partager cette ressource en eau ; vraisemblablement nous serons 8 milliards à l'horizon de 2025. La quantité d'eau douce renouvelable et disponible par habitant qui était de 17 000 m^3 en 1950 ne sera plus que de 5 100 m^3 en 2025 ([1] ; **Figure 1**) par une simple règle de trois sans compter d'autres facteurs concomitants dont le changement climatique et global (diminution potentielle de cette ressource).

L'eau est et deviendra de plus en plus une ressource rare à protéger. La préservation de la qualité de l'eau est donc un enjeu majeur tant pour l'environnement que pour l'Homme. Dans cette optique il est important de comprendre les facteurs qui peuvent l'altérer.

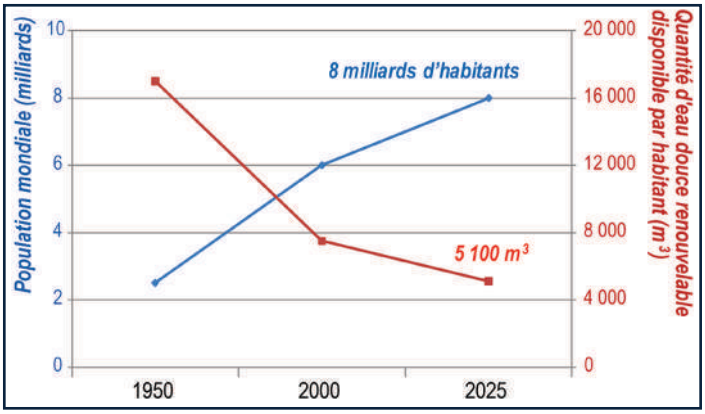


Figure 1 : *Évolution de la quantité d'eau douce en fonction du nombre d'habitants à l'échelle de 2025 [1].*

Au cours des temps, les usages de l'eau se sont peu à peu diversifiés et intensifiés passant d'un simple usage alimentaire (eau de boisson), à un usage agricole (irrigation), puis industriel, domestique et enfin récréatif. Cette utilisation croissante de la ressource en eau a entraîné peu à peu sa pollution selon un double phénomène : utilisation de la ressource elle-même et rejets directs ou indirects du fait de l'anthropisation croissante. En effet les activités humaines se sont souvent installées à proximité de l'eau, comme en témoigne par exemple actuellement la localisation géographique de nombreuses grandes capitales mondiales. De plus, au-delà des rejets directs de nombreux polluants, les transports atmosphériques et les phénomènes de ruissellement participent à l'apport des contaminants chimiques dans les milieux aquatiques. Les écosystèmes aquatiques sont directement impactés, notamment les écosystèmes côtiers qui, à l'interface entre le bassin-versant et la mer, sont le réceptacle de toutes les formes de pollution générées par les activités continentales. Les zones côtières sont des milieux d'interface affectés par de nombreux apports continentaux notamment en contaminants chimiques [2][3][4][5][6][7][8]. L'importance de la pollution des zones côtières et estuariennes est avérée [9] et son implication dans la dégradation de ces biotopes sensibles prouvée [10]. Cette altération peut rendre l'utilisation de l'eau dangereuse pour la santé et/ou perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Ces risques sanitaires et environnementaux ont conduit à une prise de conscience sociétale sur l'importance de la préservation de la qualité de l'eau.

L'évolution de la qualité de l'eau est donc en lien direct avec le développement économique de la population mondiale et son augmentation. S'il est déjà reconnu que l'accessibilité aux ressources comme l'eau, la nourriture ou l'énergie n'est pas distribuée équitablement, il est également prévisible que les changements climatiques contribueront à détériorer cette situation et ce dans un futur proche. Les changements de la qualité des eaux affecteront, en premier lieu, la santé humaine, mais également la santé des écosystèmes et par là même la production agricole, la pêche, l'aquaculture, et par conséquent l'économie. Les enjeux liés à la qualité de l'eau sont donc déjà multiples et il apparaît indispensable d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur son évolution (ou de faire le point de l'état des connaissances).

Un premier constat peut être fait : en comparaison aux études et à la compréhension des impacts du changement climatique sur la disponibilité de l'eau et sur les risques hydrologiques, les conséquences de ceux-ci sur la qualité de l'eau sont très peu documentées et étudiées [11][12]. Les inondations et les sécheresses apparaissent comme des moteurs majeurs quant à la disponibilité de l'eau. Néanmoins à côté de ces impacts majeurs et quantitatifs, la qualité des eaux (de surface et souterraines) peut être affectée par les changements climatiques. Une sécheresse par exemple peut par le simple fait d'un phénomène d'étiage et de basses eaux concentrer les polluants chimiques et amener à un arrêt de son utilisation en tant qu'eau potable. De la même façon suite à une inondation et à un phénomène de crue violent, l'alimentation en eau potable peut être suspendue du fait de l'arrivée massive de polluants dans l'eau suite à un lessivage intense des sols du bassin-versant ou suite à une saturation des usines de traitement des eaux usées.

I- Réglementation en lien avec la qualité des eaux

La qualité des eaux de surface et des nappes souterraines a généralement diminué au cours des dernières décennies, principalement en raison de l'augmentation des activités agricoles et industrielles [13]. Pour résoudre ce problème, de nombreux pays (par exemple, des pays de l'Union européenne et le Canada) ont établi des normes ou renforcé les normes existantes en matière d'effluents[1] et ont remis en état des stations de traitement des eaux usées [14].

La production mondiale de substances chimiques est passée d'un million de tonnes en 1930 à 400 millions aujourd'hui [15]. Le nombre de substances chimiques pouvant impacter la ressource en eau augmente donc tous les jours. Dans ces conditions, la notion de pollution chimique d'une eau (ou

1. Rejets industriels, domestiques... plus ou moins traités vers le milieu aquatique.

à l'inverse sa bonne qualité chimique) est délicate à définir. Par exemple, une même masse d'eau peut être considérée comme non polluée sur un paramètre tel que la teneur en nitrates et comme polluée par les métaux lourds. Il a donc fallu définir des critères d'évaluation, des paramètres précis à prendre en compte, ainsi que des moyens de quantification de ces paramètres pour qualifier la pollution chimique de l'eau.

Dans la deuxième moitié du XX^{e} siècle, les préoccupations environnementales et les premiers questionnements réels sur la qualité chimique de l'eau ont conduit à l'élaboration de la première loi sur l'eau (loi du 16 décembre 1964). Cette loi a organisé la gestion décentralisée de l'eau par bassin-versant et a créé les agences de l'eau et les comités de bassin. Depuis les années 1970, la politique publique de l'eau s'inscrit dans un cadre européen. La législation communautaire s'est d'abord intéressée aux usages de l'eau, puis à la réduction des pollutions et comprend environ une trentaine de directives sur l'eau. Au niveau français la deuxième loi sur l'eau du 3 janvier 1992 consacre l'eau en tant que « patrimoine commun de la nation » et renforce ainsi l'impératif de protection de la qualité et de la quantité des ressources en eau. Elle a également mis en place de nouveaux outils de la gestion des eaux par bassin : les SDAGE (schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux) et les SAGE (schémas d'aménagement et de gestion des eaux). Afin d'harmoniser la politique de protection des ressources et des milieux aquatiques, l'Europe a adopté le 23 octobre 2000 la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) (Directive 2000/60/CE) établissant une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Cette directive-cadre, traduite en droit français par la loi du 21 avril 2004, fixe l'objectif de « bon état » pour toutes les masses d'eau (cours d'eau, lacs, eaux côtières, eaux de transition, eaux souterraines) qui doit être atteint par les États membres à l'horizon 2015. Pour les eaux de surface, les critères de bon état reposent sur des paramètres biologiques (état écologique) et chimiques (état chimique lié à la conformité à des normes de qualité environnementale NQE fixées à l'échelle de l'union européenne), alors que pour les eaux souterraines, le bon état se réfère aux aspects quantitatifs (équilibre entre recharge et captage) et chimiques (conformité à des normes de qualité établies au niveau de l'UE, ou par les États membres à l'échelle locale, régionale ou nationale). Une masse d'eau de surface est en bon état, au sens de cette directive, dès lors qu'elle est à la fois en bon état écologique et en bon état chimique. La DCE établit une liste de 33 substances prioritaires à rechercher dans les masses d'eaux, parmi lesquelles des métaux comme le cadmium ou le nickel, des pesticides comme le diuron ou l'isoproturon, ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) comme le naphtalène ou le benzo(a)pyrène.

Pour l'évaluation de l'état chimique, la Directive fille de la DCE (Directive 2008/105/EC) définit des normes de qualité environnementale (NQE) à ne pas dépasser pour les 33 substances prioritaires ainsi que pour 8 autres polluants. Les masses d'eau sont classées soit en « bon état chimique » si les concentrations de ces 41 substances sont inférieures à leurs NQE respectives, soit en « mauvais état chimique » si au moins une substance analysée dépasse la NQE. La liste de substances prioritaires et leurs NQE associées doivent être revues tous les 4 ans. Une nouvelle proposition de directive a été publiée récemment [16] dans laquelle les NQE de certaines substances ont été revues et de nouvelles substances prioritaires ont été ajoutées. Pour la première fois, trois substances issues de médicaments entreraient dans cette liste : 17-α-éthinylœstradiol (EE2), 17-β-œstradiol (E2) et diclofénac. Les autres molécules sont soit des dérivés de combustion (dioxines et composés de type dioxine), soit des substances issues de produits phytopharmaceutiques (aclonifène, bifénox, cyperméthrine, dicofol, heptachlore, quinoxyfène), de produits biocides (cybutryne, dichlorvos, terbutryne), ou de produits chimiques industriels (acide perfluorooctanesulfonique [PFOS], hexabromocyclododécane [HBCDD]). Six de ces quinze nouvelles substances entrent directement dans la catégorie « substances dangereuses prioritaires », qui implique la suppression progressive de leur déversement dans l'eau dans un délai de vingt ans : dicofol, PFOS, quinoxyfène, dioxines et composés de type dioxine, HBCDD, heptachlore.

Cependant, il ne faut pas oublier qu'à côté de ces polluants dits « prioritaires » ou « spécifiques », il reste le cortège de toutes les substances chimiques utilisées par l'homme ; 100 000 substances sont recensées sur le marché communautaire dont 30 000 sont soumises à enregistrement selon la

réglementation REACH (Registration, Évaluation, Authorisation and Restriction of CHemical substances). Ces substances chimiques à l'heure actuelle non considérées dans les listes de polluants prioritaires peuvent potentiellement devenir les nouveaux polluants de demain ; ainsi des molécules comme les substances pharmaceutiques ou les produits de soin corporels qui ont été synthétisées pour soigner sont aujourd'hui retrouvées dans les écosystèmes aquatiques où elles sont considérées comme des polluants « émergents ».

II- Sources de pollutions des eaux

Les polluants chimiques qu'ils soient considérés comme prioritaires ou émergents peuvent être introduits dans l'eau tout au long du grand cycle de l'eau **(Figure 2)**.

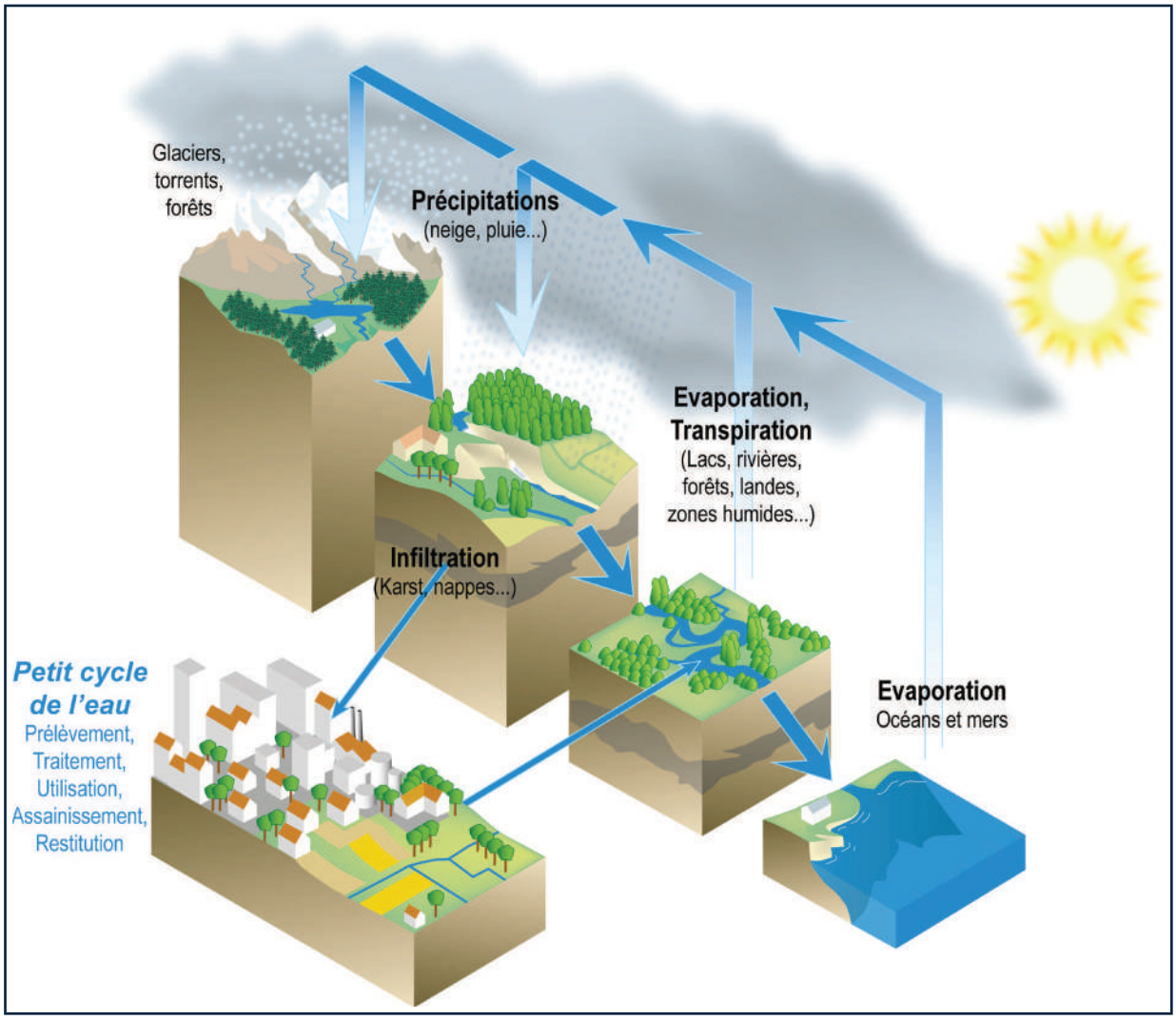


Figure 2 : *Cycle de l'eau (http://www.services.eaufrance.fr/services/grand-cycle-l-eau).*

Ils ont des sources communes, ponctuelles ou bien diffuses, qui peuvent être regroupées en quatre grandes familles :

Origine naturelle

Certaines substances chimiques sont présentes naturellement dans notre environnement ou peuvent être émises lors de phénomènes naturels. Des composés comme les métaux par exemple sont

des éléments constitutifs de l'écorce terrestre et peuvent être introduits dans les masses d'eau par des mécanismes d'érosion ou de dégradation des sols. De la même façon, des molécules comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent être notamment produites lors d'incendies de forêts ou d'éruptions volcaniques.

Origine industrielle

Les activités industrielles rejettent de façon directe ou indirecte des substances chimiques dans l'environnement *via* les rejets dans l'atmosphère, les stations d'épuration ou des infiltrations par exemple. En fonction de l'activité industrielle considérée les polluants émis vont bien sur être différents. Sur le plan national les rejets industriels *via* les stations d'épuration ont été évalués dans le cadre du RSDE (Recherche des Substances Dangereuses dans l'Eau), ce qui permet d'avoir une idée de la typologie des polluants rejetés. Parmi les polluants recherchés on retrouve par exemple des métaux indestructibles comme le chrome, le zinc, le cuivre et des substances synthétiques comme le DEHP (Phtalate : Di(2-éthylhexyl) phtalate), les BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzènes, Xylènes) ou le dichlorométhane, ou encore des produits formés lors des processus mis en œuvre comme les HAP (formés lors des phénomènes de combustion incomplète).

Origine agricole

Les activités agricoles utilisent des substances chimiques pour le traitement des sols, des cultures ou pour le traitement des animaux. Les polluants classiquement associés à l'activité agricole sont les nitrates, les pesticides et les substances vétérinaires pour le traitement des animaux, les antibiotiques par exemple. Plusieurs métaux, dont le cuivre majoritairement, entrent dans la composition des produits épandus plusieurs fois par an sur les surfaces agricoles (e.g. Cuivre - Bouillie Bordelaise ; Argent comme agent anti-grêle).

Origine urbaine et domestique

La pollution d'origine domestique englobe toutes les substances que nous pouvons émettre ou utiliser au quotidien et qui finissent dans les écosystèmes aquatiques en tant que polluants. Cela va des rejets d'hydrocarbures et de métaux lors des déplacements en voitures, en passant par les produits de nettoyage utilisés dans les maisons ou les pesticides et engrais utilisés dans les jardins jusqu'aux médicaments utilisés pour soigner et les métaux provenant des toitures/canalisations en contact avec les eaux pluviales.

Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue qu'un polluant ne provient pas nécessairement d'une seule source ; de très nombreux polluants pouvant avoir des origines multiples comme les HAP notamment (d'origine naturelle, industrielle ou urbaine) les alkylphénols (d'origine urbaine, industrielle ou agricole), ou l'Argent (d'origine urbaine, industrielle ou agricole) [17][18].

III- Interactions changement climatique – qualité de l'eau

De façon générale, plusieurs moteurs non associés au climat influencent les ressources en eau douce à toutes les échelles, notamment l'échelle mondiale [19]. Les ressources en eau sont fortement touchées, tant en termes de quantité que de qualité, par l'activité humaine, à savoir l'agriculture et les changements d'affectation des terres, la construction et la gestion des réservoirs, les émissions de polluants, et le traitement de l'eau et des eaux usées. L'utilisation de l'eau est principalement liée aux changements démographiques, à la consommation d'aliments (notamment le type de régime), à la politique économique (notamment la tarification de l'eau), à la technologie, au mode de vie et à la perception de la valeur des écosystèmes d'eau douce par la société. Afin d'évaluer la relation entre le changement climatique et l'eau

douce, il est nécessaire d'analyser comment l'eau douce a été influencée (et sera influencée dans l'avenir) par les changements de ces moteurs non associés directement au climat [20].

La pollution des milieux aquatiques (continentaux, littoraux ou océaniques) est directement liée aux activités humaines variées de type urbain, agricole, ou industriel (cf. paragraphe ci-dessus). Le changement climatique ou le changement global peut en influant sur ces activités avoir un impact indirect sur la qualité de l'eau. Par exemple des changements de pratiques viticoles auront une incidence sur l'utilisation de pesticides (qualitativement et quantitativement) et donc sur leur apport vers le milieu aquatique. L'utilisation des sols aura aussi une forte incidence : l'imperméabilisation par exemple peut être un vecteur non négligeable de polluants vers les milieux aquatiques empêchant une infiltration de ceux-ci et donc limitant leur dégradation par les bactéries des sols.

En Europe les rejets industriels et domestiques sont de mieux en mieux maîtrisés du fait d'une réglementation de plus en plus sévère mais aussi du fait de l'amélioration des procédés d'épuration. En revanche les pollutions dites diffuses pourraient augmenter du fait d'événements climatiques extrêmes entraînant un lessivage accru des contaminants chimiques stockés dans les sols, ou un relargage des contaminants piégés dans les sédiments du fait des phénomènes de crues et de remise en suspension de ces derniers entraînant une remobilisation des contaminants piégés dont certains depuis longtemps (cas des métaux ou des PolyChloroBiphényles (PCB) par exemple). Les phénomènes hydrologiques peuvent avoir une influence directe sur la qualité des eaux : une augmentation des matières en suspension pourrait entraîner une augmentation de la part des contaminants hydrophobes associés mais pourrait aussi entraîner une fixation plus importante pour certains d'entre eux qui passeront ainsi de la phase dissoute à la phase particulaire (changement de spéciation[2]) ; des régimes d'étiage pourraient amener à une reconcentration des espèces chimiques et donc à une augmentation des concentrations pouvant amener à des dépassements de seuils réglementaires (NQE ou seuil de potabilité) mais aussi à des concentrations à partir desquelles des effets toxiques peuvent se produire vis-à-vis de la faune et flore aquatique (concentrations dites sans effet ou PNEC [Predicted Non Effect Concentration]). Les alternances sécheresses-précipitations en lien avec l'évolution des sols des bassins versants auront aussi une incidence forte sur la mobilité des contaminants et leur apport vers les milieux aquatiques. Au-delà des phénomènes hydrologiques, les autres facteurs associés au changement climatique qui peuvent directement influer sur la qualité de l'eau sont la température, les radiations solaires car ces deux paramètres vont avoir une influence sur la physico-chimie des milieux et des composés et donc sur leur spéciation (ou distribution) et leur réactivité et donc *in fine* sur leur toxicité.

Paramètres basiques (T, pH, salinité, radiations solaires)

Le changement climatique contribue aux multiples perturbations des systèmes écologiques comme l'acidification des océans ou la multiplication des phénomènes d'eutrophisation en milieu côtier [21], l'augmentation de la température de l'air et de l'eau [20].

Concernant la température, une augmentation de la température des eaux de surface, de 0,2 °C à 2 °C selon les cas, a été observée depuis les années 1960 en Europe, Amérique du Nord, Asie [20] en relation avec le réchauffement global. De façon plus régionale on peut noter que l'estuaire de la Gironde a vu sa température augmenter régulièrement en période estivale : presque 2,5 °C en 30 ans [22].

La température est un paramètre clé en ce qui concerne les équilibres physico-chimiques et les phénomènes biologiques (le métabolisme par exemple dépend de la température ; les phénomènes de ventilation chez les poissons également). Ainsi des variations de température auront des incidences sur la solubilité, la complexation, la volatilisation, la dégradation des contaminants chimiques, influant ainsi directement sur la spéciation de ces derniers et donc sur leur transfert inter-compartiments environnementaux et in fine sur leur biodisponibilité.

2. Désigne la forme chimique et structurale sous laquelle se trouve un élément métallique ou une molécule.

De façon générale la solubilité des contaminants chimiques augmente avec la température alors que la concentration en espèces gazeuses dissoutes diminue. Ceci est particulièrement important dans le cas de l'oxygène dissous qui diminuera de façon notable avec l'augmentation de la température accentuant les phénomènes d'hypoxie en milieu aquatique. Dans le même temps certains contaminants chimiques verront leur concentration dissoute augmenter, ce qui peut en première approximation s'apparenter à une part biodisponible de la contamination plus importante.

Les variations de température modifiant les réactions biologiques, la température peut aussi avoir un effet sur les impacts toxiques par modification du métabolisme [23]. Ainsi les changements de température induiront des changements quant aux effets toxiques des micro-polluants, de nombreuses études montrant une augmentation de la toxicité avec une augmentation de la température [23][24][25].

Le pH va également avoir un rôle sur la solubilité et donc sur la spéciation et *in fine* sur la biodisponibilité des contaminants chimiques. De nombreux contaminants chimiques organiques sont des acides ou des bases faibles et seront donc dépendants quant à leur forme chimique prédominante du pH du milieu récepteur. Si le pH évolue leur spéciation évoluera ; ainsi par exemple pour des acidifications du milieu, les acides faibles de types phénoliques (ex : pentachlorophénol, pKa = 5,1) seront préférentiellement sous forme associée organique, donc plus hydrophobes et potentiellement plus bioaccumulables.

Les interactions salinité-contaminants sont complexes car multifactorielles. La salinité a une influence sur la spéciation des contaminants chimiques mais elle aura aussi un impact sur la toxicité et la physiologie des espèces elles-mêmes [26][27]. Les composés organiques sont moins solubles et plus biodisponibles (car extractibles) dans les eaux salées que dans les eaux douces du fait de ce qui est communément appelé « l'effet de sel ». En effet les molécules d'eau sont fortement liées par les sels ce qui les rend indisponibles pour solvater et donc dissoudre les composés organiques [28]. On peut donc s'attendre à une augmentation et de la biodisponiblité et de la toxicité en parallèle d'une augmentation de la salinité [23][29][30].

Les changements climatiques globaux ont un impact sur la qualité et la quantité de rayonnement solaire transmis à la surface des eaux. En effet, l'impact sur la couche d'ozone aboutit à une augmentation des rayonnements UV-B (280-320 nm) reçus par les eaux superficielles [31]. Ce phénomène peut donc favoriser les réactions photochimiques impliquant directement le carbone organique dissous (matière organique naturelle) et donc les grands cycles biogéochimiques concernant les nutriments et les contaminants organiques et inorganiques [32]. En effet, le carbone organique dissous, origine organique de la coloration des eaux va subir plus de réactions photochimiques aboutissant à une modification de sa structure et donc à une diminution de la coloration associée [33]. Parallèlement, les rayonnements UV-B vont donc être plus disponibles pour provoquer des réactions de photodégradation à partir des contaminants notamment organiques, aboutissant à la formation de produits de photodégradation dont les propriétés physico-chimiques et écotoxicologiques sont inconnues la plupart du temps mais qui peuvent aboutir à la formation de photo-produits plus toxiques que les composés parents. Ce phénomène est documenté pour nombre de pesticides ou de composés pharmaceutiques comme par exemple la ranitidine (médicament anti-ulcères) [34] ou le sulfaméthoxazole (antibiotique) [35]. Les phénomènes de phototransformation des contaminants organiques sont actuellement imparfaitement documentés et devront être mieux prix en compte dans le futur en relation avec la qualité des masses d'eau.

Nutriments

Le réchauffement du sol augmente la part de phosphore et d'azote extractibles [11]. Des températures plus fortes augmenteront les processus de minéralisation et l'apport d'azote et de phosphore (ainsi que de carbone organique) des sols vers les eaux par lessivage. Un climat plus chaud devrait donc

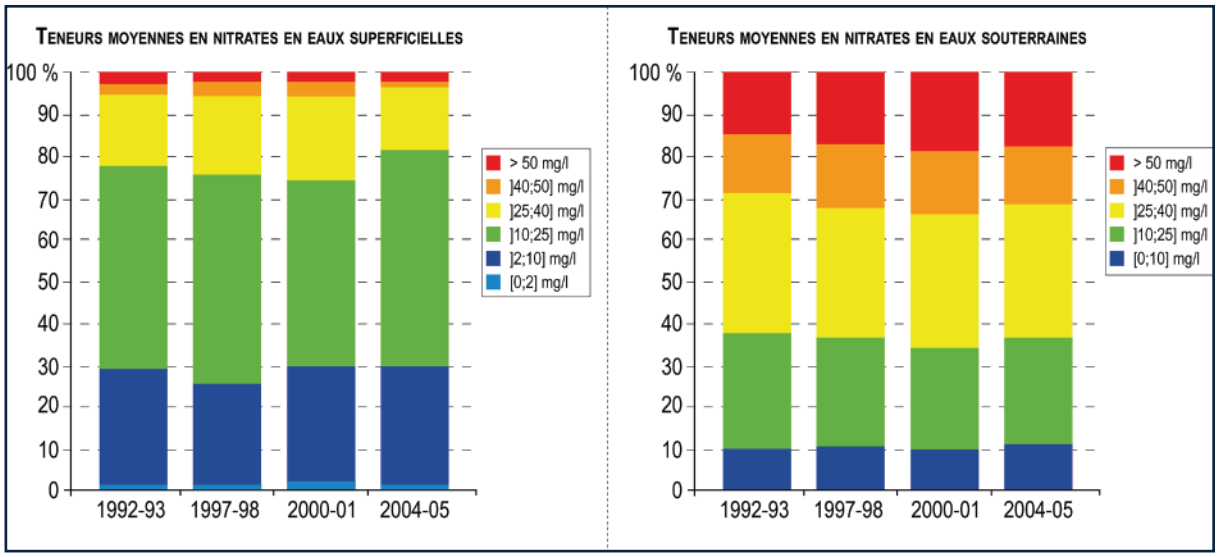


Figure 3 : *Concentrations en nitrates dans les eaux superficielles et les eaux souterraines françaises entre 1992 et 2005 [39].*

être à l'origine d'une augmentation des nutriments dans les eaux de surface et les eaux souterraines [36]. De nombreux auteurs prédisent ainsi une augmentation des concentrations et des flux en nitrates dans les 50 prochaines années [37][38].

Si l'on s'intéresse de plus près à la situation française, les nitrates sont actuellement un facteur déclassant des masses d'eau, en particulier pour les masses d'eaux souterraines. Leurs concentrations suivent la même tendance que celle observée à l'échelle européenne, avec les teneurs qui demeurent constantes dans les masses d'eau suivies **(Figure 3)**. La mise en œuvre en 1991 de la « directive nitrates » (directive 91/676/CEE du Conseil) qui vise à lutter contre la pollution des eaux par les nitrates à partir de sources agricoles, après avoir eu un effet se traduisant par une baisse, actuellement ne semble pas avoir d'incidence forte sur les concentrations de nitrates observées dans les eaux continentales françaises ; on observe une stabilisation des concentrations. Les eaux de surface et les eaux souterraines les plus impactées par les nitrates se trouvent en Bretagne et en Charente **(Figure 4)**.

À l'échelle du bassin Adour-Garonne, les tendances locales s'inscrivent dans la tendance nationale. Globalement les concentrations en nitrates augmentent au fil des années quel que soit le type de bassin-versant considéré (agricole, équilibré, exutoire ou littoral) jusqu'aux années 1990 mais se stabilisent ensuite avec les mesures prises dans le cadre de la « directive nitrates ». Dans ce contexte les impacts du changement climatique pourraient tendre à ré-aggraver la situation et contrebalancer les mesures de réduction d'usage et d'amélioration des systèmes d'épuration.

Matière organique

La matière organique dissoute (MOD) est reconnue comme ayant une influence non négligeable sur la qualité de l'eau : influence sur le pH, la spéciation des contaminants chimiques. La source principale de MOD dans les eaux de surface est due au lessivage des sols, lesquels sont directement impactés par le changement climatique. Un changement de la qualité et de la quantité de MOD en lien avec le changement climatique est donc fortement probable (notamment une augmentation des apports en carbone organique dissous) et pourrait avoir une incidence directe sur la qualité des eaux et sur la toxicité et le devenir des contaminants chimiques présents dans les écosystèmes aquatiques.

L'interaction des polluants avec la matière organique est en effet un fait bien établi, bien que les mécanismes par lesquels elle se produit ne soient pas toujours bien compris. La MOD est en effet connue pour interagir avec les polluants et affecter leur transport et leur devenir dans l'environnement

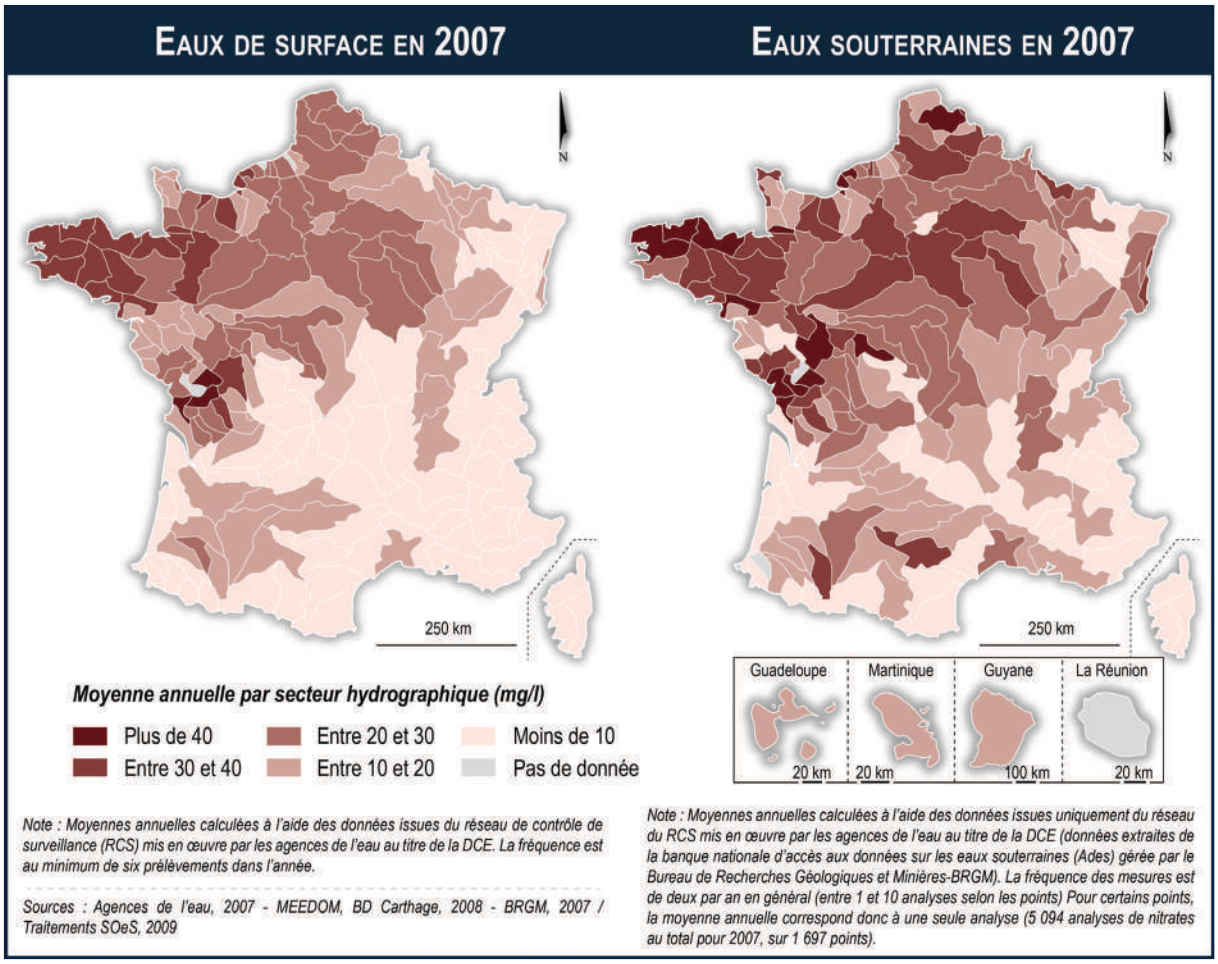


Figure 4 : *Concentrations en nitrates dans les eaux superficielles et les eaux souterraines françaises en 2007 [39].*

aquatique [40][41], mais également leur biodisponibilité, leur biodégradation et leur toxicité vis-à-vis des organismes [42][43]. Le piégeage des contaminants par la MOD dépend de nombreux facteurs tels que les caractéristiques de la MOD et des contaminants (nature, structure, taille des molécules, polarité…) et les paramètres physico-chimiques du milieu (pH, concentration ionique…) [44].

Une augmentation significative de la teneur en matière organique naturelle (MON) a été observée au niveau international au cours des 30 dernières années (Scandinavie, Angleterre, Allemagne, Amérique du Nord…) [45][46][47]. Les modifications observées (augmentation de la teneur en carbone organique dissous (COD), modification de la couleur de l'eau…) peuvent être expliquées par les changements climatiques [11], entre autres par l'augmentation du volume des pluies ou le changement des radiations UV. Une augmentation potentielle de la matière organique dissoute (MOD) pourrait avoir des impacts importants sur les écosystèmes aquatiques. Cette augmentation de la concentration en matière organique est d'autre part accompagnée d'un changement des caractéristiques physiques et chimiques (modification de la polarité, de l'hydrophobicité, du caractère anionique…) des molécules qui la composent [48]. Les changements climatiques entraînent par exemple une augmentation des radiations solaires, ce qui tend à augmenter la photo-oxydation de la MOD, produisant ainsi des molécules de poids moléculaire inférieur. Un autre mécanisme lié au réchauffement climatique est l'augmentation de la productivité primaire [49] à l'origine d'une augmentation et d'une modification de la MOD dans les milieux aquatiques. Dans les régions tempérées, le changement climatique induirait une diminution du nombre de jours pluvieux, mais augmenterait le volume moyen de chaque événement [50] entraînant alors de forts apports en MOD d'origine terrigène.

Microalgues toxiques et leurs toxines

Le changement global peut (1) favoriser le développement d'espèces phytoplanctoniques et de cyanobactéries introduites dont celles qui ont la capacité à émettre des molécules naturelles toxiques que l'on rassemble sous le nom de toxines algales (cyanotoxines, phycotoxines…), (2) augmenter l'abondance et la fréquence d'occurrence d'espèces autochtones responsables de toxicité, (3) générer une plus forte production de toxines par ces microalgues.

En raison de l'évolution des températures et de l'acidité des eaux, des espèces allochtones (par exemple importées dans les eaux de ballast) peuvent trouver des conditions favorables à leur développement dans nos eaux. C'est le cas par exemple d'*Ostreopsis* (palytoxines)[3], de *Gambierdiscus* (ciguatera)[4] et de *Vulcanodinium* (pinnatoxines)[5]. Une nouvelle espèce de cyanobactérie tropicale a commencé à coloniser nos régions tempérées, *Cylindrospermopsis raciborskii*, en lien avec l'augmentation des températures [51] ; cette cyanobactérie est connue pour produire une toxine dangereuse la cylindrospermopsine (cytotoxique et hépatotoxique) qui est maintenant détectée dans les eaux européennes [52][53].

L'augmentation de fréquence des tempêtes peut créer des conditions favorables au développement de certaines espèces toxiques, par exemple en libérant dans les eaux des nutriments stockés dans les sédiments. On peut par exemple s'interroger sur les efflorescences exceptionnelles de *Pseudonitzchia spp*. observées dans les eaux du Bassin de Marennes-Oléron pendant les semaines qui ont suivi l'ouragan Xynthia.

Des résultats expérimentaux publiés en 2011 montrent que la diatomée *Pseudo-nitzschia multiseries* produit de plus grandes quantités d'acide domoïque (phycotoxine amnésiante, *amnesic shellfish poisoning* ou ASP) quand la $p(CO_2)$[6] augmente, spécialement lorsque les nutriments sont limitants [54]. En 2010, un protocole expérimental semblable appliqué au dinoflagellé *Karlodinium veneficum* avait également mis en évidence une augmentation de la production d'une ichthyotoxine (la karlotoxine 1) dans les mêmes conditions [55]. Ces récents résultats sont en concordance avec l'existence d'un lien direct entre la biosynthèse de phycotoxines et le métabolisme de la plupart des algues responsables d'efflorescences à caractère toxique – même si l'on ne connaît pas les mécanismes biochimiques qui contrôlent la production de toxine en fonction de la $p(CO_2)$ et du pH. Globalement, ces premières expériences suggèrent que les efflorescences toxiques pourraient devenir plus fréquentes et plus intenses dans un océan acidifié, augmentant ainsi les risques liés aux phycotoxines.

Micropolluants

La présence des micro-polluants dans les écosystèmes aquatiques est le fait de sources directes et indirectes ou diffuses **(Figure 5)**. Leur présence est conditionnée par leur cycle biogéochimique et différents phénomènes très complexes, tant physico-chimiques que biologiques, qui peuvent être affectés par les changements climatiques **(Figure 5)**.

La distribution des contaminants chimiques dans l'environnement au sens large et plus particulièrement dans l'eau est conditionnée par les phénomènes de partition et d'équilibre entre les différents compartiments environnementaux (air, eau, sols, biote), par les sources et les voies d'introduction (apports directs par rejets, apports par lessivage, apports par dépôts secs ou humides), par les phénomènes de dégradation biotiques et abiotiques. L'ensemble de ces phénomènes et processus sont impactés par le

3. Les algues du genre *Ostreopsis* causent des nuisances dans les eaux de baignades en Méditerranée depuis 2006, elles sont aussi déjà détectées en petit nombre sur les côtes atlantiques françaises.
4. Les ciguatoxines ont été répertoriées en Europe africaine depuis plusieurs années (provenance probable des Caraïbes), un premier cas a été rapporté en France méditerranéenne en 2011.
5. Les pinnatoxines ont causé des toxicités atypiques en France (étang d'Ingril) depuis 2006.
6. Pression de CO_2.

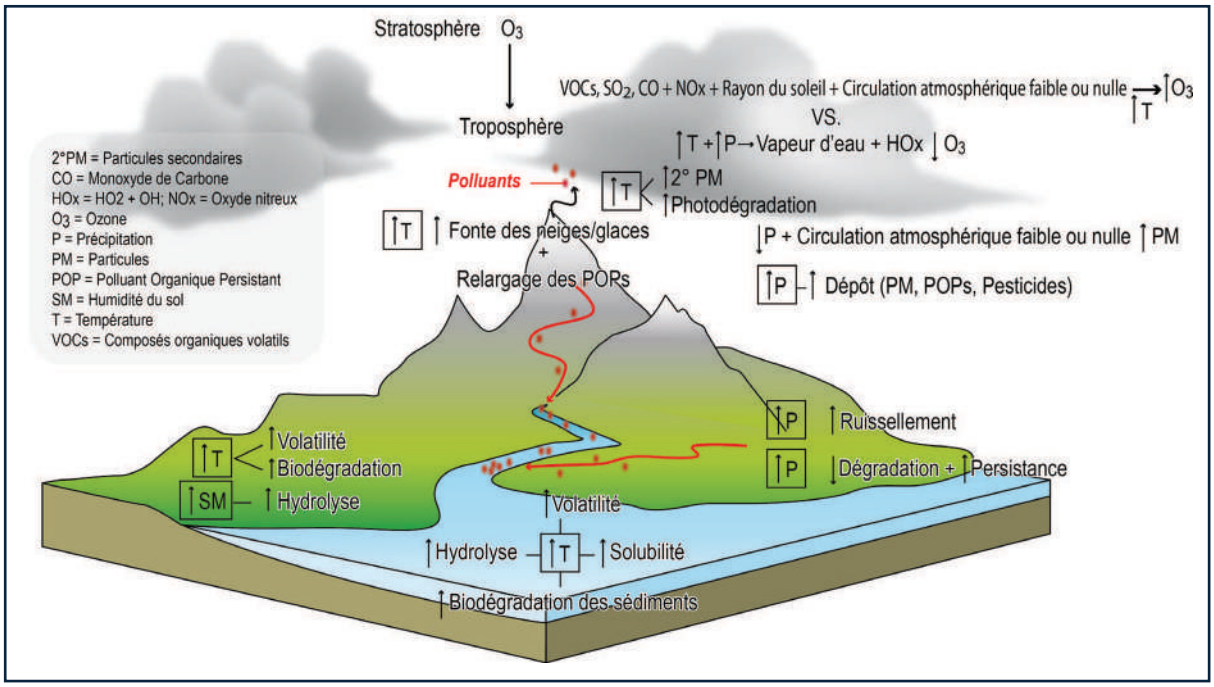


Figure 5 : *Sources et processus conditionnant la présence des micro-polluants chimiques dans l'environnement aquatique [23].*

changement climatique et les changements globaux. Il en résulte que la présence, la distribution, et *in fine* l'impact toxique des contaminants chimiques seront donc impactés par le changement climatique **(Figure 5)**.

Micropolluants inorganiques

Les métaux représentent une grande majorité des micropolluants inorganiques. Ils constituent une source majeure minérale et énergétique, dont l'exploitation et la diversification des applications vont fortement accroître pendant les 30 prochaines années. Ainsi, ils continueront à jouer un rôle majeur dans la pollution des milieux aquatiques.

Les métaux sont des éléments chimiques non-synthétiques et sont indestructibles. Du fait de leur persistance absolue, leur introduction dans les milieux aquatiques nécessite donc des stratégies de gestion adaptées. On distingue ici des métaux qui sont essentiels à la vie (oligo-éléments ; e.g. cuivre, zinc, arsenic, etc.) et des métaux auxquels on attribue aujourd'hui seulement des propriétés toxiques (e.g. plomb, uranium, thallium). La présence et la disponibilité des éléments du premier groupe dans le milieu naturel sont essentielles, sinon il existe un risque de carence qui peut être aussi problématique que celui de la pollution en cas de présence/disponibilité excessive de ces éléments. De nouvelles technologies et applications de certains métaux utilisés par l'homme depuis des millénaires (e.g. argent) et qui sont des contaminants classiques en font également des contaminants émergents à travers des nouvelles utilisations et formes introduites dans l'environnement. L'utilisation de nouvelles formes d'argent (nano-particules d'argent) dans notre vie quotidienne et leur introduction dans les eaux usées et les milieux aquatiques en sont un exemple actuel [18].

Parmi les métaux, le cadmium, le mercure, le nickel et le plomb sont considérés comme polluants prioritaires par la DCE. Dix-huit autres sont pris en compte pour la définition de NQE provisoires dans la circulaire du 7 mai 2007 (antimoine, argent, arsenic, baryum, beryllium, bore, chrome, cobalt, cuivre, étain, molybdène, sélénium, tellurium, thallium, titane, uranium, vanadium, zinc). Si l'on s'intéresse à la qualité des cours d'eau européens de façon très générale, les concentrations en cadmium et mercure diminuent depuis le début des années 1980 **(Figure 6)** du fait de réglementations de plus en plus drastiques et de mise en œuvre d'opérations de réhabilitation des sites sources contaminés.

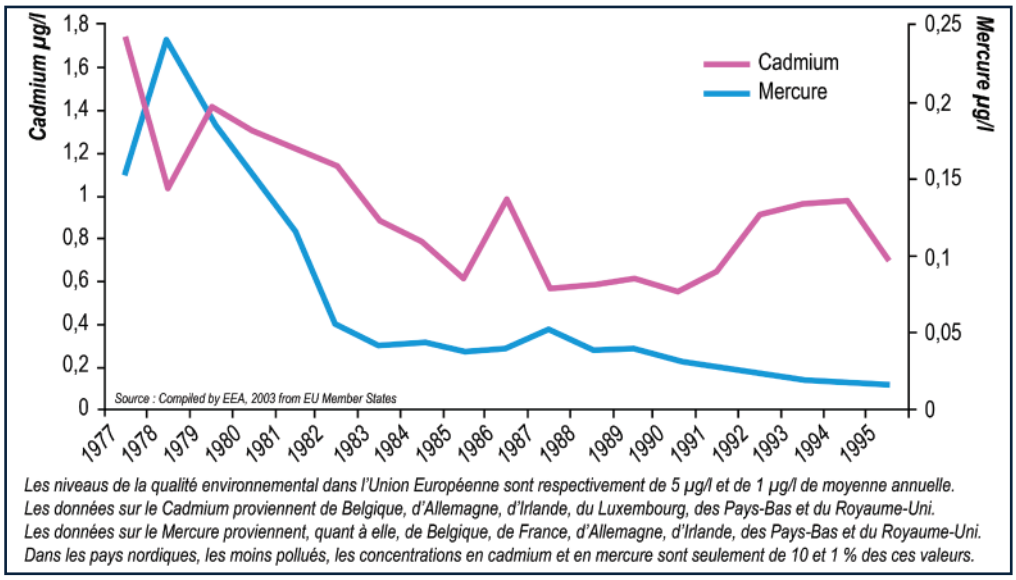


Figure 6 : *Évolution des concentrations de deux métaux cibles, le cadmium et le mercure, dans les eaux européennes [56].*

Bien que le changement climatique ne contribue pas de façon majeure (sauf cas de modification des processus d'altération des roches dans les bassins versants) directement à la contamination des systèmes aquatiques par les éléments traces métalliques (ETM), il jouera probablement un rôle très important sur leur transport et leur réactivité dans les systèmes aquatiques et plus particulièrement dans les continuums fluvio-estuariens. Il faut préciser que leur transport, leur réactivité et leur biodisponibilité dans les eaux douces, intermédiaires et côtières sont principalement contrôlés par les interactions spatiales et temporelles entre les phases dissoutes et particulaires. De plus, de nombreux paramètres et processus contrôlant la mobilité et le potentiel écotoxicologique des ETM seront directement affectés par un changement climatique (tant *via* les phénomènes hydologiques et *via* l'augmentation de la température). La baisse des débits avérée et l'augmentation prévisible de l'intensité des crues extrêmes auront probablement un fort impact sur le transport des ETM (e.g. érosion des sols avec les dépôts atmosphériques, érosion de sédiments de barrage, transport rapide des particules vers le milieu marin, etc. [57]) ; et leurs transformations dans les gradients bio-géochimiques des milieux aquatiques (les phénomènes de complexation pourraient être déplacés entraînant un relargage des métaux vers la phase dissoute ; une augmentation du carbone organique dissous associée à un changement des conditions redox pourraient favoriser également une augmentation des teneurs en ETM dissous ; les phénomènes microbiens dépendant de le température pourront être amplifiés et conduire à un changement de la spéciation de certains ETM...).

Cas des ETM dans le système « Gironde »

Le système fluvio-estuarien de la Gironde draine ~18 % de la superficie de la France métropolitaine et constitue ainsi un système aquatique majeur à l'échelle Européenne. De nombreuses sources de contaminants inorganiques, principalement d'Élé-ments Traces Métalliques (ETM : métaux lourds et métalloïdes ; Cd, Zn, Pb, Cu, As, Hg, Ag ; [4][58]) existent dans ce bassin-versant, ils sont dus aux diverses activités industrielles (e.g. miniers, métallurgiques), agrico-les et domestiques historiques et actuelles. Ainsi, le système girondin est atteint par une pollution poly-métallique principalement due à l'activité métallurgique (extraction de Zn) historique sur le site de la Vieille Montagne (Aveyron). Suite à l'arrêt de l'activité métallurgique en 1987, les efforts de surveillance et de restauration du site ont nettement réduit la pression directe de cette source sur le continuum Riou-Mort-Lot-Garonne-Gironde. L'amélioration générale de la qualité des eaux dans ce système a rendu visible d'autres sources non négligeables d'ETM comme les sédiments pollués du Lot qui peuvent être mobilisés lors de travaux d'aménagements fluviatiles [59] ou des crues [57], l'agriculture [60] et le milieu urbain [18]. Cet exemple montre clairement que, dans un contexte de changement global qui modifie les diverses pressions anthropiques sur les systèmes aquatiques, il y a des facteurs (e.g. activités minières et industrielles, urbanisation, occupation des sols, législation, gestion de sédiments pollués, etc.), plus ou moins dépendants du changement climatique qui contrôlent majoritairement la présence des contaminants métalliques dans le milieu aquatique et les organismes bioaccumulateurs (e.g. huîtres ; [18]). L'exemple régional montre les conséquences importantes sur la qualité du milieu et sur le plan socio-économique (e.g. interdiction d'ostréiculture en Gironde), avec une nette influence sur les milieux voisins (e.g. la Baie de Marennes-Oléron, première zone Française d'ostréiculture).

Sans être exhaustif on peut citer quelques exemples. Dans un scénario de réchauffement régional, il faut s'attendre à une augmentation de la température des eaux de surface et des nappes peu profondes. Ainsi la prolongation des périodes où les températures des eaux sont supérieures à ~12-15°C contribuera fortement à la mobilisation (microbienne) d'arsenic dans les rivières [61]. Ce métalloïde très toxique montre de fortes anomalies géochimiques dans les rivières drainant le Massif Central avec des concentrations dissoutes proches des limites admissibles pour la production d'eau potable (e.g. dans l'Isle ; dans les coteaux de Gascogne), notamment en période estivale. Si les situations de débits faibles en période estivale continuent à s'accentuer (intensité et/ou durée) les temps de stagnation estivale des eaux dans l'estuaire fluvial se prolongeront, ce qui augmentera clairement la minéralisation de la matière organique dans cette partie de l'estuaire, mobilisant d'importantes quantités de cuivre (actuellement ~3,6 t/an) dans l'eau [62]. La baisse des débits fluviaux et l'élévation prévue du niveau marin favoriseront l'intrusion de masses d'eau salines dans l'estuaire de la Gironde ce qui déplacera inévitablement les processus estuariens de dissolution de métaux par chloro-complexation (e.g. cadmium, argent) vers l'amont [18] **(Figure 7)**.

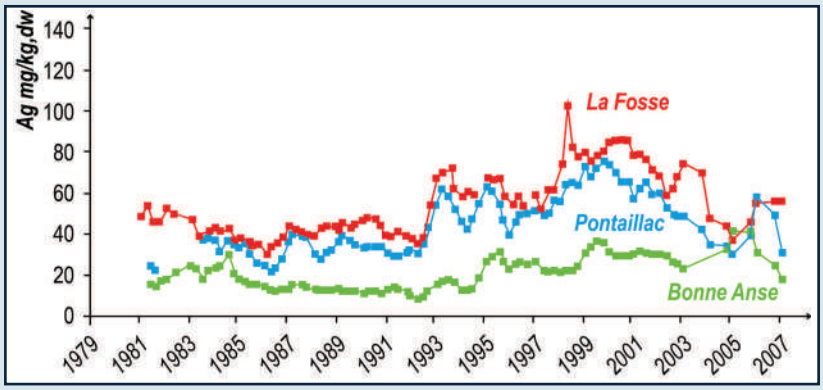


Figure 7 : *Évolution des concentrations en argent dans les huîtres de la Gironde à trois sites de l'embouchure montrant un gradient de contamination du plus interne (La Fosse) vers le plus marin (Bonne Anse ; données RNO ; [18]). À noter que les concentrations en Argent dans les huîtres reflètent les concentrations en Argent dissous dans le gradient de salinité de l'estuaire de la Gironde et que les dernières données (2008-2011 ; non publiées) montrent une augmentation des valeurs actuelles à un niveau maximum (i.e. égal ou supérieur à celui des années 1999-2002).*

Micropolluants organiques

Les micropolluants organiques se comptent en milliers de molécules et en dizaines de classes différentes. Ils sont pour la majorité d'entre eux synthétiques et utilisés dans de nombreux usages domestiques (ex. : produits ménagers, plastifiants...), agricoles (ex. : pesticides, agent de formulation...) ou industriels. Ils sont aussi pour certains d'entre eux formés non intentionnellement lors de processus variés comme par exemple la combustion (ex. : HAP) ou les opérations de synthèse industrielle (ex. : bisphénol) ou encore d'origine naturelle (ex. : les alcanes). Les impacts du changement climatique seront très variables selon les caractéristiques physico-chimiques de ces composés. On peut distinguer deux grandes classes : les composés persistants (ou appelés POP pour polluant organiques persistants) et les non persistants parmi lesquels on compte de nombreux pesticides, la majorité des composés pharmaceutiques, des détergents...

Le changement climatique influencera le devenir environnemental et le comportement (donc l'impact) des micro-polluants organiques en ayant une action importante sur tous les mécanismes conditionnant leur distribution environnementale (spéciation) : augmentation des phénomènes de volatilisation, de dépôt humide, de dégradation.

Cas des POP

Le changement climatique aura une incidence assez forte sur le devenir et le comportement des POP [23] selon des phénomènes qui peuvent d'ailleurs avoir des conséquences contradictoires. Avec le réchauffement global, la volatilisation et donc la partition des POP vers le compartiment atmosphérique devraient augmenter de même que les phénomènes de dégradation tant dus à la photo-oxydation qu'à la dégradation liée aux micro-organismes [63][64] ce qui conduirait à une diminution des concentrations en POP dans les milieux aquatiques et donc à une exposition plus faible des organismes aquatiques à ces composés. À côté de cette tendance globale, les schémas régionaux associés à une augmentation des précipitations et à des apports d'eau *via* la fonte des glaces et des neiges amèneraient à une augmentation des apports humides en POP vers les systèmes aquatiques et donc à une augmentation de leurs concentrations [63][65]. En effet les sols et les glaciers sont des réservoirs de POP accumulés au cours des années. Ainsi des lessivages importants de sols avec une remobilisation de matériel ancien ou la fonte des glaciers permettraient la libération d'anciens stocks de ces composés persistants piégés des

années en arrière (à l'époque de leur utilisation par exemple pour les PCB) [66] **(Figure 5)**. Les phénomènes de crues pourraient également en remobilisant de vieux sédiments permettre la libération dans le milieu aquatique d'anciens stocks de composés piégés et conservés sur du long terme. Ce phénomène d'apports plus importants associés à des phénomènes d'étiage plus fréquents et plus marqués pour des composés stables et persistants pourrait donc conduire à des augmentations sensibles des concentrations en POP dans les milieux aquatiques de type rivières et estuaires.

Cas des pesticides

Depuis près d'un demi-siècle, la modernisation de l'agriculture a été marquée par l'introduction et l'utilisation massive des pesticides dans les pratiques culturales. Actuellement, la surface agricole utile française occupe près de 30 millions d'hectares et la France est le troisième consommateur mondial de produits phytosanitaires. L'excès ou l'utilisation mal appropriée de produits phytosanitaires peuvent engendrer la contamination des différents compartiments (eau, air et sol) et notamment altérer la ressource en eau. Compte tenu des risques qu'ils représentent tant pour les milieux aquatiques que pour la production d'eau potable, la présence de pesticides dans les eaux fait l'objet d'un suivi régulier qui n'a cessé de se renforcer lors de la dernière décennie. Les données acquises par les réseaux de surveillance de la qualité des eaux (superficielles et souterraines) témoignent d'une présence quasi généralisée de pesticides dans les eaux françaises. Cette dégradation est variable dans le temps (Figure 8), et dépend des caractéristiques intrinsèques des molécules (persistance ou non) ainsi que du type de milieu/matrice, voire de territoire, considéré... À titre d'exemple, la dernière étude du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, reporte des quantifications de pesticides pour la période 2007-2009 dans 92 % des points de mesure en cours d'eau (58 % pour les territoires d'outre-mer), 70 % en plans d'eau et en eaux souterraines [67]. Dans les sédiments des rivières et des plans d'eaux où les pesticides sont par contre peu présents, on retrouve plus fréquemment des insecticides et des fongicides.

Les molécules les plus rencontrées dans les cours d'eau sont des herbicides (glyphosate, diuron, atrazine – **Figure 8**), et certains ont été retirés de l'homologation depuis 2003. On note également l'importance quantitative des produits de dégradation des pesticides, qui peuvent résulter de transformations biologiques (métabolisation) ou abiotiques (par exemple, photo-dégradation).

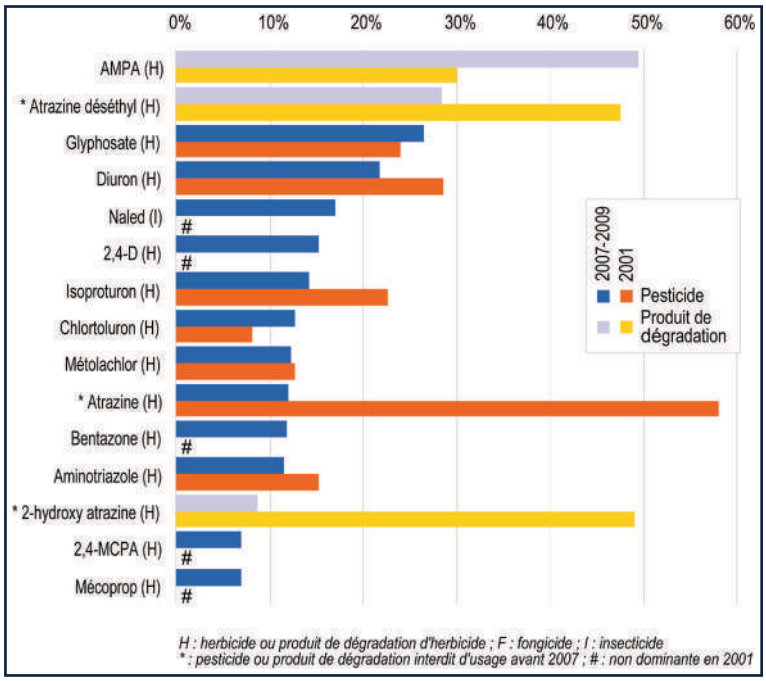


Figure 8 : *Principales molécules présentes dans les eaux superficielles sur la période 2007-2009 en métropole, tous réseaux confondus, et pourcentages de quantification en 2001 [67][68].*

Outre des effets sur la transformation des composés résultant d'évolution des conditions lumineuses (UV), le changement climatique pourrait également affecter les transferts de pesticides de la parcelle agricole au milieu aquatique, lesquels dépendent non seulement des caractéristiques des zones d'application (vulnérabilité), des usages (itinéraires techniques), mais également de la climatologie locale (durée et intensité des événements pluvieux).

Les différents phénomènes liés au changement climatique auront comme pour les POPs des conséquences parfois contradictoires. De façon générale le réchauffement global associé au changement climatique devrait participer à réduire les concentrations en pesticides tant au niveau des sols que des eaux en raison de la combinaison d'une augmentation, de la volatilisation des pesticides et de leur dégradation [23][69].

En revanche les augmentations de l'intensité et de la fréquence des précipitations devraient favoriser l'apport de pesticides vers les milieux aquatiques [70][61]. Bloomfield *et al.* [72] ont observé que les changements des rythmes et des intensités des précipitations saisonnières ainsi que l'augmentation de la température de l'air sont les principaux moteurs liés au changement climatique qui interagiront sur le devenir et le comportement des pesticides. Probst *et al.* [73] ont montré que pour certains pesticides (isoproturon et bifenox) des scénarios de précipitations intenses (augmentation de 10 à 20 mm/jour) augmenteraient le risque écotoxicologique lié aux pesticides avec une concentration en pesticides accrue dans le milieu aquatique. Indépendamment de ces phénomènes variés le changement climatique aura une action forte sur les traitements utilisés en agriculture tant qualitativement que quantitativement [74][75].

Cas des autres micro-polluants organiques (composés pharmaceutiques, plastifiants, cosmétiques, détergents…)

En ce qui concerne les autres micro-polluants les mêmes tendances que celles explicitées ci-dessus s'observeront selon les caractéristiques physico-chimiques et le caractère persistant ou non persistant. Un focus intéressant peut être fait sur les composés pharmaceutiques considérés comme des contaminants émergents depuis le début des années 2000 et entrés pour quelques-uns d'entre eux dans la liste des polluants prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau.

Ainsi plusieurs travaux ont démontré que certains composés pharmaceutiques étaient photo-dégradables [76][77]. On peut donc conclure que l'augmentation du rayonnement solaire devrait amener à une diminution de leurs concentrations en milieux aquatiques (en association ou non avec la dégradation bactérienne) [78]. Néanmoins il faut garder en tête que nous connaissons peu de chose sur les potentiels produits de dégradation formés qui pourraient être plus toxiques que les composés parents [34]. Plusieurs études ont montré que les concentrations en composés pharmaceutiques étaient corrélées au taux de carbone organique dissous et qu'elles dépendaient des débits et de l'intensité des précipitations [79][80]. Des phénomènes d'étiage marqués pourraient ainsi amener à une augmentation notable des concentrations en composés pharmaceutiques. Ces derniers sont majoritairement amenés vers les milieux aquatiques par les rejets des stations d'épuration qui dans de nombreux cas (à population constante) sont assez constants ; ainsi les apports seront amenés à être constants ou à augmenter (en lien avec l'augmentation de la population), ceci bien évidemment à procédé d'épuration constant, amplifiant l'augmentation des concentrations liées aux phénomènes d'étiage. Certains composés pharmaceutiques sont assez stables tout en étant très mobiles (comme l'acide clofibrique ou l'iopromide) ; ils ont un potentiel de lessivage important et peuvent donc être entraînés vers les eaux de surface mais aussi les eaux souterraines par des phénomènes de précipitations intenses [81].

Impacts écotoxicologiques

Les mécanismes de prise en charge des polluants par les organismes aquatiques, et par conséquent leurs effets potentiels, vont fortement dépendre de la structure chimique des molécules (taille, polarité, liposolubilité…), des organismes biologiques concernés, des barrières biologiques concernées (épithélium branchial, revêtement cutané, tractus digestif…) et des capacités de métabolisation ou élimination par les organismes aquatiques. Le changement climatique a une incidence sur différents paramètres comme la température, l'ensoleillement, la salinité, la solubilité, la matière organique… eux-mêmes ayant une influence sur la réactivité des molécules, le métabolisme, la biodisponiblité… Il aura par voie de conséquence une incidence notable sur les phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification et sur la toxicité des micro-polluants [23][82][83][84].

Les métaux comme les contaminants organiques peuvent être bioaccumulés par les organismes aquatiques à tous les niveaux d'organisation trophique. Leur accumulation dépend de leur biodisponibilité dans le milieu qui varie fortement selon les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (notamment pH, salinité, quantité et qualité des MES, oxygénation…), des mécanismes de traversée des barrières biologiques qu'ils empruntent (par exemple, diffusion passive principalement pour le mercure, transport facilité pour le cadmium ou autre type de transport

actif) et des capacités des organismes à les métaboliser et/ou éliminer, qui sont conditionnées par l'état physiologique des individus [85]. La pollution des cours d'eau affecte toute la chaîne écologique vivant dans ces environnements, du phytoplancton aux carnivores situés au sommet de la pyramide alimentaire. Elle modifie la quantité, et la qualité, de la production primaire [86][87] qui est à la base du recyclage des nutriments, et sert de nourriture aux organismes supérieurs. Les effets délétères des métaux s'observent également aux niveaux d'organisation supérieurs (par exemple invertébrés, poissons), avec des impacts génotoxiques divers, une diminution de la fécondité et une augmentation de la mortalité [88][89]. Combinée avec les conséquences du changement global, la pollution est susceptible d'avoir des impacts écotoxicologiques accrus. Par exemple, les conditions hypoxiques rencontrées en milieu naturel en lien avec l'augmentation de la température des eaux et l'augmentation de la durée des périodes d'étiage estivales conduit d'une part à une hyperventilation des organismes provoquant une plus forte bioaccumulation des contaminants [90] et d'autre part à un affaiblissement des organismes par une diminution de leur métabolisme général de façon à « s'économiser », ce qui peut conduire à des atteintes toxiques plus sévères au niveau cellulaire [91].

Bien que moins étudiés au niveau régional que les métaux, les impacts des contaminants organiques s'observent également aux différentes échelles d'organisation biologique (subcellulaire, cellulaire, individu, population…) et trophique. Certains de ces composés sont bioaccumulables, d'autres peuvent générer des effets sur le vivant sans nécessairement être accumulés. Les effets des pesticides sur les écosystèmes aquatiques dépendent du mode d'action toxique de ces substances, et des organismes-cibles : ainsi, les herbicides impactent la composante végétale aquatique (par exemple [92]), mais les pesticides pourront également avoir des effets indésirés, directs ou indirects, vis-à-vis d'organismes non-cibles (par exemple : toxicité d'insecticides sur les algues, ou d'herbicides sur les poissons). De nombreux travaux montrent une toxicité accrue des pesticides avec une élévation de la température et de la salinité [27][82]. Le changement climatique affectant de façon générale les structures des réseaux trophiques, les sources de nourriture et sa disponibilité (qualitativement et quantitativement), les voies de migration, les comportements alimentaires, il affectera notamment les phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification ce qui aura des conséquences importantes dans le cas des polluants persistants (comme les POP) et en retour sur les mécanismes de toxicité [63][93][94]. Parmi ces phénomènes on peut citer la remobilisation lors de périodes de sous-alimentation de contaminants stockés dans les graisses. Cet effet de toxicité « retard » qui touche les ours polaires peut être généralisé à d'autres espèces comme les saumons, les oiseaux marins, la morue arctique [95] et aussi à des espèces plus classiques comme les esturgeons, les anguilles… On ne peut pas non plus exclure une bioaccumulation moins importante si les réseaux trophiques changent et si les organismes supérieurs se nourrissent sur des proies moins contaminées [94].

Conclusion

Si jusqu'à maintenant, des études ont permis de cerner l'impact du changement climatique sur la qualité de l'eau en ciblant des paramètres basiques comme la température de l'eau ou encore le pH, la salinité et la quantité d'oxygène dissous, il y a un manque avéré de connaissances quant à son impact sur l'apport, le devenir et la toxicité des micro-polluants chimiques. Les travaux existants s'accordent malgré tout à prévoir que le changement climatique aura globalement un impact négatif engendrant des situations à risques de plus en plus fréquentes en lien avec les événements climatiques extrêmes, comme les situations d'étiage ou les épisodes de fortes précipitations. Les concentrations en micro-polluants, les quantités de matière organique dissoute ou encore les épisodes d'apports de toxines algales devraient augmenter en lien par exemple avec l'augmentation de la température. Il est avéré qu'il y a un fort besoin de travaux complémentaires sur le sujet notamment sur le devenir des contaminants et sur leur impact toxique en lien avec le changement climatique.

Une meilleure compréhension de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'eau au niveau régional passera en premier lieu notamment par une meilleure connaissance des pressions de contamination, de leur source et du devenir de ces contaminations en termes d'apports et d'évolution, en lien avec les activités anthropiques associées, les modes de vie, les usages (qualitatifs et quantitatifs) et les occupations des sols. Il est en particulier important de documenter la question des micro-polluants organiques et plus particulièrement des contaminants dits émergents et ce, en tenant compte des effets de mélange.

8.3 Disponiblité des eaux de surface

Coordination : *Henri Etcheber*
Rédacteurs : *Bruno Coupry, Alexandra Coynel, Henri Etcheber, Eric Sauquet*
Contributeurs : *Jérôme Baron, Clément Bernard, François-Xavier Cuende, Timothée Leurent*

En Aquitaine, dont la grande majorité des débits des cours d'eau dépend strictement de ceux d'affluents amont prenant leur source dans des régions limitrophes, comprendre les tendances évolutives des débits fluviaux des dernières décennies et prévoir par modélisation ce qui pourrait advenir dans un futur proche, afin de mettre en place des politiques de gestion pertinentes, est une problématique encore faiblement abordée et devra faire l'objet d'études concertées et approfondies à mettre d'urgence en place.

Néanmoins, des études parcellaires montrent que la tendance des débits de la plupart des rivières aquitaines est à la baisse, avec renforcement des périodes d'étiages estivaux, en durée et en intensité. Les réseaux des petits cours d'eau peuvent être gravement affectés (mise à sec de cours d'eau en Dordogne fluviale amont, par exemple).

Il ressort qu'à l'horizon 2030, il est prévu une baisse de 20 à 30 % des débits moyens annuels, déjà en baisse dans des proportions proches par rapport aux années 1950 à 1960 du siècle dernier : ceci avec des tendances marquées pour les périodes d'étiage par rapport aux événements de crues, où toute évolution significative est plus floue. Mais en fonction du degré d'évolution du climat à prendre en compte, et du fait de l'évolution difficilement prévisible des actions anthropiques, de la diversité des caractéristiques des bassins versants, les incertitudes restent encore notables. Les projections à des laps de temps plus conséquents (fin du siècle), encore peu documentées, présentent des incertitudes plus fortes et affichent des baisses de 50 à 60 % des débits par rapport aux actuels.

Les conséquences sur la qualité des eaux (élévation de leur température, pollutions accrues) risquent de toucher irréversiblement les populations biologiques de ces cours d'eau fluviale et de générer une marinisation prévisible de l'estuaire de la Gironde avec toutes les conséquences écologiques connues.

Introduction

La question de la disponibilité et de l'accès à l'eau potable est et sera l'un des enjeux majeurs auquel l'humanité devra faire face au XXI^{e} siècle. Dans ce contexte, la mesure quantitative et qualitative (chapitre 8.2) des composantes du cycle de l'eau est fondamentale pour toute réflexion sur une gestion efficace des eaux. Or, de lourdes menaces pèsent sur la ressource en eau si les modifications du climat annoncées par les projections des modèles numériques, ajoutées aux diverses pressions anthropiques devaient se confirmer.

La hausse des températures du globe et les évolutions des précipitations pourraient affecter la totalité du cycle de l'eau d'un bassin-versant : extension du manteau neigeux, processus d'évapotranspiration, d'infiltration, de stockage dans les nappes et de ruissellement des eaux sont tous concernés. Si l'on ajoute à cela, les prélèvements d'eaux de surface (et même d'eaux profondes) dus à l'action humaine (irrigation, industrie, Alimentation en Eau Potable), il est fondamental de se pencher avec attention sur les problèmes du partage de l'eau entre des usages, incluant les services écologiques, aux besoins parfois totalement antagonistes.

Tous ces problèmes affectent directement les fluctuations temporelles des débits des fleuves et rivières en Aquitaine, comme dans la plupart des autres régions françaises et ressortent les questions majeures suivantes :

- Quelles sont les tendances actuelles de l'évolution des débits des rivières de notre région ?
- Peut-on bénéficier de prévisions suffisamment fiables sur leur devenir au cours de ce siècle ?
- Quelles conséquences doit-on attendre sur l'évolution de la qualité des eaux de surface, des cycles biologiques de ces milieux et des usages que l'on compte en faire ?
- Peut-on remédier à des évolutions qui pourraient sembler néfastes et comment ?

Pour mesurer les effets du climat sur l'hydrosystème, il convient de procéder à deux approches complémentaires :

- L'approche statistique (méthode rétrospective) : basée sur l'analyse de séries chronologiques longues, elle permet de dégager des tendances passées et présentes suivies par les principales variables du cycle de l'eau (précipitations, température et débit examinés sur différents pas de temps – mois, saison ou année). Cette analyse faite, il s'agit de comprendre les origines des variations de ces caractéristiques par rapport à leur environnement ; de plus, il peut résulter de cette phase la mise en évidence d'une relation entre le climat et l'évolution d'un des paramètres examinés ;
- La modélisation (méthode prospective), qui propose une simulation de l'évolution future des principales variables relatives au cycle de l'eau et à la gestion de la ressource à partir d'un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème validé par des données enregistrées en temps présent. La modélisation climatique est réalisée à grande échelle par les Modèles de Circulation Générale (GCMs), du fait des coûts de calcul ; les échelles de gestion étant plus fines, il est nécessaire de mettre en place des méthodes de descente d'échelle pour représenter des phénomènes météorologiques d'extension géographique limitée. Outre cette difficulté à décrire le climat à échelle spatio-temporelle fine, s'ajoute une connaissance très disparate des actions anthropiques, elles aussi locales, concernant les prélèvements et la consommation en eau.

I- Contexte

À l'échelle globale, existent de nombreuses situations critiques relatives à la disponibilité des ressources en eau. Or, le réchauffement climatique entraînerait une augmentation des précipitations consécutives à celle des évaporations, avec de fortes perturbations sur leur cyclicité connue jusqu'à présent.

En Europe, le changement le plus probable devrait correspondre à une intensification des contrastes hydrologiques avec des risques accrus d'inondation à l'automne-hiver et d'étiage très prononcé en été.

Les études menées sur la problématique climat/hydrologie de surface sont nombreuses en France (plus de 46 articles/rapports référencés dans l'étude Explore2070 in Synthèse bibliographique, Lot 3 « Ressources superficielles » réalisée par BRLi – Météo France – Irstea pour le compte du MEDDTL). Les hypothèses, stratégies et options techniques retenues sur l'effet du changement climatique (modèles climatiques et hydrologiques, entrée climatique, etc.) ne sont pas précisément les mêmes entre ces études. De ce fait les résultats ne sont pas strictement comparables. Peu ont abordé la question de l'effet sur les modes de gestion. À l'échelle nationale, il faudrait s'attendre à une augmentation des températures, une réduction des écoulements en été et en automne et des débits d'étiage, une réduction de la couverture neigeuse, spécialement à basse et moyenne altitude. Les évolutions sur les crues semblent en revanche incertaines.

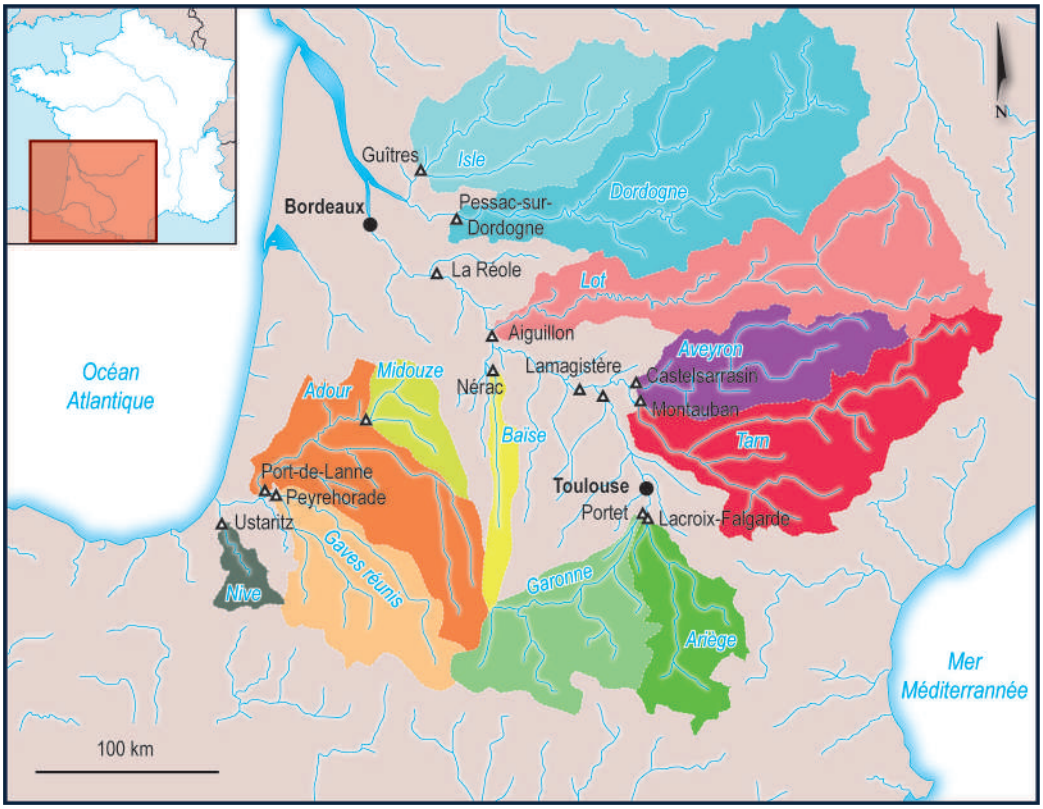


Figure 1 : *Réseau hydrographique du Sud-Ouest de la France : affluents majeurs de Garonne, Dordogne, Adour (Coynel, [1]).*

Au vu de la **Figure 1** et conformément à la notion bien connue de continuum fluvial (dépendance à l'aval des phénomènes enregistrés à l'amont), il ressort que débattre du devenir des débits fluviaux en Aquitaine demande de comprendre ce qui se passe dans les régions connexes, du fait des deux origines majeures de ces cours d'eaux (Massif Central ou Pyrénées) et des différents régimes hydrologiques en place (nival, pluvio-nival, pluvial) selon les ensembles étudiés. De plus, en fonction des actions humaines (irrigation, barrages hydro-électriques, aménagements pour navigation…) induisant des débits très influencés, ne pas maîtriser cette composante anthropique conduit à des projections futures erronées des débits.

Les études publiées les plus poussées sur la problématique climat/débits ont été menées en Garonne amont [2] et estuarienne [3]. Sur la Dordogne, aux débits régentés par les barrages EDF, l'essentiel des préoccupations actuelles (non publiées) porte sur les étiages estivaux dramatiques des petits cours d'eaux (mises à sec qui sont de plus en plus fréquentes). Enfin, ce sont les évolutions des étiages de la rivière Adour qui sont présentement étudiés, alors que pour les Gaves et les Nives ce sont les phénomènes de crues plus que les périodes d'étiage qui sont suivies (études non publiées).

II- Impacts observés et attendus

A- Les tendances actuelles

Fleuves Garonne et Dordogne

L'analyse des débits moyens annuels de la Garonne et de la Dordogne, à leur entrée dans le système estuarien de la Gironde (données de la banque HYDRO), révèle une forte variabilité annuelle (30-900 m^3s^{-1} et 210-480 m^3s^{-1} respectivement pour la Garonne et la Dordogne), mais surtout une diminution significative de ceux-ci sur les cinquante dernières années **(Figure 2)** : de l'ordre de 25-30 % pour la Garonne et de 20 % pour la Dordogne.

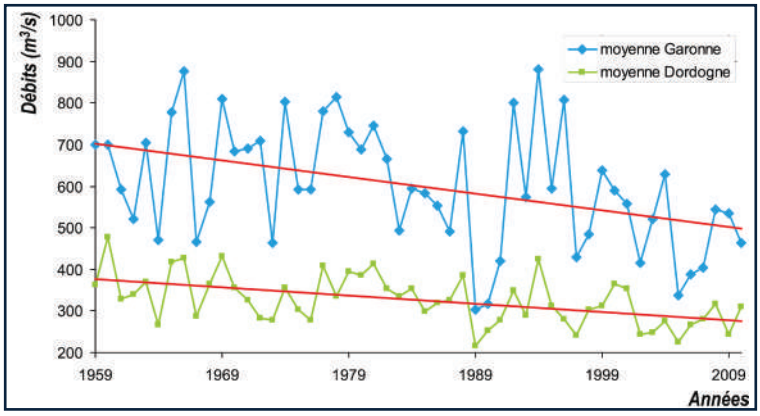


Figure 2 : *Moyenne annuelle des débits de la Garonne à Tonneins et de la Dordogne à Pessac Sur Dordogne à l'entrée de l'estuaire de la Gironde.*

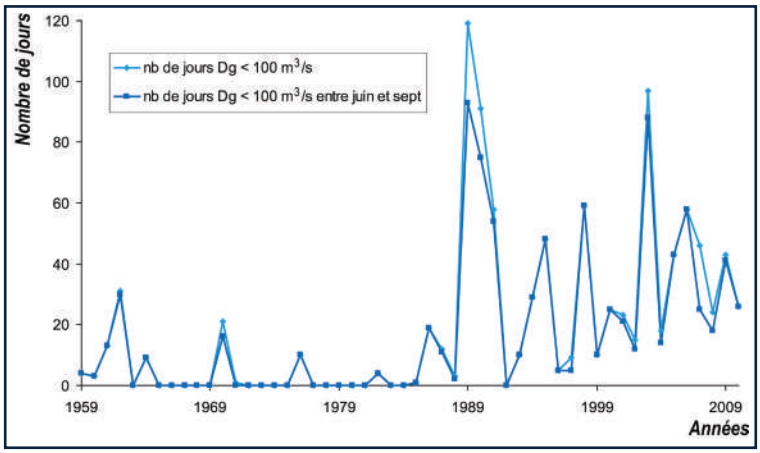


Figure 3 : *Nombre de jours au-dessous du débit objectif d'étiage en Garonne à Tonneins.*

Si les bassins versants, impactés par les changements climatiques, intègrent la réponse hydrologique, les modifications du milieu physique d'origine anthropique (changement d'usage des sols, aménagements hydrauliques…) rendent difficiles l'identification des liens entre la variabilité climatique et celle hydrologique. Pour la Garonne, il est maintenant admis que sa variabilité hydrologique à son exutoire est influencée par l'indice climatique dominant en Europe, l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), qui correspond à la différence de pression entre les deux centres d'action dans l'Atlantique Nord (Islandes, Açores) contrôlant la position du centre de dépression sur l'Europe.

Une simple observation sur l'évolution du nombre de jours durant une année, pour lesquels on se situe au-dessous du Débit Objectif d'Étiage (DOE) en Garonne, fixé ici à 100 m^3s^{-1}, montre que, depuis les années 1980, ce nombre a considérablement augmenté **(Figure 3)** à l'entrée du système estuarien de la Gironde. Ainsi, la période d'étiage est-elle de plus en plus marquée avec des débits fluviaux de plus en plus faibles. Il en va différemment pour la Dordogne.

En effet, si, pour la Garonne, les débits les plus forts et les plus faibles révèlent une tendance à la baisse sur une période de cinquante ans **(Figure 4)**, ce schéma d'évolution est beaucoup plus complexe pour la Dordogne, où les stratégies de production électrique d'EDF perturbent profondément les évolutions temporelles de ce paramètre **(Figure 5)**. En période d'étiage, les débits minima observés restent relativement stables, tout au plus une légère augmentation de leur durée est-elle apparente, mais sans être significative. À l'échelle saisonnière, ce sont bien sûr les influences liées à l'hydroélectricité qui sont les plus significatives, mais il ne faut pas négliger le rôle possible des formations calcaires karstiques, lieux d'infiltrations connues des eaux, pouvant influencer les variations observées des débits.

L'interprétation des données relatives aux périodes de crues soulève plus de problèmes : ces dernières sont moins fréquentes et moins intenses en Garonne d'année en année, mais le phénomène est moins évident en Dordogne, où, là encore, les activités EDF peuvent vraisemblablement jouer un rôle perturbateur significatif. De plus, il est certain que, si les tempêtes marquées sont associées à des pluviométries conséquentes, ce qui se traduit le plus souvent par des augmentations de débits, l'étude de leur fréquence sur les dernières cinquante années ne montre pas de tendance significative, que ce soit au niveau national ou pour l'Aquitaine **(Figure 6)**. Il s'en suit que les phénomènes de crue ne montrent pas d'évolution nette d'années en années, tant dans leurs intensités que dans leurs fréquences.

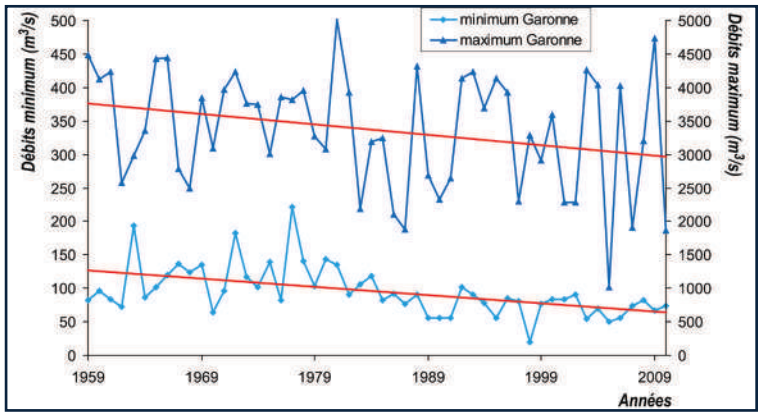


Figure 4 : *Débits minima et maxima sur la Garonne entre 1959 et 2010 à Tonneins.*

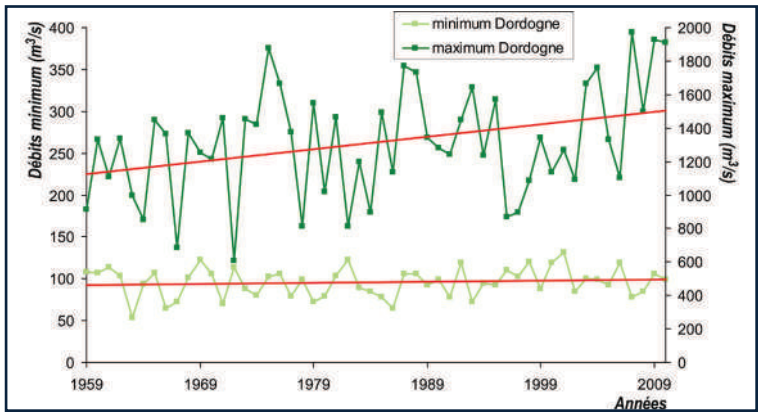


Figure 5 : *Débits minima et maxima sur la Dordogne entre 1959 et 2010 à Pessac Sur Dordogne.*

Affluents de la Garonne et de la Dordogne

Les affluents majeurs de la Garonne et de la Dordogne suivent dans leurs grandes lignes des variations interannuelles des débits du même type que celles données pour la Dordogne et la Garonne et qui ne seront pas illustrées ici : à savoir, des débits annuels moyens en baisse, des étiages plus prononcés, qui, par exemple, dans la haute Dordogne, donnent lieu actuellement à la mise à sec des petites rivières, lourde de conséquences pour le bon état écologique de ces cours d'eau et pour les cultures environnantes nécessitant de gros efforts d'irrigation, comme les étendues de maïs nouvellement implantées dans ce milieu.

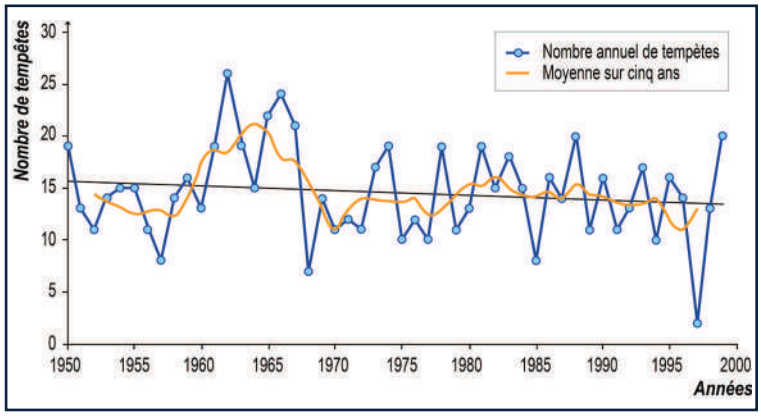


Figure 6 : *Nombre de tempêtes observées chaque année en France entre 1950 et 1999.*

Précisons encore que c'est la conjonction de la baisse progressive de ces divers flux d'eau de surface en amont qui induit les réponses enregistrées en aval en Aquitaine.

Systèmes Adour, Gaves et Nives

Selon que l'on considère la rivière Adour ou les autres cours d'eau de ce système pyrénéen occidental, les études sur l'évolution actuelle des débits, qui sont encore très fragmentaires et peu abordées, n'ont pas porté sur les mêmes aspects.

L'évolution des débits de l'Adour révèle des situations problématiques en périodes d'étiage, dans une région où les demandes d'irrigation sont fortes, principalement du fait du développement très prononcé de la maïsiculture.

Il n'en est pas de même pour les Gaves et les Nives, bassins caractérisés par des débits spécifiques élevés (débits ramenés à une surface, exprimés en l/km^2/s), où ce sont essentiellement les périodes de crues qui font l'objet d'études plus poussées ; cette zone considérée comme une hydro-écorégion, homogène du point de vue de la géologie, du relief et du climat [4], voit évoluer les cours d'eau montagnards d'un régime nival (dans le Béarn) ou pluvio-nival (dans le Pays Basque) à un régime pluvio-nival à pluvial, respectivement. Ceci a des conséquences directes sur la cyclicité des débits : débits printaniers décalés et moins forts, débits estivaux en baisse.

Dans un travail sur l'impact du Changement Climatique sur le bassin-versant du Rhône dans les Alpes [5], pour des altitudes comparables aux Pyrénées occidentales, un schéma similaire a été proposé.

Hydrologie à l'échelle du Sud-Ouest

Notons enfin le travail réalisé à l'échelle de la France qui vise à identifier les tendances récentes observées sur les débits caractéristiques des étiages et de la ressource [6]. Cette étude s'appuie sur un jeu de chroniques longues (autour de 40 ans) de bonne qualité hydrométrique et relatives à des bassins peu influencés. Ici on cerne mieux les évolutions hydrologiques liées au climat. Une des conclusions est la présence d'une tendance à la baisse du débit annuel pendant la période 1968-2008 **(Figure 7)**. Ceci s'inscrit dans une sévérité des étiages accrue perceptible sur la moitié sud de la France. De plus, un décalage de la période d'étiage vers plus de précocité est également observé. Une analyse plus précise montre qu'en changeant la période d'analyse les tendances temporelles ne restent pas stables ; ce qui induit une certaine prudence dans l'attribution à la seule hausse des gaz à effet de serre.

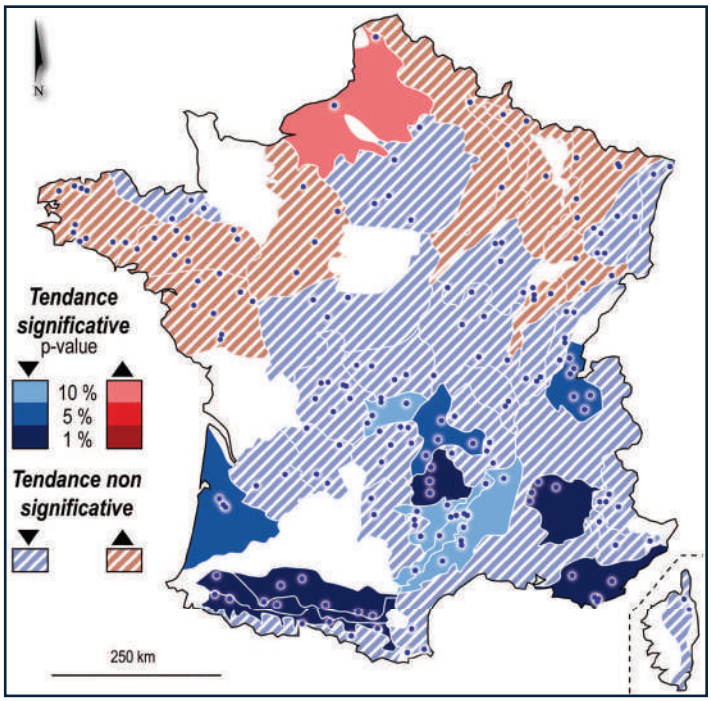


Figure 7 : *Tendances régionales observées sur le débit annuel sur la période 1968-2008. Les points représentent les stations hydrométriques incluses dans l'analyse (extrait de Giuntoli et Renard, 2010).*

B- Les modélisations du futur

Les Modèles de Circulation Générale (GCMs) tentent d'appréhender les impacts du changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre sur les hydrosystèmes continentaux, sujets à de nombreuses incertitudes (paragraphe suivant).

Actuellement, des approches modélisatrices performantes n'ont été proposées que pour le système hydrologique Garonne amont, intégrant tous les affluents majeurs, avec pour station aval celle de Lamagistère (Tarn et Garonne). De plus, le travail le plus complet [2] ne porte que sur des prévisions à l'échelle de temps 2030, horizon utile pour les décideurs comme l'Agence de l'Eau, d'autres auteurs [3][7] [8][9] abordant quelques décennies supplémentaires, mais aucune étude ne modélise jusqu'à la fin de ce siècle.

Il ressort de ces études que, si le choix des modèles utilisés a une influence majeure sur les résultats obtenus **(Figure 8)** et si des spécificités locales bien tranchées peuvent être mises en évidence, une tendance majoritaire à la baisse des débits est révélée en quasiment toute saison.

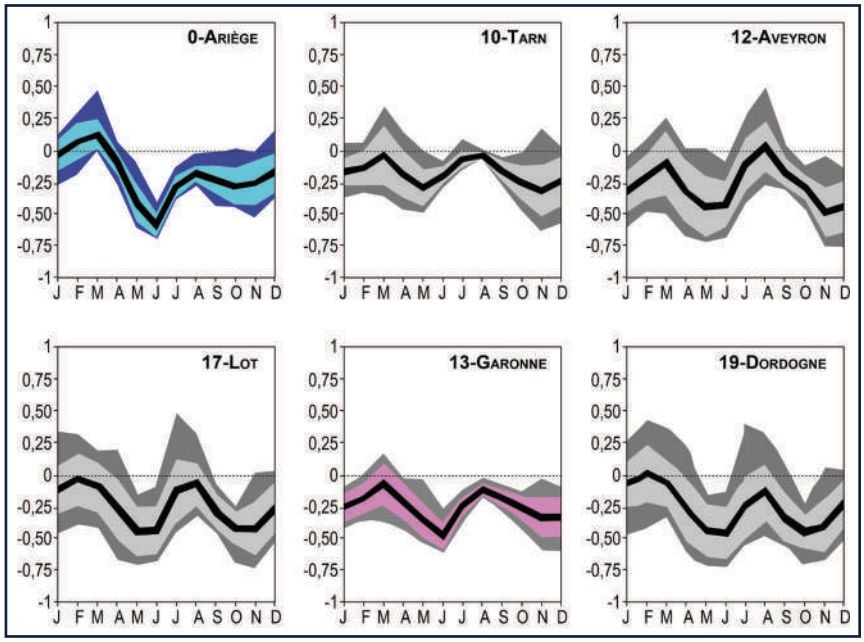


Figure 8 : *Évolution des débits mensuels en relatif entre les périodes 2046-2065 et 1970-1999. Le trait noir est la moyenne d'ensemble, la zone en gris clair est délimitée par la moyenne d'ensemble plus ou moins un écart-type intermodèle, la zone en gris foncé est délimitée par les valeurs maximales et minimales parmi les 14 GCMs. (Extraits de Boé 2007 [8]).*

0 : l'Ariège à Foix
10 : le Tarn à Marsal
12 : l'Aveyron à Piquecos [Loubejac]
17 : Le Lot à Villeneuve sur Lot
13 : la Garonne à Lamagistère
19 : la Dordogne à Pessac sur Dordogne

Comme il sera évoqué dans le paragraphe sur les incertitudes, toute la difficulté d'appliquer ces modèles à des échelles d'espace plus réduit, où les spécificités locales, dont les usages anthropiques, doivent être prises en compte, entraîne ces différences de résultats.

De tels résultats régionaux sont en parfait accord avec les résultats obtenus sur les prévisions de données précipitation et évapotranspiration dans le bassin de la Garonne **(Figure 9)** : diminution de la pluviométrie, bouleversement des processus d'évaporation en relation avec les élévations de température de l'air engendrant ces baisses de débits, qui sont confirmées par tous les modèles, certes avec des gammes d'estimation relativement larges, mais qui abondent toutes dans le même sens.

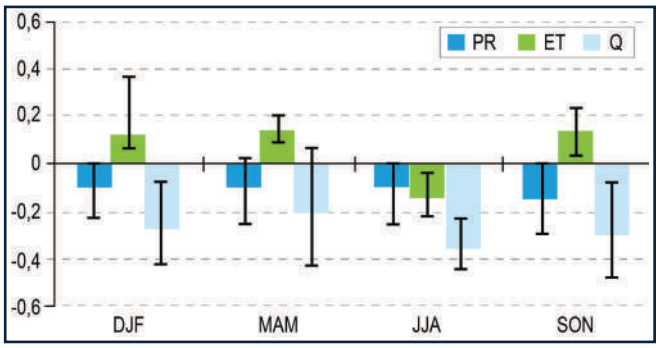


Figure 9 : *Changements relatifs (sans unités) dans les précipitations (PR), l'évapotranspiration (ET) et les débits (Q) dans le bassin de la Garonne entre les périodes 2046-2065 et 1971-2000. La longueur des barres larges correspond à la moyenne des données multimodèles, alors que les barres minces représentent les valeurs minimales et maximales de 14 modèles climatiques utilisés (Boé 2007 [8]). DJF = Décembre, Janvier, Février, etc.*

Toutefois, les résultats obtenus sur le système Garonne s'inscrivent parfaitement dans ceux proposés au niveau global français qui, quel que soit le modèle adopté, annonce une baisse générale des débits dans les décennies à venir **(Figure 10)**.

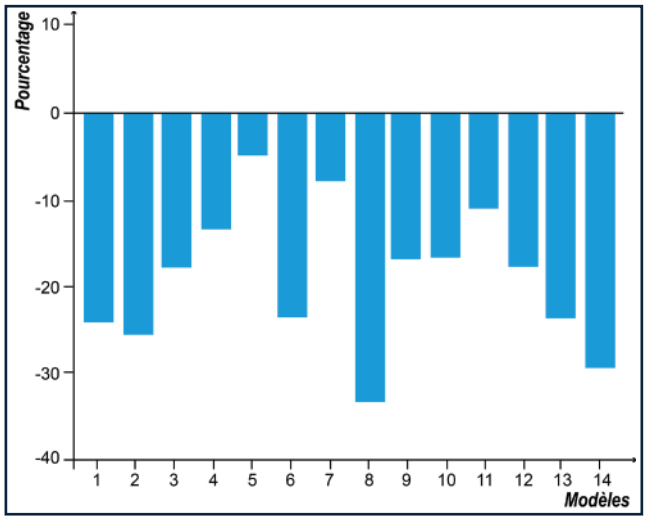


Figure 10 : *Changements relatifs annuels des débits sur la France entre les périodes 2046-2065 et 1971-2000 pour chaque modèle climatique CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase3), Boé et al [10].*

Ces études, faites pour la plupart sur des bases d'élévation de température raisonnables (de l'ordre de 2 °C en moyenne annuelle à l'horizon 2030 et de 4 °C à 5 °C à l'horizon des décennies proches de la fin du siècle), donnent des réponses concordantes entre modèles et pour des zones géographiques variées : en moyenne, sur la Garonne amont, pour les années 2030, les baisses de débits annuels prévues tournent autour de 20 à 30 % selon les modèles hydrologiques utilisés pour les projections.

Il n'existe pas de prévisions chiffrées à l'horizon 2100 qui, si les mêmes tendances perdurent tant du point de vue climatique que d'utilisation des eaux, devrait voir s'afficher des baisses très problématiques des débits. Du fait de la concordance de plusieurs des approches proposées actuellement et sans utilisation de modèle bien établi, des scénarios locaux à forte probabilité d'existence devraient se dessiner : par exemple, augmentations des débits en hiver, débits printaniers plus précoces et sans doute moins importants, ce qui devrait induire des réductions plus ou moins drastiques des débits estivaux et pourrait générer de graves nuisances.

III- Incertitudes

Le traitement du changement climatique et de ses impacts sur l'hydrologie requiert un enchaînement de modélisation depuis le climat jusqu'aux modes de gestion. Chaque niveau est sujet à des hypothèses et porteur de biais et d'imprécision du fait de représentation forcément incomplète de la complexité. Il est indispensable d'examiner les résultats en intégrant les incertitudes. Une manière de prendre en compte les incertitudes au niveau du climat est de manipuler les sorties de plusieurs GCMs. Pour ce qui est de la réponse hydrologique, les modèles de transformation pluie-débit sont en général calés sur des données actuelles, et soumis à des conditions inédites (en particulier climatiques), ils ont, de fait, chacun une sensibilité propre aux évolutions du climat. Les incertitudes sur la représentation pluie-débit seront examinées en alimentant plusieurs modèles pluie-débit avec les mêmes projections climatiques.

Il est donc possible qu'à partir de modèles établis pour des échelles plus ou moins larges et dans lesquels on introduit des spécificités locales, tant du point de vue du fonctionnement naturel que des usages locaux de l'eau, on puisse arriver à des propositions cohérentes d'évolution des débits des cours d'eau en fonction du changement climatique.

De la simple étude des débits à Lamagistère (Tarn et Garonne), enregistrés sur les années 1971-1999 et reproduits par utilisation de quatre modèles hydrologiques différents **(Figure 11)**, il ressort que des résultats cohérents sont enregistrés. Des résultats aussi probants ont été obtenus sur les bassins de la Loire et de la Seine, avec un peu plus de dispersion pour le Rhône pendant les périodes d'étiage. Néanmoins, on réalise déjà que des différences significatives peuvent exister.

Au niveau des prévisions et à des échelles régionales, les incertitudes sont généralement fortes [11] et ce d'autant plus que les projections abordées sont à des échéances de temps éloignées. Les raisons en sont multiples.

- Identification des scénarios de développement qui conditionnent les scénarios d'émission ;
- Problème de désagrégation d'échelle et nécessité d'introduire des spécificités locales concernant les caractéristiques environnementales diverses, mais aussi les usages de l'eau ;
- Dans des configurations de bassins versants complexes avec usages multiples, difficultés à se projeter dans le futur relativement à l'évolution de l'ensemble de ces activités et des transformations des bassins versants (occupation des sols, irrigation, hydroélectricité, aménagements divers...) ;
- Choix des hypothèses climatiques à l'échelle régionale, quand l'étude porte sur des échéances lointaines, ne serait-ce que pour les élévations de température, qui auront un rôle si important sur les bilans hydriques.

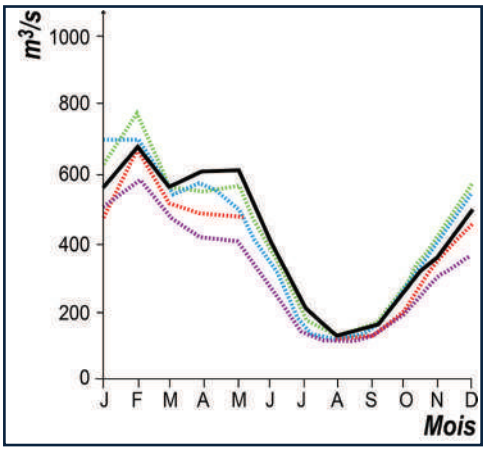


Figure 11 : *Évolution saisonnière des débits à la Magistère sur la période 1971-1999, observés (trait noir) et simulés par 4 modèles hydrologiques différents (Boé et al. [10]).*

Conclusion

Une démarche prospective vise à analyser la possibilité de rééquilibrer les quantités d'eau (à travers le paramètre débit) suite à des modifications des usages de l'eau dans les bassins versants. La réflexion devra porter également sur des définitions appropriées des niveaux d'eaux minima qu'il sera souhaitable de garder sur les rivières et à l'exutoire des trois grands bassins (Garonne, Dordogne, Adour).

Il n'existe pas d'actions envisageables permettant de modifier l'évolution prévisible des températures et des précipitations, qu'elles soient raisonnées en termes de moyennes ou de variabilité à toutes échelles de temps : interannuelle, saisonnière ou plus courte (événement pluvieux, tempête...).

Ainsi, sur la plupart des aspects bilans hydrologiques, aucune possibilité d'intervenir : l'équilibre pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement dépendra quasi-strictement de l'évolution du climat. Seuls les prélèvements d'eau qui se répartissent en alimentation en eau potable (AEP), en bassins industriels et agricoles peuvent faire l'objet d'aménagements. Or, des décisions draconiennes, qui semblent inévitables et concernent l'ensemble du problème de l'usage de l'eau, vont devenir incontournables.

Penser à moins consommer d'eau, ne serait-ce qu'en l'utilisant de façon plus rationnelle, doit être la ligne directrice des politiques futures, plus recommandable qu'un développement immodéré de retenues d'eau de toutes sortes, qui ont parfois des effets néfastes sur les équilibres biogéochimiques et écologiques des cours d'eau :

- Meilleur système d'irrigation et/ou changement de pratiques agricoles (culture à moindre consommation d'eau) à prévoir ;
- Utilisation industrielle de l'eau plus efficace avec traitement plus performant de la qualité des rejets divers ;
- Devant le processus inscrit d'une population croissante, utilisation plus parcimonieuse de l'eau à usage domestique.

Comme la région Aquitaine est caractérisée par la réunion de sous-bassins aux caractéristiques propres très diversifiées, tant des points de vue structurels que d'usages de l'eau, les priorités affectées ne seront pas les mêmes d'une aire géographique à une autre.

Dans le système Garonne amont, selon l'origine des affluents (Pyrénées ou Massif Central), soumis à des types de climat et à des usages différents, notamment agricoles et/ou industriels, les décisions à prendre seront spécifiques en fonction du cours d'eau concerné. De tout ceci, il faut garder à l'esprit que la qualité et l'abondance des eaux de la Garonne à son entrée en Aquitaine dépendront beaucoup plus des décisions prises en Midi-Pyrénées qu'en Aquitaine elle-même.

Dans le système Dordogne amont, il est actuellement admis que, si la variabilité des débits saisonniers est très marquée par la gestion des barrages EDF, ce sont les plus petits cours d'eau qui subissent au plus fort les périodes d'étiages estivaux, avec des mises à sec désastreuses pour la faune aquatique locale. De même, en périodes printanière et estivale, des développements de macrophytes, en progression annuelle significative, pourraient être à l'origine d'apparitions saisonnières et ponctuelles de mousses qui, par leur présence, dénaturent immanquablement l'esthétisme de ce magnifique cours d'eau. Tous ces phénomènes influencent, là encore, la qualité des eaux de la Dordogne à son entrée en Aquitaine.

Dans la rivière Adour, l'évolution des débits à prévoir est similaire à celle de la Garonne (renforcement de l'intensité et de la durée des étiages), ce qui nécessitera aussi des décisions à prendre sur les usages agricoles en vue de l'élaboration d'une gestion plus rigoureuse de consommation d'eau. Ce ne sera peut-être pas le cas des gaves pyrénéens qui voient leurs débits hivernaux perturbés plus par les effets du changement climatique que par leurs débits de période d'étiages.

8.4 Disponibilité des eaux souterraines[1]

Coordination : *Alain Dupuy*
Rédacteurs : *Alain Dupuy, Bruno de Grissac, Frédéric Huneau*
Contributeurs : *Cyril Lucas, Pierre Marchet*

Il est juste d'affirmer que le climat et les ressources en eau sont interdépendants. Les eaux de surface sont pro parte *directement liées au climat actuel, alors que les eaux souterraines le sont moins directement. Certains systèmes aquifères, notamment profonds, comme ceux présents en Aquitaine, ont des cycles de fonctionnement pluriséculaires voire plurimillénaires. Dans ces conditions, le changement climatique doit s'envisager d'une part en fonction de la nature de la ressource en eau (superficielle ou profonde) et d'autre part selon la nature directe ou indirecte des effets potentiels.*

Actuellement des hypothèses sur le fonctionnement des hydrosystèmes permettent de relier les évolutions passées du climat avec la disponibilité actuelle des ressources en eaux souterraines. De nombreux travaux de recherche sont nécessaires afin d'établir les relations d'interdépendances entre le climat et la disponibilité des ressources en eau.

Malgré la complexité et la diversité géologique souterraine de l'Aquitaine, la sauvegarde et la pérennisation de cette richesse en termes de ressources en eau souterraine imposent une politique de gestion raisonnée, basée sur des travaux de recherche, afin de se prémunir vis-à-vis des multiples effets directs ou indirects du changement climatique.

Introduction

Les eaux souterraines représentent aujourd'hui un véritable enjeu dans le contexte d'un développement durable des ressources. Les aquifères[2] profonds des grands bassins sédimentaires constituent une ressource potentielle considérable tout en étant quasiment insensibles aux phénomènes anthropiques de surface comme les pollutions. En France en 2012, tous usages confondus, 46 % des eaux prélevées proviennent des nappes souterraines (hors usage pour le refroidissement des centrales nucléaires et autres usines)[3]. En Aquitaine en 2010, quelque 310 millions de m^3 (Mm^3) ont été prélevés dans le milieu naturel pour l'alimentation en eau potable des populations. Ces prélèvements ont été satisfaits à 36 % dans les eaux superficielles et donc à 64 % dans les nappes de surface[4] et dans les nappes et aquifères profonds[5]. En comparaison environ 510 mm^3 ont été prélevés pour l'agriculture à 38 % dans les eaux superficielles et les retenues et à 62 % dans les eaux souterraines. Pour l'Aquitaine, cette part des eaux souterraines plus importante que la moyenne nationale s'explique par le potentiel hydrogéologique du Bassin aquitain, avec ses nombreux aquifères profonds renfermant des eaux de très bonne qualité et naturellement protégées des activités anthropiques de surface potentiellement polluantes.

1. Nappe d'eau souterraine : Ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère et dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.
2. Corps de roches perméables comportant une zone saturée en eau, suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement d'une nappe d'eau souterraine et le captage d'une quantité d'eau appréciable.
3. http://www.aqui.fr/environnements
4. Aquifère contenant une nappe généralement libre située entre la surface et quelques dizaines de mètre de profondeur.
5. Aquifère contenant une nappe généralement captive située entre plusieurs dizaines de mètres et quelques milliers de mètres de profondeur.

Le contexte du changement climatique et son cortège de modifications notamment sur les températures et la distribution spatio-temporelle des précipitations, induit des questionnements sur le devenir des ressources en eau souterraine, leurs disponibilités futures et leurs multiples utilisations ainsi que les futurs conflits d'usage potentiels. Des éléments de réponse peuvent se trouver dans l'aspect prospectif abordé à l'aide de modèles numériques, mais également sur des retours d'expérience tels que l'épisode caniculaire de l'été 2003 et son impact, riche de signification, sur les consommations en eau sur la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) [1].

I- Contexte

État de la Recherche en France et en Aquitaine

Afin d'échanger à propos des changements globaux et de leurs impacts sur les ressources en eau, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne a organisé un colloque lors de l'année 2007. Ces rencontres entre acteurs locaux et membres de la communauté scientifique ont permis d'évoquer de nombreux sujets dont la gestion des ressources en eau souterraine. Ce colloque a mis en exergue un manque de connaissances concernant l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne [2].

À l'échelle du grand cycle de l'Eau, et notamment sur les relations entre eaux de surface et souterraines, de nombreuses méthodes permettent d'évaluer (avec plus ou moins de précision) la pluie efficace[6], il reste cependant très difficile de distinguer et d'estimer la part de l'eau qui contribue à l'infiltration (recharge des nappes[7]) et celle qui contribue aux écoulements de surface. Ceci résulte des nombreux facteurs à prendre en considération tels que le volume et la durée des précipitations, la saison (ensoleillement et température), la pente du terrain et la nature des sols (perméabilité, végétation…). Afin d'établir des cartes nationales ou régionales de vulnérabilité intrinsèque des systèmes hydrogéologiques, le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minières) a développé une méthode qui permet de produire un indicateur spatial nommé « Indice de Développement et de Persistance des Réseaux » (IDPR). Basé sur l'analyse du modèle numérique de terrain et des réseaux hydrographiques naturels qui sont partiellement conditionnés par le contexte géologique, cet indice permet alors de traduire l'aptitude des formations de sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface [3]. Cet indice est utilisé par le BRGM pour la réalisation d'une carte de vulnérabilité des masses d'eau souterraines vis-à-vis du changement climatique.

Des programmes de recherche sur le changement climatique et ses effets sur les eaux souterraines sont en cours de réalisation en Aquitaine. Le projet OPURES-Climat (OPtimisation des Usages des Ressources en Eaux Souterraines) a pour objectif la simulation des effets du changement climatique sur la gestion de ressources en eaux souterraines stratégiques en Aquitaine (2010-2012). Un autre programme se focalise sur les aspects paléoclimatiques, et notamment l'existence de traces ou signes antérieurs de changements climatiques mémorisés dans les systèmes aquifères profonds très inertiels, ainsi que sur l'adaptation de ces systèmes. Des travaux sont également menés en s'appuyant sur les grands modèles numériques hydrodynamiques Nord et Sud Aquitain utilisés pour la gestion active des ressources en eau souterraine, en simulant des tendances d'évolution des prélèvements en fonction de contraintes climatiques.

Spécificités régionales

Le Bassin aquitain se présente comme une vaste dépression triangulaire limitée par des reliefs et largement ouverte vers l'Ouest sur l'Océan Atlantique. Sa bordure est constituée au Nord par la partie

6. Fraction des précipitations totales, exprimée sous forme de lame d'eau, qui atteint la nappe.
7. Apports d'eau externe de toutes origines à un aquifère.

australe du Massif Armoricain, à l'Est par le Massif Central et au Sud par la Chaîne Pyrénéenne. Ces reliefs sont séparés par le seuil du Poitou au Nord et par le seuil de Naurouze au Sud-est, seuils qui le délimitent du Bassin Parisien et du Bassin Méditerranéen. Vers l'Ouest, le Bassin aquitain se prolonge sous l'océan par le plateau continental du golfe de Gascogne. À l'intérieur de ce cadre géographique se développe le bassin formé par une série de dépôts sédimentaires hétérogènes, datant essentiellement des ères Secondaire et Tertiaire **(Figure 1)**.

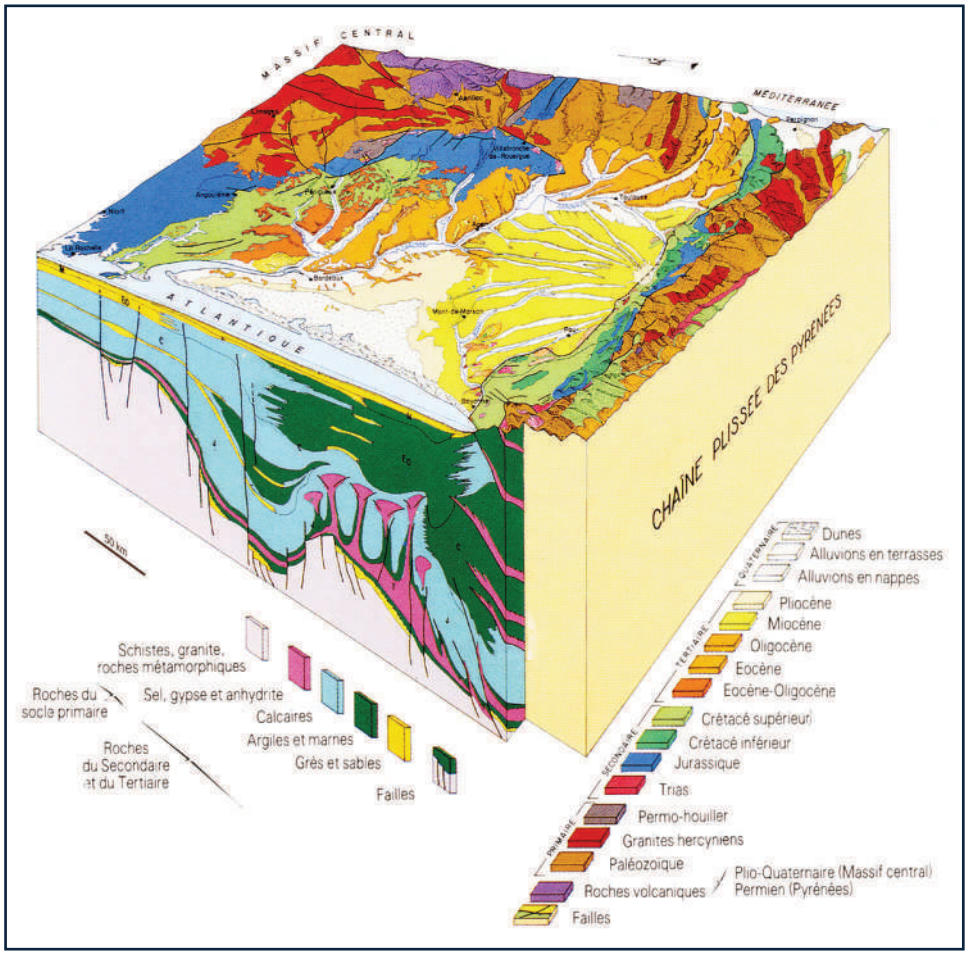


Figure 1 : *Bloc-diagramme géologique du Bassin d'Aquitaine (d'après BRGM-ANDRA, 1986).*

L'accident structural de la « Flexure Celtaquitaine »[8], qui s'étend selon une ligne Arcachon-Toulouse sépare le Bassin aquitain en deux entités distinctes : au Sud une série sédimentaire marine, au Nord domaine de plate-forme de haut-fond.

De cette hétérogénéité géologique, découle une répartition spatiale et verticale des réservoirs aquifères relativement hétérogène. Au Nord de l'Aquitaine se développe le système Multicouche Nord-Aquitain qui fournit l'alimentation en eau potable du département de la Gironde, et une partie de la Dordogne, du Lot-et-Garonne et des Landes, au Sud, l'aquifère profond des Sables Infra-Molassiques (SIM) est commun avec Midi-Pyrénées. Au Nord-Est et au Sud, les formations calcaires des Causses et des Chaînons Béarnais renferment de puissants aquifères karstiques[9]. Superposées à ces grands systèmes

8. Accident tectonique structural de direction NO-SE (d'Arcachon à Carcassonne) qui divise le Bassin aquitain en une province septentrionale (plate-forme continentale) et une province méridionale (fosses de subsidence très profondes de Parentis et de l'Adour).
9. Aquifère dont les conditions et le comportement correspondent au karst (massif calcaire dans lequel l'eau a creusé de nombreuses cavités).

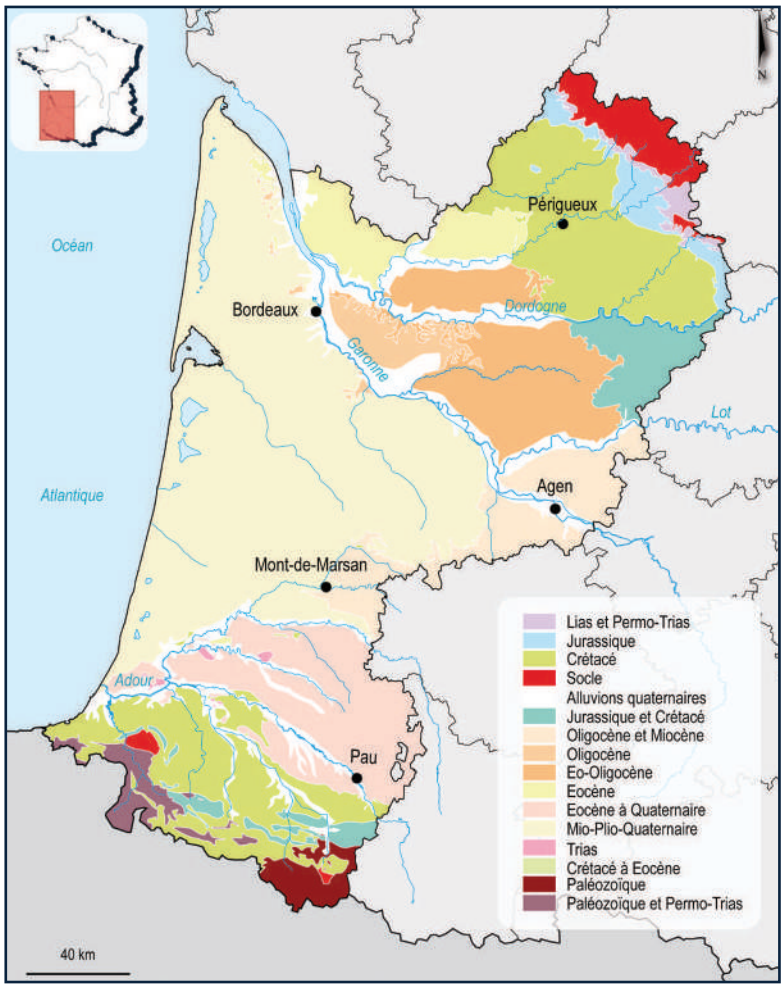


Figure 2 : *Carte des systèmes aquifères aquitains à l'affleurement (d'après Atlas de l'Aquitaine, Conseil régional d'Aquitaine).*

aquifères, les formations alluviales[10] du Quaternaire[11] sont le siège des nappes d'accompagnement des grands cours d'eau, et de la nappe phréatique du Sable des Landes **(Figure 2)**.

Forte de tous ces systèmes aquifères, l'Aquitaine apparaît relativement bien lotie dans un contexte de changement climatique. Toutefois, ces systèmes, notamment profonds, se caractérisent par un fonctionnement très inertiel : ainsi le taux de renouvellement des eaux est extrêmement faible à l'échelle humaine, et seuls des événements climatiques majeurs sont capables de générer des recharges notables. Les grands systèmes aquifères captifs[12] européens ont ainsi connu leurs dernières grandes périodes de recharge au cours du petit âge glaciaire (cf. chapitre 2) et à la débâcle de la dernière glaciation il y a environ 10 000 ans [4].

Différents indicateurs géolo-giques permettent de retracer l'allure générale de la courbe des changements de température de la Terre depuis son origine, il y a 4,6 milliards d'années **(Figure 3)**. Ces derniers mettent en évidence un climat généralement plus chaud que celui des 2 derniers millions d'années. À l'échelle des temps géologiques, les variations de température moyenne ont été très importantes tant en ampleur qu'en fréquence.

Afin de répondre aux exigences de la DCE et dans le cadre du SDAGE actuel, les différents aquifères présents sur le bassin Adour-Garonne ont été subdivisés en masses d'eau souterraines[13] (MESO). Les 105 masses d'eau souterraines répertoriées sur l'ensemble du bassin concernent, pour 85 d'entre elles, des masses d'eau souterraines libres, les 20 masses d'eau restantes étant captives.

Selon un classement des différents systèmes en fonction de leurs propriétés physiques et de leurs modes de fonctionnement, une typologie permettant de les distinguer a été mise en place dans le cadre d'une étude pour le compte de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne en 2011 [6].

Elle comprend sept grandes classes de systèmes, dont 6 sont présentes en Aquitaine :

- Les systèmes libres sédimentaires,
- Les systèmes captifs,

10. Formations constituées par des particules provenant des roches en place, mais ayant subi des modifications plus ou moins importantes du fait de leur transport par les eaux courantes.
11. Subdivision supérieure de l'ère cénozoïque – qui comprend aussi le système tertiaire –, le quaternaire a débuté il y a 2,6 millions d'années, avec l'apparition de l'homme.
12. Aquifère entièrement saturé comportant une nappe captive, donc sans surface libre ni zone non saturée, délimité au toit par des formations à perméabilité très faible faisant obstacle à tout flux appréciable.
13. Volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères.

- Les systèmes alluviaux,
- Les systèmes situés sur la frange littorale,
- Les systèmes karstiques,
- Les systèmes de socle cristallin.

Le sous-sol de l'Aquitaine se caractérise par différents types de systèmes hydrogéologiques induits par les caractéristiques géologiques de ce dernier. Chaque type de système se distingue par des conditions de gisement et/ou un fonctionnement hydrodynamique différent.

Il est de plus admis qu'au regard du fonctionnement des différents systèmes, de leurs diverses relations (ou interrelations) avec des composantes externes (climatique, hydrologique, océanique...), la signature des effets du changement climatique sera différente en fonction du type de système observé.

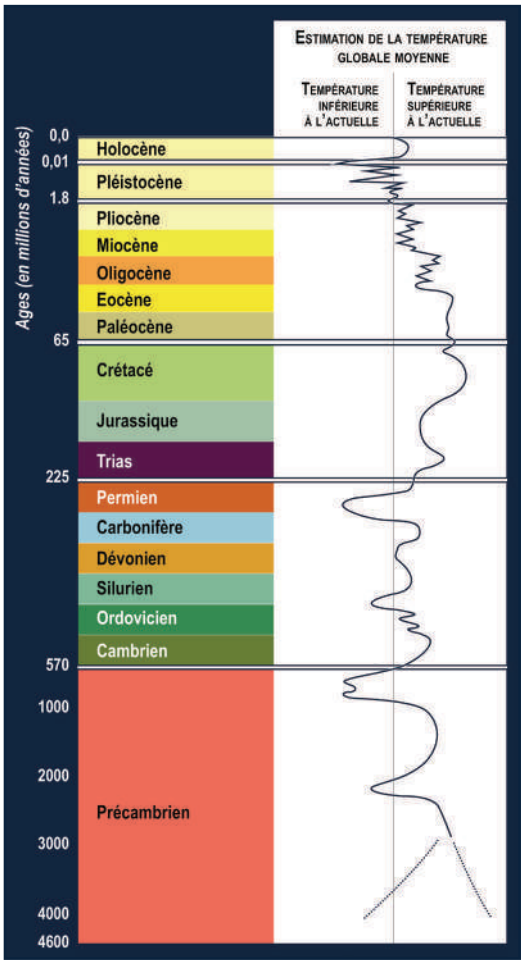


Figure 3 : *Tendance d'évolution des températures au cours de 4,5 milliards d'années BP [5].*

II- Impacts observés et attendus

Modification des modalités d'alimentation

Induite par les changements climatiques, la modification des différentes composantes du cycle hydrologique devrait avoir un impact plus ou moins important sur les flux entrants au sein des différents systèmes hydrogéologiques du bassin.

La recharge des aquifères s'effectue d'une part au niveau des zones d'affleurement des formations aquifères par infiltration directe de l'eau de pluie, et d'autre part par le phénomène de drainance[14], caractérisé par des flux issus des systèmes hydrogéologiques encadrant. Dans une moindre mesure, le réseau hydrographique peut également constituer un soutien à la recharge des aquifères par l'interaction directe entre nappe et cours d'eau. Ces derniers et notamment les débits des rivières sont spécifiquement abordés dans le chapitre 8.3.

Les précipitations constituent une composante importante dans la recharge des aquifères libres[15]. Cependant, les anomalies de précipitation issues des simulations climatiques restent actuellement marquées par de nombreuses incertitudes et il s'avère difficile de quantifier précisément l'évolution de ce paramètre essentiel, notamment pendant la période hivernale. En effet, contrairement à la période estivale, pour laquelle les modèles simulent une baisse des précipitations, une forte divergence des anomalies simulées par ces derniers caractérise la période hivernale, période qui contribue à la recharge des systèmes hydrogéologiques. À l'échelle régionale, les derniers résultats issus des projections du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) semblent indiquer malgré tout une baisse des précipitations au cours des mois de décembre, janvier et février. La moyenne annuelle multimodèles des anomalies simulées se situe entre -5 et -25 mm/an à l'horizon 2046-2065. Cette baisse serait plus conséquente dans la partie Sud-Ouest du bassin.

14. Flux d'eau souterraine à composante essentiellement verticale, passant d'un aquifère à un autre au travers d'une couche moins perméable.
15. Aquifère contenant une nappe libre et comportant une surface libre (lieu des points d'une nappe où la pression de l'eau égale la pression atmosphérique) et une zone non saturée.

Une diminution de la pluviométrie et une éventuelle modification de la distribution temporelle de cette dernière au cours de l'hiver pourraient avoir une influence sur la recharge des systèmes hydrogéologiques du bassin. Les masses d'eau souterraine libres, principalement rechargées par les apports météoriques, seront particulièrement concernées par ces évolutions. L'estimation de la modification des flux entrants au sein des différents systèmes reste cependant très difficile à réaliser. D'autres facteurs pourraient en effet modifier la recharge comme la diminution des précipitations solides, associées à une hausse des précipitations dans les zones de basse et moyenne montagne [7] ou encore la modification des phénomènes d'évapotranspiration. Régulés par de nombreux phénomènes physiques, chimiques et biologiques, ces derniers sont également associés à de nombreuses incertitudes et il s'avère actuellement difficile d'estimer exactement leur évolution.

Conditionnées directement par les précipitations et l'évapotranspiration, les pluies efficaces risquent ainsi d'être plus ou moins modifiées en fonction de l'évolution de ces paramètres. Ces modifications seront d'ordre quantitatif mais pourraient également concerner la nature des écoulements associés à ces dernières. En effet, une modification de la répartition des flux qui contribuent aux écoulements de surface et à l'infiltration est largement envisageable. Régie par de multiples paramètres (climat, nature des sols et occupation, état hydrique des sols et de la végétation, type de végétation, topographie…), la distribution exacte de ces flux s'avère difficilement estimable pour une période en cours et pour un secteur donné et l'est donc d'autant plus dans un cadre prospectif.

L'approche classique utilisée par la communauté scientifique afin d'estimer les futures conditions de recharge des systèmes hydrogéologiques consiste à développer des modèles continentaux de surface qui prennent en compte l'ensemble du continuum sol/végétation/atmosphère et qui sont souvent désignés par l'acronyme anglais SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer). Une étude menée en 2010 par *Mc Callum et al.* [8] a par exemple permis de démontrer, que la recharge d'un aquifère n'était pas seulement conditionnée par les précipitations mais par un ensemble de paramètres (concentration en dioxyde de carbone, température, précipitation, pression de vapeur saturante, radiation solaire et intensité des précipitations). En effectuant différentes analyses de sensibilité pour chaque critère et des analyses multicritères sur un modèle SVAT, les auteurs ont ainsi mis en évidence l'influence de l'ensemble des facteurs étudiés sur les modalités d'alimentation des aquifères.

En France, une étude intitulée RExHyss [9] menée dans le cadre du programme GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) a permis, à l'aide de différentes projections climatiques régionalisées et de différents types de modèles couplés, d'estimer à 30 % la diminution de la recharge moyenne annuelle des systèmes hydrogéologiques des bassins de la Seine et de la Somme pour une diminution moyenne des précipitations hivernales estimée à 12 % pour la fin du XXI^{e} siècle.

La partie nord de l'Aquitaine a servi de site test dans le projet Explore 2070 du Ministère de l'Environnement (2010-2012) qui visait à proposer une vision systémique des impacts liés aux évolutions du cycle de l'eau et à construire les stratégies d'adaptation. Toutefois, aucune étude académique spécifique n'a été réalisée sur le bassin Adour-Garonne ni en Aquitaine afin d'estimer la recharge des systèmes face aux changements climatiques. Comme précisé ci-avant, cette dernière sera largement influencée par la modification des précipitations et devrait concerner les différents types de masses d'eau souterraines libres du bassin (sédimentaire libre, socle, karstique, alluvial…). Les stocks disponibles au sein de ces différents systèmes et l'amplitude saisonnière qui les caractérise pourraient alors diminuer au cours des prochaines décennies.

Induits par une différence de pression de part et d'autre des aquitards[16], les phénomènes de drainance constituent une autre forme de recharge. Ces derniers concernent l'ensemble du système aquifère multicouche du bassin sédimentaire aquitain et peuvent représenter une composante majeure

16. Aquitard : corps de roches peu perméables pouvant contenir et stocker d'importantes quantités d'eau mais dont les vitesses de circulation sont faibles.

dans la recharge des aquifères, notamment les grands systèmes captifs au sein desquels de nombreux transferts s'effectuent ainsi. Les systèmes libres peuvent également être alimentés par des flux ascendants issus des formations sous-jacentes.

Conditionnée par l'état piézométrique[17] des aquifères, la recharge par flux de drainance pourrait alors, suite à l'évolution de ce dernier, être indirectement modifiée par les changements climatiques. Compte tenu de l'extension régionale de certains aquifères du système multicouche, ces modifications pourraient ainsi concerner d'importants volumes d'eau. Hormis ce type d'impact, les grands systèmes captifs se caractérisent par un fonctionnement fortement inertiel et présentent *a priori* une faible vulnérabilité vis-à-vis des impacts directs des changements climatiques.

Comme mentionné précédemment, la recharge des systèmes peut également être réalisée, dans une moindre mesure, par des apports directs issus du réseau hydrographique. Ces derniers concernent tous les systèmes qui présentent des interrelations étroites avec les cours d'eau (systèmes sédimentaires libres, alluviaux, karstiques). Ces apports s'effectuent généralement en période de hautes eaux, sous l'effet d'une différence de charge entre les cours d'eau et les aquifères. Ainsi, la modification des écoulements de surface durant la période hivernale pourrait engendrer une évolution des flux entrant au sein du compartiment souterrain. L'évolution des débits des cours d'eau à cette période reste pour le moment associée à de plus fortes incertitudes que pour la période estivale donc il s'avère difficile d'évaluer précisément ce type d'impact. Cependant, une étude menée en 2003 sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne [10] a permis de montrer que certains cours d'eau pourraient passer d'un régime nival à un régime d'écoulement pluvial, caractérisé par une augmentation des débits en période hivernale. Une hausse de la recharge de certains systèmes pourrait ainsi être envisagée si cette augmentation des débits engendrait une hausse de la ligne d'eau suffisante pour permettre à cette dernière d'être supérieure à la surface piézométrique des nappes.

Modification des interactions nappes/cours d'eau

Certains systèmes du bassin se caractérisent par d'importantes interrelations avec le réseau hydrographique. Conditionnés par l'état quantitatif de chacun des compartiments (superficiel et souterrain) en un endroit donné, les échanges entre les cours d'eau et les aquifères se font, soit directement lorsque les alluvions sont peu ou pas développés et que le cours d'eau est en contact direct avec l'aquifère, soit par l'intermédiaire des nappes d'accompagnement. Généralement, les cours d'eau alimentent les nappes en périodes hivernales et sont alimentés par ces dernières en période estivale. Le compartiment souterrain joue un rôle majeur dans le soutien des débits d'étiage, permettant au cours d'eau de conserver un débit de base par drainage des aquifères.

La modification de l'état quantitatif de chacun de ces compartiments, induite par les changements climatiques, devrait alors modifier ces échanges. Si l'évolution de ces derniers présente de nombreuses incertitudes pour la période hivernale, la période estivale se caractérise par un signal beaucoup plus robuste. De nombreuses études prospectives ont mis en évidence une réduction des débits au cours de la période d'étiage, associée à un allongement de cette dernière dû à une diminution des apports issus de la fonte des neiges (impact associé au cours d'eau caractérisé par un régime d'écoulement nival). Cette baisse de la ligne d'eau en période estivale entraînera alors un renforcement du drainage des systèmes hydrogéologiques et une vidange plus rapide de ces derniers car plus intense et débutant parfois plus tôt dans l'année. Quelques études hydrologiques prospectives ont été réalisées sur le bassin Adour-Garonne mais aucune d'entre elles n'a permis d'estimer ce type d'impact [11][12][13].

17. État énergétique de l'eau souterraine mesuré au toit d'un aquifère et exprimé par unité de poids et de volume de la colonne d'eau.

Modification des flux sortants

Les systèmes hydrogéologiques présentent différents types de flux sortants. Ces flux peuvent subvenir, soit sous forme de sources, soit par la vidange naturelle dans le réseau hydrographique, ou encore par les effets des drainances entre différentes formations.

De ce fait, si l'évolution du climat entraîne des modifications du fonctionnement des systèmes hydrogéologiques et a un impact sur les flux entrants par effet de drainance, une modification des flux sortants sera *in fine* également observée. Cet impact concerne essentiellement les aquifères du système multicouche présents au sein du bassin sédimentaire aquitain.

En ce qui concerne les flux sortants par effet de vidange dans le réseau hydrographique, la modification de ces derniers, en réponse aux changements climatiques, est également présentée ci-dessus car ce phénomène constitue une composante des interactions nappes/rivières.

Enfin, les flux sortants des systèmes peuvent également se présenter sous forme de sources. L'Aquitaine compte un nombre important de sources, principalement présentes au sein des systèmes karstiques et de socles-cristallin mais également au sein de certains systèmes de type sédimentaire ou encore alluvial. Ces dernières présentent des débits variables qui résultent du mode de fonctionnement des aquifères et de leurs conditions de gisement. Certaines sources sont pérennes et présentent des débits plus ou moins constants tout au long du cycle hydrologique alors que d'autres sont transitoires et ne fonctionnent qu'en période de hautes eaux. Ce type de flux sortant varie donc en fonction des systèmes concernés et il serait incohérent de généraliser l'impact du changement climatique sur cette composante des systèmes hydrogéologiques.

Cependant, il apparaît important de remarquer que la modification de l'état quantitatif de certains systèmes, accompagnée d'une hausse de la fréquence des périodes sèches, pourraient avoir un réel impact sur certaines sources du bassin. Les sources qui présentent la plus grande vulnérabilité face aux changements climatiques sont celles qui se caractérisent actuellement par des fonctionnements saisonniers avec de faibles débits en périodes de basses eaux. Des observations effectuées sur certaines sources de la chaîne des Pyrénées montrent que ces dernières peuvent présenter des épisodes de tarissement au cours de certaines années sèches [14]. Ces épisodes pourraient alors se multiplier dans les années à venir pour les systèmes qui présentent ce type de source et qui se caractérisent par une faible fonction capacitive et des temps de résidence très courts.

Intrusions marines (surcote et biseau salé)

L'élévation du niveau moyen des océans, induite par les changements climatiques et engendrée principalement par la fonte des calottes polaires et la dilatation thermique des eaux océaniques, pourrait avoir un impact sur les systèmes hydrogéologiques côtiers. De nombreux travaux de recherche ont été effectués ces dernières années afin d'estimer cette variation du niveau moyen des océans en tenant compte de l'ensemble des facteurs responsables de cette dernière [15][16]. Les valeurs obtenues sont très différentes et témoignent de l'incertitude qui caractérise l'ensemble des résultats et de la complexité de l'exercice.

Différents intervalles de valeurs en fonction des différents scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) ont été présentés au sein du 4e rapport d'évaluation du GIEC. Ces derniers vont de 0,18 m à 0,59 m pour la fin du XXIe siècle et constituent actuellement des estimations relativement basses par rapport à l'ensemble des résultats proposés par la communauté scientifique.

Une étude récente du BRGM menée sur la montée du niveau marin induite par les changements climatiques [17] précise que, quelle que soit la nature de cette variation, nous sommes actuellement entrés dans une dynamique qui engendrera une remontée du niveau marin bien au-delà de l'horizon 2100.

L'intrusion marine résulte d'un équilibre naturel et se présente sous la forme d'un biseau salé plus ou moins développé (caractérisé par une interface eau douce/eau salée). Certains systèmes hydrogéologiques côtiers pourraient être impactés par une surcote du niveau marin et un déplacement du trait de côte vers l'intérieur du domaine continental. Ces deux facteurs pourraient en effet perturber l'équilibre actuellement existant par un déplacement du front de salinité et une modification du biseau salé (géométrie et position).

Certains aquifères côtiers représentent une ressource en eau essentielle et sont donc associés à des enjeux importants. De nombreuses études ont été menées ces dernières années afin d'améliorer les connaissances de ces phénomènes et d'appréhender la sensibilité des systèmes côtiers face à une évolution du niveau marin. Différentes méthodes telles que le développement de modèles hydrodynamiques/hydrodispersifs ou encore les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères permettent d'aborder ce type de phénomènes et de caractériser la sensibilité des systèmes côtiers.

Situé sur la façade Atlantique, le Bassin aquitain présente une sensibilité relativement faible vis-à-vis des intrusions salines. Constitué de flyschs[18], le secteur du Pays Basque ne présente pas d'aquifères côtiers et le reste du littoral, caractérisé par la présence du système multicouche du bassin sédimentaire aquitain, présente peu de secteurs sensibles à ces phénomènes. En effet, comme précisé précédemment, les principaux aquifères du système multicouche qui pourraient présenter une sensibilité vis-à-vis d'une hausse du niveau marin sont les aquifères peu profonds du Plio-Quaternaire[19] et du Miocène[20]. Les autres formations qui composent ce système sont des aquifères captifs, de grande extension, qui entrent en contact avec le milieu océanique au droit du talus continental et pour lesquels, même une surcote de 2 mètres aurait une influence insignifiante sur l'équilibre naturel actuellement en place. Les enjeux les plus importants concernent les aquifères qui présentent actuellement une interface eau douce/eau salée au droit de la frange littorale. La surcote représente pour ces systèmes un facteur d'évolution mais c'est surtout la modification du trait de côte induite par cette dernière qui constitue un risque. La modification du trait de côte sera largement conditionnée par la topographie et il est donc important de souligner que les zones les plus sensibles du bassin Adour-Garonne vis-à-vis des intrusions salines sont celles qui ne sont pas protégées par le cordon dunaire et qui présentent une topographie relativement basse par rapport au niveau marin actuel. Les aquifères du bassin concernés par une modification de l'interface eau douce/eau salée suite à une hausse du niveau marin pourraient, par exemple, être ceux situés actuellement au droit de la zone estuarienne de l'Adour, du bassin d'Arcachon, de la partie nord de la zone estuarienne de la Gironde…

Impacts indirects sur les ressources en eau souterraine

Les changements climatiques auront des répercussions directes sur les ressources en eau souterraine. La modification de certains facteurs climatiques et hydrologiques tels que les régimes de pluie, la température, les phénomènes d'évaporation et l'infiltration engendreront certainement une modification du fonctionnement de certains systèmes hydrogéologiques, en particulier celui des systèmes libres. En effet, contrairement aux eaux superficielles, les eaux souterraines présentent une inertie plus ou moins importante vis-à-vis des facteurs de stress surfaciques. Cette caractéristique inertielle est d'autant plus importante pour les systèmes captifs qui peuvent présenter un temps de réponse particulièrement long face à un événement (effet différé), du fait de leur composante capacitive qui leur confère un grand potentiel à enregistrer et amortir les effets de la variabilité climatique.

Si les travaux sur les impacts directs se multiplient, il reste cependant primordial de prendre en considération les effets induits des changements climatiques qui pourraient s'avérer être tout aussi conséquents et concerner l'ensemble des aquifères (libre et captif). Ces impacts indirects se traduiront par une augmentation des pressions anthropiques sur les eaux souterraines causées par exemple par :

18. Formations rocheuses qui se forment en même temps que les montagnes et constituées par des successions de bancs de grès à la base de la formation et de schistes vers le haut de la formation.
19. Terme groupant le Pliocène et le Quaternaire, soit un laps de temps de 5 à 6 millions d'années.
20. Époque de l'ère Tertiaire d'une durée approximative de 18 à 20 millions d'années, soit de -23,03 à -5,332 millions d'années.

- Augmentation des volumes prélevés pour la consommation domestique, particulièrement pendant les événements extrêmes tels que les épisodes de sécheresse qui pourraient être de plus en plus fréquents dans le futur ;

- Augmentation des volumes prélevés pour l'irrigation afin de limiter le stress hydrique des cultures en périodes estivales (en considérant un maintien des pratiques agricoles actuelles) ;

- Augmentation des prélèvements dans le compartiment souterrain induite par la diminution des ressources disponibles en surface, notamment en période d'étiage.

Enseignement de la canicule 2003 et des années 2007 et 2008 pour la prise en compte des changements climatiques dans l'estimation des besoins futurs en eau potable : les enjeux pour le SAGE Nappes Profondes de Gironde.

Réalisée en 2009 cette étude avait pour objectif d'étudier l'impact des phénomènes caniculaires sur l'usage eau potable, dans la perspective de leur multiplication, pour la prise en compte dans le dimensionnement des infrastructures d'eau potable, et notamment des projets de substitution des ressources destinés à préserver les nappes profondes. Cette dernière était donc liée à la révision du SAGE Nappes profondes et s'inscrivait dans le projet Eau&3E du programme « villes durables » de l'Agence Nationale de la Recherche.

Dans le cadre de cette étude, une analyse statistique et une recherche de corrélation ont été effectuées entre les volumes utilisés pour l'eau potable et les indicateurs climatologiques pour les dernières années caractérisées par des conditions climatiques particulières (été caniculaire en 2003 et frais et humide en 2007 et 2008). Ces dernières ont été réalisées à partir de données de prélèvements ou de production fournies par les services d'eau potable de Gironde (au mieux sur les trente dernières années) et de données climatiques issues de plusieurs stations météorologiques, dont Mérignac, la plus ancienne et la plus complète du département.

Les principales conclusions, issues du compte rendu de cette étude, sont les suivantes :

- Les phénomènes climatologiques extrêmes et ponctuels n'expliquent pas à eux seuls les prélèvements atypiques des années 2003 ou 2007-2008. Les variations sont plutôt dues à des écarts à la moyenne climatologique sur plusieurs mois (années globalement plus chaudes et sèches, ou fraîches et humides) ;

- La production d'eau potable réagit immédiatement aux variations de température maximale (pas d'effet retard ni de perturbation du phénomène) ; des corrélations linéaires entre les prélèvements et températures maximales ont été mises en évidence. Les meilleures (R2 de 0,8 à plus de 0,9) correspondent à des périodes courtes sans précipitations durant lesquelles la température ne varie que dans un sens, et en distinguant les jours ouvrables et le week-end (le nombre d'usagers présents étant le paramètre le plus influent) ;

- La pluviométrie interfère dans la relation entre prélèvements AEP et température maximale : une même augmentation de température génère une augmentation de prélèvements d'eau potable nettement plus faible (environ 2 fois) si la période est pluvieuse ;

- Sur la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB), le lien linéaire entre l'augmentation de température maximale et l'augmentation de volume d'eau potable produit a pu être quantifié. Par exemple, pour les jours ouvrables des années chaudes et sèches, sur la base d'une production moyenne estivale actuelle d'environ 155 000 m^3/j, une augmentation de 1,6 % de la consommation par degré d'augmentation de température a été constatée.

- À partir de ce dernier résultat, une simulation de la production d'eau potable de la CUB à l'horizon 2050 a été effectuée, sur la base des projections climatiques issues du GIEC. L'ordre de grandeur obtenue est de 4 à 8 % d'augmentation moyenne pour la période estivale et de 10 à 12 % pour la semaine de pointe. Ces résultats ont ainsi permis d'apporter des éléments de réflexion qui pourront être utilisés pour certains aspects de la gestion des ressources en eau, notamment pour le dimensionnement des infrastructures d'alimentation en eau potable.

Conclusion

Le changement climatique et ses conséquences peuvent s'envisager sous forme d'effets directs ou indirects vis-à-vis des ressources en eau souterraine. Parmi les effets directs, les principaux questionnements portent sur les modifications du mode d'alimentation et de recharge des aquifères en fonction des perturbations climatiques telle que la modification du régime spatio-temporel des précipitations. *In fine* la question porte sur les effets des modifications climatiques (durée, fréquence, répartition des précipitations, températures moyennes, évaporation, évapotranspiration[21]...) sur le

21. Flux d'eau extrait du sol par évaporation et par prélèvement par la végétation.

fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères et plus spécifiquement sur la fonction de recharge et d'alimentation des nappes. On peut également évoquer l'effet de ces changements sur la qualité des réserves et donc leur usage futur.

Les effets indirects soulèvent également d'importants questionnements comme l'effet d'un report des prélèvements de surface vers les aquifères profonds. Le manque potentiel de précipitations et donc le déficit de ressources de subsurface devront être palliés par les ressources souterraines, tant du point de vue de l'eau potable que du point de vue des besoins en irrigation. La question est donc posée de l'effet des reports de prélèvement des eaux superficielles vers les eaux souterraines pour l'eau potable ainsi que pour l'irrigation. Les questionnements portent à la fois sur le court terme avec la gestion des périodes de demandes sévères et ponctuelles comme la période d'irrigation, mais également sur le long terme avec l'effet cumulé d'un déficit de recharge ou d'alimentation associé à une forte augmentation des prélèvements.



Industrie chimique dans le secteur du Bec d'Ambès en Gironde (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 9 :

Risques sanitaires

Coordination : *Isabelle Baldi*
Rédacteurs : *Isabelle Baldi, Gaëlle Coureau, Gaëlle Gault, Pierre-Yves Guernion, Denis Malvy, Simone Mathoulin-Pelissier, Chantal Raherison, Patrick Rolland, Roger Salamon*

Si les questions sur le changement climatique sont encore souvent centrées sur ses conséquences en matière d'environnement et d'économie, l'attention se tourne progressivement vers les enjeux de santé publique. Ceux-ci recouvrent à la fois les effets sanitaires directs liés aux catastrophes occasionnées par des événements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, incendies), aux vagues de chaleur ou de froid, ou encore aux effets cancérogènes des ultraviolets, mais aussi un certain nombre d'effets sanitaires indirects. Parmi ceux-ci, figurent l'impact de l'accroissement des polluants atmosphériques sur la santé respiratoire et sur les allergies, celui des modifications des ressources en eau sur le développement de micro-organismes délétères pour l'homme, les modifications de la dynamique de certaines pathologies infectieuses et la possible émergence de nouvelles maladies en relation avec la migration de vecteurs (phlébotomes, moustiques).

Vis-à-vis de chacun de ces risques, un certain nombre de mesures de surveillance et d'alerte sont aujourd'hui en place au niveau de la région Aquitaine sous l'impulsion de plans ou de réseaux nationaux. C'est notamment le cas concernant la surveillance des épisodes de canicule et de grand froid, l'enregistrement des nouveaux cas de cancer, la surveillance et l'alerte sanitaire concernant les pics de pollution atmosphérique, les mesures concernant la qualité des eaux de consommation et de baignade, l'observation entomologique des vecteurs de maladies infectieuses. La prévention des conséquences sanitaires du changement climatique repose bien évidemment en priorité sur les mesures visant à réduire l'effet de serre, mais elle nécessite également le développement et le renforcement de la recherche et des connaissances dans le domaine santé-environnement.

Introduction

Tant au niveau des décideurs que du grand public, le débat sur le changement climatique est aujourd'hui centré sur les conséquences environnementales et économiques, et par conséquent n'a accordé jusque-là qu'une attention marginale aux effets sur la santé humaine. Pourtant des questions bien spécifiques sont aujourd'hui débattues dans la littérature scientifique médicale concernant l'impact de ces changements environnementaux. En effet le changement de climat est amené à modifier un certain nombre de paramètres physiques et biologiques auxquels l'homme s'est adapté biologiquement et socialement, et la rapidité de ces modifications pourrait alors retentir sur son état de santé.

Parmi ces effets potentiels, certains peuvent être qualifiés de « directs » car ils se traduisent de manière claire et généralement à court terme sur les indicateurs de santé des populations (mortalité, morbidité), et d'autres d'« indirects » car ils mettent en œuvre une succession de phénomènes dont le changement climatique représente l'origine et l'effet de santé la conséquence ultime [1].

I- Effets directs

Effets sanitaires des catastrophes climatiques

De manière évidente, tout événement météorologique extrême, surtout s'il est brutal et imprévisible (pluies extrêmes, raz de marée, tempêtes, cyclones, incendies, inondations), est susceptible de s'accompagner d'accidents et de décès au sein des populations. Il s'agit de phénomènes très concentrés sur le plan géographique et temporel.

Les données du Centre de recherche sur l'épidémiologie des désastres (Université de Louvain) et de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) montrent une augmentation sensible du nombre de catastrophes naturelles au cours de la dernière décennie à l'échelle mondiale (**Figure 1**, [2]). Les catastrophes climatiques (températures extrêmes, sécheresses et incendies de forêt) représentent la majorité de ces événements (environ 70 %) et leur part s'accroît avec les années.

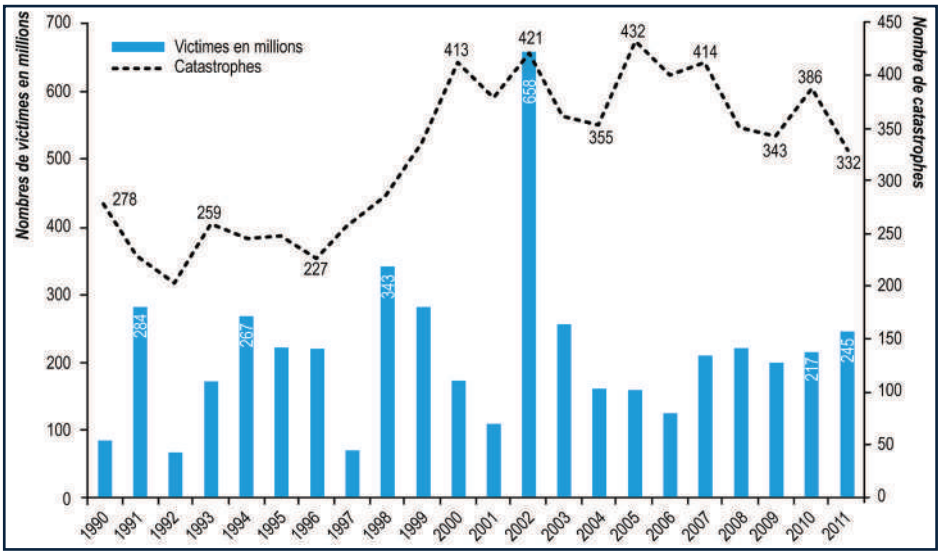


Figure 1 : *Fréquence des catastrophes naturelles et nombre de victimes à l'échelle mondiale au cours des deux dernières décennies (Guha-Sapir et al. [2]).*

Les catastrophes naturelles les plus marquantes en Aquitaine au cours des dernières décennies ont été les tempêtes Lothar et Martin en décembre 1999 (96 victimes en France), et la tempête Klaus en janvier 2009 qui a fait 11 victimes, principalement dans le Sud-Ouest[1]. Le passage de la tempête Klaus a notamment entraîné une nette augmentation des intoxications au monoxyde de carbone essentiellement liées à l'usage domestique de groupes électrogènes pour pallier les coupures d'électricité. Au décours de cette tempête, 109 épisodes d'intoxications impliquant 295 personnes et occasionnant 4 décès ont été rapportés dans les trois régions du Sud-Ouest (Midi-Pyrénées, Languedoc Roussillon et Aquitaine). Dans la seule région Aquitaine, le bilan était de 64 épisodes impliquant 176 personnes et occasionnant 2 décès [3]. De plus, en février 2010, la tempête Xynthia a occasionné la mort de 53 personnes essentiellement en Charente Maritime et en Vendée [4].

Effets sanitaires des vagues de chaleur et de froid

La relation avec des effets de santé peut paraître *a priori* moins évidente pour des événements météorologiques survenant à l'échelle de plusieurs jours ou semaines tels que les vagues de chaleur ou de froid. La fluctuation saisonnière des taux de mortalité est en effet un phénomène bien connu, qui s'observe dans un grand nombre de pays et notamment en France (**Figure 2**, [5]). Elle se traduit par un

1. http://www.emdat.be/disaster-list

minimum en été (déficit le plus marqué en août) et un maximum en hiver (pointe généralement en janvier). L'analyse des données de mortalité et de morbidité des populations humaines lors d'événements climatiques met en évidence un impact sur la santé, notamment celle des groupes les plus fragiles, tels que les personnes en fin de vie ou présentant des pathologies chroniques cardiaques ou respiratoires. Ainsi la vague de chaleur qui s'est produite en Europe au cours de l'été 2003, avec une élévation de la température moyenne estivale de +3,7 °C (par rapport à la période 1950-2006) [6], s'est accompagnée de près de 30 000 décès, dont environ 15 000 en France [7][8]. Ainsi, sur la **Figure 2**, cet excès de mortalité (de l'ordre de 500 décès supplémentaires par jour) au cours de l'été 2003 s'observe sous la forme d'un pic en période estivale. Depuis cet épisode, un système de surveillance et d'alerte des épisodes de canicule a été mis en place par l'Institut de Veille Sanitaire en 2004.

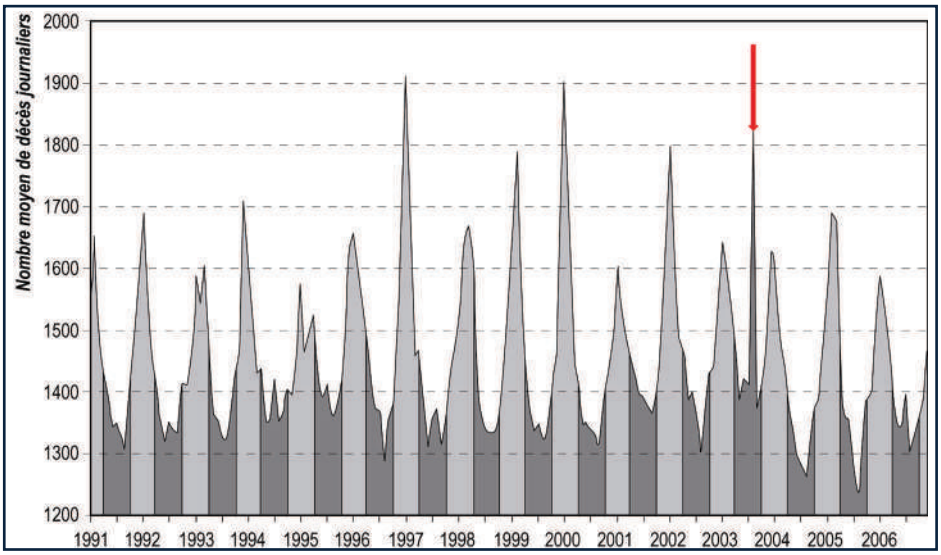


Figure 2 : *Moyenne mensuelle des décès journaliers en France de 1991 à 2006. En gris clair : mois d'octobre à mars, en gris foncé : mois d'avril à septembre (Rousseau 2006, [5]).*

Surveillance et alerte sanitaire lors des épisodes de canicules en Aquitaine (Cellule de l'InVS en région (Cire) Aquitaine)

À la suite des températures exceptionnelles de l'été 2003 et de leur considérable impact sanitaire, un plan national canicule (PNC) a défini des actions de court et moyen terme afin de réduire les effets sanitaires des vagues de chaleur. Ce plan prévoit la mise en œuvre de mesures de protection des personnes à risque hébergées en institution (personnes âgées, malades ou handicapées), le repérage par les mairies des personnes à risque isolées, un dispositif d'alerte météorologique (Météo France) et sanitaire (Institut de veille sanitaire, InVS), et s'appuie sur les principes de solidarité et de communication (recommandations et sensibilisation des personnes fragiles et du grand public avec ouverture d'un numéro vert en période de veille saisonnière : le 0 800 06 66 66). Ce plan se décline selon trois niveaux : le niveau de veille saisonnière du 1er juin au 31 août, le niveau de mise en garde et actions (Miga) déclenché par le préfet en cas de prévisions de vague de chaleur et le niveau de mobilisation maximale déclenché par le premier ministre lorsque la situation est jugée exceptionnelle et dépasse le champ sanitaire. Chaque année, dans le cadre de ce plan opérationnel, un système d'alerte concernant les risques sanitaires, le système d'alerte canicule et santé, est activé par l'Institut de Veille Sanitaire en collaboration avec Météo-France. Ce système est fondé sur la surveillance d'indicateurs biométéorologiques (IBM) et sanitaires dans l'objectif de prévoir des épisodes susceptibles d'impacter fortement la santé notamment en termes de surmortalité [9]. Les IBM sont calculés à partir de la moyenne sur trois jours des températures minimales et maximales. Pour chaque département, des seuils d'alerte (diurne et nocturne) ont été définis par rapport au risque de surmortalité **(Tableau 1)**. Lorsque ces seuils sont susceptibles d'être atteints ou dépassés, l'Institut de Veille Sanitaire recommande d'activer le niveau de Miga. En parallèle, la surveillance d'indicateurs sanitaires permet d'apprécier l'impact éventuel par le suivi des décès enregistrés par l'état-civil (dans environ 1 000 communes en France soit 70 % des décès), de la fréquentation des services d'urgences hospitaliers, et des recours à SOS Médecins. Ces indicateurs sanitaires sont suivis au niveau régional par les Cellules de l'Institut de Veille Sanitaire (Cire), en collaboration avec les Agences Régionales de Santé. Ces dernières sont chargées de s'assurer de l'organisation des soins et de la mise en place de mesures adaptées en cas de tensions hospitalières voire de l'activation des plans blancs[2] au sein des établissements de santé, et du suivi de l'activité et des capacités hospitalières régionales. Le rôle des Agences Régionales de Santé est avant tout incitatif pour que les établissements

2. Plan blanc : chaque établissement de santé élabore un Plan blanc qui lui permet de mobiliser immédiatement les moyens de toute nature dont il dispose en cas d'afflux de victimes ou pour faire face à une situation sanitaire exceptionnelle.

s'équipent de pièces rafraîchies et rédigent le plan bleu[3]. En cas de niveau Miga, l'Agence Régionale de Santé s'assure également de la bonne prise en charge des personnes âgées et handicapées par la mise en place de mesures prévues dans le plan bleu pour gérer la situation de crise.

Département	Station	IBM minimal	IBM maximal
Dordogne	Bergerac	20°C	36°C
Gironde	Mérignac	21°C	35°C
Landes	Mont-de-Marsan	20°C	34°C
Lot-et-Garonne	Agen	20°C	36°C
Pyrénées-Atlantiques	Pau	20°C	34°C

Tableau 1 : *Indicateurs (IBM) Biométéorologiques des départements aquitains utilisés pour déclencher le niveau de mise en garde et actions (Miga) du plan national canicule (PNC).*

Depuis la mise en place de ces mesures en 2004, le niveau de Miga a été déclenché une première fois dans les 5 départements d'Aquitaine lors de la vague de chaleur survenue en juillet 2006, puis une seconde fois en 2011 dans le Lot-et-Garonne pendant un week-end fin août. Aucun niveau de mobilisation maximale n'a été activé jusqu'à présent. En Gironde, le suivi des différents indicateurs sanitaires pendant la vague de chaleur de juillet 2006 a mis en évidence un impact sanitaire modéré sur l'ensemble de la population, et non pas uniquement chez les personnes âgées [10].

Des vagues de froid hivernales sont également régulièrement observées en France. En février 1956, un froid polaire gagna la France, et s'accompagna en Aquitaine de 50 cm de neige dans les rues de Bordeaux et 80 cm au Cap Ferret. D'autres vagues de froid intense ont été également observées en janvier 1963, janvier 1985 et février 2012 (plus de 500 décès en Europe, 10 en France). Comme pour les épisodes de canicule, il a été montré que ces températures extrêmes étaient à l'origine d'une surmortalité chez les personnes les plus fragilisées, notamment sur le plan respiratoire et cardio-vasculaire. De plus, le risque d'intoxication par le monoxyde de carbone lié aux appareils de chauffage défectueux devient alors maximal. L'hiver rigoureux de 1984-1985 se serait ainsi accompagné d'un excès de 8 000 décès en France (cf. encadré ci-dessous). On pourrait ainsi faire l'hypothèse qu'un réchauffement climatique s'accompagnerait d'une moindre mortalité hivernale. Cette hypothèse est débattue. En effet les comparaisons internationales montrent que les pays qui subissent des hivers modérés subissent des pics de mortalité plus marqués en cas de vague de froid que ceux qui connaissent des hivers rudes (ex. : Canada).

Surveillance et alerte sanitaire lors des épisodes de grands froids en Aquitaine (Cellule de l'InVS en région (Cire) Aquitaine)

Grâce à sa situation sur la façade atlantique, l'Aquitaine bénéficie d'hivers généralement doux. Cependant, comme sur l'ensemble du territoire, une surveillance des risques liés au grand froid est en place, dont l'activation pourrait être rendue plus fréquente en cas de changement climatique.

Ainsi, depuis 2004, deux plans de gestion des risques liés au froid ont été institués par les autorités sanitaires françaises, l'un spécifique aux personnes sans abri, l'autre plus large pour la protection de la population générale. En 2007, une circulaire interministérielle a été élaborée par la Direction Générale de la Santé pour préciser les actions à mettre en œuvre pour prévenir et faire face aux conséquences sanitaires propres à la période hivernale – et non spécifiquement au froid. Elle intègre le dispositif pour les personnes sans-abri et l'étend aux groupes à risque de la population générale (notamment les personnes souffrant de pathologies chroniques, et les personnes âgées). Le dispositif s'appuie sur la carte de vigilance de Météo-France, qui utilise l'indice de refroidissement éolien. Des seuils diurnes et nocturnes ont été retenus pour la vigilance orange et rouge. Les actions du dispositif sont déclinées par le préfet de département à partir des informations fournies par Météo-France et de la surveillance de la disponibilité en lits d'hôpitaux. Dans le cadre du plan grand froid, l'InVS a un rôle de suivi d'un éventuel impact sanitaire en lien avec le froid. En région, les Cire ont donc pour mission d'assurer le suivi d'indicateurs sanitaires issus des systèmes de surveillance (mortalité, passages aux urgences, SOS Médecins), et d'alerter les autorités sanitaires régionales, si la situation le nécessite.

En effet les épisodes de grand froid, s'ils devaient devenir plus fréquents, pourraient s'accompagner d'un plus grand nombre d'hypothermies et de gelures, favoriseraient les crises d'asthme et l'insuffisance coronarienne aiguë, ainsi que le développement d'infections broncho-pulmonaires. L'impact du froid sur la mortalité peut être important, par exemple, au cours du mois de janvier 1985, une vague de froid exceptionnelle a engendré une surmortalité estimée à 13 % en France [11]. Plus récemment, lors de la vague de froid début 2009, un excès de mortalité proche de 6 000 décès (+14 %) a été estimé sur les six premières semaines de l'année, en France, en comparaison aux trois hivers précédents [12].

3. Plan bleu : pour chaque institution publique, privée, associative ou commerciale, ce plan fixe le mode d'organisation général pour répondre à une situation de crise.

Effets sanitaires des expositions aux ultraviolets

Les changements climatiques s'associent à une dégradation de la couche d'ozone stratosphérique qui constitue un filtre protecteur contre le rayonnement solaire. Il est donc probable que les populations humaines connaîtront un accroissement dans les prochaines décennies de l'exposition aux ultraviolets A et B, reconnus cancérigènes. Une plus forte intensité de ces rayonnements, et en particulier des UVB qui ont les répercussions les plus importantes sur la santé de l'homme, est susceptible d'accroître la fréquence de certaines pathologies **(Figure 3)**. Ainsi, l'OMS prédit qu'une diminution de 10 % de la concentration d'ozone stratosphérique pourrait provoquer chaque année 300 000 cancers cutanés, 4 500 mélanomes et entre 1,60 million et 1,75 million de cas de cataracte de plus dans le monde. L'impact réel sur la santé des populations dépendra bien évidemment de l'évolution de la couche d'ozone au cours des prochaines décennies.

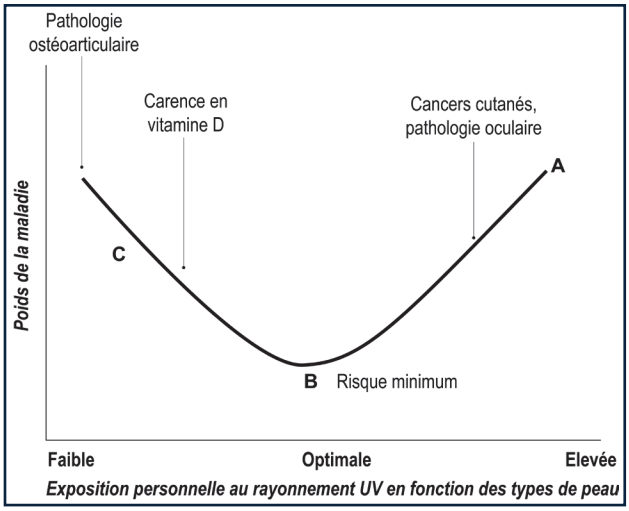


Figure 3 : *Relations entre l'exposition aux UV et la charge de morbidité (Source : http://www.who.int/uv/health/fr).*

Surveillance de la survenue des mélanomes cutanés en Aquitaine-Registre général des cancers de la Gironde

La surveillance épidémiologique des cancers en France repose sur un partenariat, coordonné par l'Institut de veille sanitaire (InVS), entre le réseau français des registres de cancers (Francim), le service de biostatistique des Hospices Civils de Lyon (HCL) et l'Institut national du cancer (INCa). Les registres de cancers effectuent un enregistrement exhaustif et continu des nouveaux cas de cancers dans une zone géographique définie. En 2012, la France compte 25 registres qualifiés (14 registres généraux et 11 spécialisés) qui couvrent environ 20 % de la population. En Gironde, un registre général des cancers existe depuis 2005. Les données enregistrées par les registres sont régulièrement analysées et modélisées afin d'obtenir des estimations de l'incidence et de la mortalité par cancer en France (données des registres, de mortalité [CepiDC] et démographiques [Insee]). Elles sont disponibles sur le site Internet de l'InVS.[4]

En Aquitaine, on constate une augmentation de l'incidence des mélanomes cutanés entre 1980 et 2005 **(Figure 4)** : les taux standardisés (Europe) étaient de 4,8 en 1980 et 11,4/100 000 en 2005 chez les femmes et 3,1 et 10,6 pour 100 000 hommes. En tenant compte de l'évolution de la population (modification de structure par âge), l'augmentation de l'incidence serait donc de 143 % chez les femmes et de 300 % chez les hommes entre 1980 et 2005. En Aquitaine, en 2005, environ 400 nouveaux cas de mélanome ont été diagnostiqués, touchant un peu plus souvent les femmes que les hommes, et survenant plus d'une fois sur deux chez des personnes de moins de 65 ans.

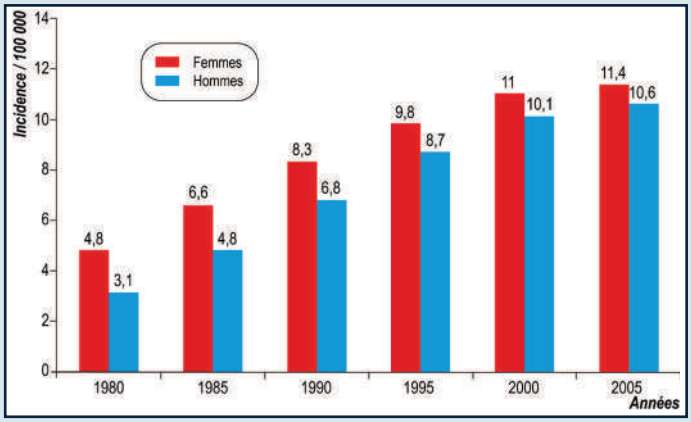


Figure 4 : *Estimation de l'incidence standardisée (population européenne) des mélanomes cutanés en Aquitaine selon le sexe entre 1980 et 2005 (http://www.invs.sante.fr/applications/cancers/estimations_regionales_1980_2005/).*

Divers facteurs peuvent expliquer la progression du nombre de cas de mélanomes : une amélioration du diagnostic, l'existence de campagnes de dépistage, mais aussi une augmentation des expositions au soleil dans des activités de loisir, dès la petite enfance. L'augmentation de l'incidence du mélanome cutané en France, mesurée depuis 1980, la gravité de ce cancer en cas de découverte tardive et l'identification de facteurs de risque sur lesquels il est possible d'agir convergent fortement vers la nécessité d'intensifier les mesures de prévention primaire (éviter l'exposition aux rayonnements ultra-violets) et secondaire (dépistage) qui sont essentiellement de type individuel. La mesure des bénéfices des campagnes de prévention primaire ne pourra toutefois s'observer en termes d'indicateurs épidémiologiques que dans plusieurs années.

4. http://www.invs.sante.fr/surveillance/cancers

II- Effets indirects

Pollution atmosphérique

La relation entre pollution atmosphérique et changement climatique est à double sens (cf. chapitre 8.1). En effet, certains polluants atmosphériques (oxydes d'azote, dioxyde de soufre, particules en suspension…) et les gaz à effets de serre (tels que le dioxyde de carbone, le protoxyde d'azote…) sont aussi responsables des changements climatiques. Ceux-ci sont émis principalement par les activités anthropiques telles que le transport et l'industrie même si certains polluants sont également émis par des activités naturelles (décomposition de matière organique, feux de forêts, volcans, phénomènes de fœhn…). Réciproquement, la qualité de l'air à l'échelle locale et régionale est étroitement associée aux conditions climatiques et météorologiques. Ainsi les changements à venir devraient s'accompagner d'une modification de la dispersion de la pollution et d'une accentuation des réactions photochimiques et par conséquent de la production accrue de certains polluants tels que l'ozone. De plus, l'assèchement du climat devrait accroître certaines émissions du fait des feux de biomasse et de l'augmentation de diverses formes de poussières.

De très nombreuses études ont été menées au cours des dernières décennies sur les effets de la pollution atmosphérique sur la santé des populations. Elles ont clairement démontré les effets délétères des expositions aux particules fines à la fois sur l'appareil respiratoire et sur le système cardiovasculaire, aussi bien en termes de mortalité que de morbidité. L'exposition à court terme à des niveaux élevés de particules fines a été associée à une plus grande fréquence d'hospitalisations pour asthme et à des altérations aiguës de la fonction respiratoire, notamment chez les enfants. Par ailleurs, l'exposition prolongée à ces polluants, même à des niveaux modérés a été associée au développement de l'asthme au cours des premières années de vie, à l'apparition de broncho-pneumopathies obstructives ou à la survenue de pneumonies. Par leur action sur le calibre des vaisseaux, les particules ont été aussi impliquées dans la survenue de pathologies cardiaques ischémiques comme l'infarctus du myocarde. L'ozone contribue également à la survenue d'un grand nombre de maladies respiratoires telles que l'asthme, et son impact est particulièrement marqué dans les populations les plus fragiles telles que les personnes âgées, les enfants et les diabétiques. Une élévation des niveaux de pollution en particules fines et ozone sous l'effet du changement climatique s'accompagnerait donc d'un plus grand risque de maladies cardio-respiratoires.

Chaque région française s'est dotée d'une association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air. Ces associations sont regroupées au sein de la Fédération nationale ATMO[5]. Conformément à la loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie de 1996, elles mettent en œuvre la surveillance et l'information sur la qualité de l'air, diffusent les résultats des mesures et des prévisions, transmettent aux préfets les informations relatives aux dépassements ou prévisions de dépassements des seuils réglementaires. Concernant la prévention des effets sanitaires de la pollution atmosphérique, deux niveaux d'actions sont définis :

- En vue de prévenir des effets sanitaires chroniques, des valeurs limites, ou des valeurs-cibles (en fonction des polluants), sont définies. Les dépassements de ces valeurs, qui peuvent être exprimées en moyenne annuelle, ou en nombre de jours ou d'heures par an ne dépassant pas un certain niveau, doivent entraîner la mise en œuvre de plans pluriannuels de réduction des émissions à long terme. En France, ce sont les Plans de Protections de l'Atmosphère qui assurent cette fonction dans les zones où les valeurs limites sont ou risquent d'être dépassées.
- En vue de prévenir des effets sanitaires aigus, des seuils d'information et de recommandations et des seuils d'alerte sont également définis pour certains polluants. Le niveau d'information et de recommandations vise à conseiller les personnes les plus fragiles lors d'épisodes aigus de pollution.

5. http://www.atmo-france.org

Seuls les seuils d'alerte, correspondant, sur la base des connaissances scientifiques disponibles, à des concentrations en polluants susceptibles d'entraîner des effets immédiats sur la santé humaine ou sur l'environnement peuvent entraîner la prise de mesures urgentes par arrêté préfectoral dans l'objectif d'abaisser le niveau de pollution : diminution ou modification de certaines productions industrielles, ralentissement de la vitesse du trafic automobile...

Pour un même polluant, les seuils diffèrent selon l'échelle de temps (moyenne horaire, journalière, saisonnière, annuelle), au cours du temps en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques, et sont définis par la réglementation européenne et/ou française. En complément, certains organismes établissent des recommandations de valeurs à respecter, en vue de diminuer l'impact sanitaire de la qualité de l'air (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, Organisation Mondiale de la Santé...), recommandations que le législateur prend en compte lors de la révision ou la mise en œuvre de la réglementation. Les principales valeurs pour la santé humaine correspondant à la réglementation en vigueur en 2012 figurent dans le **Tableau 2**.

En $\mu g/m^3$	Valeur limite / Valeur cible	Information et Recommandations	Alerte
Dioxyde de soufre (SO_2)	125 (/j moins de 3j/an) 350 (/h moins de 24 h/an)	300 Sur une heure	500 Sur 3 moyennes horaires
Dioxyde d'azote (NO_2)	40 Moyenne annuelle 200 (/h moins de 18 h/an)	200 Sur une heure	400 Sur 3 moyennes horaires (sur une heure avant 2012)
Ozone (O_3)	120 (moyenne 8h/j moins de 25j/an en moy sur 3 ans)	180 Sur une heure	1er seuil : 240 Sur une heure 2ème seuil : 300 Sur 3 moy. horaires 3ème seuil : 360 Sur une heure
Particules en suspension PM10	40 (moyenne annuelle) 50 (/j moins de 35 j /an)	50 sur 24 h (80 sur 24 h entre 2008 et 2012)	80 sur 24 h (125 sur 24 h entre 2008 et 2012)

Tableau 2 : *Principales valeurs réglementaires concernant les polluants atmosphériques.*

Surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine

Réseau de mesure de la qualité de l'air en Aquitaine AIRAQ (PY Guernion) :

Basées sur les mesures et les prévisions de la qualité de l'air réalisées par AIRAQ (réseau de mesure de la qualité de l'air en Aquitaine), des procédures d'alerte sanitaire à la pollution atmosphérique sont mises en place sur la région depuis la fin des années 1990, et sont régulièrement mises à jour afin de prendre en compte l'évolution des connaissances et des réglementations. Parmi les polluants visés par ces procédures, il en est deux qui sont particulièrement sensibles au changement climatique, à savoir l'ozone (O_3) et les particules en suspension (PM10)[6].

Dès que les concentrations dépassent ou devraient dépasser (d'après les modèles de prévision) les seuils définis sur des bases sanitaires, une information à la population est faite, et des recommandations, voire des restrictions sont mises en œuvre. Les recommandations d'ordre civique et les mesures réglementaires concernent les principaux secteurs d'émissions (émissions industrielles, trafic routier, chauffage [en particulier chauffage au bois], agriculture). Au niveau sanitaire, les recommandations, en lien avec l'impact de chaque polluant sur la santé, précisent d'éviter les activités physiques et sportives intensives, les activités exposant à d'autres nuisances respiratoires, rappellent aux personnes sensibles telles que les asthmatiques la nécessité de suivre scrupuleusement les traitements en cours (notamment respiratoires et cardiovasculaires) et de consulter un médecin en cas de dégradation de l'état de santé.

Parmi les polluants bénéficiant d'une surveillance réglementaire, l'ozone est celui qui a donné lieu au plus grand nombre de dépassements de seuils depuis 1999. Ainsi, sur la région Aquitaine, la moitié des déclenchements des procédures d'information/recommandations entre 1998 et 2011 est concentrée sur la seule année 2003, année de canicule.

La conclusion de l'ensemble des travaux concernant l'impact sanitaire des particules en suspension (PM10) a induit également un durcissement de la réglementation en air ambiant sur ce paramètre, avec la mise en place de procédures d'alertes, et un abaissement régulier des seuils associés. Or, ces PM10 incluent, parmi d'autres particules, des particules ultrafines, de tailles inférieures à 100 nm, dont certaines (cas des Aérosols Organiques Secondaires ou AOS) sont issues de processus photochimiques se déroulant directement dans l'atmosphère. Suite au constat de réchauffement climatique, une augmentation de la production de ces AOS est à attendre, allant de pair avec une augmentation de l'impact sanitaire de ces composés.

6. cf. chapitre 8.1

Comme précisé précédemment, au-delà des actions à court terme menées en cas de pic de pollution, des plans d'actions à plus long terme, basés sur les dépassements des valeurs-limites, voire des valeurs-cibles, doivent être mis en place pour lutter contre l'impact sanitaire chronique de la pollution atmosphérique. Ces plans, le plus souvent locaux, viennent compléter les démarches régionales et nationales visant à lutter contre le réchauffement climatique et/ou la pollution atmosphérique (SRCAE, Plan Particules…). Au niveau de la région Aquitaine, les dépassements de valeurs limites observés visent principalement les PM10 et le dioxyde d'azote (NO_2). Les plans d'actions mis en place en conséquence ont pour objectif de diminuer les émissions de ces deux polluants, ce qui passe très souvent par une limitation de l'utilisation des énergies fossiles. Ainsi, l'objectif de réduction de la pollution atmosphérique pourra se coupler aux efforts pour lutter contre le changement climatique, *via* la diminution de l'utilisation des matières fossiles et donc des émissions de gaz à effet de serre, et en particulier de dioxyde de carbone (CO_2).

Phénomènes allergiques

Les maladies allergiques sont le résultat d'une interaction entre l'existence d'une prédisposition génétique et l'exposition à des facteurs environnementaux (allergéniques, polluants, infectieux).

Le réchauffement climatique, les modifications de l'importance des précipitations, mais aussi l'augmentation du CO_2 dans l'air ambiant (seul fournisseur de carbone dans le processus de photosynthèse) ont un impact sur la croissance des végétaux ainsi que sur les phénomènes de pollinisation. Des mesures dans l'atmosphère réalisées dans différents pays ont montré un accroissement des concentrations en pollens au cours des 50 dernières années. Ces élévations concernent notamment des espèces dont le pouvoir allergénique est important telles que le bouleau, l'aulne ou le cèdre japonais. De plus la période de pollinisation tendrait à devenir plus précoce dans l'année et à durer plus longtemps. Ainsi, aux Pays-Bas, les comptes polliniques de 14 espèces de végétaux décelaient leur présence de 3 à 22 jours plus tôt dans les années 2000 qu'en 1970 [13]. Les modifications climatiques sont aussi susceptibles de modifier la distribution géographique des espèces végétales et de faire apparaître (ou disparaître) certains pollens dans de nouvelles régions. Enfin il a été suggéré que le pouvoir allergénique des pollens, et notamment ceux des graminées pourrait lui-même être accru par l'élévation des températures et des taux de CO_2 dans l'atmosphère.

Les allergènes présents dans les pollens, et notamment ceux des graminées, sont responsables de l'apparition d'asthme allergique, une affection qui a été montré en constante progression au cours des dernières années, et aussi d'épisodes d'aggravation respiratoire ou exacerbations. De même la fréquence de la rhinite allergique augmente très régulièrement, en parallèle de l'accroissement des concentrations aériennes en pollen. En dehors d'une modification des expositions aux pollens au cours du temps, d'autres facteurs ont également été évoqués pour expliquer l'augmentation des allergies dans les populations : l'accroissement de la pollution atmosphérique, le développement de l'hygiène et des milieux de vie aseptisés – en particulier pendant l'enfance –, l'utilisation accrue des antibiotiques et des vaccinations sont autant de facteurs qui impactent nos défenses immunitaires.

Il existe une interaction forte entre l'exposition aux pollens et exposition aux polluants, tant in vitro, qu'in vivo.

Épidémiologie des maladies respiratoires en Aquitaine (Université Bordeaux Segalen, CHU Bordeaux)

Des données concernant les maladies respiratoires sont disponibles en Aquitaine depuis de nombreuses années au travers de diverses études épidémiologiques [14][15][16]. Celles-ci permettent d'identifier des spécificités régionales à un temps donné, mais aussi les tendances évolutives. Elles pourront donc le cas échéant identifier les effets des changements climatiques sur la santé respiratoire et allergique des Aquitains dans les prochaines années, aussi bien pour les enfants que pour les adultes.

Les dernières données épidémiologiques de l'enquête ISAAC (International Study of Asthma and Allergies in Childhood) internationale, multicentrique réalisées à Bordeaux centre retrouvaient en 1997 une prévalence de l'asthme de 8 % chez les enfants âgés de 6-7 ans (n = 3205), et de 15 % chez les adolescents âgés de 13-14 ans (n = 3 000). La prévalence du rhume des foins chez les enfants était de 9 %, plus élevée qu'à Strasbourg par exemple (5.9 %). En 2000 dans le cadre de l'étude ISAAC-II (étude française des six villes) chez les 9-11 ans, une prévalence de l'asthme de 9 % était observée (n = 1 500).

Les données comparatives ont toujours retrouvé une prévalence de l'asthme plus élevée à Bordeaux comparativement aux autres villes, sans facteur explicatif évident à ce jour.

En 2007, dans le cadre du PRSE, la phase III de l'étude ISAAC a été réalisée permettant de comparer la prévalence de l'asthme 10 ans après la première étude. La prévalence de l'asthme est restée stable à 9.6 % chez les enfants. Il faut cependant noter que la prévalence des sifflements chez les enfants a légèrement augmenté de 18 % en 1997 à 21 % en 2007.

Chez l'adulte âgé de 20-44 ans, dans le cadre de l'étude internationale ECRHS (European Community Respiratory Health Survey), la prévalence de l'asthme en population générale était de 5 %, plus élevée que dans les autres villes participant à l'étude (Grenoble, Montpellier, Paris). La prévalence de la rhinite allergique était de 30 %.

Bordeaux était caractérisée par une prévalence de sensibilisation aux acariens la plus élevée d'Europe.

Parmi les facteurs explicatifs, l'exposition aux pollens a été étudiée, et celle en particulier au pollen de pin maritime très présent dans la région [17]. La sensibilisation au pollen de pin (P. pinaster) est très faible parmi les patients adressés pour symptômes allergiques, elle n'est que de 1.9 %, dans une région où l'exposition à ce pollen est importante.

Altération de la qualité de l'eau

Les changements climatiques s'accompagneront de modifications des ressources en eau. Au niveau des océans et des réserves d'eau douce, l'augmentation des gaz à effets de serre se traduira notamment par une élévation de température et une acidification, lesquels impacteront le développement des algues. Un petit nombre de ces algues ont un potentiel délétère pour la santé humaine parce qu'elles produisent des toxines naturelles qui se concentrent le long de la chaîne alimentaire.

Dans les eaux profondes et calmes, sous l'effet d'une élévation de température, des cyanobactéries peuvent se développer de manière accélérée. Leur présence a été détectée au niveau des étangs et estuaires par l'apparition « d'algues bleues » ou « d'algues vertes ». Ces cyanobactéries, lors de leur mort ou de leur rupture, peuvent libérer dans l'eau des toxines susceptibles d'atteindre le foie (hépatotoxines), le système nerveux (neurotoxines), la peau ou les muqueuses (dermatotoxines). L'intoxication humaine peut se produire lors de la baignade, par les eaux de boisson ou encore par l'inhalation d'embruns. Ces toxines occasionneraient principalement des troubles bénins comme des irritations oculaires, cutanées ou de l'appareil respiratoire. Les cyanotoxines sont à distinguer des phytotoxines, produites par du plancton en milieu marin uniquement, régulièrement associées aux épisodes toxiques de nature gastro-intestinale entraînant l'interdiction de commercialisation des coquillages.

On ne peut complètement exclure que ces diverses toxines, au-delà des troubles aigus qu'elles occasionnent, soient à l'origine de troubles chroniques. Cette hypothèse a notamment été soulevée concernant le rôle des cyanobactéries dans le développement de maladies neuro-dégénératives, telles que la sclérose latérale amyotrophique.

Depuis 2004, la Direction Générale de la Santé a mis en place un plan de surveillance conduisant à interdire la baignade et à restreindre certaines activités nautiques en présence d'écume ou au-delà d'un certain seuil concernant les toxines des cyanobactéries. Par ailleurs, les phytotoxines font l'objet d'une surveillance par IFREMER à partir de stations de mesures réparties sur l'ensemble du littoral (réseau REPHY). Dans le cadre de ses missions, l'ARS d'Aquitaine réalise périodiquement des synthèses sur la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine à l'échelle régionale et départementale à partir des contrôles qu'elle effectue régulièrement[7].

Pathologies infectieuses : paradigme et enjeux pour l'Aquitaine en 2013

En 2013, certaines maladies infectieuses sont qualifiées de « nouvelles » et renvoient à un changement de paradigme repéré depuis la fin du XX^{e} siècle. Elles sont souvent appelées maladies

7. http://www.ars.aquitaine.sante.fr/Eau.77774.0.html

émergentes ou ré-émergentes. À leur endroit, le qualificatif de « nouveau » rend compte de plusieurs faits distincts, bien que non exclusifs : (1) de nouveaux outils sont mis à disposition pour améliorer la découverte et palier les manques de connaissances ; (2) de nouveaux organismes pathogènes ont émergé, en particulier ceux résistants aux anti-infectieux disponibles ; (3) notre environnement géo-climatique et technologique et nos comportements ont changé et s'inscrivent dans la mondialisation.

Dans ce cadre, la multiplication du contact avec les espèces animales, sauvages, domestiques, d'élevage, de compagnie ou de rente, augmente le risque de zoonoses[8]. La généralisation des voyages et échanges inter-continentaux ainsi que la libre circulation des personnes et des marchandises au sein de l'Union Européenne favorise l'importation de nouveaux pathogènes (à partir de voyageurs ou d'animaux infectés) et de nouveaux arthropodes[9] vecteurs[10] capables de transmettre ces derniers.

Climat et Maladies infectieuses

En simplifiant à l'extrême à deux éléments de description, les faciès du climat renvoient à l'acception des niveaux et fluctuations de température et d'hydrométrie. Le rythme désormais soutenu des changements climatiques n'explique pas à lui seul la dynamique des maladies infectieuses, mais leur conjonction dans un espace géographique donné avec des facteurs tels que la mondialisation des transports ou même *a minima* les migrations d'animaux (telles les espèces aviaires) peut être suffisante pour créer, voire fixer le complexe pathogène[11] d'une maladie infectieuse nouvelle.

L'impact du changement climatique sur l'émergence de pathogènes d'importance humaine ne représente qu'un des éléments dans la prise en compte des risques sanitaires encore évitables liés aux activités humaines (part anthropique). Ainsi ce risque ne constitue qu'un des pendants dans le domaine sanitaire de celui, planétaire, de la crise écologique générée par l'homme et attendue au terme des décennies à venir [18].

L'exemple des maladies infectieuses vectorielles

Le poids indirect de données climatiques nouvelles sur la santé humaine et animale peut faire l'objet de veille, de prédiction, d'anticipation dans une perspective globale de prévention. L'exemple des maladies infectieuses à transmission vectorielle est à ce titre typique.

<u>À l'échelon de la France métropolitaine</u>

Une maladie vectorielle anthropo-zoonotique comme la leishmaniose cutanée ou viscérale, transmise par la piqûre de petites mouches tropicales ou subtropicales, les phlébotomes, était jusqu'alors rapportée sur le pourtour méditerranéen. En 2012, un foyer a été identifié dans le Jura français avec des cas humains chez des randonneurs, en contexte local d'infection chez le chien. Cette émergence atteste la migration du vecteur vers des zones jusqu'alors hostiles à la faveur de conditions climatiques devenues favorables.

<u>À l'échelon des pays du Nord</u>

La conjonction de transhumances aviaires, avec des espèces porteuses du virus West Nile, et de l'installation ou la pérennisation des moustiques piqueurs et compétents[12] pour la transmission de ce virus

8. Zoonose (ou Anthropo-zoonose) : maladie transmissible (ou exclusivement transmise) de l'animal à l'homme.

9. Arthropode : embranchement d'animaux, lignée des invertébrés à laquelle appartiennent les insectes.

10. Arthropode vecteur : arthropode hématophage qui assure, par un comportement spécifique, la transmission biologique (cycle indispensable de développement dans le vecteur) et active (le vecteur va jouer un rôle actif c'est-à-dire qu'il amène l'agent à un vertébré réceptif) des agents pathogènes d'un hôte vertébré donneur à un autre hôte vertébré réceptif.

11. Complexe pathogène : concept qui résulte de la coïncidence, dans un espace déterminé, d'un agent pathogène, de son hôte réservoir (milieu naturel, homme, animal), d'un mode de transmission (conditions climatiques, sociales, environnement, vecteur ou hôte intermédiaire) et d'individus réceptifs.

12. Compétence vectorielle : aptitude intrinsèque du vecteur à s'infecter sur un hôte vertébré, à assurer le développement d'un

a été associée à une expression épidémique de grande ampleur dans la ville de New York en 1999, et depuis dans tous les USA, et au maintien de foyers dans la région du delta du Danube en Roumanie. En Europe encore, la Grèce doit désormais compter avec la circulation des moustiques compétents pour la transmission du paludisme et depuis 3 ans avec la réapparition d'un paludisme autochtone.

À l'instar des données issues de l'expérience des pays baltes, l'épidémiologie de l'encéphalite européenne (verno-estivale) à tique (TBE) illustre l'implication de la place du changement climatique dans le complexe pathogène des anthropo-zoonoses de transmission vectorielle **(Figure 5)**.

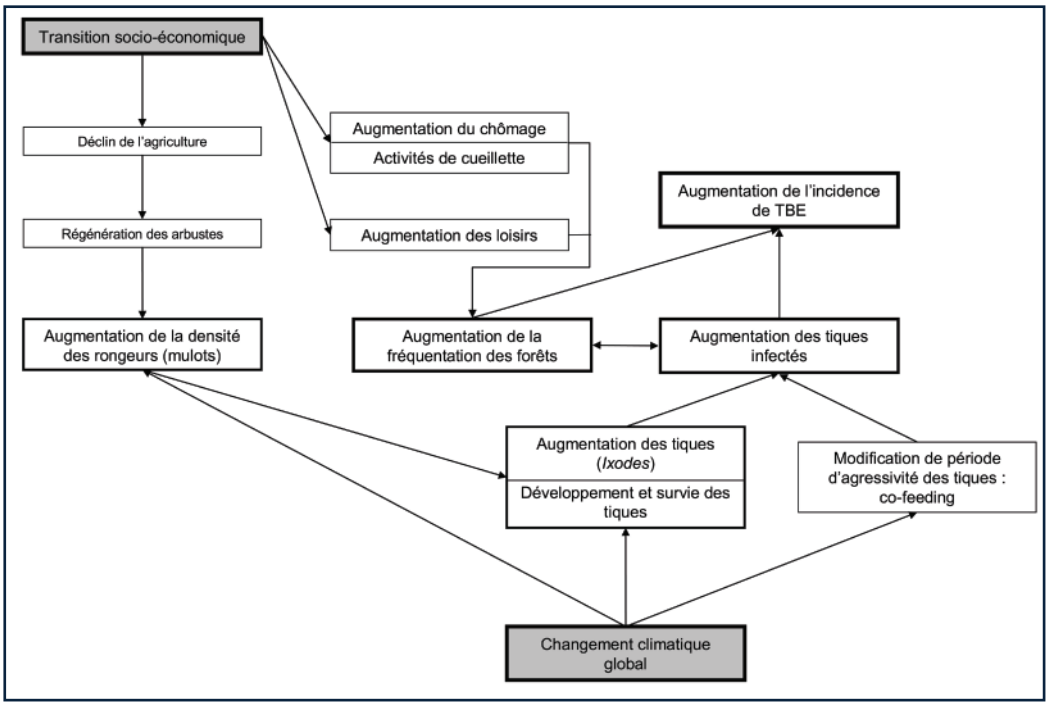


Figure 5 : *Schéma de la place du changement climatique dans le complexe pathogène des anthropo-zoonoses de transmission vectorielle. Exemple = Epidémiologie de l'encéphalite européenne (verno-estivale) à tique (TBE) dans les pays baltes (adapté d'après Randolph SE et al. [19]).*

Scénario et mesures de contrôle d'une maladie vectorielle émergente

Le risque d'installation d'une maladie vectorielle « nouvelle » renvoie à plusieurs conditions : (1) la présence du vecteur, (2) sa réceptivité (favorable à la transmission), (3) son infectivité (capacité à infecter) en contexte de (4) vulnérabilité d'une population (indemne et non-immune) dans laquelle (5) le pathogène est introduit. En d'autres termes, il faut un vecteur (présent et en abondance). Le vecteur doit piquer l'homme pour s'infecter (fréquence d'importation du pathogène en phase de circulation dans le sang) puis infecter. Le vecteur doit pouvoir survivre, dans des conditions environnementales devenues favorables, au-delà de la durée de développement du pathogène (interactions pathogène-vecteur).

Ainsi, les mesures d'anticipation et de contrôle d'une maladie vectorielle émergente au sein d'un espace géographique à risque regroupent : (1) le contrôle de l'introduction du vecteur (portuaire ou aéroportuaire, dans le cas d'un moustique-vecteur), ou de son aire d'extension vers le territoire (par voie terrestre, routière ou ferrée) ; (2) le contrôle de l'introduction d'un pathogène nouveau, compatible avec le vecteur ou co-adapté[13].

À l'échelon mondial, régional et national, ces mesures sont consignées dans le cahier des charges de la forme révisée du Règlement Sanitaire International (RSI 2005) [20]. Ce règlement, édicté par l'OMS,

agent pathogène et à transmettre cet agent à un autre hôte.

13. Co-adapté : pathogène et vecteur adaptés l'un à l'autre.

est entré en vigueur en juin 2007, ratifié par la France et transposé en droit français avec notamment un Décret paru en janvier 2013 pour sa mise en œuvre sur le territoire français et au niveau de ses régions [21]. Par ailleurs, ces démarches doivent impliquer une dynamique de mobilisation des professionnels intégrant également une dimension de démocratie sanitaire.

Sans mesures de prévention, l'infection du vecteur par le pathogène pourrait conduire à une urgence de santé publique de portée internationale (USPPI) à transmission vectorielle comme visée par le RSI **(Figure 6)**.

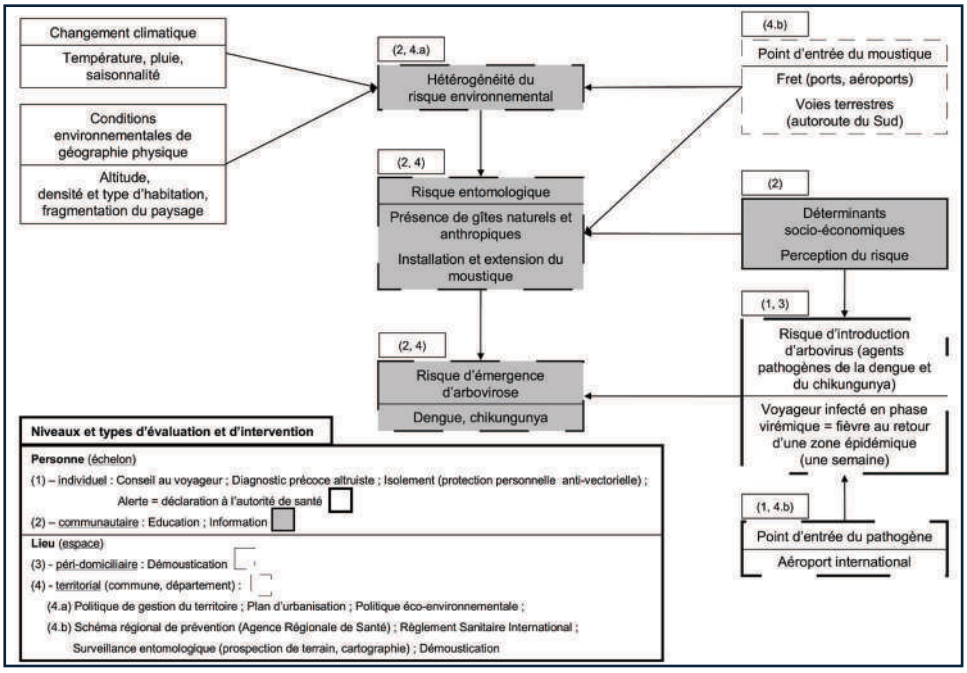


Figure 6 : *Changement climatique et déterminants de l'émergence d'arboviroses (dengue, chikungunya) transmises par Aedes albopictus sur la façade atlantique, 2013 (Matthieu MECHAIN & Denis MALVY).*

La Région Aquitaine et les infections vectorisées à l'aune du changement climatique

La Région Aquitaine, par sa situation géographique à la fois méridionale et constitutive de la façade atlantique, remplit les conditions géo-climatiques de risque vectoriel émergent en rapport avec des conditions favorables de réchauffement.

À titre d'exemple, la présence saisonnière d'une remarquable densité d'espèces aviaires en provenance d'Afrique de l'Ouest dans l'espace côtier atlantique, et possiblement porteuses de virus West Nile, et celle de moustiques adaptés à ce virus renvoient à une vigilance vis-à-vis de l'expression au moins sporadique de l'infection chez l'humain, même si ce risque reste pour l'heure théorique.

L'exemple du moustique tigre et des arboviroses d'importance humaine (dengue et chikungunya)

Un exemple plus avéré en terme de risque attendu est déterminé par les conséquences de la circulation du moustique *Aedes albopictus,* encore appelé « moustique tigre ». Il s'agit d'un moustique tropical invasif, agressif et nuisant, expansionniste et plastique[14]. D'origine forestière et d'Asie du Sud-Est, il emprunte facilement divers moyens de transport (pneumatiques, véhicules routiers) et les gîtes artificiels urbains constituent pour lui un environnement propice à son développement. Il est présent à l'état adulte et actif au cours des périodes chaudes de l'année en zone tempérée (mai à octobre). Il pond dans de nombreuses

14. Plastique : qui s'adapte facilement à un environnement nouveau.

petites collections d'eaux. Ses œufs résistent à la sécheresse et au gel et peuvent rester en quiescence[15] pendant plusieurs mois ou années dans les interstices de gîtes tels que les pneus usagés.

C'est par le transport maritime de ces derniers à destination de sites industriels d'Italie du Nord qu'il a été introduit depuis les années 1970 en région méditerranéenne. Il a ensuite poursuivi une extension durable de son aire d'implantation dans les départements français métropolitains des Alpes-maritimes (2004), de Haute-Corse (2006), de Corse du Sud et du Var (2007), des Alpes-de-Haute-Provence et des Bouches-du-Rhône (2010), du Gard, de l'Hérault et du Vaucluse (2011).

Aedes albopictus est un vecteur potentiel de plusieurs arboviroses[16] tropicales ou sub-tropicales, dont les deux principales, la dengue et le chikungunya, ne sont pas endémiques en France métropolitaine. En Europe du Sud, des épidémies de dengue transmise par un autre vecteur, *Aedes aegypti*, moins plastique et pérenne qu'*Aedes albopictus*, sévissaient jusqu'au début du siècle dernier.

Dans les faits, il existe un synchronisme saisonnier entre les épidémies d'outremer et l'été métropolitain (mai à octobre) lequel représente la période d'activité du moustique. Des voyageurs revenant de zones géographiques où sévissent ces infections arbovirales peuvent donc introduire les virus pathogènes dans les zones où le moustique est implanté.

Ainsi en 2007, des touristes infectés en Inde par le chikungunya et en phase virémique[17] à leur retour (5-7 jours après piqûre infectante) ont introduit l'arbovirus en Italie du Nord. Il s'en est suivi une épidémie de plusieurs centaines de cas dans la région d'Émilie-Romagne, au faciès entomologique permissif (environnement ayant permis la présence du moustique vecteur). En 2010, les territoires des départements français d'Amérique (DFA) ont connu une épidémie de dengue de grande ampleur. La même année en France métropolitaine, faits nouveaux, 2 cas de dengue et 2 cas de chikungunya autochtones ont été diagnostiqués à Nice (Alpes-Maritimes) et à Fréjus (Var).

La Région Aquitaine et l'émergence du risque vectoriel en 2013

S'agissant du scénario d'implantation (installation pérenne) d'*Aedes albopictus* en Europe entre 2013 et 2030 **(Figure 7)**, 3 facteurs sont déterminants et suffisants, tous relevant d'une dynamique tributaire du climat et de l'expression d'un réchauffement climatique : (1) une température moyenne annuelle supérieure à 11 °C ; (2) une température minimale moyenne du mois le plus froid supérieure à 0 °C ; (3) des précipitations moyennes annuelles supérieures à 500 mm/an.

En Région Aquitaine, ces conditions sont remplies, et l'observation entomologique a confirmé cette menace. Le moustique tigre a été détecté pour la première fois en 2011 dans deux aires d'autoroute du Lot-et-Garonne et de Gironde, rendant compte d'un transport passif dans les véhicules en provenance de zones où le moustique est implanté. En 2012, il a été à nouveau retrouvé dans ces départements et repéré dans celui des Pyrénées-Atlantiques. En Aquitaine, ce moustique est désormais considéré présent de manière contrôlée (niveau dit 0.b, sur une échelle de 5), conformément au plan anti-dissémination du chikungunya et de la dengue en métropole, déployé par la Direction Générale de la Santé depuis 2006 [22]. Les simulations entomologiques rendent attendu le passage prochain d'une partie la Région en niveau 1 (« *Aedes albopictus* implanté et actif »).

15. Quiescence : pause dans le processus de développement de l'insecte (dormance des œufs), résultant de conditions climatiques défavorables (saison hivernale).
16. Arbovirose : maladie provoquée par un arbovirus, virus transmis par un vecteur, appelé arthropode hématophage. Le terme arbovirus ne fait pas partie de la classification taxonomique des virus (ils rassemblent différentes classes de virus). Ce nom provient de la contraction de l'expression anglaise Arthropod-Born Viruses.
17. Phase virémique : période pendant laquelle l'agent pathogène viral est présent dans la circulation sanguine de l'hôte vertébré.

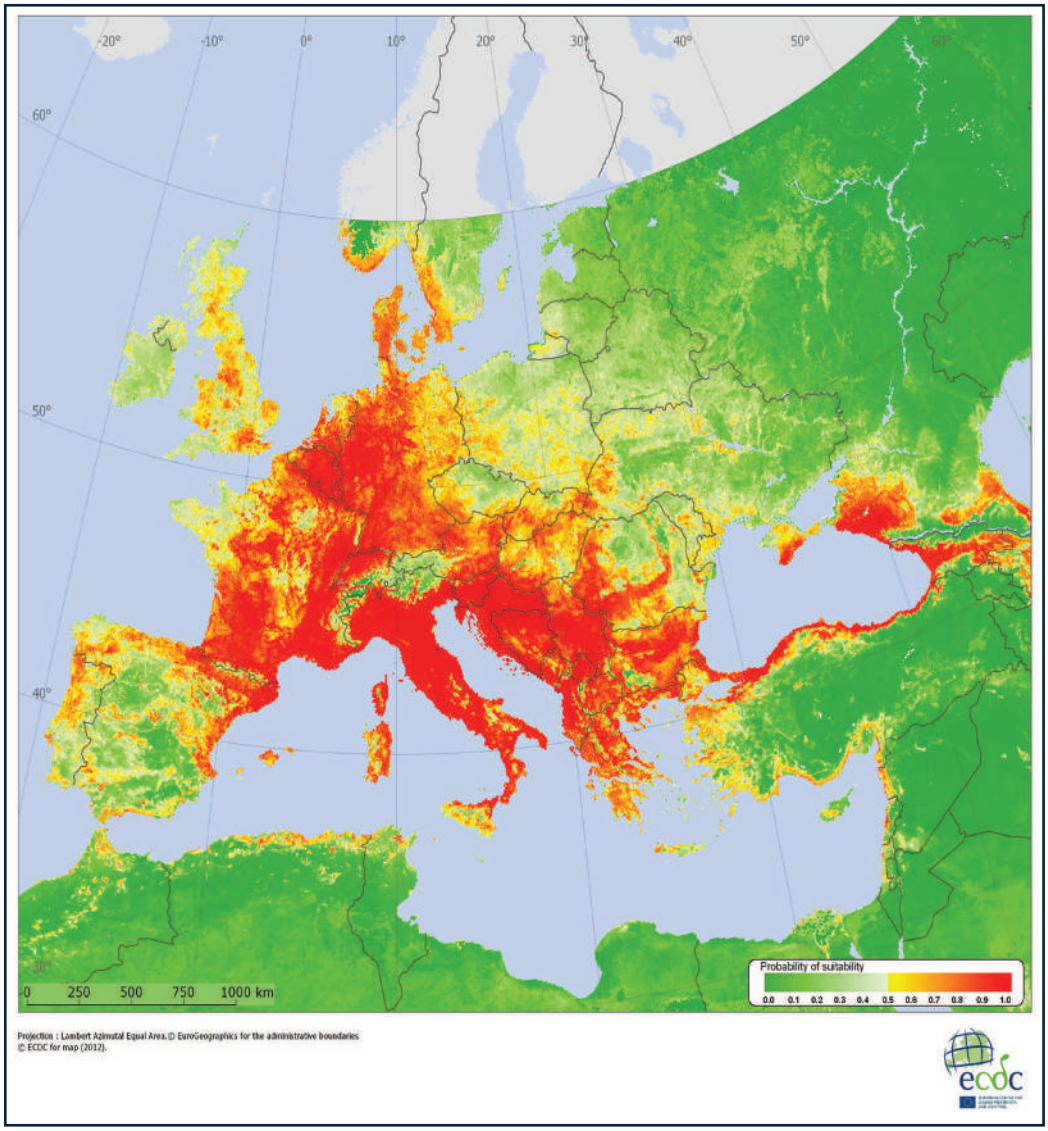


Figure 7 : *Extension possible d'Aedes albopictus en Europe entre 2010 et 2030 (source : European Centre for Disease Prevention and Control, D Stockholm: ECDC; 2009, http://www.ecdc.europa.eu [23]).*

La Région Aquitaine dispose d'un aéroport international desservant des zones géographiques d'endémie. Ce changement de niveau de risque implique, en particulier de la part du Centre hospitalier régional de référence (CHU de Bordeaux), la surveillance renforcée des cas fébriles suspects d'arbovirose (avec Déclaration Obligatoire au niveau du point focal de la Plateforme régionale de veille et d'urgences sanitaires, Agence régionale de santé-ARS/Cellule de l'institut de veille sanitaire en région-CIRE).

Par-delà le bénéfice direct pour le patient, un diagnostic précoce vise la prévention de la transmission autour des cas (suspects ou confirmés de phase virémique). Des mesures de protection personnelle des cas contre les piqûres de moustiques (non encore infectés) ainsi que la démoustication péridomiciliaire en situation de présence du vecteur s'inscrivent dans la prévention de l'émergence d'une arbovirose à propension épidémique dans la région. La construction d'un argumentaire visant leur mise en place renvoie non seulement à une présence du vecteur, mais aussi à des conditions climatiques (et saisonnières) de type verno-estival, permissives et favorables à sa multiplication **(Figure 6)**. L'application de ces mesures de gestion du risque à l'échelon individuel est parfois objet de débat et reste tributaire de l'adhésion des décideurs et de la population concernée.

En guise de commentaire : une nécessaire dynamique de prévention

Cette planification doit compter avec la consolidation de la surveillance pluri-disciplinaire et interactive (Sud-Nord, Nord-Sud et Nord-Nord), la lisibilité de l'expertise bio-clinique et de la référence locale et régionale (CHU de Bordeaux) et l'implication raisonnée des élus et des populations, visant une appréhension responsable et

bannissant la médiatisation d'une peur de circonstance face à un risque sanitaire désormais appréhendable et en partie contrôlable.

Dans le paradigme des maladies vectorisées, l'expérience atteste que le pire n'est pas toujours sûr (virus West Nile), mais que le probable est certain à moyen terme (dengue, chikungunya). Cette expérience pose le cadre de perspectives de recherche opérationnelle à l'échelon régional et européen. À ce titre, des cartes de probabilité de distribution d'*Aedes albopictus* (**Figure 7** ; exemple en fonction de conditions climatiques adaptées) couvrent le territoire de la France métropolitaine, mais elles semblent peu opérationnelles au niveau régional. Elles mettent peu en évidence l'hétérogénéité attendue au vu des facteurs environnementaux locaux qui impactent sur la distribution des vecteurs à des échelles fines. Pour améliorer le processus d'anticipation et de prévention de potentielles USPPI à transmission vectorielle, une dynamique de recherche transversale en santé-environnement est souhaitable et attendue dans la région.

Autres impacts

L'élévation des températures est par ailleurs susceptible d'impacter les populations par des phénomènes divers et complexes, aujourd'hui encore mal identifiés. Ainsi le retentissement néfaste sur les productions agricoles de certaines zones, ou encore la montée des eaux dans des régions côtières pourrait contraindre certaines populations à migrer vers d'autres zones d'habitat et/ou à modifier leurs activités. Les transformations culturelles, sociologiques et politiques qui pourraient découler de telles migrations ou changements nécessiteront des stratégies d'adaptation, plus difficiles à mettre en œuvre pour les populations les plus défavorisées, mais également pour les individus psychologiquement fragilisés. Une émergence de troubles anxieux ou de névroses peut être crainte dans un tel contexte.

Conclusion

Le changement climatique est donc susceptible d'impacter la santé humaine de diverses manières, directement dans la suite de catastrophes climatiques majeures ou de vagues de chaleur ou de froid mais aussi secondairement à la modification des milieux de vie et à l'augmentation de certaines expositions nocives (pollution atmosphérique, ultra-violets, pollens, toxines, maladies infectieuses…). L'importance de ces effets n'est pas aujourd'hui facilement appréciable, car elle dépend de paramètres divers encore mal connus. En premier lieu l'intensité des changements climatiques et la rapidité d'installation de conditions nouvelles, variables selon les scénarios aujourd'hui proposés, apparaissent comme des facteurs essentiels car conditionnant les capacités d'adaptation physiologiques, psychologiques, sociologiques et économiques des populations. Les conséquences sanitaires varieront selon les zones géographiques, et seront *a priori* plus marquées dans les régions de latitude extrême, dans les zones côtières concernées par la montée des eaux, et dans les pays aux économies les plus défavorisées, moins capables de prévenir ou de maîtriser les conséquences du changement. De plus, comme l'ont démontré des épisodes de canicule, de froid extrême ou de pollution atmosphérique déjà survenus, certains individus présenteront des risques sanitaires plus marqués du fait de fragilités individuelles (pathologies préexistantes, âges extrêmes…).

L'essentiel de la prévention des impacts sanitaires passe par l'ensemble des mesures visant à réduire la dérive de l'effet de serre. Dans cette perspective, la gestion de la part anthropique du changement climatique par la réduction des émissions de CO_2 reste un des défis incontournables posé devant le risque de rupture et de basculement biologique de l'ensemble des composantes de notre environnement. La prévention repose également sur le développement et le renforcement des connaissances et des actions de santé publique visant à mieux comprendre les impacts sanitaires, à les surveiller au sein des populations, à informer et à protéger des risques les individus les plus sensibles. Même si les paramètres économiques et politiques dominent aujourd'hui la question du changement climatique, la prise de conscience des citoyens concernant des risques pour la santé humaine doit permettre de percevoir le changement climatique non seulement comme une menace globale, ressentie comme lointaine et théorique, mais aussi comme une menace pour la santé, concrète et ancrée dans le quotidien. De cette manière, les enjeux sanitaires peuvent jouer un rôle moteur dans les changements de comportements individuels et collectifs et participer à infléchir les politiques à une échelle plus globale.



Éléments de synthèse





Réensablement et réaménagement de la plage de Camélie à Soulac-sur-Mer. Est-ce suffisant face à l'érosion littorale ? (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Chapitre 10 :

Bilan de l'étude : enjeux, questionnements et recommandations

I- Le changement climatique : une préoccupation réelle et actuelle pour l'Aquitaine

Cela fait désormais plusieurs décennies que le problème de la dangerosité des gaz à effet de serre est posé au niveau scientifique. Les émissions liées aux activités humaines ont fortement augmenté après la Seconde Guerre mondiale : pour le seul dioxyde de carbone (CO_2) produit par l'usage des combustibles fossiles, elles sont passées de 1 à 2 milliards de tonnes de carbone par an dans les années 1950, à 6 où 7 milliards de tonnes par an vers la fin du XX^{e} siècle, et à 9 milliards par an environ aujourd'hui. À cela s'ajoute la part due à la déforestation, soit 1 à 2 milliards de tonnes supplémentaires chaque année. La végétation et les océans ne sont en capacité de reprendre en temps réel qu'une moitié environ des quantités de CO_2 injectées dans l'atmosphère, au prix d'ailleurs de conséquences nocives telles que l'acidification croissante des océans. Faute de revenir à un seuil d'émission de l'ordre de 3 ou 4 milliards de tonnes par an, le CO_2 s'accumule de manière durable dans l'atmosphère : il faut un siècle environ pour que la moitié du CO_2 qui y est injecté à un moment donné en disparaisse. Les faits sont parlants : la concentration en CO_2 est passée d'une valeur préindustrielle de 270 ppmv (parties par millions en volume), valeur qui était restée presque inchangée depuis 10 000 ans, à une valeur désormais très proche de 400 ppmv. Le CO_2 n'est pas le seul gaz en cause : l'effet de son augmentation est presque doublé par celui des émissions de méthane, de protoxyde d'azote, de fréons, ou encore par l'augmentation de l'ozone des basses couches de l'atmosphère, un produit indirect des activités humaines.

Dès les années 1970, les premiers modèles climatiques ont montré que le réchauffement moyen de la surface de la planète pourrait atteindre plusieurs degrés sous l'influence d'un doublement de la teneur atmosphérique en CO_2, un chiffre alarmant qui a mis le monde scientifique en émoi. Le dernier réchauffement de quelques degrés que la planète ait subi est en effet le réchauffement moyen de 5 à 6 °C qui a accompagné la fonte de calottes de glace de plusieurs kilomètres d'épaisseur présentes il y a 20 000 ans sur l'Eurasie et l'Amérique du Nord.

Ces premières prévisions étaient déjà basées sur des calculs physiques : les gaz à effet de serre piègent le rayonnement infrarouge émis par la Terre et, dans un contexte de fort développement de la science spatiale, des milliers de chercheurs ont contribué à calculer l'effet radiatif de chaque molécule sur chaque longueur d'onde dans l'atmosphère terrestre.

L'effet de ces gaz est différé de quelques décennies : il faut que le réservoir thermique de la planète, – les premières dizaines de mètres supérieures de l'océan –, prenne le temps de se réchauffer (comme il prendra peut-être un jour le temps de se refroidir ?). Les rapports successifs du GIEC (en 1990, 1995, 2001 et 2007, le prochain est à paraître en septembre 2013 et en 2014), ont montré que les modèles récents, beaucoup plus complets, confirmaient le diagnostic et les prévisions des années 1970 ou 1980. Ils montrent aussi que progressivement le monde réel tend à évoluer en conformité avec ces

prévisions : aux fluctuations naturelles se superposent désormais des évolutions qui correspondent de manière très significative aux effets attendus des gaz à effet de serre.

Que peut-on craindre ? Le pire n'est jamais certain, mais nous sommes confrontés à la menace de changements possibles, plausibles, voire très probables, correspondant à autant de dangers que l'on doit chercher à anticiper. Un débat un peu inutile oppose parfois les tenants de l'« atténuation » de l'effet de serre, pour qui la seule vraie priorité est de réduire les émissions de gaz à effet de serre à ceux qui pensent que l'adaptation préventive aux effets du changement climatique est la seule issue. En fait les deux vont désormais de pair : l'évolution actuelle des émissions de gaz à effet de serre, qui continue de s'accélérer, oblige à un effort accru pour parvenir à la contenir. Une région comme l'Aquitaine se doit d'apporter sa contribution à l'effort collectif encore incertain, mais absolument nécessaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre. C'est à la fois un devoir, et aussi le plus souvent une protection nécessaire contre les risques importants d'augmentation future du coût de l'énergie. Une part majeure des plans Climat-Énergie est consacrée à cet effort. Mais l'Aquitaine doit aussi évaluer de la manière la plus lucide et précise possible, les risques environnementaux auxquels elle peut être confrontée dans les décennies à venir, et qui seront d'autant plus grands que l'effort international de limitation des gaz à effet de serre sera faible : les gaz à effet de serre d'origine anthropique qui circulent au-dessus de l'Aquitaine sont pour plus de 95 % d'origine étrangère et on ne peut ignorer leurs effets.

Si l'on suit cette logique on peut distinguer de manière grossière deux types d'évolution. Dans la première le réchauffement climatique reste modéré dans le siècle à venir, de l'ordre de 2 °C en moyenne annuelle globale à l'échelle de la planète. Mais il est désormais plausible, voire probable, que l'on n'en restera pas là et il est nécessaire d'envisager les conséquences d'une élévation de la température moyenne globale de l'ordre de 4 ou 5 °C. Les projections d'élévation du niveau marin sont également difficiles à préciser : elles dépendent d'une part de la dilatation des océans, d'autre part de la fonte des glaciers de montagne et de celles des grands glaciers polaires (Antarctique, Groenland). Les variations assez modestes publiées dans le dernier rapport du GIEC (quelques dizaines de centimètres de hausse en fin de siècle) sont remises en cause par la fonte apparemment plus rapide que prévue de l'Antarctique et du Groenland ; envisager alors un relèvement d'un mètre ou plus en fin de siècle relève d'une précaution nécessaire face aux éléments scientifiques disponibles aujourd'hui. De manière générale, nous n'avons pas cherché à envisager des scénarios extrêmes. Certains modèles vont au-delà, avec des réchauffements en fin de siècle de plus de 6 °C, des relèvements du niveau de la mer bien supérieurs à un mètre. Cependant, ces résultats dépendent de facteurs impossibles à prévoir avec exactitude, tels que l'évolution des ressources mondiales en hydrocarbures et leur usage. Nous n'avons donc pas cherché dans ce document à caractériser des risques réellement extrêmes, mais à caractériser ce que s'adapter à un réchauffement global de « quelques » degrés pourra signifier pour l'Aquitaine.

Comment donc analyser les impacts d'un réchauffement global de 4 ou 5 °C à l'échelle de notre région ? Le chapitre 1 est là pour rappeler la difficulté de passer de chiffres globaux à des évolutions plus locales. Nous savons que le réchauffement sera généralement plus fort sur les continents que sur les océans, donc plutôt plus fort en Aquitaine que pour l'ensemble de la planète et qu'il sera aussi marqué par des fluctuations naturelles qui diminuent sa prévisibilité. D'une manière qui peut paraître paradoxale, mais qui est en fait profondément logique, cette prévisibilité réduite correspond à des risques plus importants. Ainsi les modèles de Météo-France ou de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace)[1] simulent en Aquitaine des élévations de température pouvant atteindre 10 °C en moyenne estivale pour certaines années vers la fin du siècle – sans que l'on puisse dater de tels épisodes. Le réchauffement global pourrait aussi s'accompagner d'une forte diminution estivale des précipitations en Aquitaine, qui ne serait pas nécessairement équilibrée par des précipitations hivernales accrues. Mais ces évolutions dépendent des modes de circulations atmosphériques futures et d'autres scénarios futurs sont aussi possibles.

Nous sommes également conscients que l'impact du changement climatique est encore souvent difficile à dissocier des autres facteurs d'évolution de nos sociétés. La globalisation et la mondialisation

1. www.ipsl.fr

ont très largement favorisé la migration des espèces entre continents, et donc l'introduction d'espèces dont le caractère invasif peut être amplifié par le changement climatique. Les pressions et sollicitations portant sur les milieux et ressources biologiques se sont diversifiées en réponse aux nouvelles demandes énergétiques et alimentaires. Cette évolution elle-même a induit une intensification des méthodes de cultures et une demande accrue vis-à-vis de ressources telles que l'eau, qui risquent d'être limitantes dans le contexte du changement climatique. Enfin les variations démographiques en Aquitaine contribuent à changer les usages des terres, entre agriculture, forêt et espaces à vocation récréative. Toutes ces évolutions interagissent avec le changement climatique, et leurs effets et impacts ne peuvent souvent pas être distingués.

Ces grands changements vont constituer le nouveau cadre climatique de l'Aquitaine. C'est dans ce contexte que l'on peut tenter de décliner les principaux enjeux auxquels il convient dès maintenant de faire face, par une analyse la plus fine possible des conséquences attendues dans la région. Le changement climatique induit des risques qui lui sont propres et qui se superposent à d'autres facteurs de risques très différents : il peut s'agir d'autres problèmes environnementaux (maintien de la biodiversité, acclimatation d'espèces à cultiver pour l'agriculture) mais aussi de problèmes sociaux (démographiques, économiques, politiques). Les études que nous avons recensées sont parfois transverses à plusieurs domaines : par exemple la santé publique, la qualité de l'air, celle de l'eau. Elles peuvent au contraire être limitées à un milieu ou un enjeu particulier (par exemple l'agriculture, la forêt, les ressources halieutiques, le trait de côte, la montagne). Sans prétendre à l'exhaustivité, le but de cet ouvrage est de contribuer à démêler cet écheveau afin de mettre en évidence les vulnérabilités, les fragilités que le changement climatique pourrait induire à l'échelle régionale, et d'initier une réflexion plus approfondie sur les stratégies d'adaptation à envisager. En bonne démocratie, ces stratégies doivent être élaborées progressivement par les acteurs politiques et les décideurs, en concertation avec toutes les parties prenantes et les citoyens, et en coopération avec les régions voisines de l'Aquitaine. Ce travail collectif, qu'il est urgent de renforcer, doit aussi faire l'objet d'une veille permanente, de manière à être suffisamment réactif face à un diagnostic scientifique qui doit lui-même être actualisé de manière continue.

De manière cohérente, les recommandations contenues dans ce rapport consistent à pointer du doigt des problèmes qui méritent d'être anticipés, soit par des décisions rapides, soit par une phase de recueil de connaissances supplémentaires lorsque l'effort de recherche nécessaire ou le débat public n'existent pas encore au niveau adéquat.

II- Conclusions générales : mots clés et recommandations

Résumer sous la forme de quelques conclusions, près de 300 pages d'un texte scientifique pluridisciplinaire très riche, représente un défi presque impossible. Mais derrière les différents textes et les différentes réflexions qui constituent la matière de ce rapport, il existe des traits communs qui peuvent nous servir de guide. On peut les caractériser en trois mots – d'autres, un peu équivalents, seraient aussi légitimes – : complexité, urgence et adaptabilité.

Complexité

Les chercheurs rassemblés pour écrire ces textes proviennent de différents horizons, couvrent une gamme très large de disciplines, et mettent en évidence la richesse remarquable du tissu scientifique aquitain. Mais les différents problèmes traités sont interdépendants et de nombreuses études qui se situent à l'interface entre ces compétences ne conduisent pas à des conclusions simples et tranchées. Comment peut-on par exemple évaluer la qualité de l'air en Aquitaine ? Cette question, encadrée par des normes réglementaires de plus en plus strictes, se trouve à la croisée de questionnements scientifiques très différents : impacts directs des évolutions climatiques, choix de différents types d'urbanisme, impact polluant de diverses activités industrielles, des moyens de transport, mais aussi rôle de la forêt… Nous

verrons dans plusieurs cas que certaines des études nécessaires à la décision publique n'ont pour l'heure jamais été menées de manière directe. Quel est le rôle potentiel de la forêt des Landes – ou des différentes pratiques agricoles – sur les microclimats régionaux ? Quel peut être l'impact d'une salinisation des zones estuariennes – au plan de la biodiversité, au plan social, au plan économique ? Il ne s'agit là que d'exemples, et d'autres seront présentés dans les paragraphes suivants.

Face à cette complexité, nous avons conscience de l'aspect partiel de notre étude, volontairement limitée au champ de la connaissance à caractère universitaire (voir l'introduction). Certains enjeux transversaux dépassent le domaine des compétences rassemblées pour cet ouvrage. C'est par exemple le cas des problèmes de conservation des espèces animales et végétales. C'est aussi le cas des problèmes d'urbanisme et de développement des villes, celles-ci étant confrontées à une double problématique qui fait d'elles des sources d'émissions de gaz à effet de serre, en même temps que des zones particulièrement vulnérables à des épisodes de canicule ou d'inondation. C'est enfin le cas des ressources régionales en énergie. Hydroélectricité, nucléaire, solaire, éolien, bois, biocarburants : tous dépendent des aléas climatiques, mais ceci réclame une analyse qui dépend de compétences technologiques que nous n'avons pas rassemblées ici.

Urgence et adaptabilité

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, nous l'avons rappelé plus haut, est un phénomène récent, contemporain du développement industriel, qui produit des effets discernables depuis une vingtaine d'années environ. Comparées à la part des évolutions actuelles que l'on peut identifier comme les premières conséquences possibles ou probables de l'augmentation des gaz à effet de serre, les changements à venir pourront être beaucoup plus importants et se développer à un rythme beaucoup plus rapide. Par ailleurs, tous ne seront pas prévisibles dans le détail. Même dans un climat qui serait devenu généralement plus chaud et plus sec, l'Aquitaine continuera de souffrir par moments d'hivers rigoureux, d'étés pluvieux, voire très pluvieux : l'évolution se marquera avant tout par la modification progressive de la fréquence ou de l'intensité de ces événements. Des études montrent par exemple déjà qu'à circulation atmosphérique identique, les hivers les plus rigoureux d'aujourd'hui le sont moins que ceux d'autrefois. Mais le développement de situations dommageables, qu'il s'agisse d'épisodes de sécheresse prolongée, ou de la prolifération de certaines espèces invasives (qui peut être favorisée par des causes multiples, allant de l'absence de gel l'hiver aux transports par avion), ira inévitablement de pair avec des événements inattendus auxquels il conviendra de s'adapter.

La conclusion la plus importante de cette étude est donc probablement, qu'il faut se préparer à penser différemment par rapport à un grand nombre de situations, dans un grand nombre de secteurs. Il faut s'approprier cette idée d'un futur différent. Et il faut le faire avec une réelle réactivité, en assimilant au mieux l'information disponible, qui s'enrichit constamment, et en prêtant attention aux incertitudes du diagnostic, qui constituent autant de risques additionnels.

Ceci nous amène à proposer quelques recommandations initiales.

La nécessité d'assurer la dissémination de l'information produite par ce groupe de réflexion

Ce rapport a été rédigé par des scientifiques, à destination des autorités du Conseil régional, mais aussi à destination de lecteurs qui vont bien au-delà du seul domaine scientifique. Nous souhaitons donc qu'il soit diffusé auprès des décideurs aquitains, auprès des associations, des élus, des assemblées territoriales, du grand public, en clair auprès de l'ensemble des parties prenantes. C'est l'ensemble des Aquitains qui est concerné et ils doivent être informés des évolutions à venir grâce à un accès facile à l'ensemble du texte. Ce sont les retours de ces lecteurs qui permettront de l'enrichir et de l'actualiser.



La vallée de la Dordogne, vue sur le château de Beynac (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

La nécessité de mettre en place un comité scientifique permanent

Un groupe d'experts dédiés devra être mis en place de manière pérenne. Il aura pour mission d'actualiser régulièrement le présent rapport, qui a été principalement élaboré pendant l'année 2012. Il apportera ainsi son expertise de manière continue à la Région qui pourra aussi lui confier l'étude de problèmes plus spécifiques que ceux que nous avons cherché à aborder ici de manière très générale. Il pourra compléter ce rapport dans les domaines que nous avons seulement esquissés (conservation, urbanisme, énergie). Son travail devra être conduit en lien avec d'autres structures existantes, publiques ou privées.

La nécessité d'étudier en continu certains processus/phénomènes permettant un suivi environnemental de l'Aquitaine

L'étude du climat et de ses conséquences s'intéresse à des évolutions qui sont ou seront sensibles à l'échelle de plusieurs décennies. Les grands organismes internationaux, les agences spatiales, ont mis en place un suivi organisé de « variables climatiques essentielles » destinées à accompagner l'évolution de l'environnement global de la planète. Les Instituts du CNRS, l'Institut National des Sciences l'Univers, l'INEE, ont mis en place, en lien avec leurs tutelles ministérielles, des systèmes d'observations pérennes, qui ont un objectif précis en matière de recherche (par exemple, l'observatoire SOMLIT). Un effort d'observation pérenne est également effectué dans des organismes aux missions plus spécifiques : IFREMER, Météo-France, INRA, IRSTEA, Agences de Bassin… La Région Aquitaine doit développer une capacité à rassembler, croiser et analyser ces informations, et à déterminer quelles sont les données supplémentaires qui doivent aussi faire l'objet d'un suivi pérenne en fonction des intérêts régionaux. La création récente d'un laboratoire d'excellence (LabEx COTE), regroupant une grande partie des partenaires institutionnels en charge des recherches sur l'environnement en région Aquitaine, et dont les travaux sont focalisés vers la réponse des écosystèmes au changement climatique, devrait contribuer à coordonner ces efforts. Il devrait permettre d'organiser et gérer les données relatives à l'évolution des milieux, de leurs ressources biologiques et de leurs services écosystémiques. Au-delà des efforts des organismes scientifiques, les dispositifs de veille et d'actualisation des connaissances doivent également tirer parti des expertises et de l'expérience (professionnelle, citoyenne, personnelle) de l'ensemble des acteurs socio-économiques de la région.

La nécessité de repenser les modes de gouvernance

Les problèmes émergents liés au changement climatique nécessitent de repenser certains modes de gouvernance parce qu'ils impliquent un renforcement des dépendances interterritoriales ou intersectorielles, par exemple de type urbain/rural, maritime/terrestre, ou encore à l'interface entre différents écosystèmes, et de manière générale de type amont/aval dans tous les systèmes d'exploitation des ressources naturelles. Il est de ce point de vue nécessaire de porter une attention particulière aux conditions extrêmes pouvant conduire à des points de rupture, que le changement climatique peut provoquer au travers d'épisodes allant bien au-delà des évolutions moyennes, tels le cas d'inondations importantes, de submersions marines, de sécheresses, d'épidémies, de pics de pollution. Cette tâche est rendue à la fois difficile et nécessaire par les incertitudes et controverses qui entourent les impacts du changement climatique. Dans le cadre régional, repenser les modes de gouvernance pour mieux s'adapter au changement climatique, signifie donc avant tout créer des lieux efficaces de partage d'information et de débats, qui dépassent le seul cadre du comité d'experts mentionné plus haut, et permettent une mise à jour explicite des enjeux, nécessaire pour conduire à des mécanismes d'arbitrage et de compensation.

III- Conclusions particulières

Nous rassemblons ici des conclusions sectorielles, concernant des domaines spécifiques (par exemple le domaine de la montagne) ou bien des préoccupations relativement focalisées, même si elles

s'articulent avec un très grand nombre d'autres études (par exemple la qualité de l'air ou la gestion de l'eau). Dans ce qui suit, nous n'avons pas cherché à suivre le plan du rapport de manière stricte. Chaque paragraphe essaie d'indiquer quelles décisions pourront devenir nécessaires et quels sont les débats à initier.

Évolution climatique et évolution du vivant

La diversité des espèces vivantes constitue très certainement le patrimoine le plus important que nous nous devons de conserver au cours des décennies ou siècles à venir. L'évolution de ces espèces dépend de facteurs multiples, mais le climat joue un rôle important, et le réchauffement déjà observé – de l'ordre d'un degré sur les régions continentales – est suffisant pour avoir un impact perceptible, que l'on peut noter au niveau des dates de vendange ou de floraison, ou de débourrement des arbres par exemple. Les réponses adaptatives des espèces demeurent très largement méconnues. Quelques exemples peuvent illustrer différentes facettes des problèmes posés. Les observations rétrospectives menées au cours des dernières décennies ont permis de déceler des migrations du chêne vert le long de la côte atlantique ou du frêne en altitude dans les Pyrénées. Les espèces vivantes constituent même un marqueur privilégié de la variabilité de notre environnement dont elles intègrent les effets sur des durées qui peuvent être importantes, de plusieurs semaines à plusieurs décennies. L'Aquitaine voit comme partout se superposer des causes climatiques et non climatiques à l'évolution du monde vivant. Les accidents des pétroliers Erika et Prestige dans le golfe de Gascogne ont eu un impact notoire sur les oiseaux marins, et leurs effets sur l'environnement ne peuvent être traités séparément des évolutions océano-climatiques actuelles. Les lieux de réchauffement ponctuel des eaux, par exemple lorsqu'elles servent au refroidissement d'une centrale nucléaire, constituent des zones « réservoirs » d'espèces thermophiles, espèces qui sont de plus en plus capables de migrer vers le milieu naturel en raison du réchauffement climatique des eaux. La pêche, les modifications du littoral, du domaine montagnard, de la forêt ou des pratiques agricoles sont autant de contributeurs potentiels aux changements de la biodiversité que nous avons abordés dans ce rapport sous l'angle limité de leur rapport avec le changement climatique.

Dans le contexte du réchauffement global, plusieurs problèmes nouveaux se posent. Que signifie la conservation des espèces (dans les parcs ou réservoirs), si les espèces les mieux adaptées au climat ne sont plus toujours les mêmes ? Doit-on accueillir les espèces nouvelles, retenir les espèces qui tendent à migrer ? Il est nécessaire de réfléchir au problème général de la gestion des stocks, des échanges entre les systèmes, du suivi d'espèces indicatrices et de manière générale de la préservation des réservoirs d'espèces dont il faudra repenser la mission. Il peut aussi être nécessaire d'introduire des espèces nouvelles (nécessaires à l'équilibre d'un écosystème), d'assister la migration de certaines autres.

En ce qui concerne les ressources exploitées par la pêche, plusieurs contraintes liées au changement climatique demandent à être étudiées. Certaines sont d'ordre opérationnel : les techniques et usages de pêche doivent être mis en cohérence, et adaptés à un coût de l'énergie qui risque d'augmenter. Certaines concernent la régulation de l'exploitation de ressources qui ne sont pas toujours renouvelées. Si l'on veut limiter l'empreinte écologique de l'activité de pêche sur des stocks dont l'affaiblissement peut être augmenté par les effets du changement climatique, il faut être attentif à la préservation des habitats essentiels et au maintien de la connectivité entre ces habitats, un problème particulièrement sensible pour les espèces amphihalines qui pénètrent dans les estuaires puis les rivières. Le Centre de Ressources National donne un cadre à cette action :

> *La Trame verte et bleue est un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques identifiées par les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE), ainsi que par les documents de l'État, des collectivités territoriales et de leurs groupements. Elle constitue un outil d'aménagement durable du territoire. La Trame verte et bleue contribue à l'état de conservation favorable des habitats naturels et des espèces et au bon état écologique des masses d'eau.*[2]

2. Voir la référence : www.trameverteetbleue.fr

Dans tous les cas une attention particulière doit être portée aux milieux considérés comme particulièrement vulnérables tels que les estuaires de la Gironde et de l'Adour ou encore le bassin d'Arcachon.

De manière plus générale, nous avons constaté que plusieurs obstacles subsistent quand il s'agit d'évaluer l'évolution de la biodiversité à l'échelle régionale : la rareté des travaux permettant de prédire l'évolution d'une espèce donnée, le manque de données sur des durées longues, l'insuffisance des modélisations aux échelles adaptées. Ces recherches doivent être développées, en lien avec les organismes et associations qui traitent des problèmes de conservation et de gestion des ressources biologiques. Les problèmes d'adaptation et d'évolution concernent non seulement les communautés présentes dans les espaces à but conservatoire, mais également la biodiversité dite « ordinaire ». Nous avons évoqué au paragraphe précédent la nécessité d'un suivi à long terme de paramètres environnementaux : la définition d'indicateurs pertinents pour évaluer l'évolution de la biodiversité est une étape particulièrement importante de ce processus. Le suivi de paramètres environnementaux doit nécessairement être couplé à celui de la diversité des espèces présentes dans les écosystèmes. Pour le milieu marin par exemple, cela intègre la capacité d'observer de manière suivie (temporellement et spatialement) l'arrivée d'espèces nouvelles, dont celles qui ont une affinité tropicale.

La diversité biologique est vue de prime abord comme un patrimoine à conserver, dont les méthodes de conservation sont remises en cause par le changement climatique. Mais elle doit aussi être considérée comme une assurance pour l'avenir dans un contexte d'incertitude économique et écologique. L'évolution des espèces et leur capacité d'adaptation à de nouvelles conditions environnementales dépendent étroitement du niveau de diversité actuellement présent dans les écosystèmes. Il est donc nécessaire de gérer cette diversité dans cette perspective, à tous les niveaux hiérarchiques et à toutes les échelles spatiales, depuis les écosystèmes entiers jusqu'à la diversité génétique à l'intérieur des espèces. Très concrètement, ce paradigme appelle à reconsidérer les systèmes de cultures (agriculture ou sylviculture) en y introduisant la nécessaire diversité en termes d'espèces ou de variétés cultivées.

L'air et l'eau en Aquitaine

L'air

La notion de qualité de l'air est souvent ambiguë et mal comprise. Certains composés atmosphériques introduits par les activités humaines ont un impact négatif bien connu sur la santé humaine (le monoxyde de carbone, certains oxydes d'azote). Certains autres composés ont quant à eux un impact bien connu sur l'équilibre radiatif de la planète : ce sont les gaz à effet de serre à longue durée de vie atmosphérique, au premier rang desquels on peut citer le CO_2, ou le méthane. Le terme de pollution est souvent appliqué à l'un ou l'autre de ces effets, entraînant une certaine confusion au niveau des débats publics. Cette confusion n'est malheureusement pas facile à éviter car nombreux sont les polluants qui ont à la fois un impact sanitaire et un impact climatique, illustrant ainsi le fait que climat et la qualité de l'air sont intimement liés. C'est notamment le cas de l'ozone troposphérique et des particules submicroniques.

La complexité des enjeux ne s'arrête pas là : la pollution atmosphérique peut être transportée à des échelles régionales ou globales selon le temps de vie atmosphérique des polluants. Les composés émis ou formés en Aquitaine peuvent donc avoir un impact au-delà de notre région et la qualité de l'air en Aquitaine peut en retour être impactée par des polluants transportés sur de longues distances, par exemple trans-océaniques.

L'évolution de la qualité de l'air en Aquitaine est ainsi largement dépendante des actions menées au niveau national, mais aussi aux niveaux européen et mondial, puisque réduire les émissions de gaz polluants est la stratégie la plus évidente d'amélioration de la qualité de l'air – même si elle est moins efficace quand il s'agit de polluants secondaires, c'est-à-dire de produits indirects des émissions, comme

l'ozone ou certains aérosols secondaires. Ce contexte global crée une situation difficile : l'Aquitaine va devoir s'adapter préventivement à des réglementations qu'elle n'aura pas choisies, qui seront certainement plus contraignantes, et dépendront de pollutions qu'elle ne maitrisera pas…

Mais il existe aussi des particularités et un contexte plus régional. Il tient à l'émission de composés spécifiques en lien avec le massif forestier des Landes. Mais la détérioration de la qualité de l'air peut aussi être corrélée à des situations anticycloniques prolongées pendant l'été (comme en 2003), situations auxquelles l'Aquitaine pourrait être particulièrement exposée dans le futur. Les émissions locales de polluants restent alors piégées près du sol, pouvant favoriser une formation accélérée d'ozone. En 2003, la moitié environ des cas de mortalité recensés en France ont pu être attribués à la dégradation de la qualité de l'air, plutôt qu'à l'effet direct de la canicule, par déshydradation. C'est donc probablement dans le domaine de l'adaptation de l'urbanisme à des situations météorologiques de ce type, que le problème de la qualité de l'air se posera à l'avenir de la manière la plus sensible.

Les eaux superficielles

Les exercices de simulation du changement climatique rappelés au chapitre 1 prévoient une élévation globale de la température du sol, et donc de la température des eaux de surface, une modification des régimes de précipitation, une perturbation de la fréquence et de l'intensité de certains événements extrêmes (tempêtes, sécheresses plus ou moins prononcées selon les régions). Tout ceci peut impacter significativement le fonctionnement des bassins versants et les régimes hydrologiques des eaux de surface.

Des années plus fréquemment marquées par des précipitations réduites font partie des risques futurs auxquels l'Aquitaine est confrontée. Cela se traduira inévitablement par une réduction des débits des rivières. Dans ce contexte, la gestion des étiages va devenir un des enjeux difficiles des décennies à venir. Parallèlement, les risques de concentration de la pollution seront accrus et nécessiteront un suivi en continu très minutieux à l'échelle des bassins-versants, et donc au-delà des frontières administratives de la région Aquitaine. La baisse des débits pourra aussi induire une détérioration de la qualité des rivières par eutrophisation. Un enjeu majeur des décennies à venir sera donc clairement la maîtrise des dangers menaçant la qualité de l'eau potable, et de manière plus générale la disponibilité future en eau douce pour des usages multiples. La régulation des débits, que ce soit par la réduction de la demande ou la création de nouvelles ressources, devient une question cruciale, qui est d'ores et déjà abordée à l'échelle du bassin et impose une approche collective. De manière générale, une décroissance de la disponibilité en eau posera des problèmes de partage, et il convient de poursuivre une large réflexion sur les usages de l'eau, les modes d'irrigation ou d'arrosage économes en eau, ou l'adaptation *via* le choix des cultures adéquates.

Un relèvement du niveau de la mer de quelques dizaines de centimètres (ou plus) posera aussi un problème au niveau du littoral et des estuaires. La marinisation des nappes phréatiques peut devenir critique, et dans l'estuaire de la Gironde, la remontée du bouchon vaseux très à l'intérieur des terres devrait poser des problèmes, par exemple de sous-oxygénation dans les zones urbaines. Mieux évaluer ces risques réclame des études plus approfondies, et il apparaît particulièrement important de mieux comprendre les impacts en matière de toxicité, en lien d'une part avec l'évolution de paramètres généraux comme la salinité ou la température, et d'autre part avec les changements métaboliques, physiologiques des différents organismes. De manière générale, le travail que nous avons mené sur le domaine de l'eau en Aquitaine a clairement mis en évidence un manque de connaissance préoccupant, qui est dû en particulier au nombre limité de spécialistes travaillant sur les enjeux régionaux, surtout dans le domaine de la modélisation.



Cours d'eau souterrain en Pays Basque, Pyrénées-Atlantiques (© LGPA-EEE, Université de Bordeaux 3).

Les nappes d'eaux profondes

Le changement climatique envisagé aura des impacts directs et induits sur les ressources en eaux souterraines en Aquitaine, où elles fournissent environ 60 % de la totalité des volumes d'eau prélevés. L'ampleur de ces impacts est assez directement corrélée à la disponibilité de la ressource en eau de surface, en fonction des différents types d'usages (alimentation et eau potable, usage agricole, usage industriel). Une disponibilité moindre des ressources de surface se traduirait par une augmentation au moins équivalente des prélèvements dans les eaux souterraines et donc par une plus grande dépendance de l'Aquitaine vis-à-vis des eaux souterraines.

Ainsi, quelle qu'en soit l'échéance, dans le cadre du changement climatique la question de l'évolution des ressources en eaux souterraines apparaît comme essentielle. Des études concernant le développement d'outils de gestion dynamique de ces ressources sont déjà en cours, mais il est souhaitable d'approfondir la réflexion sur la disparité des réserves, leur réponse au prélèvement, leur gestion, sur les conflits d'usage. Cela nécessite en particulier de mieux connaître les aquifères de grande profondeur, de mieux appréhender les aspects de reconstitution et de recharge (éventuellement artificielle) de ces ressources profondes, de mener des études quantitatives et qualitatives sur le couplage entre eaux superficielles et souterraines, et finalement de mieux appréhender le fonctionnement futur des systèmes « nappe/rivière » largement répandus dans les vallées alluviales d'Aquitaine.

La qualité de l'eau

Il y a désormais consensus sur le fait que le changement climatique peut provoquer une diminution de la qualité des eaux. Cela est dû à la conjonction de deux effets : la quantité d'eau disponible risque d'aller en diminuant, alors que la demande devrait augmenter. Cette évolution aura une répercussion à la fois sanitaire et environnementale.

Un des enjeux majeurs des prochaines décennies sera donc de développer une bonne appréhension du problème des pollutions aquatiques en lien avec les usages, l'occupation des sols, et les modes de consommation, et en couplant pressions rurales, urbaines et industrielles. Il sera primordial de bien cerner les sources des contaminants affectant les milieux aquatiques, pour les diminuer, voire les supprimer, ou bien d'adapter les traitements de réhabilitation et de dépollution au plus près de ces sources. Il conviendra également d'approfondir nos connaissances des sources de contaminants d'un point de vue qualitatif et quantitatif, et en particulier des processus de formation et d'évolution des contaminants chimiques.

Le changement climatique affectera par exemple les transports atmosphériques, ainsi que les partages entre les phases dissoute et particulaire ou les processus de photodégradation. Cela signifie qu'il faudra progresser dans la connaissance des phénomènes de transport, de distribution inter-compartiments (air-eau-sol-biote), ou encore dans celle des processus de formation et de transformation des contaminants. Il sera aussi nécessaire de préciser l'impact toxique des contaminants en lien avec l'évolution des paramètres comme la salinité, la température, l'oxygénation, ou encore en lien avec les changements métaboliques et physiologiques des différents organismes aquatiques.

Au bout du compte, les décideurs aquitains seront probablement amenés à réglementer les flux de contaminants émis dans le milieu aquatique.

Les menaces sur les régions littorales et estuariennes

Les littoraux sableux et rocheux aquitains sont modelés et évoluent en permanence principalement sous l'action de marées et de houles de fortes intensités. Cet environnement est donc soumis à de forts aléas naturels tels que l'érosion et la submersion marine. Ces phénomènes ont des conséquences sociales et économiques de plus en plus importantes car le littoral subit une pression démographique et une urbanisation croissante, liées en particulier au développement de l'économie des loisirs et du tourisme.

Ces risques nécessitent d'être réévalués dans le cadre du réchauffement climatique du fait de l'élévation attendue du niveau marin et du changement de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes. Dans ce contexte il est essentiel de mieux caractériser, au niveau de l'Aquitaine, les forçages hydrodynamiques, principalement ceux qui sont associés à la houle et à la marée, et leurs impacts sur l'évolution du littoral. Pour mieux caractériser le bilan des apports de sédiments qui conditionne l'évolution du littoral aquitain, il est nécessaire de disposer de davantage d'information concernant les stocks sableux disponibles sur le plateau continental, et surtout de mieux suivre l'évolution morphologique des côtes à fréquence élevée, mensuelle, en prenant en compte l'observation d'événements exceptionnels comme les tempêtes. Ce suivi est possible : il demande la mise en œuvre d'observations régulières, associant des mesures par lidar et le développement d'un modèle prédictif de l'évolution du trait de côte à l'échelle de l'Aquitaine.

Beaucoup de travaux scientifiques indiquent aussi qu'une montée du niveau marin atteignant un mètre en 2100 est un scénario possible. Caractériser l'impact d'un tel relèvement sur le trait de côte aquitain (y compris dans le domaine des estuaires) demande un travail important, utilisant des techniques de bathymétrie précises, la caractérisation de la topographie et des bâtis proches du littoral, là aussi en association avec l'usage de modèles. Ces études conserveront une part d'incertitude : si les modèles hydrodynamiques en milieu littoral sont assez fiables à moyenne échelle, en revanche il est nécessaire d'améliorer leur capacité à décrire les processus de franchissement et de submersion. Mais il est urgent de mettre ce travail en œuvre car il constituera un élément central du débat à mener avec les parties prenantes, pour déterminer les options à adopter vis-à-vis des zones menacées. Comment associer des mesures de repli stratégique ou de relocalisation des activités avec la construction d'ouvrages de défense ; faut-il favoriser le retour de certaines aires à l'état initial de zones humides protégées (dépoldérisation) ? Dans tous les cas la décision finale demandera une large anticipation.

Impacts sur le milieu montagnard

Les différents massifs montagnards aquitains sont des milieux caractérisés par une grande hétérogénéité de paysages et d'activités : eau, neige, forêt, élevage, espaces protégés – Parc National –, exploitation de l'énergie hydroélectrique. La vulnérabilité aux risques climatiques peut donc y prendre des formes multiples selon les enjeux considérés, et elle y sera généralement forte, en particulier s'agissant de la végétation et des cours d'eau. L'altitude est un facteur majeur : 1 degré de réchauffement se traduit par un déplacement vertical des isothermes pouvant aller de 100 mètres (climats secs) à 160 mètres (climats humides). Sachant que le réchauffement sur l'Aquitaine devrait être plus important que le réchauffement global moyen, on imagine le bouleversement majeur qu'impliquerait en fin de siècle un réchauffement global de 4 à 6 °C. Les massifs béarnais, où la biodiversité comme les socio-écosystèmes s'étalent sur une plus grande gamme d'altitude que les montagnes basques, seront particulièrement sensibles au changement.

En ce qui concerne la biodiversité, le processus de thermophilisation (le fait que les espèces à preferendum thermique froid disparaissent ou déclinent, que les espèces à preferendum thermique chaud se développent et que la distribution de celles-ci tend à suivre le déplacement des températures) et de manière générale les différentes formes de changements dans la distribution spatiale des espèces animales et végétales (impliquant la disparition possible de certaines d'entre elles) constituent des défis marquants. Ils doivent être étudiés en synergie avec des contraintes liées aux modes de gestion, par exemple les obstacles à la migration d'espèces liés la régulation des cours d'eau. Le changement climatique va accentuer l'énorme pression anthropique qui pèse déjà sur la viabilité de certaines espèces endémiques, emblématiques ou d'intérêt patrimonial. C'est le cas, dans le domaine des gaves et des nives, du desman des Pyrénées, de la grenouille des Pyrénées, ou du saumon atlantique. Afin de hiérarchiser les priorités d'action, il conviendrait d'établir une liste des espèces vulnérables au changement climatique en Aquitaine.

Plusieurs activités sensibles vont probablement demander des décisions. Les plus susceptibles de subir les effets du changement climatique et de connaître de profondes mutations sont le tourisme

hivernal, l'exploitation forestière, le pastoralisme. Il paraît illusoire de maintenir l'activité de l'ensemble des stations de ski de manière durable sous la forme actuelle, ce qui oblige à réfléchir dès maintenant à la mise en place d'activités complémentaires. La gestion paysagère des montagnes réclame aussi une réflexion dédiée.

Un effort de recherche est nécessaire et, en complément des travaux de modélisation déjà entrepris, toujours à poursuivre, il est primordial de construire des projets expérimentaux de longue durée dans des contextes écologiques diversifiés, en permettant ainsi la promotion de recherches concertées, pluridisciplinaires, basées sur des observations de terrain. Mais le travail doit aller plus loin. Un défi supplémentaire est de ne pas s'en tenir à suivre et documenter scientifiquement les bouleversements structurels et fonctionnels en cours – par exemple au travers d'Observatoires de la biodiversité montagnarde aquitaine ou pyrénéenne (cf. § sur l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique). Il faut aussi en anticiper les évolutions, établir les stratégies susceptibles de diminuer les impacts, et ceci en impliquant les différents acteurs institutionnels, politiques et de la société civile.

L'agriculture : des contraintes nouvelles ?

L'agriculture en Aquitaine sera soumise à un ensemble de contraintes de natures diverses : températures plus importantes, modification du contexte hydrique, avec la possibilité d'années sèches plus nombreuses (mais aussi d'orages plus intenses), risques sanitaires modifiés avec l'apparition possible d'espèces invasives et de risques épidémiques nouveaux. Ces risques ne sont pas propres à l'Aquitaine, et la région devra chercher à tirer bénéfice de solutions étudiées au niveau national et international.

Un premier ensemble de solutions est de nature agronomique, avec un enjeu majeur qui est de préserver le potentiel agricole, en permettant une réduction des besoins en eau d'irrigation. Pour les grandes cultures en général et le maïs en particulier, il sera nécessaire de mettre en œuvre des variétés plus résistantes, voire de changer d'espèces cultivées. Une réflexion sérieuse sur les types d'agriculture adaptés et le lien production-commercialisation devra être conduite pour maintenir le tissu économique. La question de l'avenir de l'irrigation devra être posée explicitement, quels que soient les types de culture, et les choix devront être établis en tenant compte des usages partagés de la ressource en eau, que ce soit entre les différents utilisateurs, mais aussi entre les différents départements de la région Aquitaine et les départements voisins.

Pour les espèces fruitières et la vigne, il existe une dynamique scientifique bien implantée dans la région Aquitaine, et les objectifs prioritaires de recherche tiennent déjà compte des impacts du changement climatique et des adaptations à mettre en œuvre. Ces recherches ont pour objectif de maintenir la compétitivité économique des exploitations en favorisant le maintien du rendement et de la qualité des produits. Elles sont en général conduites en interaction forte avec les organisations professionnelles concernées. Cette dynamique de recherche doit être soutenue et renforcée, les liens avec les différents acteurs professionnels, avec ceux du développement agricole, doivent être maintenus et encouragés.

La question de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique est par nature pluri-factorielle et doit être abordée par des recherches pluridisciplinaires, allant des sciences physiques et biologiques aux sciences humaines et sociales. Cette pluridisciplinarité, difficile à mettre en œuvre, doit être encouragée et soutenue. La question de l'adaptation de la viticulture aquitaine au changement climatique devrait à ce titre, servir d'exemple. Comme cette viticulture est principalement associée à la notion d'appellation d'origine, la question des adaptations techniques doit être envisagée conjointement à une réflexion sur les dispositions réglementaires, mais aussi sur le lien au terroir comme gage de qualité et de valorisation commerciale. La recherche bordelaise, au sein de l'ISVV (Institut des Sciences de la Vigne et du Vin), s'est engagée dans cette direction, tant au niveau régional, qu'au niveau national. Cette dynamique scientifique pluridisciplinaire doit être soutenue. Il peut être également important pour la Région de renforcer son rôle d'animation entre les différents acteurs de ce secteur économique majeur.

Au-delà de cet effort de recherche, il est nécessaire d'engager une réflexion sur des enjeux et des pratiques qui demanderont des actions éventuelles et donc des décisions spécifiques. C'est le cas du partage éventuel des terres, des modifications de cultures à envisager, de l'étude de la mise en place de migrations d'espèces assistées, de l'organisation face aux risques sanitaires et aux invasions biologiques rapides. De manière large, il est nécessaire de développer une stratégie pour aborder des questions telles que le choix du type d'agriculture et des filières (grandes cultures ? arboriculture ?), les problèmes d'irrigation qui leur sont associées, ou celles liées au contexte réglementaire qui encadre certaines productions comme celle du vin.

La forêt : la nécessité de développer une gestion adaptative

Élément important des paysages aquitains, par leur étendue et leur diversité, les forêts stigmatisent les préoccupations et questionnements suscités par le changement climatique. La durée de vie des arbres qui les composent couvre une échelle de temps qui est caractéristique des évolutions climatiques. Les durées de vie plus longues que celle des cultures annuelles exposent également les forêts à des risques plus nombreux, (feu, sécheresse, tempête, invasions biologiques…), dont certains peuvent être amplifiés par le changement climatique. On peut citer à cet égard le risque phytosanitaire encouru par la pinède landaise en réponse à la migration vers le nord du nématode. Ces considérations temporelles militent en faveur du développement d'une gestion adaptative volontariste prenant en compte de manière plus aiguë l'incertitude générée par ces délais. Cette gestion demande encore pour l'essentiel à être construite, en laissant place à une flexibilité et évolubilité accrue. Nombre de mesures prises aujourd'hui pourraient n'avoir aucun effet à court terme, mais risquent de s'avérer judicieuses d'ici quelques décennies. Elles pourraient donc être mal comprises par les populations actuelles. C'est déjà le cas pour toutes les mesures basées sur l'utilisation de la diversité dans son acception la plus large (diversité des méthodes de cultures, diversité des espèces, diversité des produits générés par les forêts) comme vecteur d'adaptation au changement climatique. Cette gestion adaptative méritera dès lors d'être largement diffusée et expliquée au niveau de l'ensemble des parties prenantes, des milieux socio-professionnels jusqu'au public le plus large.

Le rôle réel des forêts à l'échelle locale, comme cible ou moteur du changement climatique demeure aujourd'hui un véritable enjeu de recherche. Les connaissances actuelles, rappelées dans cet ouvrage, se sont surtout attachées à estimer l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des arbres, la productivité des forêts en termes de production et de composition spécifique. Mais l'effet en retour des forêts sur le climat reste très largement méconnu. La forêt d'Aquitaine, notamment la pinède landaise, est suffisamment étendue pour avoir une influence probable sur les conditions climatiques locales : elle modifie la réflexion du rayonnement solaire (albedo), les vents de surfaces, la transpiration de l'eau des sols. Enfin la forêt est aussi un outil de lutte contre le changement climatique, grâce aux capacités de stockage du CO_2. Les interactions entre ces trois fonctions (rétroaction sur le climat, captation de carbone, fonctionnement des arbres) appellent un effort de recherche.

Glossaire

Abiotique : Désigne un facteur écologique, un phénomène ou un processus de nature physico-chimique, indépendant des êtres vivants, ou entièrement contrôlé par des paramètres non biologiques.

Accrétion : Désigne le développement progressif d'une forme ou d'une accumulation qui s'enrichit par des apports nouveaux.

Adaptation : « Ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques. On distingue divers types d'adaptation, notamment l'adaptation anticipée et réactive, l'adaptation publique et privée, et l'adaptation autonome et planifiée » (GIEC, 2001).

Albédo : Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou un objet.

Aménités : Le terme d'aménités a été défini en 1999 par l'OCDE comme des « attributs, naturels ou façonnés par l'homme, liés à un espace ou à un territoire et qui le différencient d'autres territoires qui en sont dépourvus ». Les aménités conduisent à s'interroger sur les relations entre les hommes à propos du territoire en mettant l'accent sur la qualité de cette relation en sortant d'une conception étroite des filières productives. Pour en savoir plus, voir notamment (Cairol et Terrasson, 2002[1]).

Anadrome : Espèce qui vit en mer et remonte en eau douce pour se reproduire.

Anthropique : Relatif à l'activité humaine, qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'homme.

Aquifère : Formation géologique constituée de roches perméables contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation.

1. Cairol D., Terrasson D, 2002. Numéro spécial Aménités rurales : une nouvelle lecture des enjeux territoriaux, *Ingénieries - EAT*, p. 5-14.

Autécologie : (syn. autoécologie) Sous-discipline de l'écologie concernant l'étude des individus pris isolément dans leur milieu, en particulier l'action des facteurs écologiques sur les organismes. Ce terme est en grande partie synonyme d'écophysiologie.

Avalaison : Phénomène par lequel les poissons migrateurs descendent de leur cours d'eau vers la mer.
Bathymétrie : Mesure de la profondeur des mers et cartographie des reliefs sous-marins.

Benthique : Qualifie un organisme qui vit à proximité des fonds marins.

Bon état écologique : Le « bon état écologique » est une norme fixée par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) qui comporte cinq classes (très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais). Pour chaque « masse d'eau » du territoire national, la norme de « bon état écologique » définit un écart aux conditions de références représentatives d'une eau pas ou très peu influencée par les activités humaines. L'état écologique est défini soit par les mesures de paramètres physico chimiques, biologiques et morphologiques s'il existe des points de mesures, soit sur avis d'expert dans le cas contraire.

Biodisponibilité : désigne la fraction d'une substance ou d'un composé chimique ayant la possibilité d'être absorbée et d'être utilisée par le métabolisme d'un organisme vivant.

Biotique : Qui est propre à la vie et désigne donc tout facteur écologique, tout phénomène ou processus de nature biologique, dépendant des êtres vivants.

Biotope : Milieu biologique homogène propre au développement d'une ou plusieurs espèces.

Chaméphyte : Forme végétale caractérisée par des plantes buissonnantes qui sont adaptées à passer la mauvaise saison grâce à des bourgeons situés à moins de 25 cm au-dessus du sol, ce qui leur permet d'être protégés par la neige pendant la mauvaise saison.

Changements environnementaux planétaires (ou Changement global) : Terme générique couvrant de multiples changements environnementaux et écologiques

à la surface de la Terre en réponse à une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Cela comprend notamment les modifications d'usage des terres et des fonds marins (déforestation, urbanisation, intensification/déprise agricole, désertification, pêche, etc.), les modifications des cycles biogéochimiques (azote, carbone, eau…), les évolutions de la biodiversité (perte de biodiversité, invasions biotiques, destruction d'habitats et/ou surexploitation de populations, etc.), le changement climatique, l'acidification des océans.

Clé de voûte : Espèce dont l'effet sur son environnement est disproportionné comparativement à ses effectifs ou à sa biomasse.

Construction sociale des risques : Idée selon laquelle un risque n'existe pas « par essence » mais qu'il résulte de processus sociaux et politiques qui relient des phénomènes d'origine naturelles et/ou anthropiques à des enjeux sociaux, économiques ou environnementaux relatifs à la santé, à la sécurité ou à l'intégrité de certains milieux, d'individus et de groupes, de biens et d'activités. De ce point de vue, un risque est évolutif car dépendant des conditions sociales au sein desquelles il est construit.

Débit de Crise (DCR) : Le DCR est la valeur de débit d'étiage au-dessous de laquelle l'alimentation en eau potable pour les besoins indispensables à la vie humaine et animale, ainsi que la survie des espèces présentes dans le milieu sont mises en péril. À ce niveau d'étiage, toutes les mesures possibles de restriction des consommations et des rejets doivent avoir été mises en œuvre. (Plan de crise)

Débit Objectif d'Étiage (DOE) : Le DOE est la valeur du débit fixé par le SDAGE au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement des milieux aquatiques et qui est à garantir statistiquement huit années sur dix. Le DOE est « satisfait une année donnée », lorsque le plus faible débit moyen de 10 jours consécutifs (VCN10) est maintenu au-dessus de 80 % de la valeur du DOE.

Démersale : Qualifie une espèce qui vit près des fonds marins tout en pouvant les quitter ponctuellement.
Dendrochronologie : Étude de l'évolution temporelle de l'épaisseur des cernes des arbres à des fins de datation.

Dépoldérisation : La dépoldérisation est un processus de « remise » à la mer des terres précédemment gagnées sur l'espace maritime. Cette démarche d'aménagement du territoire a été initiée par la Grande-Bretagne dans les années 1980. Il existe quatre types de dépoldérisation selon leur objectif : à visée environnementale, protectrice, touristique et compensatoire.

Diadrome : Désigne une espèce de poisson migratrice qui effectue une partie de son cycle vital en rivière et le reste en mer ou inversement.

Directive Cadre européenne sur l'eau (DCE) : La DCE, adoptée le 23 octobre 2000 et transcrite en droit français par la loi du 21 avril 2004, fixe pour les pays membres de l'Union Européenne un objectif de qualité des eaux visant l'atteinte de « bon état » aux échéances de 2015, 2021 et 2027.

Dulcicole : Qualifie un organisme qui vit dans les eaux douces.

Écosystème : Ensemble formé par l'association d'organismes vivants en interaction les uns avec les autres et avec leur environnement, et qui constitue une unité fonctionnelle de base en écologie.

Ectotherme : (syn. Poïkilotherme) Désigne les animaux à « sang-froid », dépourvus de régulation thermique, dont la température corporelle suit passivement celle de leur environnement.

Édaphique : Désigne ce qui se rapporte aux sols.

Effet de serre : Processus naturel ou anthropique de réchauffement de l'atmosphère et du sol, lié à la présence des gaz appelés gaz à effet de serre (GES). Les GES laissent une grande part du rayonnement solaire incident pénétrer l'atmosphère jusqu'au sol, et piègent au contraire les rayonnements infrarouges émis par la surface terrestre et les basses couches atmosphériques, retenant la chaleur dans le système surface-troposphère et entraînant l'augmentation de la température.

Efflorescence : Développement rapide d'une microalgue entraînant la présence d'un grand nombre de cellules dans l'eau (plusieurs millions par litre) qui dans certains cas peut prendre la couleur de l'algue.

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) : Phénomène climatique combinant les fluctuations océaniques entre les événements El Niño et La Niña, et les fluctuations atmosphériques appelées oscillations australes. Il se produit avec une cyclicité irrégulière de 2 à 7 ans environ, dans l'océan Pacifique tropical. Il se traduit par des variations intenses d'échanges d'énergie entre océan et

atmosphère, modifie la circulation océanique, la température de l'air et de l'eau, les vents, les précipitations, ainsi que les échanges de CO_2 avec l'atmosphère, avec des impacts importants sur des régions éloignées. La composante atmosphérique est souvent mesurée par la différence de pression entre les stations de Darwin et Tahiti, et la composante océanique par les valeurs de la température de la mer en surface au centre et à l'est du Pacifique équatorial. Un épisode El Niño décrit l'élévation des températures de la mer, généralement en fin d'année, à l'est du Pacifique et le long des côtes d'Amérique du Sud. Un épisode La Niña correspond à un refroidissement des mêmes régions.

Entomofaune : En un endroit donné, partie de la faune (peuplement d'animaux) constituée des insectes.

Équitabilité : Mesure du degré de régularité dans l'abondance relative des effectifs des diverses espèces d'un peuplement.

Estran : Partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

Étiage : Niveau le plus bas d'un court d'eau ou d'un lac.

Eutrophisation : Phénomène d'enrichissement excessif, naturel ou anthropique, des eaux continentales ou littorales en substances nutritives (matières organiques, phosphates, nitrates…), qui peut entraîner la prolifération d'espèces et végétaux aquatiques (parfois toxiques) et la détérioration progressive du milieu aquatique (manque d'oxygène, dégagement de substances toxiques, diminution de lumière dans la colonne d'eau…).

Évapo-transpiration : Phénomène d'évaporation de l'Eau par les végétaux terrestres grâce auxquels la sève peut circuler dans les plantes vasculaires.
Fitness : Degré d'adaptation d'une population d'une espèce donnée à sa niche écologique.

Gaz à effet de serre (GES) : Constituants gazeux de l'atmosphère, d'origine naturelle ou anthropique, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde se situant dans le spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le GIEC parmi lesquels figurent : la Vapeur d'eau (H_2O), le Dioxyde de carbone (CO_2), le Méthane (CH_4), l'Ozone (O_3), le Protoxyde d'azote (N_2O), l'Hydrofluorocarbures (HFC), le Perfluorocarbures (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF_6).

Gestion effective : La gestion effective d'un environnement ou d'une ressource renvoie à l'ensemble des actes organisateurs déterminés par les usages réels et les règles informelles indépendamment des règles formelles définies par les autorités compétentes ou de la gestion intentionnelle portée par des gestionnaires de l'environnement. (Mermet, 1992[2])-http://www.academie-sciences.fr/arpcep/Documents/ARP-CEP%20Document%20final.pdf

Gouvernance : Désigne un mode de régulation des rapports sociaux et économiques, fondé sur la reconnaissance mutuelle, le dialogue, la concertation à différentes échelles de territoire et entre différents types de parties prenantes, en vue d'une prise de décision. (Source SNDD 2010-2013).

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais : IPCC) : Créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), suite à une prise de conscience du problème que pourrait poser le changement climatique à l'échelle du globe. Le GIEC est un organe intergouvernemental qui est ouvert à tous les pays membres de l'ONU et de l'OMM. Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation.

Identité sociale : Ensemble des caractéristiques qui permettent d'identifier et de qualifier un individu (ou un groupe social donné) telles que l'âge, le genre, la catégorie socioprofessionnelle, la formation et l'expérience professionnelle, etc.

Index climatique multivarié SBC : (Southern Biscay Climate index) Indice climatique calculé sur onze paramètres (température de l'air et de surface de la mer, état d'agitation de la mer, pression atmosphérique, précipitations, vent…) permettant d'évaluer les impacts

2. Mermet L., 1992. *Stratégies pour la gestion de l'environnement : la nature comme jeu de société ?*, Paris, L'Harmattan, 205 p.

des changements océano-climatiques dans le golfe de Gascogne. Les valeurs négatives correspondent aux années avec des conditions dépressionnaires dominantes particulièrement en hiver (précipitations importantes et mer forte). Les valeurs positives indiquent la prédominance au cours de l'année de conditions anticycloniques (pression supérieure à la normale, température atmosphérique élevée, forte insolation et mer calme).

Mésophile : Désigne une espèce ou un peuplement croissant dans un biotope au sol neutre et présentant des conditions moyennes de température et d'humidité.

Métapopulation : Population constituée par un ensemble de sous-populations.

Modélisation individu-centrée : Approche récente pour laquelle aucune définition absolue n'existe encore. Dans son principe[3][4], la modélisation individu-centrée (en anglais : *Individual-Based Modeling*) simule les populations ou les systèmes de populations en tant qu'entités discontinues (i.e. séparées, à savoir ici les individus d'une population ou d'un ensemble de populations) caractérisés par une ensemble de paramètres qui varient entre les individus, chacun caractérisé lui-même par une histoire unique en terme d'interactions avec son environnement et les autres individus de la (ou des) populations(s).

Montaison : Phénomène par lequel les poissons migrateurs remontent les cours d'eau pour leur développement ou leur reproduction.

Multifonctionnalité : Appliquée à la forêt, la multifonctionnalité désigne la capacité de celle-ci à fournir d'autres biens et services (environnementaux, sociaux) que la production de bois. L'idée n'est pas nouvelle (Buttoud, 2003[5]) ni propre à la forêt, comme en témoignent les réflexions qui se sont développées ces vingt dernières années autour de l'agriculture (OCDE, 2001[6]). Pour autant, son contenu est loin d'être stabilisé. En France, la multifonctionnalité des forêts s'est tout récemment dotée d'un caractère institutionnel en figurant (en substance) dès le titre I de la loi d'orientation forestière de 2001 (Dehez, 2009[7]).

Niche climatique : Terme récent pouvant désigner les dimensions climatiques de la niche écologique, elle-même définie comme un espace multidimensionnel décrivant la place et la spécialisation d'une espèce à l'intérieur d'un peuplement.

Nival : Relatif à la neige ; concernant les débits fluviaux, correspond à un type de régime influencé par la fonte des neiges.

North Atlantic Oscillation (NAO) : Oscillation de masse atmosphérique entre les deux centres d'action climatologique de l'Atlantique Nord : l'Anticyclone des Açores et la Dépression d'Islande. L'Indice NAO, souvent calculé par la différence de pression atmosphérique entre Reykjavik et Lisbonne, décrit une part importante des variations du régime océan-atmosphère sur la région, y compris l'intensité des vents d'ouest dominants et les variations de précipitations sur le sud de l'Europe.

Observatoire de la Côte Aquitain (OCA) : Partenariat régional qui a pour objectif principal de mettre à disposition des acteurs du littoral des outils d'aide à la décision et à la gestion de ce milieu en constante évolution. Jusqu'en 1992, la MIACA Mission Interministérielle d'Aménagement de la Côte Aquitaine a été chargée de la coordination de l'aménagement de la côte Aquitaine.

Ordre : (sensu classification de Strahler) La méthode d'ordination de Strahler permet de calculer des indicateurs de l'importance d'un cours d'eau, en se basant sur le niveau de ramification du réseau hydrographique. La valeur d'un segment aval s'incrémente de 1 s'il résulte de la confluence de deux segments de même niveau. Deux segments d'ordre 1 confluent dans un ordre 2. Un ordre 2 et un ordre 1 donne un ordre 2... deux ordres 2 donnent un ordre 3... etc.

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) : Organisation dont la mission est de promouvoir les politiques qui amélioreront le bien-être économique et social partout dans le monde.

Panache fluvial/estuarien : Volume important d'eaux

3. DeAngelis D.L. & Mooij W.M., 2005. Individual-Based Modeling of ecological and evolutionary processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 36:147–68.

4. Grimm V. & Railsback S.F. (2005). *Individual-Based Modeling and Ecology*. Princeton: Princeton Univ. Press. 480 p.

5. Buttoud G., 2003. *La forêt : un espace aux utilités multiples*, Les études de la documentation française, La documentation française, Paris.

6. OCDE, 2001. *Multifonctionnalité - Élaboration d'un cadre analytique*, OCDE, Paris.

7. Dehez J. (coord. par), Candau J., Deuffic P., Gadaud J., Rulleau B., Rambonilaza M., Point P., 2009. *Services récréatifs et multifonctionnalité des forêts en Aquitaine*, rapport pour le CCRRDT Aquitaine, Cemagref, Bordeaux.

douces, turbides et riches en nutriments d'origine continentale qui est apporté à la bande côtière par l'embouchure d'un fleuve.

Pélagique : Qualifie une espèce, des individus vivant en pleine eau.

Perception sociale/Représentations sociales : Ensemble des idées, images, croyances, schèmes de pensée, liés à un objet donné qui conduisent des individus ou des groupes sociaux à se fonder une opinion, un jugement, un point de vue, une vision du monde à partir de processus cognitifs conscients ou inconscients, individuels ou collectifs.

Phénologie : Étude de l'influence du temps et des conditions écologiques, entre autres climatiques, sur la succession des diverses phases du cycle vital d'une espèce.

Plan de Gestion des Étiages (PGE) : Protocole d'accord entre différents partenaires (État, agriculteurs, Agence de l'Eau, EDF...) dans le domaine de la gestion quantitative de la ressource en période d'étiage. Il vise à retrouver une situation d'équilibre entre les usages de l'eau et le milieu naturel, traduite par le respect du débit objectif d'étiage.

Pluvial : Relatif à la pluie ; concernant les débits fluviaux, correspond à un type de régime influencé par la pluviométrie.

Pluvio-nival : Relatif à la pluie et à la neige ; concernant les débits fluviaux, correspond à un type de régime influencé par la fonte des neiges et/ou la pluviométrie.

Prométhéen (approche prométhéenne) : On dit d'une approche qu'elle est prométhéenne lorsqu'elle envisage une transformation fondamentale, structurelle, forte d'un fait, d'un état, d'un milieu.

Relocalisation : « Opération qui consiste à déplacer, à reculer les activités et les biens sur le territoire à une distance suffisante, vers l'arrière-pays, afin de les mettre à l'abri des risques qu'ils peuvent encourir face à la mer, à court ou à long terme » (Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, MEDDE, 2012).

Résilience : Capacité d'un organisme, d'un groupe ou d'une structure à s'adapter à un environnement changeant et à revenir à son équilibre initial.

Risque : Le risque se définit par la probabilité de survenue d'un événement potentiellement néfaste (l'aléa) et par la gravité de ses conséquences (enjeux). On le trouve ainsi traduit de façon simple en termes mathématiques : Risque = Aléa (événement) x Vulnérabilité (enjeux) ou Risque = Probabilité x gravité.

Scénarios SRES : Scénarios d'émissions élaborés par Nakicenovic et Swart, dans le Special Report on Emission Scenarios, sur lesquels sont fondées la plupart des projections climatiques futures présentées dans les troisième, quatrième et même cinquième rapports d'évaluation du GIEC.

Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux estuaire de la Gironde (SAGE) : Le SAGE se développe sur un espace de 3 683 km^2 dont 365 km^2 pour l'estuaire dans le domaine public fluvial et 3 318 km^2 en surface communale (dont 16 % en Charente Maritime et 84 % en Gironde). Le nombre de communes concernées par ce SAGE est de 185 dont 142 en Gironde et 43 en Charente-Maritime. La population permanente concernée est de 930 000 habitants. Le SAGE concerne aussi les milieux associés de l'estuaire avec en particulier des marais et 56 cours d'eau affluents (longueur totale = 585 km).

Services écosystémiques : les services écosystémiques sont une représentation des liens supposés entre l'état des écosystèmes et le fonctionnement des sociétés humaines. Le Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005[8]) définit les services éco systémiques comme des « bienfaits directs ou indirects que les sociétés humaines retirent des écosystèmes ». L'établissement de plusieurs listes de services a notamment été appliqué en France sur les forêts pour discuter de la conservation de la biodiversité (Chevassus-au-Louis, 2009[9]). La diffusion rapide de ce concept a suscité des controverses sur sa pertinence.

Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (Smiddest) : Il assure la maîtrise d'ouvrage du SAGE Estuaire.

Thermocline : Zone de transition marquant la limite souvent abrupte entre les eaux océaniques de surface,

8. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosytems and Human Well-Being: General Synthesis*, Island Press Washington D.C. http://www.maweb.org/fr/index.aspx, consulté le 04 juin 2012.

9. Chevassus-au-Louis B., 2009. *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes*, Centre d'Analyse Stratégique, Paris.

plus chaudes, et les eaux océaniques de fond, plus froides.

Thermophilisation : (terme récent traduit de l'anglais thermophilization) Processus par lequel les espèces vivantes à preferendum thermique froid disparaissent et les espèces vivantes à preferendum thermique chaud se développent. La thermophilisation des communautés végétales montagnardes reflète l'intensité du réchauffement récent. Dans la logique du changement climatique projeté, les transformations d'ores et déjà observées suggèrent un déclin progressif des espèces et communautés vivant d'ordinaire dans les habitats les plus froids.

Trophique : Se dit d'un niveau, d'une situation et cible la position (producteur, consommateur) occupée dans la chaîne alimentaire d'un écosystème, mésocosme, microcosme…

Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) : Plus grande et plus ancienne des organisations globales environnementales au monde. Première organisation environnementale mondiale créée en 1948. Aujourd'hui, le plus vaste réseau mondial de professionnels de la conservation avec un rôle de premier plan en matière d'environnement et de développement durable.

Vulnérabilité : Le terme « vulnérabilité » est utilisé de façon vague dans de nombreux contextes. Dans le cadre des études environnementales, la « vulnérabilité » apparaît plutôt en tant que concept dérivé du domaine des sciences sociales (*cf.* chapitre 3). Définir précisément et évaluer quantitativement la vulnérabilité des espèces au changement climatique sont encore des tâches en cours. Plus de 90 traits biologiques ont été listés10 comme indicateurs de la vulnérabilité des espèces, tous groupes taxonomiques confondus, face à un risque d'extinction (Foden, 2008[10]). Parmi eux, certains traits de vulnérabilité peuvent être associés de façon étroite au changement climatique ; ils sont déclinés en différentes catégories regroupées dans cinq groupes : A- Habitat spécialisé de l'espèce et/ou exigences particulières au regard du microhabitat. ; B- Tolérance environnementale étroite ou existence de seuils susceptibles d'être dépassés en raison du changement climatique pendant n'importe quel stade du cycle de vie de l'espèce. ; C- Dépendance vis-à-vis d'un signal environnemental spécifique susceptible d'être modifié par le changement climatique. ; D- Dépendance vis-à-vis d'interactions interspécifiques susceptibles d'être modifiées par le changement climatique. ; E- Capacité limitée de dispersion vers une zone nouvelle ou plus favorable.

10. Foden W., Mace G., Vié J.-C., Angulo A., Butchart S., DeVantier L., Dublin H., Gutsche A., Stuart S. and Turak E., 2008. Species susceptibility to climate change impacts. In J.-C. Vié, C. Hilton-Taylor and S.N. Stuart (eds). *The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN Gland, Switzerland.

Sources :

- *Cabane Francois (2012). Lexique d'écologie, d'environnement et d'aménagement du littoral. http://archimer.ifremer.fr/doc/00026/13721/*
- *Centre de ressources pour les Plans-Climat Énergie Territoriaux*
- *Dictionnaire de l'environnement. http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4*
- *GIEC, 2001. Glossaire des termes employés dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC. http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf*
- *GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse…, 103 p.*
- *GIEC, 2007. Glossaire des termes employés dans le quatrième rapport du GIEC. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_glossary-fr.pdf*
- *Grand Robert de la langue française, p. 1279 : Didact. Relatif à Prométhée. Le mythe prométhéen. Litt. Caractérisé par le goût de l'action, la foi en l'homme.*
- *Jeandel C. et Mosseri R., 2011. Le Climat à découvert, CNRS Éditions, 288 p.*
- *Ramade F., 2002. Dictionnaire encyclopédique de l'Écologie et des Sciences de l'Environnement., DUNOD, 2e édition, Paris. 1075 p.*
- *Ramade F., 2008. Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité, DUNOD, Hors collection, 760 p.*
- *Stratégie Nationale du Développement Durable 2010-2013.*
- *http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNDD-3.pdf*

Acronymes

AEP : Alimentation en Eau Potable
ANR : Agence Nationale de la Recherche
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique, http://www.cnrs.fr/
CRTA : Comité Régional du Tourisme d'Aquitaine, http://www.tourisme-aquitaine.fr
CUB : Communauté Urbaine de Bordeaux http://www.lacub.fr/
DCR : Débit de CRise (voir glossaire)
DOE : Débit Objectif d'Étiage (voir glossaire)
ECOFOR : Groupement d'intérêt public « ECOsystème FORestier », http://www.gip-ecofor.org/
ENSO : El Niño-Southern Oscillation (voir glossaire)
G.C.Ms : Modèles de Circulation Générale
GES : Gaz à Effet de Serre (voir glossaire)
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évo-lution du Climat (voir glossaire), http://www.ipcc.ch
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, http://wwz.ifremer.fr/institut
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique, http://www.inra.fr/
InVS : Institut de Veille Sanitaire, http://www.invs.sante.fr/fr
IPB : Institut Polytechnique de Bordeaux
IPSL : Institut Pierre Simon Laplace, http://www.ipsl.fr/
IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, http://www.irstea.fr/
ISPED : Institut de Santé Publique d'Épidémiologie et de Développement, http://www.isped.u-bordeaux2.fr/
ISVV : Institut des Sciences de la Vigne et du Vin, http://www.isvv.univ-bordeauxsegalen.fr/
LabEx COTE : Laboratoire d'Excellence COTE : Continental to Costal Ecosystems: Evolution, Adaptability and Governance. http://cote.labex-univ-bordeaux.fr/
MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, http://www.developpement-durable.gouv.fr/
MIACA : Mission Interministérielle d'Aménagement de la Côte Aquitaine
NAO : North Atlantic Oscillation (voir glossaire)
OCA : Observatoire de la Côte Aquitaine (voir glossaire), http://littoral.aquitaine.fr/
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques (voir glossaire), http://www.oecd.org
ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, http://onerc.org/
OPCC : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique, http://www.opcc-ctp.org/
PGE : Plan de Gestion des Étiages (voir glossaire)
PLU : Plans Locaux d'Urbanisme
PPRI : Plans de Protection des Risques Inondation
RENECOFOR : RÉseau National de suivi à long terme des ÉCOsystèmes FORestiers
RIG : Référentiel Inondation de la Gironde
RRLA : Réseau de Recherche Littoral Aquitain http://rrla.epoc.u-bordeaux1.fr/
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux estuaire de la Gironde (voir glossaire)
http://www.sage-estuaire-gironde.org
SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. (cf. Agence de l'eau Adour Garonne) http://www.eau-adour-garonne.fr/fr/quelle-politique-de-l-eau-en-adour-garonne/un-cadre-le-sdage.html
SMEGREG : Syndicat Mixte d'Études pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde. http://www.smegreg.org/
SMIDDEST : Syndicat MIxte pour le Développement Durable de l'EStuaire de la Gironde. http://www.sage-estuaire-gironde.org/
SRCAE : Schéma Régional Climat Air Énergie en Aquitaine, http://www.srcae-aquitaine.fr/public/
SRES : Special Report on Emission Scenarios/rapport spécial sur les scénarios d'émissions (voir glossaire)
UB : Université de Bordeaux
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature (voir glossaire), http://www.uicn.org/fr/
UPPA : Université de Pau et des Pays de l'Adour



Les Pyrénées basques (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).



Chapitre 1

[1] Köppen W., 1936. Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, Vol 1 Part C, 1-44.

[2] Arrhenius S., 1896. Ueber den Einfluss des Atmosphärischen Kohlensäurengehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche, in the Proceedings of the Royal Swedish Academy of Science, Volume 22, I N. 1, 1–101.

[3] Revelle R. et Suess H., 1957. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO_2 during the past decades. Tellus 9, 18-27.

[4] Charney J.G. *et al.*, 1979. Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. National Academy of Sciences, Washington, DC, 22 p.

[5] Richardson L.F., 1922. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press.

[6] IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, 365 p.

[7] IPCC, 1992. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, 200 p.

[8] IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 p.

[9] IPCC, 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996 p.

[10] Nakicenovic N. *et al.*, 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, 599 p.

[11] Peings H. *et al.*, 2011. Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM. Rapport pour le Plan National d'Adapation, direction de Jean Jouzel. http://www.developpement-durable.gouv.fr /IMG/pdf/onerc_PG.pdf.

[12] Peings H. *et al.*, 2012. Scénarios régionalisés - Indices de référence pour la métropole. Rapport pour le Plan National d'Adapation, direction de Jean Jouzel. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_IM_p2.pdf.

[13] Garnier E., 2005. Les grands vents dans le Grand Ouest français XVI^{e}-XIX^{e} siècles, Tempêtes sur la forêt française XVI^{e}-XX^{e} siècle. L'Harmattan, 55-70.

[14] Ribes A. *et al.*, 2010. A method for regional climate change using smooth temporal patterns. Climate Dynamics, 35(2-3), 391-406, doi:10.1007/s00382-009-0670-0.

[15] Hémery G. *et al.*, 2008. Detecting the impact of oceano-climatic changes on marine ecosystems using a multivariate index : The case of the Bay of Biscay (North Atlantic European Ocean). Global Change Biology 14, 27-38.

[16] Castège I. *et al.*, 2010. Programme régional « Environnement et Ressources des Milieux Marins Aquitains ». Compte rendu d'activité 2010. ERMMA, Biarritz, 66 p.

[17] David V. *et al.*, 2005. Long term changes of the zooplanktonic variability in a turbid estuary: Gironde estuary (France). Estuarine Coastal and Shelf Science 64, 171-184.

[18] Chaalali A. *et al.*, 2012. Abrupt changes in estuarine biological compartments in relation to climate changes: the example of a European macrotidal estuary. Estuaries & Coasts (sous presse).

[19] Chaalali A. *et al.*, 2012. Changes in the zooplankton community distribution in the Gironde estuary: a marinisation consequence? Estuarine Coastal and Shelf Science (sous presse).

[20] IPCC, 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp 104. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

[21] Michel S. *et al.*, 2009. Evolution of upper layer temperature in the Bay of Biscay during the last 40 years. Aquat. Living Resour. 22, 447-461.

[22] Lozier M.S. et al., 2008. The spatial pattern and mechanisms of heat-content change in the North Atlantic. Science 319, 800-803.

[23] Ivchenko V.O. *et al.*, 2006. Anomaly of heat content in the northern Atlantic in the last 7 years: Is the ocean warming or cooling? Geophys. Res. Lett. 33.

[24] De Castro M. *et al.*, 2009. Present warming within the context of cooling–warming cycles observed since 1854 in the Bay of Biscay. Continental Shelf Research 29, 1053-1059.

[25] González M. *et al.*, 2008. Análisis de la tendencia de la temperatura superficial del agua del mar en Donostia-San Sebastián a partir del estudio de la serie del Aquarium (1946-2007). Revista de Investigación Marina 4, 7 p.

[26] Goikoetxea N. et al., 2009. Trends and anomalies in sea surface temperature, observed over the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. Continental Shelf Research 29, 1060-1069.

[27] Revilla M. *et al.*, 2010. A two-decade record of surface chlorophyll "a" and temperature in offshore waters of the Basque country (southeastern Bay of Biscay). Revista de Investigación Marina 17, 14-20.

[28] Michel S. *et al.*, 2009. Temperature variability in the

Bay of Biscay during the past 40 years, from an in situ analysis and a 3D global simulation. Cont. Shelf Res. 29, 1070-1087.

[29] Koutsikopoulos C. *et al.*, 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. Oceanol. Acta 21, 335-344.

[30] Planque B. *et al.*, 2003. Large-scale hydroclimatic variability in the Bay of Biscay: the 1990's in the context of interdecadal changes. ICES Mar. Sci. Symp. 219, 61-70.

[31] Fontán A. *et al.*, 2006. Marine hydrodynamics between San Sebastián and Hondarribia (Guipúzcoa, northern Spain): field measurements and numerical modeling. Sci. Mar., 70S1, 51-63.

[32] Chust G. *et al.*, 2009. Human impacts overwhelm the effects of sea-level rise on Basque coastal habitats (N.Spain) between 1954 and 2004. Estuarine Coastal and Shelf Science 84, 453-462.

[33] Marcos M. *et al.*, 2005. Consistency of long sea-level time series in the northern coast of Spain. Journal of Geophysical Research 110: C03008.

[34] Stammer D. *et al.*, 2013. Causes for contemporary regional sea level changes. Annual review of marine science, 5, 21-46, 10.1146/annurev-marine-121211-172406.

[35] Chust G. *et al.*, 2010. Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. Estuarine Coastal and Shelf Science 87, 113-124.

[36] ONERC, 2005. Impacts du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral : scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, note technique n° 2, Conservatoire du littoral.

[37] Hulme M. *et al.*, 1995. An integrated framework to address climate change (ESCAPE) and further developments of the global and regional climate modules (MAGICC). Energy Policy 23(4-5), 347-355.

[38] Butel R. *et al.*, 2002. Spatial variability of wave conditions at French Atlantic coast using in-situ data. Journal of Coastal Research, SI 36, 96-108.

[39] Abadie A. *et al.*, 2006. Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast. Continental Shelf Research 26, 1924-1939.

[40] Dupuis H. *et al.*, 2006. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. J.Mar. Syst. 63, 105–114.

[41] Dodet G. *et al.*, 2010. Wave climate variability in the north-east Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean Modell. 31, 120–131.

[42] Le Cozannet G. *et al.*, 2011. Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. J.Climate, 24, 641–652. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3589.1

[43] Charles E. *et al.*, 2012. Present wave climate in the Bay of Biscay: spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. Journal of Climate 25, 2020-2039.

[44] Charles E. *et al.*, 2012. Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. Ocean Dynamics, DOI 10.1007/s10236-012-0534-8.

[45] Castelle B. *et al.*, 2007. Impact of storms on beach erosion: Broadbeach (Gold Coast, Australia). Journal of Coastal Research, SI 50, 534-539.

[46] Thiébot J. *et al.*, 2011. The influence of wave direction on the morphological response of a double sandbar system. Cont Shelf Res 32, 71-85, DOI 10.1016/j.csr.2011.10.014.

[47] Stockdon H.F. *et al.*, 2006. Empirical parameterization of setup, swash and runup. Coast. Eng. 53, 573-588.

[48] Idier D. *et al.*, 2012. Modélisation des surcotes sur les côtes françaises, manche et atlantique, Congrès SHF : « Événements extrêmes fluviaux et maritimes », Paris, 1-2 février 2012.

[49] Wang S. *et al.*, 2008. The impact of climate change on storm surges over Irish waters. Ocean Modelling 25, 83-94.

[50] Goberville E. *et al.*, 2010. Climate driven changes in coastal marine systems of western Europe. Marine Ecology Progress Series 408, 129-147.

[51] Déqué M., 2003. Impacts des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations (IMFREX). Rapport technique, 3 p., Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques.

Chapitre 2

[1] Colville E.J. *et al.*, 2011. Sr-Nd-Pb Isotope evidence for ice-sheet presence on southern Greenland during the last interglacial. Science 333(6042), 620-623.

[2] Kopp R.E. *et al.*, 2009. Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. Nature 462, 863-867.

[3] Sánchez Goñi M.F. *et al.*, 2012. European climate optimum and enhanced Greenland melt during the Last Interglacial. Geology 40(7), 627–630.

[4] Seguin B., 2010. Le changement climatique : conséquences pour l'agriculture et la forêt. Rayonnement du CNRS, Changement climatique 54, 36-47.

[5] Johnsen S.J. *et al.*, 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. Nature 359, 311-313.

[6] Bond G.C. et Lotti R., 1995. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. Science 267, 1005-1010.

[7] Sánchez Goñi M.F. *et al.*, 2000. European climatic

response to millenial-scale climatic changes in the atmosphere-ocean system during the Last Glacial period. Quat. Res. 54, 394-403.

[8] Roche D. *et al.*, 2004. Constraints on the duration and freshwater release of Heinrich event 4 through isotope modelling. Nature 432, 379-382.

[9] Sánchez Goni M.F. *et al.*, 2008. Contrasting impacts of Dansgaard-Oeschger events over a western European latitudinal transect modulated by orbital parameters. Quaternary Science Reviews 27, 1136-1151.

[10] Genty D. *et al.*, 2006. Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African delta C-13 stalagmite profiles - comparison with Chinese and South Hemisphere stalagmites. Quaternary Science Reviews 25, 2118-2142.

[11] Genty D. *et al.*, 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. Nature 421, 833-837.

[12] Genty D. *et al.*, 2010. Isotopic characterization of rapid climatic events during OIS3 and OIS4 in Villars Cave stalagmites (SW-France) and correlation with Atlantic and Mediterranean pollen records. Quaternary Science Reviews 29, 2799-2820.

[13] Andrieu-Ponel V. *et al.,* 1988. Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs ; application à l'interprétation du retrait glaciaire. Bull. Asso. Franç. Étude Quaternaire 25(2-3), 55-67.

[14] Jalut G. et Turu i Michels V., 2006. La végétation des Pyrénées françaises lors du dernier épisode glaciaire et durant la transition Glaciaire-Interglaciaire (Last Termination), in J.M. Fullola, N. Valdeyron et M. Langlais (sous la dir. de), Els Pirineus i les àrees circumdants durant el Tardiglacial. Mutacions i filiacions tecnoculturals, evolució paleoambiental. Homenatge Georges Laplace. XIV Col°Eloqui internacional d'arqueologia de Puigcerdà, 10-11 XI 2006, Institut d'Estudis Ceretans.

[15] Gumprich A. *et al.*, 2012. Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of sand-filled wedge structures and their alluvial host sediment from Jonzac, Southwest France. Boreas (sous presse).

[16] Bertran P. *et al.*, 2011. Inland aeolian deposits of Southwest France: facies, stratigraphy and chronology. Journal of Quaternary Science 26(4), 374-388.

[17] Bahn P.G., 1994. Lascaux: composition or accumulation? Zephyrus 47, 3-13.

[18] Cheddadi R. et Bar-Hen A., 2009. Spatial gradient of temperature and potential vegetation feedback across Europe during the late Quaternary. Climate Dynamics 32, 371–379.

[19] Jost A. *et al.*, 2005. High-resolution simulations of the last glacial maximum climate over Europe: a solution to discrepancies with continental palaeoclimatic reconstructions ? Climate Dynamics 24, 577-590.

[20] Arpe K. *et al.*, 2011. A comparison of climate simulations for the last glacial maximum with three different versions of the ECHAM model and implications for summer-green tree refugia. Climate of the Past 7, 91-114.

[21] Bertran P. *et al.*, 2009. Paléoenvironnements tardiglaciaires en Aquitaine : la séquence alluviale de La Brunetière. Quaternaire 20(2), 161-193.

[22] Millet L. *et al.*, 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 315-316, 86-99.

[23] Faure E. et Galop D., 2011. La fin du paradigme du désert landais : histoire de la végétation et de l'anthropisation à partir de l'analyse palynologique de quelques lagunes de la Grande Lande, in J.C. Merlet J.-C. et J.P. Bost, De la lagune à l'Airial : le peuplement de la Grande-Lande. Aquitania, Suppl. 24, 43-59.

[24] Niort J., 2009. Reconstitution de l'histoire de la recolonisation du chêne et du hêtre dans les Pyrénées. Rapport de stage de Master 2, UMR Biogeco, Univ. Bordeaux 1.

[25] Papion-Clavé B., 2001. Évolution des paléo-environnements côtiers à l'Holocène : exemple de l'Aquitaine septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, n° 2413.

[26] Andrieu V., 1991. Dynamique du paléoenvironnement de la vallée montagnarde de la Garonne (Pyrénées centrales, France) de la fin des temps glaciaires à l'actuel. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2, 330 p.

[27] Rius D. *et al.*, 2011. Holocene fire regime from multi-site sedimentary charcoal analyses in the Lourdes Basin (Pyrénées, France). Quaternary Science Reviews 20, 1696-1709.

[28] Genty D. *et al.*, 2011. Dating the Lascaux Cave gour formation. Radiocarbon 53(3), 479-500.

[29] Zanchetta G. *et al.*, 2007. Late Quaternary palaeohydrology of Lake Pergusa (Sicily, southern Italy) as inferred by stable isotopes of lacustrine carbonates. Journal of Paleolimnology, doi:10.1007/s10933-006-9070-1.

[30] Bar-Matthews M. *et al.*, 2000. Timing and hydrological conditions of Sapropel events in the eastern Med. Sea, as evident from speleothems, Soreq cave. Chemical Geology 169(1-2), 145-156.

[31] Davis B. A. *et al.*, 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quaternary Science Reviews 22, 1701-1716.

[32] Auriemma R. *et al.*, 2004. Middle to Late Holocene relative sea-level changes recorded on the coast of Apulia (Italy). Géomorphologie: relief, processus, environnement 1, 19-34.

[33] Alfonso S. *et al.*, 2001. A European lead isotope signal

recorded from 6000 to 300 yrs B.P. in coastal marshes (S.W. France). Atmospheric Environment 35(21), 3595-3605.

[34] Tastet J-P., 1998. Chronologie et cartographie d'un complexe unique côtier holocène : l'exemple aquitain du Nord-Médoc (France). Quaternaire 9(3), 157-167.

[35] Clarke M. *et al.*, 1999. Evidence for the timing of dune development on the Aquitaine coast, southwest France. Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplement Band 116, 147-163.

[36] Clarke M. *et al.*, 2002. Late Holocene sand invasion and North Atlantic storminess along the Aquitaine Coast, southwest France. The Holocene 12(2), 231-238.

[37] Buffault P., 1942. Histoire des dunes maritimes de la Gascogne. Imprimerie Delmas, Bordeaux, 446 p.

[38] Froidefond J-M. et Legigan P., 1985. La grande dune du Pilat et la progression des dunes sur le littoral aquitain. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine 38, 69-79.

[39] Tastet J-P. *et al.*, 2008. Geological and archaeological chronology of the late Holocene coastal enclosure : the Sanguinet lake (SW France). Geoarchaeology: An International Journal 23(1), 131-149.

[40] Burnouf J. *et al.*, 1989. Paléo-paysages littoraux et occupation du sol holocènes en nord-Médoc (Gironde, France), dans Les sociétés rurales du centre-ouest atlantique de la Préhistoire à nos jours. Actes du 3e colloque GERHICO, Rochefort, 18-20 avril 1988, 169-183.

[41] Coquillas D., 2010. Essai de reconstitution des rivages estuariens ou l'histoire de l'évolution des marais de la rive droite de la Gironde, Bordeaux. Cercle archéo St-Ciers/Gironde.

[42] Gé T. *et al.*, 2005. L'élévation séculaire des berges antiques et médiévales de Bordeaux. Étude géoarchéologique et dendrochronologique. CR Géosciences 337, 297-303.

[43] Le Roy Ladurie E., 1967. Histoire du climat depuis l'an mil, Flammarion, Paris, 376 p.

[44] Mouthon F., 1993. Les blés en Bordelais, l'économie céréalière dans les diocèses de Bordeaux et de Bazas (vers 1300-vers 1550). Doctorat Univ. Bordeaux 3 sous la direction de J.-B. Marquette.

[45] Garnier E., 2011. Climat de la France : apport de l'histoire, in Jeandel C. et Mossery R. (sous la dir. de), Le climat à découvert. Outils et méthodes en recherche climatique, CNRS Éditions, 111-113.

[46] Garnier E. *et al.*, 2011. Grapevine harvest dates in Besançon between 1525 and 1847 : Social outcome or climatic evidence ? Climatic Change 104, 703-727.

[47] Chuine I. *et al.*, 2004. Grape ripening as a past climate indicator. Nature 432, 289-290.

[48] Jones P.D. et Mann M.E., 2004. Climate over past millennia. Review of Geophysics 42, 404-405.

[49] Bourquin-Mignot C. et Girardclos O., 2001. Construction d'une longue chronologie de hêtres au Pays Basque. La forêt d'Iraty et le Petit Âge Glaciaire. Sud-Ouest Européen 11, 59-71.

[50] Badeau V. *et al.*, 1996. Long-term grouwth of trees : ten years of dendrochronological studies in France. In : European forest Institute research, Report n° 5 Growth trends in European forests, Spiecker *et al.* (ed.), Springer Verlag Berlin, 167-181.

[51] Desprat S. *et al.*, 2003. Revealing climatic variability of the last three millennia in northwestern Iberia using pollen influx data. Earth & Planet. Sci. Letters 213, 63-78.

[52] Mazier F. *et al.*, 2009. Multidisciplinary approach to reconstructing local pastoral activities : an example from the Pyrenean Moutains (Pays Basque). The Holocene 19(2), 171-188.

[53] Pfister C *et al.*, 2010. The Meteorological framework and the cultural memory of three severe storms in Europe. Climatic Change 101(1-2), 281-310.

[54] Garnier E., 2010. Les dérangements du temps. Plon, 145 p.

[55] Garnier E., 2010. Climat et Histoire en Europe, XVIe-XIXe siècles. Revue d'Histoire Moderne et Contemporaine, n° thématique 57-3, 159 p.

[56] DDE-Gironde, 2005. Plan de prévention du risque inondation. Aire élargie de l'agglomération Bordelaise Secteurs Bordeaux N&S ; http://www.gironde.equipement.gouv.fr/aire-elargie-de-l-agglomeration-a138.html

[57] Cazenave A. et Rémy F., 2011. Sea level and Climate: observation and causes of changes (invited review article), Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change 2(5), 647-662.

Chapitre 3

[1] Chalas Y. *et al.*, 2009. Comment les acteurs s'arrangent avec l'incertitude, Édition des Archives Contemporaines.

[2] Giddens A., 2011. The politics of climate change, Polity Press.

[3] Driessen P. *et al.*, 2010. *From* climate change to social change, International Books, Utrech.

[4] Young O.R. *et al.*, 2006. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. Global Environmental Change, vol. 16, n° 3, 304-316. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.004

[5] IPCC, 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 104 p.

[6] IPCC, 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1075 p.

[7] Smit B. et Wandel J., 2006. Adaptation, adaptative capacity and vulnerability. Global Environmental Change 16, 282-292.

[8] Adger W.N., 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16, nºBecerra S. et Peltier A. (sous la dir. de), 2009. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. L'Harmattan, coll. Sociologies et environnement, 575 p.

[9] Hallegatte S., « Après Durban, limiter à 2°C le réchauffement est utopique », Le Monde, 14.12.2011.

[10] Bozonnet J.P., 2012. Le contre-récit climatique en Europe : émergence et signification sociale, in Edwin Zaccai et François Gemenne (sous la dir. de), « Controverses climatiques ». Presses de Sciences Po, février 2012.

[11] Pielke R.A., 1998. Rethinking the role of adaptation in climate policy. Global Environmental Change, 8, 2, 159-170.

[12] Grandchamp-Florentino L. et Rudolf F., 2009. Calculer pour sauver le climat ? Responsabilité, autocontrainte, rationnalisation des modes de vie face au changement climatique, in M Dobré, S Juan, « Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie ». L'Harmattan, Sociologie et Environnement, 186-198.

[13] Bertrand F. et Rocher L, 2011. L'intégration du changement climatique dans l'action publique locale, facteur de renouvellement du développement urbain durable ? in Béal Vincent, Gauthier Mario, Pinson Gilles (sous la dir. de), « Le développement durable changera-t-il la ville? Le regard des sciences sociales », PUSE, coll. TemiS, 385-403.

[14] Le Monde. Cahier du monde n° 2117 mardi 11 décembre 2012.

[15] Breysse D., 2010. Overview of deterioration processes, in "Non-Destructive evaluation of reinforced concrete structures", ed. C. Maierhofer, H.W. Reinhardt et G. Dobmann, Bertram Publ.

[16] Wiel M., 2004. Ville et mobilité : un couple infernal ?, Éditions de l'Aube.

[17] Ellul J., 1988. Le bluff technologique. Paris, Hachette.

[18] Beslay C. *et al.*, 2013. Le « bâtiment économe » : une utopie technicienne ? in Jérôme Boissonade, Katja Hackenberg (sous la dir. de), « Sociologie des approches critiques du développement et de la ville durable », Éditions Petra, coll. Pragmatismes.

[19] Dehez J., 2012. L'ouverture des forêts au public. Un service récréatif. Quae, coll. Sciences et Techniques Update, 165 p.

[20] Dehez J. *et al.*, 2009. Services récréatifs et multifonctionnalité des forêts en Aquitaine. Rapport pour le CCRRDT Aquitaine, Cemagref, Bordeaux.

[21] Dehez J., 2010. « Les forêts d'Aquitaine : un patrimoine fréquenté », Sud Ouest Européen, numéro spécial « Patrimoines Naturels » (30).

[22] ECOFOR, 2010. Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais. Rapport pour les ministères du Développement durable et de l'Agriculture, ECOFOR, Paris.

[23] Mora O. *et al.*, 2012. *Le* massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050, Rapport de l'étude prospective. Conseil régional d'Aquitaine-INRA.

[24] Deuffic P. *et al.*, 2010. Patrimoine foncier... et naturel ? Les propriétaires forestiers face à l'écologisation des Landes de Gascogne. Sud Ouest Européen 30, 109-121.

[25] Deuffic P. et Moustié J., 2010. Pins et feuillus, entre doutes et incertitudes. Les forestiers des Landes de Gascogne et la question de la multifonctionnalité des boisements feuillus après la tempête de 2009. Rapport réalisé avec le soutien du Conseil régional d'Aquitaine, CCRRDT 2007, convention n° 20071204003, Cemagref, Cestas.

[26] Chatry C. *et al.*, 2010. Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts. Rapport de la mission interministérielle : Ministère de l'alimentation de l'agriculture et de la pêche (CGAAER), ministère de l'intérieur, de l'outre-mer et des collectivités territoriales (inspection générale de l'administration), ministère de l'écologie de l'énergie, du développement durable et de la mer (conseil général de l'environnement et du développement durable).

[27] Bouisset C., 2011. PPR, urbanisation et risques d'incendie de forêt dans les Pyrénées-Orientales : méthodes, enjeux, débats. Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, document 551, mis en ligne le 19 octobre 2011. http://cybergeo.revues.org/24658.

[28] Bouisset C. *et al.*, 2010. Le patrimoine naturel en Aquitaine vu du Web : discours, valeurs, fonctions. Sud Ouest Européen 30 (numéro spécial « Patrimoines Naturels »).

[29] Ribéreau-Gayon M. D., 1993. Re-production identitaire dans les Landes de Gascogne. Écologie humaine XI(2), 71-85.

[30] Kalaora B., 2010. Rivages en devenir, des horizons pour le Conservatoire du Littoral. La documentation française.

[31] Meur-Férec C. *et al.*, 2006. Vers une stratégie de gestion à long terme de l'érosion côtière : l'apport de l'évaluation de la vulnérabilité. Actes du colloque « Interactions Nature-Société, analyse et modèle », La Baule. http://geolittomer.univ-nantes.fr/StockageUMR/COLLOQUE/pdf/C3_0505_MEUR-FERREC.pdf.

[32] Commission Européenne, 2004. Vivre avec l'érosion côtière en Europe – Sédiments et Espace pour la Durabilité. Conclusions de l'étude EUROSION. Luxembourg : Office pour les Publications Officielles des Communautés Européennes. http://www.eurosion.org/project/eurosion_fr.pdf.

[33] Aubié S. et al., 2011. Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-59095-FR. http://littoral.aquitaine.fr/IMG/pdf/brgm_rp_59095_fr_alea_2020_2040_2011_10_10.pdf

[34] Anselme B. *et al.*, 2008. Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigue : le domaine de Graveyron, bassin d'Arcachon (France). VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 8 Numéro 1 avril 2008. http://vertigo.revues.org/1254.

[35] CACG, 2008. Schéma d'aménagement et de gestion des eaux Adour amont – Tendances et scénarios – 212 pages. http://www.institution-adour.fr/adour_files/pdf/sage_adour_amont/SageAdour-2009-02-11-CLEpleniere-DocumentsSeance.pdf.

[36] Rahmstorf S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science 315, 368-370.

[37] Garnier E. et Surville F. (sous la dir. de), 2010. La tempête Xynthia face à l'histoire. Submersions et tsunamis sur les littoraux français du moyen âge à nos jours. Le Croit Vif, Saintes.

[38] Point P., 2011. Gouvernance des zones humides estuariennes, production de bien public et financement de maintenance, Région et Cohésion, volume 1(3).

[39] Point P., 2011. Annexes auditions au rapport « L'eau en Aquitaine à l'horizon de 30 ans. Six scénarios pour 2041 ». CESER Aquitaine. http://ceser-aquitaine.fr/informations/avisrapports/rapports/2011/eau-aquitaine/eau-rapport-complet.pdf

[40] Boschet C. et al., 2012. La gestion des zones humides : interactions sociales et gouvernance économique. Document de travail, mars 2012, 25 p.

[41] Viard J., 2006. Éloge de la mobilité. Essai sur le capital temps libre et la valeur travail, Éditions de l'aube.

[42] Conseil régional du Tourisme d'Aquitaine, 2011. La fréquentation touristique de l'Aquitaine, Hors série - Édition 2011, Conseil régional du Tourisme d'Aquitaine, Bordeaux.

[43] Daubet B. *et al.*, 2010. Analyse prospective pour un schéma des plans plages sur le littoral Aquitain, ONF, CEMAGREF, ICABE, 6 volumes + annexes, Bordeaux.

[44] Le Scouarnec N. et Martin L., 2009. Effets du changement climatique sur le tourisme, in Le tourisme en France - édition 2008, INSEE références, Paris, 61-71.

[45] Bouisset C. et Dehez J., 2010. Rapport du critère D2 : Social : paysage, tourisme, loisirs, chasse, Expertise « Avenir du massif forestier landais », GIP ECOFOR, Paris.

[46] Rulleau B. *et al.*, 2012. Recreational Value, Site Characteristics and User Heterogeneity in Contingent Valuation. Tourism Management 33, 195-204.

[47] Dehez J. *et al.*, 2008. La fréquentation estivale des « Plans Plages » Girondins en 2006. Partie 1 : description des visiteurs et des pratiques, juin 2008, Bordeaux.

Chapitre 4

[1] Caparros A. et Péreau J-C., 2013. Forming coalitions to negotiate North-South Agreements. Environmental and Development Economics 18(1), 69-92.

[2] ONERC, 2011. 1er plan national d'adaptation au changement climatique.

[3] Péreau J-C., 2009. Négociation et théorie des jeux : les « dessous » d'un accord acceptable. Négociations 2, 35-49.

[4] ONERC, 2009. Impacts du changement climatique, coûts associés et pistes d'adaptation.

[5] CEDD, 2010. Économie de l'adaptation au changement climatique.

[6] Brahic E. et Terreaux J-P., 2009. Évaluation économique de la biodiversité, Méthodes et exemples pour les forêts tempérées. Quae, Paris, 200 p.

[7] Terreaux J-P. et Weber J., 2011. Réflexions sur l'évaluation de la biodiversité et l'aménagement des forêts. Revue forestière française 63(5), 571-78.

[8] Millénium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Island Press, Washington, D.C.

[9] Point P., 2010. Quelle méthodologie pour la confrontation des valeurs de conversion ou de conservation des zones humides ?, Revue d'Économie Régionale et Urbaine 5, 855-876.

[10] Henry C., 1984. La microéconomie comme langage et enjeu de négociations. Revue économique 35(1), 177-198.

[11] Martin J.Ch. et Point P., 2012. Road project opportunity costs subject to a regional constraint on greenhouse gas emissions. Journal of Environmental Management 112, 292-303.

[12] Leontief W., 1936. Quantitative input and output relations in the Economic System of the United States. The Review of Economic Statistics 18, 105-125.

[13] Irichabeau G., 2011. Évaluation économique de la dépendance d'une activité au milieu naturel. L'exemple de l'ostréiculture arcachonnaise. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux.

[14] Auby I. et Maurer D., 2004. Étude de la reproduction de l'huître creuse dans le bassin d'Arcachon - Rapport final. Rapport Ifremer. R.INT.DEL/AR/04.05.

[15] Stern N. (sous la dir.de), 2006. The Stern Review Report: the Economics of Climate Change. London, HM Treasury, 603 p.

[16] Godard O., 2007. Le Rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique ? Revue d'Économie Politique 117.

[17] Leandri M., 2009. The shadow price of assimilative

capacity in optimal flow pollution control. Ecological Economics 68(4), 1020-103.

[18] Levahri D. et Mirman L., 1980. The great fish war: an example using a dynamic Cournot-Nash solution. Bell Journal of Economics 11, 322-344.

[19] Terreaux J.-P., 2008. Taux d'actualisation décroissants et cohérence temporelle des décisions de sylviculture. Revue Forestière Française 60(4), 467-476.

[20] Clark C., 1980. Mathematical Bioeconomics: the optimal management of renewable resources, Wiley, New-York.

[21] DeLara M. et Doyen L., 2008. Sustainable management of natural resources: mathematical models and methods. Springer.

[22] Doyen L. et Péreau J.-C., 2012. Sustainable coalitions in the commons. Mathematical Social Sciences 63(1),57-64.

[23] Péreau J-C. *et al.*, 2012. The triple bottom line: Meeting ecological, economic and social goals with Individual Transferable Quotas. Journal of Environmental Economics and Management 63(3), 419-434.

[24] Martinet V. *et al.*, 2007. Defining viable recovery paths toward sustainable fisheries. Ecological Economics 64(2), 411-422.

[25] Gourguet S. *et al.*, 2013. Bio-economic modeling for the viable management of mixed fisheries. Fisheries Research 140, 46-92.

[26] Doyen L. *et al.*, 2012. A stochastic viability approach to ecosystem-based fisheries management. Ecological Economics 75, 32-42.

[27] Mouysset L. *et al.*, 2012. Different policy scenarios to promote various targets of biodiversity. Ecological Indicators 14, 209-221.

[28] Mouysset L. *et al.*, 2011. Bio economic modeling for a sustainable management of biodiversity and agriculture. Ecological Economics 70(4), 617-626.

[29] Doyen L. et Péreau J.-C., 2009. A cost-effectiveness approach for the precautionary principle. Environmental Modeling and Assessment 14(1), 127-133.

[30] Bournot A. *et al.*, 2007. Acteurs et perceptions des impacts subis par l'estuaire de la Gironde. Revue Cognitique-Cognitics, 39-57.

[31] Salles D., 2006. Les défis de l'environnement : démocratie et efficacité. Éditions Syllepse.

[32] Ferrari S. *et al.*, 2012. Critical natural capital, ecological resilience and sustainable wetland management: a French case study. Cahiers du GREThA 2012-08.

[33] Point P., 2010b. Donner une valeur à l'environnement : un exercice délicat, mais nécessaire. Revue du Commissariat Général au Développement Durable, 5-7.

[34] Point P., 2011. Gouvernance des zones humides estuariennes, production de bien public et financement de maintenance. Régions & Cohésion 1(3), 93-116.

[35] Sidibé Y. *et al.*, 2012. NOVIWAM: Five European countries together for improving water quality and water use efficiency.

[36] Sidibe Y. *et al.*, 2011. Innovative management systems to cope with drought : The case of south-western France. Symposium on Data Driven Approaches to Drought, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 21-22 Juin.

Chapitre 5.1

[1] Plan Climat Aquitain, 2007. Premières mesures. Conseil régional d'Aquitaine, 68 p. http://www.aquitaine.fr/IMG/pdf/PlanClimatAquitain.pdf

[2] IPCC, 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 104. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

[3] INRA, 2011. Métaprogramme Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt. Appels à manifestation d'intention 2011. http://www.inra.fr/les_recherches/metaprogrammes/adaptation_au_changement_climatique_de_l_agriculture_et_de_la_foret

[4] Agreste Aquitaine, 2011. Premières tendances Aquitaine. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

[5] Agreste, 2006. Mémento de la statistique agricole. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

[6] Agreste, 2010. Mémento de la statistique agricole. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

[7] Agreste-Aquitaine, 2010. L'Aquitaine en tête des régions pour l'irrigation. Analyses et résultats, n° 39. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

[8] Brisson N. et Levrault F., 2010. Le Livre Vert du projet CLIMATOR. Éditions ADEME, 334 p.

[9] Soubeyroux J.-M. *et al.*, 2011. Projet ClimSec. Impact du changement climatique en Frannce sur la sécheresse et l'eau du sol. Direction de la Climatologie de Météo-France. http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article605

[10] Seguin B., 2010. Coup de chaud sur l'agriculture. Éditions Delachaux et Niestlé, Paris. 206 p.

[11] Amigues J.P. *et al.*, 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 p. + annexes.

[12] INRA, 2010. Le projet CLIMATOR. http://www.avignon.inra.fr/projet_climator/

[13] INRA, 2009. Adaptation de l'Agriculture et des Systèmes anthropisés au Changement Climatique. AIP

ADAGE. https://www1.clermont.inra.fr/adage/

[14] Parker A. *et al.*, 2011. A general phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L. Australian Journal of Grape and Wine Research 17, 206-216.

[15] Duchêne E. et Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. Agronomical Sustainable Development 25, 93-99.

[16] Garcia de Cortazar-Atauri I. *et al.*, 2010. Climate reconstructions from grape harvest dates: methodology and uncertainties. Holocene 20, 599-608.

[17] Chuine I. *et al.*, 2004. Historical phenology: grape ripening as a past climate indicatorm. Nature 432, 289-290.

[18] ONERC. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, du Logement et des Transports. http://onerc.org/

[19] Guédon Y. et Legave J.M., 2008. Analyzing the time-course variation of apple and pear tree dates of flowering stages in the global warming context. Ecological Modelling 219, 189-199.

[20] Brisson N. *et al.*, 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe ? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research 119 201-212.

[21] Legave J.-M., 2009. Comment faire face aux changements climatiques en arboriculture fruitière. Innovations Agronomiques – INRA 7, 165-177.

[22] Van Leeuwen C. *et al.*, 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 43: n° 3, 121-134.

[23] Bergqvist J. *et al.*, 2001. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvgnon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. American Journal of Enology and Viticulture 52, 1-7.

[24] Lee S.H. *et al.*, 2007. Vine Microclimate and Norisoprenoid Concentration in Cabernet Sauvignon Grapes and Wines. American Journal of Enology and Viticulture 58, 291-301.

[25] Jones G.V. *et al.*, 2005. Climate change and global wine quality. Climatic Change 73, 319-343.

[26] Agreste-Aquitaine, 2008. Maïs aquitain : irrigation sous tension. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr, n° 16.

[27] Agreste-Primeur, 2007. L'irrigation du maïs mis à mal par la sécheresse. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr, n° 194.

[28] Caubel J., 2012. Modélisation dynamique et générique de pathosystèmes fongiques aériens - Application à l'étude des impacts du changement climatique sur la rouille brune du blé et le mildiou de la vigne. Thèse de doctorat, Agro Paris Tech, Paris.

[29] Bale J.S. *et al.*, 2002. Herbivory in global climate research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. Global Change Biology 8, 1-16.

[30] Thiéry D. et Chuche J., 2007. Réflexion sur le devenir d'insectes du vignoble dans le contexte d'un réchauffement climatique global. 8e Journée technique du CIVB 13 mars 2007, 90-101.

[31] Thiéry D., 2007. Les tordeuses nuisibles au vignoble. In Les ravageurs de la vigne, Éditions Féret, Bordeaux, 230 p.

[32] Xuéreb A. *et al.*, 2003. Une pyrale polyphage pouvant causer des dégâts au vignoble, Ephestia parasitella (Lepidoptèrae Pyralidae, Phycitinae) est présente dans le Bordelais. Phytoma. 559, 30-32.

[33] De Pertuis C. *et al.*, 2010. Économie de l'adaptation au changement climatique. Conseil Économique pour le développement durable, 90 p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/001-3.pdf

[34] Danel J.-B., 2011. Conséquences sur les filières agricoles et agroalimentaires de l'atteinte des objectifs quantitatifs de la Directive cadre sur l'eau et du SDAGE dans le bassin Adour-Garonne. CGAAER n° 10181.

[35] Nolot J.-M. et Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. Cahiers Agricultures 12, 387-400.

[36] Ollat N. *et al.*, 2011. Multidisciplinary research to select new cultivars adapted to climate changes. XVIIth International GIESCO meeting August 29 - September 2 2011, Asti and Alba, Italy.

[37] Van Leeuwen C. *et al.*, 2008. Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate. VIIth International Terroir Congress, 20-23 May 2008, Changins, Switzerland.

[38] Seguin G., 1983. Influence des terroirs viticoles sur la constitution et la qualité des vendanges. Bulletins de l'O.I.V. 623, 3-17.

[39] Bois B. *et al.*, 2008. Estimating spatial and temporal variations in solar radiation within Bordeaux wingegrowing region using remotely sensed data. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin 42, 15-25.

[40] Roby J.-P. *et al.*, 2008. Références Vigne. Références technico-économiques de systèmes de conduite de la vigne. 2e édition. Éditions Synthèse Agricole - Lavoisier, Paris. ISBN 978-910340-50-6, 269 p.

[41] Ducan A., 2012. Modélisation de l'effet du réchauffement climatique sur les performances du porc à l'engrais. Mémoire de fin d'études Bordeaux Sciences Agro, 50 p.

[42] Méda B., 2011. Une approche dynamique des flux d'éléments et d'énergie des ateliers de production avicole. Conception et application du modèle avec

ou sans parcours, MOLDAVI. Thèse de l'AgroCampus Ouest- Rennes, 232 p.

[43] Maalouf J.-P. *et al.*, 2012. The interplay of stress and mowing disturbance for the intensity and importance of plant interactions in dry calcareous grasslan[44] Maalouf J-P. *et al.*, 2012. Integrating climate change into calcareous grassland management. Journal of Applied Ecology 49, 795-802.

Chapitre 5.2

[1] Badeau V. *et al.*, 1996. Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. "Growth trends in European forests". European Forest Institute Research Report 5, 167–182.

[2] Laumaille C., 1990. Dépérissement du pin maritime en Vendée. Etude denchronologique. IUT Vannes, Département de statistique, 20 p.

[3] Seppälä R. *et al.*, 2009. Adaptation of forests and people to climate change. A Global assessment report. IUFRO World Series Volume 22, 224 p.

[4] Loarie S.R. *et al.*, 2009. The velocity of climate change. Nature, 462, 1052-1056.

[5] Koskela J *et al.*, 2007. Climate change and forest genetic diversity: implications for sustainable forest management in Europe. Bioversity International, 111 p.

[6] Lindner M. *et al.*, 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management 259, 698-709.

[7] Kolström M. *et al.*, 2011. Reviewing the Science and Implementation of Climate Change Adaptation Measures in European Forestry. Forests 2, 961-982.

[8] Loustau D. *et al.*, 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. In: Forestry and climate change. CAB International (UK), 143-150.

[9] Roman-Amat B., 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport pour le ministère de l'Agriculture et de la Pêche et le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 125 p.

[10] Office national des forêts, Direction technique, 2007. Forêts et milieux naturels face au changement climatique. Rendez-vous techniques de l'ONF, Hors Série n° 3, 102 p.

[11] Brisson N. et Levraut F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet « CLIMATOR 2007-2010 », ADEME, 366 p.

[12] Loustau D. (coord. par), 2010. Forests, carbon cycle and climate change. Éditions QUAE, coll. Update Sciences and Technologies, 350 p.

[13] Vitasse Y. *et al.,* 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? Agricultural and Forest Meteorology 149, 735-744.

[14] Urli M., 2013. Réponses des arbres forestiers aux changements globaux : approches biogéographique et écophysiologique. Thèse de l'Université de Bordeaux 1, 266 pages.

[15] Boisvenue C. et Running S.W., 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. Global Change Biology 12, 862-882.

[16] Bontemps J-D. *et al.*, 2009. Long-term changes in forest productivity: a consistent assessment in even-aged stands. Forest Sci. 55, 549-564.

[17] Spiecker H, 1999. Overview of recent growth trends in European forests. Water, Air, & Soil Pollution 116,33-46.

[18] Jump A.S. *et al.*, 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica. Global Change Biology 12, 2163-2174.

[19] Paillette V., 2010. Déplacement altitudinal de l'optimum de croissance du hêtre dans les Pyrénées. Rapport de Master II, Paris Sud, 25 p.

[20] Thivolle Cazat A. et Najar M., 2002. Évolution de la productivité et de la récolte du pin maritime dans le massif landais. Évaluation de la disponibilité future en Gironde. Revue Forestière Française, vol LII, 3-4, 350-355.

[21] Pignard G., 2000. Analyse de l'évolution de la productivité des forêts françaises au cours des 25 dernières années à partir des données de l'Inventaire forestier national. Rapport de projet du Gip Ecofor sur la productivité des forêts, 52 p.

[22] Loustau D. et Bosc A., 2012. Contraintes climatiques sur les forêts. Innovations Agronomiques 18, 71-86.

[23] Linares J.C. et Tiscar P.A., 2011. Buffered climate change effects in a Mediterranean pine species: range limit implications from a tree-ring study. Oecologia 167, 847-859.

[24] Le Tacon F. *et al.*, 1994. Le dépérissement du pin maritime dans les Landes de Gascogne à la suite des introductions de graines d'origine ibérique et des grands froids des années 1962-1963 et 1985. Revue Forestière Française 46, 474-484.

[25] Durand P *et al.*, 1983. Le dépérissement du chêne pédonculé dans les Pyrénées atlantiques. Revue Forestière Française 35, 357-368.

[26] Nageleisen L.M., 1994. Dépérissement actuel des chênes. Revue Forestière Française 46(5), 504-511.

[27] Bouhot-Delduc L. et Lévy A., 1994. Rôle de la chenille processionnaire du pin dans les dépérissements du pin maritime landais en 1990 et 1991. Revue Forestière Française 46(5), 431-436.

[28] Guinaudeau J., 1957. Effets des grands froids de février

1956 sur les espèces forestières des Landes de Gascogne. Revue Forestière Française 1, 28-34.

[29] Belrose V. *et al.,* 2006. Conséquences visibles de l'été 2003 sur les forêts : des réactions immédiates contrastées, des incertitudes sur les conséquences à long terme. Rendez-Vous Techniques de l'ONF 11, 24-27.

[30] Archaux F. *et al.*, 2009. RENECOFOR – Dix ans de suivi de la végétation forestière : avancées méthodologiques et évolutions temporelles de la flore (1994/5-2005). ONF, 456 p.

[31] Thimonier A. *et al.*, 1994. Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in the North East. New Phytologist 126(3), 533-539.

[32] Grabherr G. *et al.,* 1994. Climate effects on mountain plants. Nature 369, 448.

[33] Debatisse R., 2011. Premières interprétations écologiques de la dynamique des peuplements forestiers du réseau RENECOFOR entre 1995 et 2005. Master 2 « Fonctionnement et Modélisation des Écosystèmes Terrestres », Université Bordeaux 1.

[34] IPCC, 2002. Climate Change and Biodiversity. IPCC Technical Paper V., 85 p.

[35] Archaux F. et Wolters V., 2006. Impact of summer drought on forest biodiversity: what do we know ? Annals of Forest Science 63, 645-652.

[36] Desprez-Loustau M.L. *et al.*, 2010. Species diversity and drivers of spread of alien fungi (sensu lato) in Europe with a particular focus on France. Biological Invasions 12(1), 157-172.

[37] Philibert A. *et al.* 2011. Predicting invasion success of forest pathogenic fungi from species traits. Journal of Applied Ecology 48, 1381-1390.

[38] Maugard D. et Baubet O., 2004. Le puceron lanigère du peuplier accentue sa présence dans le Sud-Ouest et étend sa zone d'épidémie vers le Nord. Bilan de la santé des forêts en 2003, Département de la santé des forêts, 1-4.

[39] Marçais B. *et al.*, 2004. Prediction and mapping of the impact of winter temperatures on the development of *Phytophthora cinnamomi* induced cankers on red and pedunculate oak. Phytopathology 94(8), 826-831.

[40] Fabre B. *et al.*, 2011. Can the emergence of pine shoot blight caused by *Sphaerospsis sapinea* in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change? Global Change Biology 17(10), 3218-3227.

[41] Desprez-Loustau M.L. *et al.*, 2010. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. In Response of temperate and Mediterranean forests to climate change: effects on carbon cycle, productivity and vulnerability. Éditions QUAE.

[42] Desprez-Loustau M.L. *et al.*, 2010. Are plant pathogen populations adapted for encounter with their host? A case study of phenological synchrony between oak and an obligate fungal parasite along an altitudinal gradient. Journal of Evolutionary Biology 23, 87-97.

[43] Pointeau S., 2011. Interactions peuplier – puceron lanigère (*Phloeomyzus passerinii* [Sign.]) et processus à l'origine de l'émergence et de l'expansion des pullulations. Thèse de l'Université d'Orléans.

[44] Pinon J. *et al.*, 2011. Comportement des cultivars de Peuplier envers la rouille. Rev. For. Fr. 63(3), 333-346.

[45] Jactel H. *et al.*, 2008. Le risque sanitaire dans les forêts mélangées. Rev. For. Fr. 60(2), 168-180.

[46] Jactel H. *et al.*, 1995. Intensification de la sylviculture du Pin maritime et risques phytosanitaires. Forêt-Entreprise 105, 45-47.

[47] Desprez-Loustau M.L. et Wagner K., 1997. Influence of silvicultural practices on twisting rust infection and damage in maritime pine, as related to growth. For. Ecol. Man. 98, 135-147.

[48] Legrand P. *et al.*, 2005. Lutte contre l'Armillaire en forêts : méthodes sylvicoles et culturales. In L'Armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux. Guillaumin, Legrand, Lung-escarmant, Botton (Ed.) INRA Éditions, 349-363.

[49] Badeau V. *et al.*, 2010. Climate change and the biogeography of French tree species: first result and perspectives. Forests, carbon cycle and climate change, Quae Éditions, Paris, 231-252.

[50] Gibelin A.L. et Déqué M., 2001. Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXI^{e} siècle. Note de Centre n° 79. Groupe de météorologie de grande échelle et climat. Météo-France Toulouse.

[51] Cheaib A *et al.*, 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. Ecology Letters 15, 533-544.

[52] Davi H. *et al.*, 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology 141, 35-56.

[53] Davi H. *et al.*, 2010. Modelling tools for predicting the carbon cycle. In: Forests, carbon cycle and climate change, Loustau D. (Coord.), Éditions QUAE, coll. Update Sciences and Technologies, 173-199.

[54] Porté A., 1999. Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime (Pinus pinaster Ait.) en lande humide. Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay, 160 p.

[55] Moreaux V., 2012. Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France. École Doctorale 304 « Sciences et Environnements », Thématique « Physique de l'Environnement ». Thèse de l'Université de Bordeaux I, 262 pages.

[56] Pluviaud F., 2000. Impact climatique d'un scénario de doublement de CO2 sur le bilan hydrique, la production primaire et la croissance du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Mémoire de fin de stage d'ingénieur, École Nationale des Ingénieurs de la Météorologie, Toulouse, 63 p.

[57] Cloppet E., 2002. Impact d'un scénario climatique régionalisé 1960-2100 sur la phénologie et la production primaire de quelques espèces forestières françaises. Mémoire de fin de stage d'Ingénieur, n° 808, 80 p. TOULOUSE, École Nationale de la Météorologie.

[58] Loustau, D. *et al.*, 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. Tree Physiol. 25, 813-823.

[59] Ciais P. *et al.*, 2010. How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. In Forests, carbon cycle and climate change. Loustau D. (coord. par), Editions QUAE, coll. Update Sciences and Technologies, 201-227.

[60] Bréda N. *et al.*, 2010. Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. In « Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR 2007-2010 », N. Brisson et F. Levraut, Éditeurs, ADEME, 225-236.

[61] Smith S.A. et Beaulieu J.-M., 2009. Life history influences rates of climatic niche evolution in flowering plants. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences 276, 4345-4352.

[62] Kremer A. *et al.*, 2012. Long distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. Ecology Letters 15, 378-392.

[63] Déqué M. et Cloppet E., 2010. Possible future climates in France. Forests, carbon cycle and climate change, Quae Éditions, 133-143.

[64] Ciais P. *et al.*, 2010. How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. Forests, carbon cycle and climate change. D. Loustau Coord. Paris, Éditions Quae, 201-227.

[65] Muskett R.R. and Romanovsky V. 2011. Multi-Satellite measurements of changes in water storage, land-surface temperature and atmospheric CO_2 of the Northern Eurasia permafrost watersheds. International Arctic Research Centre, University of Alaska Fairbanks, 2nd - 4th of March 2011.

[66] Davidson E.A. et Janssens I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature 440(7081), 165-173.

[67] Hietz P. *et al.*, 2011. Long-term change in the nitrogen cycle of tropical forests. Science 334(6056), 664-666.

[68] Gradowski T. et Thomas S.C., 2006. Phosphorus limitation of sugar maple growth in central Ontario. Forest Ecology and Management 226(1-3), 104-109.

[69] Webb T.J. *et al.*, 2006. Coincident scales of forest feedback on climate and conservation in a diversity hot spot. Proc. R. Soc. B 273, 757-765.

[70] Kulmala M. *et al.*, 2004. A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. Atmos. Chem Phys. 4, 57-562.

[71] Brovkin V. *et al.*, 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO_2 increase and climate change during the last 150 years. Global Change Biology 10, 1253-1266.

[72] Bonan G., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science 320, 1444-1449.

[73] Brunet Y. *et al.*, 2009. Les interactions vent-arbre, de l'échelle locale à celle du paysage : vers des approches déterministes. In La forêt face aux tempêtes. Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (coord. par), Éditions Quae, 229-259.

[74] Robinet C. et Roques A., 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. Integrative Zoology 5, 132-142.

[75] Vidal R. *et al.*, 2005. Biología y daños de *Dioryctria sylvestrella* Ratz. en un huerto semillero de *Pinus pinaster* Ait. Actas del IV Congreso Forestal Español. Zaragoza (España), 26-30 septiembre 2005. Publicado en: Actas del IV Congreso Forestal Español (en CD).

[76] Cordier T., 2012. Structure des assemblages fongiques de la phyllosphère des arbres forestiers et effet potentiel du changement climatique. Thèse de l'Université de Bordeaux.

[77] Battisti A. *et al.*, 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. Ecological Applications 15(6), 2084-2096.

[78] Bergot M. *et al.*, 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. Global Change Biology 10, 1-14.

[79] Desprez-Loustau M.L. *et al.*, 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. Can. J. Plant. Pathol. 29(2), 101-120.

[80] Woods A. *et al.*, 2005. Is an Unprecedented *Dothistroma* Needle Blight Epidemic Related to Climate Change? BioScience 55(9), 761-769.

[81] Piou D. *et al.*, 2006. Les risques sanitaires consécutifs à l'été 2003 à la lumière de la littérature. Rendez-Vous Techniques de l'ONF 11, 28-33.

[82] Sturrock R.N. *et al.*, 2011. Climate change and forest diseases. Plant Pathology 60, 133-149.

[83] Jactel H. *et al.*, 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis Global Change Biology 18(1), 267-276.

[84] Desprez-Loustau M.L. *et al.*, 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. Annals of Forest Science 63, 597-612.

[85] Robinet C. *et al.*, 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. Global Ecology and Biogeography 16, 460-471.

[86] Marçais B. *et al.*, 2009. Phenotypic variation in phenology of ascospore production between European populations of oak powdery mildew. Annals of Forest Science 66, n° 814, 8 p.

[87] Kremer A. *et al.*, 2010. Historical and contemporary dynamics of adaptive differentiation in European oaks. In : Molecular approaches in natural resource Conservation, p101-122, DeWoody A, Bickham J, Michler C, Nichols K, Rhodes G, Woeste K (eds), Cambridge University Press.

[88] Kremer A., 2010. Evolutionary responses of European oaks to climate change. Irish Forestry 67, 53-66.

[89] Harfouche A. *et al.*, 1995. Variabilité intraspécifique chez le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) dans le Sud-Est de la France. II. Heterosis et combinaison de caractères chez les hybrides interraciaux. Annales des Sciences Forestières 52(4), 329-346.

[90] Chatry C. *et al.*, 2010. Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts - Rapport de la mission interministérielle : Ministère de l'alimentation de l'agriculture et de la Pêche (CGAAER), ministère de l'intérieur, de l'outre-mer et des collectivités territoriales (inspection générale de l'administration), ministère de l'écologie de l'énergie, du développement durable et de la mer (conseil général de l'environnement et du développement durable), 90 p.

[91] MAP (ministère de l'agriculture et de la pêche), Préfecture zone de défense Sud-Ouest, DFCI Sud-Ouest (défense des forêts contre l'incendie), GIP ATGeRI (aménagement du territoire et gestion des risques). 2008 Plan de protection des forets contre l'incendie d'Aquitaine, 126 p.

[92] Jouzel J. *et al.*, 2011. Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM. Rapport pour le Plan National d'Adaptation, 140 p.

[93] Piedallu C. *et al.*, 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. Revue Forestière Française, vol LXI, 6, 567-593.

[94] Robin C., 2005. Hypovirulence : les châtaigniers guérissent naturellement du chancre. Forêt Entreprise 165, 26-30.

[95] Amorini E. *et al.*, 2001. Impact of silvicultural system on Cryphonectria parasitica incidence and on genetic variability in a chestnut coppice in Central Italy. Forest Ecology and Management 142(1-3), 19-31.

[96] Sergent A., 2010. Régulation politique du secteur forestier en France et changement d'échelle de l'action publique. Économie rurale, n° 318-319.

[97] Sergent A., 2012. Gouvernance et politiques publiques forêt-bois in « Le massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050 », Mora O., Banos V., Carnus J.-M., Regolini M. (sous la dir. de), Rapport de l'étude prospective, Conseil régional d'Aquitaine-INRA, 249-251.

[98] Moquay P., 2007. Du sectoriel au territorial : nouveaux dispositifs, nouveau référentiel, Revue forestière française 5, 505-14.

[99] Mora O. *et al.*, 2012. Le massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050. Rapport de l'étude prospective, Conseil régional d'Aquitaine-INRA, 290 p.

[100] IPCC, 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Summary for Policymakers and technical summary, p. 230.

[101] Lesgourgues Y. et Drouineau S. 2009. Élaboration de nouveaux itinéraires techniques de régénération de la forêt landaise en réponse aux scénarios possibles. Innovations Agronomiques 6, 101-112.

[102] Medlyn B.E. *et al.*, 1999. Effects of elevated [CO2] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. Plant Cell & Envir. 22, 1475-1495.

[103] Norby R.H. *et al.*, 2005. Forest response to elevated CO2 is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 102, 18052-18056.

[104] Bellassen V. *et al.*, 2010. Modelling forest management within a global vegetation model – Part 1: Model structure and general behaviour. Ecological Modelling 221, 2458-2474.

[105] Bellassen V. *et al.*, 2011. Modelling forest management within a global vegetation model 1 – Part 2: model validation from tree to continental scale. Ecological Modeling 222, 57-75.

[106] Malfait J., 2009. Flux, stocks de bois en Aquitaine et séquestration du carbone : état de référence avant la tempête de janvier 2009. Les documents de recherche du GREThA - Environnement, Décembre 2009, 69 p. http://gretha.u-bordeaux4.fr/carbone-bois-aquitaine

Chapitre 6-Introduction

[1] Field J.G. *et al.*, 2002. Oceans 2020: Science, trends, and the challenge of sustainability. Island Press.

[2] Costanza R. *et al.*, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253-260.

[3] Levitus S. *et al.*, 2000. Warming of the World Ocean. Science 287, 2225-2229.

[4] Croxall J.-P., 1992. Southern Ocean environmental

changes – effects on seabird, seal and whale populations. Phil. Trans. R. Soc. B 338, 319-328.

[5] CroxaSæther B.E. *et al.*, 2005. Life history variation predicts the effects of demographic stochasticity on avian population dynamics. American Naturalist 164, 793-802.

[6] Stenseth N.C. *et al.*, 2002. Ecological effects of climate fluctuations. Science 297, 1292-1296.

[7] Heip C.H.R. *et al.*, 1995. Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries, Oceanography And Marine Biology - An Annual Review, Vol 33, U C L Press Ltd, 1-149.

[8] Blaber S.J.M. et Blaber T.G., 1980. Factors affecting the distribution of juvenile estuarine and inshore fish. Journal of fish biology 17, 143-162.

[9] Haedrich R.L., 1983. Estuarine fishes, in Ketchum, B.H. (Ed.), Estuaries and Enclosed Seas. Ecosystems of the World, 183-207.

[10] Beck M.W. *et al.*, 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. Bioscience 51, 633-641.

[11] Yanagi T., 1999. Coastal Oceanography. Kluwer Academic Publishers, 162 p. ; cité par Leredde Y ., 2011. Apports de l'Océanographie côtière à la caractérisation des risques littoraux. Mémoire de HDR, École doctorale SIBAGHE Montpellier, 122 p.

[12] Uriarte A. *et al.*, 1996. Bay of Biscay and Ibero Atlantic anchovy populations and their fisheries. Sci. Mar. 60(Supl. 2), 237-255.

[13] Arbault S. et Lacroix N., 1977. Œufs et larves de clupéidés et engraulidés dans le golfe de Gascogne (1969-1973). Distribution des frayères. Relation entre les facteurs du milieu et la reproduction. Rev. Trav. Inst. Pêches Marit., 41(3), 277-254.

[14] Goosen N. K. *et al.*, 1999. Bacterial and phytoplankton production in the maximum turbidity zone of three European estuaries: the Elbe, Westerschelde and Gironde. Journal of marine systems 22, 151-171.

[15] Abril G. *et al.*, 1999. Oxic/anoxic oscillations and organic carbon mineralization in an estuarine maximum turbidity zone (The Gironde, France). Limnology and Oceanography 44, 1304-1315.

Chapitre 6.1

[1] Lombard A. *et al.*, 2009. Regional variability of sea level change using a global ocean model at 1/4 resolution. Ocean Dyn.

[2] Chust G. *et al.*, 2010. Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century, Estuarine, Coastal and Shelf Science 87, Issue 1, 113-124.

[3] Dodet G. *et al.*, 2010. Wave climate variability in the north-east Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean Modell. 31, 120-131.

[4] Le Cozannet G. *et al.*, 2011. Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. J. Climate, 24, 641-652. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3589.1

[5] Charles E. *et al.*, 2012. Present wave climate in the Bay of Biscay: spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. Journal of Climate 25, 2020-2039.

[6] Charles E. *et al.*, 2012. Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. Ocean Dynamics, DOI 10.1007/s10236-012-0534-8.

[7] Dupuis H. *et al.*, 2006. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. J. Mar. Syst. 63, 105-114.

[8] Pedreros R., 2000. Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières – application au littoral aquitain. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I.

[9] Déqué M., 2003. Impacts des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations (IMFREX). Rapport technique, 3 p., Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques.

[10] Déqué M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57(1-2), 16-26, DOI 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030, extreme Climatic Events.

[11] Le Cozannet G. *et al.*, 2009. Impacts du Changement Climatique, Adaptation et coûts associés en France pour les Risques Côtiers. Rapport du Groupe de Travail « Risques Naturels, Assurances et Adaptation au Changement Climatique », BRGM RP 57141.

[12] Prat M-C., 2010. La théorie de la pénurie sédimentaire appliquée au sud-ouest de la France : l'exemple de l'Aquitaine et des Charentes. Roland Paskoff et les littoraux : regards de chercheurs (Duvat V., Battiau-Queney Y., Clus-Auby C., Prat M-C., [sous la dir. de]). L'Harmattan, 160-179.

[13] Mazières A. *et al.*, 2011. Analyse morphobathymétrique et suivi de l'évolution actuelle de la couverture sédimentaire superficielle du plateau interne aquitain: Exemple de la zone de La Salie entre 1984 et 2010. 13e Congrès Français de Sédimentologie. ASF, Dijon (France).

[14] Pontee N.I. *et al.*, 1998. Morpho-sedimentary evidence of Holocene coastal changes near the mouth of the Gironde and on the Medoc Peninsula, SW France. Oceanologica Acta, 21, 243-261. 10.1016/s0399-1784(98)80012-1.

[15] Mugica J. et Mallet C. avec la collaboration de Hennequin V., 2008. Étude de l'évolution géomorphologique récente de la côte sableuse aquitaine. Rapport BRGM/RP-56874-FR.

[16] Aubié S. *et al.*, 2011. Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de

la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-59095-FR.

[17] Tastet J.P. et Pontee N.I., 1998. Morpho-chronology of coastal dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France. Geomorphology 25, 93-109.

[18] Lafon V. *et al.*, 2002. Determining ridge and runnel longshore migration rate using spot imagery. Oceanologica Acta 25, 149-158.

[19] Sénéchal N. *et al.*, 2009. Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long-term data set. Geomorphology 107, 263-274.

[20] Castelle B. *et al.*, 2007. Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian coast: a review. Marine Geology 245, 141-159.

[21] Almar R. *et al.*, 2010. Two- and three-dimensional double-sandbar behaviour under intense wave forcing and a meso-macro tidal range. Continental Shelf Research 30, 781-792.

[22] Lafon V. *et al.*, 2005. Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment (SW France): 2. Physical forcing analysis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, 449-462.

[23] Parisot J.P. *et al.*, 2010. Analyse de l'évolution morphodynamique de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale. XI[e] Journées Nationales de Génie Côtier – Génier Civil, 387-396.

[24] Ranasingh R. *et al.*, 2004. The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation. Marine Geology 204, 273-287.

[25] Harley M.D. *et al.*, 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. Journal of Geophysical Research 116(F04033). doi:10.1029/2010JF001989

[26] Castelle B. *et al.*, 2007. Impact of storms on beach erosion: Broadbeach (Gold Coast, Australia). Journal of Coastal Research, SI 50, 534-539.

[27] Aubié S. et Peter-Borie M., 2008. Suivi de conditions hydriques de la falaise d'Harotzen Costa à Guéthary (64). Observatoire de la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-56876-FR.

[28] Bruun P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. Journal of Waterways and Harbours Division 88, 117-130.

[29] Cooper J.A.G. et Pilkey O.H., 2004. Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule, Global and Planetary Change 43, 157-171.

[30] Cowell P. *et al.*, 1995. Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. Marine Geology 126, 45-61.

[31] Cayocca F., 2001. Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin. Coastal Engineering 42, 115-142.

[32] Mellalieu S.J. *et al.*, 2000. Holocene development of the east bank of the Gironde Estuary: geoarchaeological investigation of the Saint Ciers-sur-Gironde march. In Pye K. and Allen J.R.L. (eds). Coastal and estuarine Environments: sedimentology, geomorphology 175, 317-341.

[33] Laborie V. *et al.*, 2012. Évolution de l'emprise des zones inondables de l'estuaire de la Gironde sous l'influence du changement climatique. Actes des 12[e] Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Cherbourg, 941-948. DOI:10.5150 /jngcgc.2012.103-L

[34] EAUCEA, 2008. Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde et prospective à moyen terme. Phase 1 : Analyse des enjeux liés à l'eau. Rapport pour le SMIDDEST- SAGE Estuaire de la Gironde et milieux associés, décembre 2008, 120 p.

[35] Mugica J. *et al.*, 2010. Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. Rapport BRGM/RP-58723-FR, 92 p.

[36] Hamm L. *et al.*, 2002. A summary of European experience with shore nourishment. Coast. Engineer. 47, 237-264.

[37] Hanson H. *et al.*, 2002. Beach nourishment projects, pratices, and objectives - a European overview. Coastal Engineering 47, 81-111.

[38] Castelle B. *et al.*, 2008. Can the Gold Coast beaches withstand extreme events? Geo-Marine Letters 28, 23-30.

[39] Abadie S. *et al.*, 2008. Erosion generated by wave induced currents in the vicinity of a jetty: the study case of the relation between the Adour river mouth and Anglet's beach - France. Journal of Coastal Research 24(1), 59-69.

[40] Castelle B. *et al.*, 2009. Beach nourishment at coolangatta bay over the period 1987-2005. Coastal Engineering 56, 940-950.

[41] Turner I.L., 2006. Discriminating modes of shoreline response to offshore-detached structures. Journal of Wateway Port Coastal and Ocean Engineering 132, 180-191.

[42] Artières O. *et al.*, 2004. Protection côtière par tubes filtre conteneurs. Cas de la plage de l'Amélie. Actes des VIII[e] journées Génie civil-génie Côtier, compiègne, 7-9 Septembre 2004, 769-773.

[43] Trmal C. et Lebreton P., 2009. Évaluation de l'impact du changement climatique sur le dimensionnement des digues à talus, La Houille Blanche, n° 2, 45-51.

Chapitre 6.2

[1] Goberville E. *et al.*, 2010. Climate driven changes in coastal marine systems of western Europe. Marine Ecology Progress Series 408, 129-147.

[2] Koutsikopoulos C. *et al.*, 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. Oceanol. Acta 21, 335-344.

[3] Planque B. *et al.*, 2003. Large-scale hydroclimatic variability in the Bay of Biscay: the 1990's in the context of interdecadal changes. ICES Mar. Sci. Symp. 219, 61-70.

[4] Brander KM. *et al.*, 2003. Use of continuous plankton recorder information in support of marine management: applications in fisheries, environmental protection, and in the study of ecosystem response to environmental change. Progress in Oceanography 58, 175-191.

[5] Perry A.L. *et al.*, 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. Science 308, 1912-1915.

[6] Castège I. *et al.*, 2010. Programme régional « Environnement et Ressources des Milieux Marins Aquitains ». Compte rendu d'activité 2010. ERMMA, Biarritz, 66 p.

[7] Hémery G. *et al.*, 2002. Écosystème et climat dans le Golfe de Gascogne. Météorologie maritime 194, 3-5.

[8] Castège I. et Hémery G., 2009. Oiseaux marins et cétacés du golfe de Gascogne. Répartition, évolution des populations et éléments pour la définition des aires marines protégées. Éditions Biotope, Mèze & Éditions du Muséum d'Histoire Naturelle, Paris, 176 p.

[9] Hémery G. *et al.*, 2008. Detecting the impact of oceano-climatic changes on marine ecosystems using a multivariate index : The cas of the Bay of Biscay (North Atlantic European Ocean). Global Change Biology 14, 27-38.

[10] Chaalali A. et al., 2012. Changes in the zooplankton community distribution in the Gironde estuary: a marinisation consequence? Estuarine, Coastal and Shelf Science, (sous presse).

[11] DeYoung B. *et al.*, 2004. Challenges of Modeling Ocean Basin Ecosystems. Science 304(5676), 1463-1466.

[12] Weijerman M. *et al.*, 2005. Regime shifts in marine ecosystems of the North Sea and Wadden Sea. Mar Ecol Prog Ser 298, 21-39.

[13] Beaugrand G. *et al.*, 2009. Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean. Global Change Biology 15(7), 1790-1803.

[14] Belkin I.M., 2009. Rapid warming of Large Marine Ecosystems. Progress in Oceanography 81, 207-213.

[15] Beaugrand G. et Reid P.C., 2003. Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. Global Change Biology 9(6), 801-817.

[16] Levitus S. *et al.*, 2009. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. Geophysical Research Letters, 36.

[17] Glé C. *et al.*, 2008. Variability of nutrients and phytoplanckton primary production in a shallow macrotidal coastal ecosystem (Arcachon Bay, France). Estuarine and Coastal Shelf Science 76, 642-656.

[18] David V. *et al.*, 2005. Long term changes of the zooplanktonic variability in a turbid estuary: Gironde estuary (France). Estuarine Coastal and Shelf Science 64, 171-184.

[19] Leorri E. *et al.*, 2008. Development of a foraminifera-based transfer function in the Basque marshes, N. Spain: Implications for sea-level studies in the Bay of Biscay. Marine Geology 251, 60-74.

[20] Chust G. *et al.*, 2010. Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. Estuarine, Coastal and Shelf Science 87, 113-124.

[21] Valle M. *et al.*, 2010. Estudio del hábitat idóneo para *Zostera noltii* y su modificación bajo un escenario de cambio climático en el estuario del Oka. Revista de Investigación Marina 17(1), 1-12.

[22] Revilla M. *et al.*, 2010. A two-decade record of surface chlorophyll "a" and temperature in offshore waters of the Basque country (southeastern Bay of Biscay). Revista de Investigación Marina 17, 14-20.

[23] Chaalali A. *et al.*, 2012. Abrupt changes in estuarine biological compartments in relation to climate changes: the example of a European macrotidal estuary. Estuaries & Coasts. (sous presse).

[24] Chust, G. *et al.*, 2011. Climate Change impacts on coastal and pelagic environments in the southeastern Bay of Biscay. Climate Research 48(2-3), 307-332.

[25] Glé C. *et al.*, 2007. Typology of environmental conditions at the onset of winter phytoplankton blooms in a shallow macrotidal coastal ecosystem, Arcachon Bay (France). Journal of Plankton Research 29(11), 999-1014.

[26] David V. *et al.*, 2007. The paradox of the long-term decrease of the clutch-size of the calanoid copepod *Eurytemora affinis* in a highly turbid estuary (Gironde estuary, France) and the stability of species abundances. Journal of Plankton Research 333, 202-218.

[27] Pasquaud S. *et al.*, 2012. Increase of marine juvenile fish abundances in the middle Gironde estuary related to warmer and more saline waters, due to global changes. Estuarine, Coastal and Shelf Science 104/105, 46-53.

[28] Pronier O. et Rochard E., 1998. Fonctionnement d'une population d'éperlan (Osmerus eperlanus, osmériformes osmeridae) située en limite méridionale de son aire de répartition, influence de la température. BFPP - Bulletin Francais de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques 71, 479-497.

[29] Beaugrand G., 2003, Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydro-climatic environment. Fisheries Oceanography 12, 270-283.

[30] David V. et al., 2007. Successful colonization of the calanoid copepod Acartia tonsa in the oligo-mesohaline area of the Gironde estuary (SW France) – Natural or anthropogenic forcing? Estuarine, Coastal and Shelf Science 71, 429-442.

[31] De Casamajor M.-N., 2004. Baie de Biscaye : richesse méconnue & diversité. Éditions A. Dewez, 264 p.

[32] Aguirrezabalaga F. *et al.*, 1988. Contribucion al conocimiento de la fauna marina en la costa vasca VI. Lurralde 11, 217-265.

[33] Galparsoro I. *et al.*, 2008. Elaboracion de cartografia de habitats marinos de la bahia de Txingudi., AZTI-Technalia para Euskadi-Aquitania, 101 p. +anexo.

[34] De Folin L., 1903. Pêches et chasses zoologiques, Éditions Petite bibliothèque scientifique, Paris, 332 p.

[35] Quero J.C. *et al.*, 1998. Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaux dans l'Atlantique européen. Oceanologica acta 21(2), 345-351.

[36] Altuna Prados A., 1991. Nota sobre la presencia de Paramuricea grayi (Johnson, 1861) (Cnidaria, Anthozoa), en la costa vasca. Munibe 43, 85-90.

[37] Quéro J.C. *et al.*, 1989. Les poissons du Golfe de Gascogne. Éditions IFREMER.

[38] Nicolas D. *et al.*, 2010. Fish under influence: A macroecological analysis of relations between fish species richness and environmental gradients among European tidal estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf Science 86, 137-147.

[39] Castège, I. *et al.*, 2012. Exploring cetacean stranding pattern in light of variation in at-sea encounter rate and fishing activity: lessons from time surveys in the south Bay of Biscay (East-Atlantic; France). Journal of Marine Systems 109–110, Supplement, 284-292.

[40] Goulletquer P. *et al.*, 2002. Open Atlantic coast of Europe - a century of introduced species into french waters. In Invasive species of Europe - Distribution, impact and management. Kluwer Academic Publishers.

[41] Salvo F., 2010. Approche comparée des populations naturelles et cultivées d'huître japonaise Crassostrea gigas dans une lagune macrotidale (Bassin d'Arcachon) : cycle biologique, relations trophiques et effets sur le benthos. Thèse de l'Université Bordeaux 1.

[42] Lassalle G. *et al.*, 2007. Parasite co-infection of two sympatric bivalves, the Manila clam (Ruditapesphilippinarum) and the cockle (Cerasto-derma edule) along a latitudinal gradient. Aquat. Living Resour. 20, 33-42.

[43] Richter O. *et al.*, 2008. A model for predicting the emergence of dragonflies in a changing climate. Freshwater Biology 53(9), 1868-1880.

[44] Edwards M. et Richardson A., 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and rtophic mismatch. Nature 430, 881-884.

[45] Lassalle G. *et al.*, 2008. Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. Biological Conservation 141(4), 1105-1118.

[46] Leterme S.C. *et al.*, 2005. Decadal basin-scale changes in diatoms, dinoflagellates and phytoplankton colour across the North Atlantic. Limnol. Oceanogr. 50(4), 1244-1253.

[47] Etcheber H. *et al.*, 2011. Monitoring water quality in estuarine environments: Lessons from the MAGEST monitoring program in the gironde fluvial-estuarine system. Hydrology and Earth Syst. Sc. 15, 831-840.

[48] Thackeray S.J., *et al.*, 2010. Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. Global Change Biology 16(12), 3304-3313.

[49] Massu N. et Landmann G., 2011. Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine. GIP ECOFOR, Synthèse bibliographique, 181 p. http://ccbio.gip-ecofor.org

[50] Beaugrand G. *et al.*, 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. Nature 426, 661-664.

[51] Desclaux-Marchand C., 2003. Intéractions hôtes-parasites : diversité, mécanismes d'infestation et impact des trématodes digènes sur les coques Cerastoderma edule (mollusque bivalve) en milieu lagunaire macrotidal. Thèse Université Bordeaux 1.

[52] Marcos M. *et al.*, 2012. Effect of sea level extremes on the western Basque coast during the 21st century. Climate Research. doi: 10.3354/cr01069.

[53] Steinacher M. *et al.*, 2010. Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. Biogeosciences 7, 979-1005.

[54] Richardson A.J. *et al.*, 2009. The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. Trends in Ecology & Evolution 24, 312-322.

[55] Castège I. *et al.*, 2004. Changes in abundance and at-sea distribution of seabirds in the Bay of Biscay prior to, and following the "Erika" oil spill. Aquatic Living Resources 17, 361-367.

[56] Castège I. *et al.*, 2007. Estimating actual seabirds mortality at sea and relationship with oil spills: lesson from the "Prestige" oil spill in Aquitaine (France). Ardeola, 289-307.

[57] Garmendia M. *et al.*, 2008. Long-term environmental, climatic and anthropogenic factors affecting subtidal soft-bottom benthic communities, within the Basque coast. Revista de Investigación Marina 2, 1-28.

[58] Borja A. *et al.*, 2004. Benthic communities, biogeography and resources management. In Borja A, Collins M. Oceanography aAlcock R., 2003. The effects of climate change on rocky shore communities in the Bay of Biscay, 1895–2050. PhD. Thesis, University of Southampton, 296 p.

Chapitre 6.3

[1] Orr J.-C. *et al.*, 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature 437, 681-686.

[2] Gros P., 2011. Écosystèmes marins (Chapitre 5). In Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine – synthèse de la bibliographie. (MEDDTL (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement)). http://archimer.ifremer.fr/doc/00043/15394/

[3] Léonardie S. *et al.*, 2008. Étude du poids socio-économique de la filière pêche dans le quartier maritime de Bayonne. Rapport CLPMEM de Bayonne/IMA de Bayonne/Agrocamppus Rennes, 48 p.

[4] Léauté J.-P., 2002. Caractéristiques des petites pêches côtières et estuariennes de la côte atlantique du sud de l'Europe. Rapport Final Sites ateliers. EC./DG Fish (DGXIV) : Contrat 99/024.

[5] Castelnaud G. et Cauvin G., 2002. Site atelier Gironde. In Léauté J.-P. (2002). Caractéristiques des petites pêches côtières et estuariennes de la côte atlantique du sud de l'Europe. Rapport Final Sites ateliers. EC./DG Fish (DGXIV) : Contrat 99/024, 58 p.

[6] Caill-Milly N. *et al.*, 2001. La petite pêche en Aquitaine : Le bassin d'Arcachon – Halieutique, socioéconomie, usages et réglementations (1999-2000), Convention PESCA – Rapport Ifremer-CRTSGéolittomer-Nantes, 156 p. + annexes.

[7] Cuende F.-X. *et al.*, 2002. Site atelier de l'Adour. In Léauté J.-P.(2002). Caractéristiques des petites pêches côtières et estuariennes de la côte atlantique du sud de l'Europe. Rapport Final Sites ateliers. EC./DG Fish (DGXIV) : Contrat 99/024, 43 p.

[8] Caill-Milly N. et Prouzet P., 2000. Pêches basques et sud-landaises : Ressources, flottille, économie, commercialisation. Repère Océan 17, Éditions Ifremer, 124 p.

[9] Prouzet P. *et al.*, 2011. Transmission of knowledge of fishing on the river Adour. In International meeting of small-scale professional Sea and Inshore fishers. The official Records, 56-66.

[10] Pronier O. et Rochard E., 1998. Fonctionnement d'une population d'éperlan (Osmerus eperlanus, Osmériformes Osmeridae) située en limite méridionale de son aire de répartition, influence de la température. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture 350, 479-497.

[11] Adam G. *et al.*, 2008. L'anguille européenne : Indicateurs d'abondance et de colonisation. Éditions Quae, coll. Savoir-Faire, 393 p.

[12] Rabic J. *et al.*, 2011. Goods and services offered by coastal, estuarine and inland ecosystems. In International meeting of small-scale professional Sea and Inshore fishers. The official Records, 22-26.

[13] Cabanne F., 2007. Lexique d'écologie, d'environnement et d'aménagement du littoral. 278 p.

[14] Adam G. *et al.*, 2008. La vie de l'Anguille. In L'anguille européenne : Indicateurs d'abondance et de colonisation. Éditions Quae, coll. Savoir-Faire, 19-41.

[15] Thibault M., 1994. Aperçu historique sur l'évolution des captures et des stocks. In Le saumon atlantique. Édition IFREMER, J. Gueguen et P. Prouzet, 175-183.

[16] Prouzet P. et Cuende F.-X., 1994. Le saumon en France : exploitation, gestion et avenir. In Le saumon atlantique. Édition IFREMER, J. Gueguen et P. Prouzet, 255-267.

[17] Fromentin J.-M. *et al.*, 2007. The ecosystem approach to fisheries: what are the research priorities ? Document de la cellule prospective du programme DEMOSTEM/IFREMER, 39 p.

[18] Garcia S.-M. et Prouzet P., 2009. Towards the implementation of an integrated approach to fisheries resources management in Ifremer, France. Aquatic Living Resources 22, 381-394.

[19] Anonyme, 2007. Programme des Nations Unies pour l'Environnement : GEO4 (Global Environment Outlook), L'Environnement pour le Développement. PNUE, 574 p.

[20] Rijnsdorp A. *et al.*, 2009. Resolving the effect of climate change on fish populations. ICES Journal of Marine Science 66, 1570-1583.

[21] Gian-Reto W. *et al.*, 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 416, 389-395.

[22] Morandeau G. *et al.*, 2010. Zoom sur la flottille active de l'Adour en 2008. Document Ifremer/SIH, 4 pages.

[23] Girardin M. et Castelnaud G., 2010. Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde : suivi des captures 2009 – Étude de la faune circulante 2009. Étude 136, rapport EDF - CEMAGREF, 236 p. + annexes.

[24] Prouzet P., 2011. Glass eel Fisheries in France: Where, When, How? Trends and threats on the recruitment. Oral communication. EELIAD meeting Biarritz 13th to 15th of April.

[25] Tchilian N., 2011. PCB Plan: Taking into account the environmental impacts. In International meeting of small-scale professional Sea and Inshore fishers. The official Records, 48-50.

[26] Gautier Ph. *et al.*, 2011. PCBs: Impact of other uses on the activity sector. In International meeting of small-scale professional Sea and Inshore fishers. The official Records, 51-54.

[27] Scourzic T. *et al.*, 2011. Évaluation du stock d'huîtres sauvages et en élevage dans le Bassin d'Arcachon. Contrat Agence des Aires Marines Protégées & OCEANIDE, 69 p.

[28] Auby I. et Maurer D., 2004. Étude de la reproduction de l'huître creuse dans le Bassin d'Arcachon, Rapport final. Rapport Ifremer R.INT.DEL/AR 04-05, 203 p.

[29] Sinclair M., 1988. Marine Populations: an Essay on

Population Regulation and Speciation. University of Washington Press, Seattle.

[30] Lévêque C. (coord.), 2011. Synthèse du projet BEEST. Rapport GIP Seine-Aval/Cemagref/Ifremer/Université Bordeaux 1/Université de Rouen/Université de Nantes/ Université Sciences et Techniques de Lille, 100 p.

[31] Caill-Milly N. *et al.*, 2011. Evolution of an exploited resource (Manila clam in the Arcachon Bay) in response to natural and anthropogenic sources of change. Symposium Vulnerability of coastal ecosystems to global change and extreme events, 18-21 October 2011, Biarritz. Poster et recueil des résumés p. 129.

[32] D'Elbée J. *et al.*, 2009. Variation and temporal patterns in the composition of the surface ichthyoplankton in the southern bay of Biscay (W. Atlantic). Continental Shelf Research 29, 1136-1144.

[33] Koutsikopoulos C. et Lacroix N., 1992. Distribution and abundance of sole (*Solea solea* L.) eggs and larvae in the Bay of Biscay between 1986 and 1989. Netherlands Journal of Sea Research 29, 81-91.

[34] Teal L.R. *et al.*, 2008. Effects of climate change on growth of 0-group sole and plaice. Marine Ecology Progress Series 358, 219-230.

[35] Millner R.S. et Whiting C.L., 1996. Long term changes in growth and population abundance of sole in the North Sea from 1940 to the present. ICES Journal of Marine Science 53, 1185-1195.

[36] Forest A., 1995. Variabilité du recrutement de la sole commune *Solea solea* (L.) dans le golfe de Gascogne. Comparaison avec différents stocks du Nord Est Atlantique. Journal de Recherche Océanographique 20, 55-62.

[37] Le Pape O. *et al.*, 2003. Relationship between interannual variations of the river plume and the extent of nursery grounds for the common sole (*Solea solea*, L.) in Vilaine Bay. Effects on recruitment variability. Journal of Sea Research 50, 177-185.

[38] Van der Veer H.W. *et al.*, 2000. Recruitment in flatfish, with special emphasis on North Atlantic species: progress made by the Flatfish Symposia. ICES Journal of Marine Science 57, 202-215.

[39] Biais G., 2007. Quality Handbook Annex: WGSSDS-Biscay sole in Report of the Working Group on the Assessment of the southern Shelf Stocks of Hake, Monk and Megrim, Vigo, Spain, 8-17 May 2007. ICES CM 2007/ACFM: 21, 612-622.

[40] Rijnsdorp A.D. *et al.*, 1992. Recruitment of sole, *Solea solea* (L), in the Northeast Atlantic. Netherlands Journal of Sea Research 29, 173-192.

[41] Henderson P.A. et Seaby R.M., 2005. The role of climate in determining the temporal variation in abundance, recruitement ang growth of sole *Solea solea* in the Bristol Channel. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 85, 197-204.

[42] Hermant M. *et al.*, 2010. Impact of warming on abundance and occurrence of flatfish populations in the Bay of Biscay (France). Journal of Sea Research 64, 45-53.

[43] Pawson M.G. et Pickett G.D., 1996. The annual pattern of condition and maturity in bass, *Dicentrarchus labrax*, in waters around England and Wales. Jour. of the Marine Biologic. Association of the UK 76, 107-125.

[44] Lafaille P. *et al.*, 2001. Feeding Ecology of 0-Group Sea Bass, *Dicentrarchus labrax*, in Salt Marshes of Mont Saint-Michel (France). Estuaries 24 (N° 1), 116-125.

[45] Martinho F. *et al.*, 2008. Estuarine colonization, population structure and nursery functioning for 0-group sa bass (*Dicentrarchus labrax*), flounder (*Platichthys flesus*) and sole (*Solea solea*) in a mesotidal temperate estuary. Journal of Applied Ichthyology 24, 229-237.

[46] Quéro, J.-C., 1989. Sur la piste des maigres *Argyrosomus regius* (Poissons, Scianidae) du golfe de Gascogne et de Mauritanie. Océanis 15(2), 161-170.

[47] Sourget Q. et Biais G., 2009. Écologie, biologie et exploitation du maigre du golfe de Gascogne. Rapport Ifremer/CNRS, 68 p.

[48] Quéro J.-C. et Vayne J.-J., 1987. Le maigre *Argyrosomus regius* (Asso, 1801) (Pisces, Perciformes, Sciaenidae) du golfe de Gascogne et des eaux plus septentrionales. Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes 49 (1 et 2), 35-66.

[49] Tixerant G., 1974. Contribution à l'étude de la biologie du maigre ou courbine (*Argyrosomus regius* Asso-Sciaena aquila Lacep.) sur la côte Mauritanienne. Thèse d'université, université d'Aix-Marseille, 146 p.

[50] Quéméner L., 2002. Le maigre commun (*Argyrosomus regius*) – Biologie, pêche, marché et potentiel aquacole. Collection Ressources de la Mer, 31 p.

[51] Cabral H.N. *et al.*, 2001. Does the Tagus estuary fish community reflect environmental changes? Climate Research 18, 119-126.

[52] Cury P. et Roy C., 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 46, 670-680.

[53] Borja A. *et al.*, 2002. Environmental factors and recruitment of mackerel, *Scomber scombrus* L. 1758, along the north-east Atlantic coasts of Europe. Fisheries Oceanography 11, 1-12.

[54] Reid D.G. *et al.*, 2001. Hydrography and mackerel distribution on the shelf edge west of the Norvegian deeps. Fisheries Research 50, 141-150.

[55] Jansen T. et Gislason H., 2011. Temperature affects the timing of spawning and migration of North Sea mackerel. Continental Shelf Research 31, 64-72.

[56] Villamor B. *et al.*, 2011. Environmental control of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*)

recruitment in the southern Bay of Biscay: case study of failure in the year 2000. Fisheries Oceanography 20, 397-414.

[57] Hémery G. *et al.*, 2008. Detecting the impact of oceano-climatic changes on marine ecosystems using a multivariate index: The case of the Bay of Biscay (North Atlantic-European Ocean). Global Change Biology 14, 27-38.

[58] Borja A. *et al.*, 2008. Climate, oceanography, and recruitment: the case of the Bay of Biscay anchovy (Engraulis encrasicolus). Fisheries Oceanography 17, 477-493.

[59] Borja A. *et al.*, 1998. Relationships between anchovy (Engraulis encrasicolus) recruitment and environment in the Bay of Biscay (1967-1996). Fisheries Oceanography 7, 375-380.

[60] Allain G. *et al.*, 2007. Biophysical modelling of larval drift, growth and survival for the prediction of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment in the Bay of Biscay (NE Atlantic). Fisheries Oceanography 16, 489-505.

[61] Planque B. et Buffaz L., 2008. Quantile regression models for fish recruitment-environment relationships: four case studies. Marine Ecology Progress Series 357, 213-223.

[62] Irigoien X. *et al.*, 2008. From egg to juvenile in the Bay of Biscay: spatial patterns of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment in a non-upwelling region. Fisheries Oceanography 17, 446-462.

[63] Castège I. *et al.*, 2008. Programme régional « Environnement et Ressources des Milieux Marins Aquitains ». Compte rendu d'activité 2008. ERMMA, Biarritz, 56 p.

[64] Castège I. et Hémery G. (coord. par), 2009. Oiseaux marins et cétacés du golfe de Gascogne. Répartition, évolution des populations et éléments pour la définition des aires marines protégées. Biotope, Mèze, Collection Parthénope, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 176 p.

[65] Perry A.L. *et al.*, 2005. Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. Science 308, 1912-1915.

[66] Gaertner D., 1984. Contribution à l'étude du stock de lottes (*Lophius piscatorius* L. 1758, et de *L. budegassa* Spinola 1807) du Plateau Celtique. Oceanologica Acta 7(2), 241-249.

[67] Quéro J.-C. et Vayne J.-J., 1997. Les poissons de mer des pêches françaises. Les Encyclopédies du naturaliste. Delachaux et Niestlé, Lausanne/Paris, 256 p.

[68] Sánchez F. et Gil G., 2000. Hydrographic mesoscale structures and Poleward Current as a determinant of hake (*Merluccius merluccius*) recruitment in southern Bay of Biscay. ICES Journal of Marine Science 57, 152-170.

[69] Mahé F., 2011. Évolution de l'activité de pêche dans le sud-est du golfe de Gascogne entre 1986 et 2008 et identification des facteurs pouvant l'affecter. Rapport de stage Master I Dynamique des Écosystèmes Aquatiques UPPA/Ifremer, 90 p.

[70] Alvarez P. *et al.*, 2004. Distribution and abundance of European hake *Merluccius merluccius* (L.), eggs and larvae in the Northeast Atlantic waters in 1995 and 1998 in relation to hydrographic conditions. Journal of Plankton Research 26, 811-826.

[71] Fernandes J.A. *et al.*, 2010. Fish recruitment prediction, using robust supervised classification methods. Ecological Modelling 221, 338-352.

[72] Persohn C. *et al.*, 2009. Habitat preferences ofselected demersal fish species in the Bay of Biscay and Celtic Sea, North-East Atlantic. Fisheries Oceanography 18, 268-285.

[73] Goñi N. *et al.*, 2011. Spatial and temporal variation of anchovy predation by albacore and bluefin tuna in the Bay of Biscay. Oral presentation in the ICES Annual Science Conference, 19-23 Sept 2011, Gansk, Poland.

[74] Goñi N. Et Arrizabalaga H., 2010. Seasonal and interannual variability of fat content of juvenile albacore (*Thunnus alalunga*) and bluefin (*Thunnus thynnus*) tuna during their feeding migration to the Bay of Biscay. Progress in Oceanography 86(1-2), 115-123.

[75] Arregui I. *et al.*, (en préparation). Movements and geographic distribution of juvenile bluefin tunas in the Northeast Atlantic, described through internal and satellite archival tags.

[76] Arregui I. *et al.*, 2006. Stock-environment-recruitment models for North Atlantic albacore (*Thunnus alalunga*). Fisheries Oceanography 15, 402-412.

[77] Bard F.X., 2001. Extension of the geographical and vertical habitat of albacore (*Thunnus alalunga*) in the North Atlantic. Possible consequences on true rate of exploitation of this stock. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT 52, 1447-1456.

[78] Bard F.X., 2003. North Atlantic albacore (*Thunnus alalunga*) past and present fisheries. Did the stock lose its resilience? Collective Volume of Scientific Papers ICCAT 55, 251-271.

[79] Goñi N. et Arrizabalaga H., 2005. Analysis of juvenile North Atlantic albacore (*Thunnus alalunga*) catch per unit effort by surface gears in relation to environmental variables. ICES J. of Marine Science 62, 1475-1482.

[80] Dufour F. *et al.*, 2010. Phenology and distribution of Albacore (*Thunnus alalunga*) and Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) catches in the northeast Atlantic and their relationship with climate variability. Progress in Oceanography 86(1-2), 283-290.

[81] Lassalle G. et Rochard E., 2009. Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. Global Change Biology 15, 1072-1089.

[82] Friedland K.D. *et al.*, 2000. Linkage between ocean climate, post-smolt growth and survival of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the North Sea area. ICES Journal of Marine Science 57, 419-429.

[83] Peyronnet A. *et al.*, 2008. Different ocean and climate factors control the marine survival of wild and hatchery Atlantic salmon *Salmo salar* in the north-east Atlantic Ocean. Journal of Fish Biology 73, 945-962.

[84] Mangel M., 1994. Climate change and salmonid life history variation. Deep-Sea Res. 11, Vol. 41(1), 75-106.

[85] Jonsson N. et Jonsson B., 2004. Size and age of maturity of Atlantic salmon correlate with the North Atlantic Oscillation Index (NAOI). Journal of Fish Biology 64, 241-247.

[86] Mitchell S.C. et Cunjak R.A., 2007. Relationship of upstream migrating adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) and stream discharge within Catamaran Brook, New Brunswick. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 64, 563-573.

[87] Boylan P. et Adams C.E., 2006. The influence of braoad scale climatic phenomena on long term trends in Atlantic salmon population size: an example from the River Foyle, Ireland. J. of Fish Biology 68, 276-283.

[88] Scarnecchia D.L., 1983. Age at sexual maturity in Icelandic stocks of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 40, 1456-1468.

[89] Gueguen J. et Prouzet P., 1994. Le saumon atlantique. Édition Ifremer, 330 p.

[90] Vibert R., 1950. Recherches sur le saumon de l'Adour (*Salmo salar* L.) : Âges, croissance, cycle génétique, races 1942-1948. Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl. 3, 27-148.

[91] Fontenelle G. *et al.*, 1980. Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Brittany and Lower-Normandy: Preliminary observations on the general characteristics of adults. Fish. Manage. 11, 87-100.

[92] Baglinière J.L. *et al.*, 1987. Caractéristiques générales des populations de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) des rivières du Massif Armoricain. In Restauration des rivières à saumons, M. Thibaud, R. Billard (sous la dir. de)., INRA, Paris, 23-37.

[93] Dumas J. et Casaubon J., 1987. Connaissance et restauration de la population de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) de la Nivelle (Pyrénées Atlantiques). In Restauration des rivières à saumons, M. Thibaud, R. Billard (sous la dir. de), INRA, Paris, 221-230.

[94] Prouzet P., 1990. Stock characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in France: a review. Aquatic. Living Resources 3, 85-97.

[95] Schaffer W.M. et Elson P.F., 1975. The adaptative significance of variations in life history among local populations of Atlantic salmon in North America. Ecology 56, 577-590.

[96] Cuende F-X. et Prouzet P., 2008. Comparison of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., stocks exploited by commercial fisheries in the Adour Basin, France at the end of the 19th and 20th centuries. Aquaculture Research 23, 373-383.

[97] Bal G. *et al.*, 2011. Effect of water temperature and density of juvenile salmonids on growth of young-ofthe- year Atlantic salmon *Salmo salar*. Journal of Fish Biology 78, 1002-1022.

[98] Garcia-Valiente A. *et al.*, 2010. Population genetics of south European Atlantic salmon under global change. Global change biology 16, 36-47.

[99] Etcheber H. *et al.*, 2011. Advantages of high frequency measurements of the water quality to the understanding of climatic and/or anthropogenic impacts in estuarine environment. Communication orale, Symposium "Vulnerability of coastal ecostystems to climate changes and extreme events". Biarritz Octobre 2011.

[100] Mahaut D. et Prouzet P., 2011. Life and behavioural characteristics of Atlantic salmon in the Adour. In International meeting of small-scale professional Sea and Inshore fishers. The official Records, 35-42.

[101] Prouzet P., 2002. Historique des captures de saumons sur les côtes Basco-Landaises depuis 1990 : Périodes et conditions de captures. Rapport Ifremer – Adera. DRV/RH/LHA/AN-01, 28 p. + annexes.

[102] Anonyme, 2010. Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France. Rapport de la deuxième phase. Partie II – Rapports des groupes transversaux, DIACT, 214 p.

[103] Beall E. et Baglinière J.L., 2009. INRA – Année Darwin – Le climat change, le saumon peut-il s'adapter ? http://www.inra.fr/annee_darwin/evolution_et_ecologie/

[104] Anonyme, 2010. Atlas de l'Eau du bassin de l'Adour. Rapport Observatoire de l'Eau du bassin de l'Adour, 121 p.

[105] Anonyme, 2010. Observatoire Pyrénéen du changement climatique : Mutualisation de la connaissance sur l'impact du changement climatique en montagne, 12 p.

[106] Beaugrand G., 2009. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. Deep-Sea Research II 56, 656-673.

[107] Beaugrand G. *et al.*, 2002. Reorganization of North Atlantic Marine Copepod BiodiversitHaugland M. *et al.*, 2006. Feeding of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts in the Northeast Atlantic. ICES Journal of Marine Science 63, 1488-1500.

[108] Cury P. *et al.*, 2000. Small pelagics in upwelling systems: patterns interaction and structural changes in « wasp-waist » ecosystems. ICES Journal of Marine Science 57, 603- 618.

[109] Boé J., 2007. Changement global et cycle hydrologi-

que : une étude de régionalisation sur la France. Communication orale CERFACS/UMR Sisyphe.

[110] Lochet A., 2006. Dévalaison des juvéniles et tactiques gagnantes chez la grande alose (*Alosa alosa*) et l'alose feinte (*Alosa fallax*) : Apports de la microchimie et de la microstructure des otolithes. Thèse en Océanographie-Université de Bordeaux I, 200 p. + annexes.

[111] Baudry D., 1999. Évaluation des zones de frayères et de production en juvéniles pour la grande alose (*Alosa alosa L.*) au niveau de l'Adour : Septembre 1998 – Octobre 1999. Rapport IA-CSP-Ifremer, 39 p.

[112] Caut I., 2011. Suivi de la reproduction naturelle de la grande alose et de la lamproie marine sur la Dordogne. Rapport MIGADO 23D-11-RT, 34 p.

[113] Carry L et Tauzin M., 2011. Suivi de la reproduction de la grande alose sur la Garonne en 2010. Rapport MIGADO 6G-RT-11, 19 p.

[114] Baudry D., 2001. Bilan du suivi de la reproduction de la grande alose (*Alosa alosa L.*) au niveau de l'Adour et du gave d'Oloron. Rapport IA-CSP-Ifremer, 34 p. + annexes.

[115] Caut I., 2011. Suivi de la population d'alose feinte sur la Dordogne et la Garonne en 2010. Rapport MIGADO 24 GD-11-RT, 28 p.

[116] Anonyme, 2005. Mission eau – Annexe 2 – Recueil des données techniques – Partie V : Analyse quantitative, 37 p.

[117] Cushing D.H., 1990. Plankton production and year-class strength in fish populations: An update of the match/mismatch hypothesis. Advances in Marine Biology 26, 249-294.

[118] Hjort J., 1914. Fluctuations in the great fisheries of Northern Europe viewed in the light of biological research. Rapp. Proc.verb. International Council for the Exploration of the Sea 20, 1-288.

[119] Prouzet P., 2010. Environnement et Fonctionnement de Populations Halieutiques : Nécessité d'une approche systémique pour une gestion intégrée de ces ressources. Éditions Universitaires Européennes, 137 p.

[120] Anonyme, 2007, Climate change and European fisheries. Study European Parliament- Policy Department – Structural and Cohesion Policies, 105 p.

[121] Clus-Auby C. *et al.*, 2004. Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du Littoral. Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100 : Synthèse. Rapport Conservatoire du Littoral, 44 p.

[122] Anonyme, 2010. L'influence du changement climatique sur la gestion de l'eau : La situation au 27 mai 2010. Rapport CUB, 13 p.

[123] Mann R., 1979. The effect of temperature on growth, physiology, and gametogenesis in the Manila clam *Tapes philippinarum*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 38, 121-133.

[124] Maître-Allain T, 1982. Influence du milieu sur la croissance de deux palourdes, *Ruditapes decussatus* et *Ruditapes philippinarum*, dans l'étang de Thau (Hérault). Vie Marine 4, 11-20.

[125] Caldiera K. et Wickett M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. Nature 425, 365.

[126] Hays G.C. *et al.*, 2005.Climate change and marine plankton. Trends in Ecology and Evolution 20(8), 337-343.

[127] Beaugrand G. et Goberville E., 2010. Conséquences des changements climatiques en milieu océanique, VertigO (revue électronique), hors-série 8. http://vertigo.revues.org/10143

[128] Range P. *et al.*, 2011. Calcification, growth and mortality of juvenile clams *Ruditapes decussatus* under increased pCO2 and reduced pH: Variable responses to ocean acidification and local scales? Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 396, 177-184.

[129] Caill-Milly N. *et al.*, 2010. A reassessment of the relationships between the state of the stock of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) and selected factors (natural and anthropological) in the Arcachon Bay: toward a better use of time partitioning and complementary multivariate descriptive approaches. ICES/Annual Science Conference/20-24 September 2010 Nantes, ICES CM 2010/G:40, Handbook p 201.

[130] Bald J. *et al.*, 2009. A system dynamics model for the management of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve, 1850) in the Bay of Arcachon (France). Ecological Model. 220, 2828-2837.

[131] Dang C., 2009. Dynamique des populations de palourdes japonaises (*Ruditapes philippinarum*) dans le bassin d'Arcachon, conséquences sur la gestion des populations exploitées. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I.

[132] Maurer D. *et al.*, 2011. Reproduction de l'huître creuse dans le Bassin d'Arcachon, Année 2011. Rapport Ifremer RST/LER/AR/11-009 : 46 p. + annexes.

[133] Bernard I., 2011. Écologie de la reproduction de l'huître creuse, *Crassostrea gigas*, sur les côtes atlantiques françaises-Vers une explication de la variabilité du captage. Thèse de Doctorat en Océanologie et environnement marin. Université de La Rochelle.

[134] Borja A. *et al.*, 2004. Benthic communities, biogeography and resources management. In Borja A, Collins M, Oceanography and Marine Environment of the Basque Country, Elsevier Oceanography Series 70, 455-492.

[135] Chust G. *et al.*, 2011. Climate Change impacts on coastal and pelagic environments in the southeastern Bay of Biscay. Climate Research 48(2-3), 307-332.

[136] Gerdeaux D. et Pont D., 2011. Chapitre IV. Écosystèmes aquatiques. In Rapport CCBIOdiversité, Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine, synthèse de la

bibliographie, 105-125.

[137] Biseau A. *et al.*, 2011. Situation en 2011 des ressources exploitées par les flottilles françaises, 68 p. http://archimer.ifremer.fr/doc/00035/14656/

[138] Biseau A., 2011. Résumé graphique des diagnostics et avis émis par le CIEM en 2011. 69 p. http://archimer.ifremer.fr/doc/00060/17151/

[139] Laborde P. *et al.*, 1999. Seasonal variability of primary production in the Cap-Ferret Canyon area (Bay of Biscay) during the ECOFER cruises. Deep-Sea Research II 46, 2057-2079.

[140] Nogueira J. *et al.*, 2008. Accumulation of northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) in a convergence zone at the Cap Breton Canyon (southern Bay of Biscay). XI International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay, Revista de Investigación Marina 3, 225-226.

[141] Blanchard F. et Vandermeirsch F., 2005. Warming and exponential abundance increase of the subtropical fish *Capros aper* in the Bay of Biscay (1973-2002). Comptes Rendus Biologies 328, 505-509.

[142] Philippart C.J.M. *et al.*, 2011. Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 400, 52-69.

[143] Castège I. *et al.*, 2010. Programme régional « Environnement et Ressources des Milieux Marins Aquitains ». Compte rendu d'activité 2010. ERMMA, Biarritz, 66 p.

[144] Quéro J.-C. *et al.*, 2007. Les captures de poissons à affinités tropicales le long des côtes atlantiques européennes. Annales de la Sociétés des Sciences Naturelles de Charente-Maritime 8(6), 651-673.

[145] Augris C. *et al.*, 2009. Atlas thématique de l'environnement marin du Pays Basque et du sud des Landes, Éditions Quae, 127 p.

[146] Greene C.H. et Pershing A.J., 2007. Climate drives sea change. Science 315, 1084-1085.

Chapitre 7

[1] Beniston M. *et al.*, 1996. The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 5, Cambridge University Press, 191-213.

[2] Theurillat J.-P., Guisan A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. Climatic change 50, 77-109.

[3] Lindner M. *et al.*, 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management 259, 698-709.

[4] Körner C., 2007. Climatic treelines, conventions, global patterns, causes. Erdkunde 61, 316-324.

[5] Lesica P. et McCune B., 2004. Decline of arctic-alpine plants at the southern margin of their range following a decade of climatic warming. Journal of Vegetation Science 14, 679-690.

[6] Pauli H. *et al.*, 2007. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Glob Change Biol 13, 147-156.

[7] Körner C. *et al.*, 1997. The responses of alpine grassland to four seasons of CO_2 enrichment: a synthesis. Acta Oecologica 18, 165-175.

[8] Jump A.S. *et al.*, 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica. Global Change Biology 12, 2163-2174.

[9] Mäkinen H. *et al.*, 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. Forest Ecology and Management 171, 243-259.

[10] Dittmar C. *et al.*, 2003. Growth variations of common beech (Fagus sylvatica L.) under different climatic and environmental conditions in Europe-a dendroecological study. Forest Ecology and Management 173, 63-78.

[11] Salzer M.W. *et al.*, 2009. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. Proceedings of the National Academy of Sciences 106, 20348-20353.

[12] Savva Y. *et al.*, 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. Trees - Structure and Function 20, 735-746.

[13] Marcora P. *et al.*, 2008. The performance of Polylepis australis trees along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. Diversity and Distributions 14, 630-636.

[14] Jolly W.M. *et al.*, 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. Geophysical Research Letters 32 L18409.

[15] Harsch M.A. *et al.*, 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. Ecology Letters 12, 1040-1049.

[16] Menzel A. *et al.*, 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12, 1969-1976.

[17] Linderholm H.W., 2006. Growing season changes in the last century. Agricultural and Forest Meteorology 137, 1-14.

[18] Menzel A. et Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe, Nature 397, 659.

[19] Vitasse Y. *et al.*, 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? Agricultural and Forest Meteorology 149, 735-744.

[20] Bergamini A. *et al.*, 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century – an effect of climate war-ming? Diversity and Distributions 15, 871-879.

[21] Colwell R.K. *et al.*, 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. Science 322, 258-261.

[22] McCain C.M. et Colwell R.K., 2011. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. Ecology Letters 14, 1236-1245.

[23] Thomas C.D., 2010. Climate, climate change and range boundaries. Diversity and Distributions 16, 488-495.

[24] Marris E., 2007. The Escalator Effect. Nature reports climate change 1, 94-97.

[25] Wilson R.J. *et al.*, 2005. Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. Ecology Letters 8, 1138-1146.

[26] Lenoir J. *et al.*, 2010. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. Ecography 33, 295-303.

[27] Gottfried M. *et al.*, 2102. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change. DOI: 10.1038/NCLIMATE1329

[28] Holzapfel A.M. et Vinebrooke R.D., 2005. Environmental warming increases invasion potential of alpine lake communities by imported species. Global Change Biology 11, 2009-2015.

[29] Sambaraju K.R. *et al.*, 2011. Climate change could alter the distribution of mountain pine beetle outbreaks in western Canada. Ecography 34, 001-013.

[30] Araújo M.B. *et al.*, 2011. Climate change threatens European conservation areas. Ecology Letters 14, 484-492.

[31] Loarie S.R. *et al.*, 2009. The velocity of climate change. Nature 462, 1052-1055.

[32] Peterson A.T., 2003. Projected climate change effects on Rocky Mountain and Great Plains birds: generalities of biodiversity consequences. Global Change Biology 9, 647-655.

[33] Schroter D. *et al.*, 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. Science 310, 1333-1337.

[34] López-Moreno J.L. *et al.*, 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. Journal of Hydrology 374, 384-396.

[35] OCDE, 2007. Changement climatique dans les Alpes européennes, adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. Paris : OCDE, mars 2007.

[36] Etchevers P. et Martin E., 2002. L'eau en montagne (rapport de colloque, Megève, 2002). Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. Grenoble : Centre d'Étude de la Neige, Météo France, 2002, 10 p.

[37] Sorbé J., 2010. Stations de ski à l'épreuve du développement durable. Leurre ou opportunité d'une évolution salutaire. Pau : Master 2 de géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 145 p.

[38] Chueca J. *et al.*, 2002. Comparación de la situación de los glaciares del Pirineo español entre el final de la Pequeña Edad del Hielo y la actualidad. Boletín Glaciológico Aragonés 3, 13-41.

[39] ODIT-France, 2009. Les chiffres clés du tourisme de montagne en France. Paris : ODIT-France, 7e édition, 62 p.

[40] Loubier J.C., 2007. Changement climatique et domaines skiables : simulation en Savoie et Haute Savoie à l'horizon 2015. Mappemonde n° 85, 9 p. http://mappemonde.mgm.fr/num13/articles/art07103.html

[41] Marc M., 2011. Le dérèglement climatique. Analyse de ses représentations et pratiques dans les stations de sports d'hiver des Pyrénées. Grenoble : Thèse pour le doctorat de géographie, Université Joseph Fourier.

[42] Paccard P., 2010. Gestion de l'eau durable en montagne : le cas de la production de neige en station de sports d'hiver. Chambéry : Thèse pour le doctorat de géographie, Université de Savoie.

[43] Pröbstl U., 2006. Kunstchnee und Umwelt: Entwicklung und Auswirkungen der technischen Beschneiung. Haupt Verlag 232 p.

[44] Demers A.S., 2006. Les impacts engendrés par la modification du régime hydrique découlant de l'enneigement artificiel. Sherbrooke Université, Maîtrise. 82 p.

[45] Vles V., 2011. Une politique en échec. La diversification de l'économie des stations de ski à l'épreuve de la construction territoriale. Pau : Université de Pau et des Pays de l'Adour, Laboratoire SET, 2011, 56 p.

[46] SNTF, 2007. SYNDICAT NATIONAL DES TELEPHERIQUES DE FRANCE. Premier bilan de la saison 2006-2007.

[47] Huntley B. *et al.*, 2008. Potential impacts of climatic change on European breeding birds. PLoS ONE 3(1), e1439. doi:10.1371/journal.pone.0001439

[48] Huntley B. *et al.*, 2007. A climatic atlas of European breeding birds. Durham University, RSPB and Lynx Edicions.

[49] Setteler J. *et al.*, 2008. Climatic Risk Atlas of European Butterflies. Biorisk 1 (Special Issue).

[50] Ott J (ed.), 2010. Monitoring Climatic Change With Dragonflies. BioRisk 5.

[51] Roberts S.P.M. *et al.*, 2011. Assessing continental-scale risks for generalist and specialist pollinating bee species under climate change. BioRisk 6, 1-18. doi: 10.3897/biorisk.6.1325

[52] Leadley P. *et al.*, 2010. Biodiversity scenarios: projections of 21st century change in biodiversity and associated ecosystem services. In Secretariat of the Convention on Biological Diversity (ed. Diversity SotCoB). Published by the Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, 1-132. Technical Series no. 50.

[53] Xenopoulos M.A. *et al.*, 2005. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. Global Change Biology 11, 1557-1564.

[54] Heino J., Virkkala R., Toivonen H., 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. Biological Reviews, 84, 39-54.

[55] Poff N.L., 2002. Ecological response to and management of increased flooding caused by climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical physical and engineering sciences 360, 1497-1510.

[56] Lassalle G. et Rochard E., 2009. Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. Global Change Biology 15, 1072-1089.

[57] Rahel F.J. et Olden J.D., 2008. Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species. Conservation Biology 22, 521-533.

[58] Daufresne M. et Boët P., 2007. Climate change impacts on structure and diversityof fish communities in rivers. Global Change Biology 13, 2467-2478.

[59] Daufresne M., 2008. Impacts des pressions climatiques et non climatiques sur les communautés piscicoles de grands fleuves français. Hydroécologie Appliquée 16, 109-134.

[60] Tisseuil C. *et al.*, 2010. Statistical downscaling of river flows. Journal of Hydrology 385, 279-291.

[61] Tisseuil C. *et al.*, 2008. Modeling the stream water nitrate dynamics in a 60,000 km² European catchment, the Garonne, Southwest France. J. Environ. Qual. 37, 2155-2169.

[62] Tisseuil C., 2009. Modéliser l'impact du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques par approche de downscaling. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

[63] Buisson L. *et al.*, 2008. Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. Global Change Biology 14. 2232-2248.

[64] Charles S. *et al.*, 2008. An individual-based model to describe a bullhead population dynamic including temperature variations. Ecological Modelling 215, 377-392.

[65] Regnier T. et al., 2011. Assessing maternal effects on metabolic rate dynamics along early development in brown trout (*Salmo trutta*): an individual-based approach. Journal of Comparative Physiology B-Biochemical systemic and environmental physiology 180, 25-31.

[66] Piou C. *et al.*, 2010. Effet du changement climatique sur les populations de poissons migrateurs d'eau froide - Le cas des populations de saumon atlantique. INRA-Onema, Partenariat 2010, Fonctionnement des écosystèmes aquatiques et changements globaux-Changement climatique et saumon (A3), Rapport final, 92 p.

[67] Baglinière J.-L. *et al.*, 2010. Changements climatiques et dynamique de populations de saumon atlantique (*Salmo salar*). In Rapport Scientifique du programme APR GICC 2005, n° de contrat 0000767, chap. 2, 6-31.

[68] Benyahya L. *et al.*, 2008. Comparison of parametric and non-parametric water temperature models on the Nivelle River, France. Hydrological Sciences Journal 53, 640-655.

[69] Devictor V. *et al.*, 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. Proceedings of the Royal Society B: Biological Science 275, 2743-2748.

[70] Devictor V. *et al.*, 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. Nature Climate Change 2, 121-124.

[71] Jiguet F. *et al.*, 2010. Bird population trends are linearly affected by climate change along species thermal ranges. Proceedings of the Royal Society B: Biological Science. doi:10.1098/rspb.2010.0796 Published online.

[72] Grangé J.L. *et al.*, 2011. Le Monticole bleu *Monticola solitarius*, nouvelle espèce nicheuse pour les Pyrénées occidentales. Le Casseur d'os 11, 130-137.

[73] Ménoni E. et Duriez O., 2008. Le Grand Tétras *Tetrao urogallus* dans les Pyrénées : historique et statut actuel. Ornithos 15-4, 272-281.

[74] Ménoni E. *et al.*, 2004. Évaluation transfrontalière de la population de Grand Tétras des Pyrénées. Faune Sauvage 263, 19-24.

[75] D'Amico F. et Hémery G., 2003. Calculating census efficiency for river birds: a case study with the White-throated Dipper *Cinclus cinclus* in the Pyrénées. Ibis 145(1), 83-86.

[76] D'Amico F. et Hémery G., 2007. Time-activity budgets and energetics of the annual cycle of Dippers *Cinclus cinclus* in upland streams are dictated by the pattern of temporal variation in river flow. Comparative Biochemistry and Physiology A. 148, 811-820.

[77] Boé J. *et al.*, 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. Water Ressources Research. 45. W08426.

[78] D'Amico F. *et al.*, 2000. River birdFilippi-Codaccioni O. *et al.*, 2010. Advanced departure dates in long-distance migratory raptors. Journal of Ornithology 151(3), 687-694.

[79] Filippi-Codaccioni O. *et al.*, 2011. Advanced Autumn Migration of the Common Crane *Grus grus* Over Western Pyrenean Passes. Acta Ornithologica 46(1), 37-45.

[80] Manenti R. et Bianchi B., 2011. A new western limit for *Rana pyrenaica* Serra-Cobo 1993 in the Irati region (Pyrenees). Herpetology Notes 4, 403-404.

[81] D'Amico F. et Oosterbroek P., 2013. New records of the endemic *Chionea* (*Sphaeconophilus*) *pyrenaea* (Bourne, 1981) and updated distribution of snowfly species in the Pyrenees. Pirineos.

[82] Arribas O.J. et Galan P., 2005. Reproductive characteristics of the Pyrenean high-mountain lizards: *Iberolacerta aranica* (Arribas, 1993), *I. aurelioi* (Arribas, 1994) and *I. bonnali* (Lantz, 1927). Animal Biology 55, 163-190.

[83] Arribas O.J., 2002. *Lacerta bonnali*. In J.M. Pleguezuelos, R. Márquez & M. Lizana (eds.), Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España, 223-224. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-A.H.E., Madrid.

[84] Némoz M. et Bertrand A., 2009. Plan national d'Actions en faveur du Desman des Pyrénées (*Galemys pyrenaicus*), 2010–2015. Société Française pour l'Étude et la Protection des Mammifères/Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, p. 159.

[85] Williams-Tripp M. *et al.*, 2012. Modeling Rare Species Distribution at the Edge: The Case for the Vulnerable Endemic Pyrenean Desman in France. The Scientific World Journal, article ID 612965. doi:10.1100/2012/612965

[86] Eynard M., 1978. Contribution à l'étude écologique de deux groupements végétaux à *Salix herbacea* des environs du col de l'Iseran. Trav. Scient. Parc nat. Vanoise 9, 25-51.

[87] Wijk S., 1986. Performance of *Salix herbacea* in an alpine snow-deb gradient. Jounal of Ecology 74, 675-684.

[88] Grabherr G., 2003. Alpine vegetation dynamics and climate change- a synthesis of long-term studies and observation. In: Nagy L, Grabherr G, Körner C, Thompson DBA (eds), Alpine Biodiversity in Europe, Springer, 399-409.

[89] Heegaard E., Vandvik V., 2004. Climate change affects the outcome of competitive interactions – an application of principal response curves. Oecologia 139, 459-466.

[90] Badeau V. *et al.*, 1996. Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. Growth trends in European forests. European Forest Institute Research Report 5, 167-182.

[91] Bontemps J.D. *et al.*, 2010. Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. Forest Ecology and Management 259, 1455-1463.

[92] Spiecker H., 1999. Overview of recent growth trends in European forests. Water, Air & Soil Pollution 116, 33-46.

[93] Vitasse Y. *et al.*, 2010. Quantifying plasticity of leaf phenology in response to temperature for two temperate tree species using transplant experiments. Functional Ecology 24, 1211-1218.

[94] Rehfeldt G.E. *et al.*, 2002. Intraspecific responses to climate in Pinus sylvestris. Global Change Biology 8, 912-929.

[95] Peñuelas J. et Boada M., 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). Global Change Biology 9, 131-140.

[96] Grime J.P., 1973. Competitive exclusion in herbaceous vegetation. Nature 242, 344-347.

[97] Adler P.B. *et al.*, 2011. Productivity is a poor predictor of plant species richness. Science 333, 1750-1753.

[98] Fridley J.D. *et al.*, 2012. The unimodal productivity-richness relationship for herbaceous vegetation should stand: reply to Adler et al. Science (sous presse).

[99] Callaway R.M. *et al.*, 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. Nature 417, 844-848.

[100] Michalet R. *et al.*, 2006. Do biotic interactions shape both sides of humped-back models of species richness in plant communities? Ecology Letters 9, 767-773.

[101] Grime J.P. *et al.*, 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. Science 5480, 762-765.

[102] Harte J. et Shaw J., 1995. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment. Science 267, 876-880.

[103] Moser B. *et al.*, 2011. Simulated migration in a long-term climate change experiment: Invasions impeded by dispersal limitation, not biotic resistance. Journal of Ecology 99, 1229-1236.

[104] Kefi S. *et al.*, 2007. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in mediterranean arid ecosystems. Nature 449, 213-217.

[105] Brooker R.W., 2006. Plant–plant interactions and environmental change. New Phytologist 171, 271-284.

[106] Davis A.J. *et al.*, 1998. Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming. Nature 391, 783-786.

[107] Saccone P. *et al.*, 2009. The role of biotic interactions in altering tree seedling responses to an extreme climatic event. Journal of Vegetation Science 20, 403-414.

[108] Baron J.S. *et al.*, 2008. Some guidelines for helping natural resources adapt to climate change. IHDP Update 2, 46-52.

[109] Baron J.S. *et al.*, 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. Environmental Management 44, 1033-1042.

Chapitre 8.1

[1] Loi sur l'Air, 1996. Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie.

[2] IPCC, 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996 p.

[3] WHO, 2005. Health and climate change: the "now and how". A policy action guide, World Health Organization Report, Copenhagen, Denmark 2005.

[4] Shindell D.T. *et al.*, 2009. Improved attribution of climate forcing to emissions. Science 326, 716-718.

[5] Monks P.S. *et al.*, 2009. Atmospheric composition change – global and regional air quality. Atmospheric Environment 43, 5268-5350.

[6] Vautard R. et Hauglustaine D., 2007. Impact of global climate change on regional air quality: introduction to the thematic issue. C.R. Geoscience 339, 703-708.

[7] Johnson C.E. *et al.*, 2001. Role of climate feedback on methane and ozone studied with a coupled ocean-atmosphere-chemistry model. Geophysical Research Letters 28, 1723-1726.

[8] Brasseur G.P. *et al.*, 2006. Impact of climate change on the future chemical composition of the global troposphere. Journal of Climate 19, 3932-3951.

[9] Hauglustaine D.A. *et al.*, 2005. Future tropospheric ozone simulated with a climate-chemistry-biosphere model. Geophysical Research Letters 32, 1-5.

[10] Lathière J. *et al.*, 2005. Past and future changes in biogenic volatile organic compound emissions simulated with a global dynamic vegetation model. Geophysical Research Letters 32(I20), 818-821.

[11] Frankignoulle M. *et al.,* 1998. Carbon dioxide emission from European estuaries. Science 282, 434-436.

[12] EXPLICIT, 2008. Étude du bilan énergétique et des émissions polluantes dues aux transports en Aquitaine - Année de référence : 2005 - Étude réalisée pour le compte de la DRE Aquitaine.

[13] Polsenaere P. *et al.*, 2011. Spatial and temporal CO_2 exchanges measured by Eddy Correlation over a temperate intertidal flat and relations with net ecosystem production. Biogeosciences 9, 249-268.

[14] Abril G. *et al.*, 2007. Enhanced methane oxidation in an estuarine turbidity maximum. Limnology and Oceanography 52, 470-475.

[15] Deborde J. *et al.*, 2010. Methane sources, sinks and fluxes in a temperate tidal lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Science 89, 256-266.

[16] Lamaud E. *et al.*, 2002. Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. Atmospheric Environment 36, 77-88.

[17] Loustau D. *et al.*, 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. Tree Physiology 25(7), 813-823.

[18] Sitch S. *et al.*, 2007. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. Nature 448(7155), 791-795.

[19] Felzer B. *et al.*, 2007. Impacts of ozone on trees and crops. C.R. Geoscience 339, 784-798.

[20] Giorgi F. et Meleux F., 2007. Modelling the regional effects of climate change on air quality. C.R. Geoscience 339, 721-733.

[21] Bedsworth L., 2012. Air quality planning in California's changing climate. Climatic Change 111, 101-118.

[22] Hallquist M. *et al.*, 2009. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 9, 3555-3762.

[23] Brasseur G.P. et Roeckner E., 2005. Impact of improved air quality on the future evolution of climate. Geophysical Research Letters 32(23), 704-707.

[24] Motabelli N. *et al.*, 2008. Climate change impact on California on-road mobile source emissions. Climatic Change 87, S293-S308.

[25] Raupach M. *et al.*, 2007. Global and regional drivers of accelerating CO_2 emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences 104, 10288-10293.

[26] Kleeman M.J., 2008. A preliminary assessment of the sensitivity of air quality in California to global change. Climatic Change 87, S273-S292.

[27] Giorgi F., 2006. Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters 33(08), 707-710.

[28] Vautard R. et al., 2007. Air quality in Europe during the summer of 2003 as a prototype of air quality in a warmer climate. C.R. Geoscience 339, 747-763.

[29] Westerling A. et Bryant B., 2006. Climate change and wildfire in and around California: fire modeling and loss modeling. California Climate Change Center, Sacramento.

[30] AIRAQ, 2013. Rapport d'étude n° ET/PE/13/01 sur l'inventaire des émissions de polluants chimiques en Aquitaine – Année 2010, version 2012.

[31] Lammel G. *et al.*, 2009. Gas/particle partitioning and global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons – A modelling approach. Chemosphere 76, 98-106.

[32] Deletraz G. et Etchelecou A., 2000. Pollution automobile azotée des axes de transit montagnards des Pyrénées-Atlantiques : concentrations, dispersion et vulnérabilité des écosystèmes de proximité aux dépôts atmosphériques. 9e colloque scientifique international sur les Transports et la Pollution de l'air, Avignon, juin 2000, Collection Actes INRETS, vol. 3, 629-634.

[33] Veschambre S. *et al.*, 2008. Import of atmospheric trace metal elements in the Aspe valley and Somport tunnel (Pyrénées Atlantiques, France): Level of contamination and evaluation of emission sources. Pollution Atmosphérique 198, 215-234.

[34] Guillon A., 2011. Étude de la composition isotopique moléculaire δ13C) comme traceur de source qualitatif et quantitatif des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) particulaires dans l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1.

[35] AIRAQ, 2010. Rapport annuel 2010.

[36] Riba M.L. *et al.*, 1987. Diurnal variation in the concentration of α – and β-pinene in the Landes forest (France). Atmospheric Environment 21, 191-193.

[37] Lopez A. *et al.*, 1988. Presentation of the experiment ATILA (effect of terpenes and isoprene in the atmosphere) carried out in a temperate forest in southwestern France (forest of Landes). Atmospheric Environment A. 22, 1881-1894.

[38] Simon V. *et al.*, 1994. The Landes experiment: Monoterpenes emitted from the maritime pine. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 99(D8), 16501-16510.

[39] Curci G. *et al.*, 2009. Modelling study of the impact of isoprene and terpene biogenic emissions on European ozone levels. Atmospheric Environment 43, 1444-1455.

[40] AIRAQ, 2004. Rapport annuel 2003, activités et bilan de la qualité de l'air.

[41] Bernard S.M. *et al.*, 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. Environmental Health Perspectives 109(2), 199-209.

[42] SRCAE, Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie. www.srcae-aquitaine.fr/public/

[43] AIRAQ, 2011. Rapport d'étude n° ET/PE/11/03 sur l'identification des zones sensibles en Aquitaine.

Chapitre 8.2

[1] PNUD (2006). Rapport mondial sur le développement humain 2006 : au-delà de la pénurie, pouvoir, pauvreté et crise mondiale de l'eau par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), 422 pages, ISBN 2-7178-5323-5.

[2] Ko F.C. et Baker J.E., 1995. Partitioning of hydrophobic organic contaminants to resuspended sediments and plankton in the mesohaline Chesapeake Bay. Marine Chemistry 49, 171-188.

[3] Kraepiel A.M.K. *et al.*, 1997. Geochemistry of trace metals in the Gironde Estuary. Geochimica et Cosmochimica Acta 61, 1421-1436.

[4] Blanc G. *et al.*, 1999. A Cadmium budget for the Lot-Garonne fluvial system (Fr). Hydrobiologia 410, 331-341.

[5] Yunker M.B. *et al.*, 1999. Natural and anthropogenic inputs of hydrocarbons to the strait of Georgia. The Science of The Total Environment 225, 181-209.

[6] Budzinski H. *et al.*, 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. Marine Chemistry 58, 85-97.

[7] Matthiessen P. et Law R., 2002. Contaminants and their effects on estuarine and coastal organisms in the United Kingdom in the late twentieth century. Environmental pollution 120, 739-757.

[8] Cailleaud K. *et al.*, 2007. Seasonal variations of hydrophobic organic contaminant concentrations in the water-column of the Seine Estuary and their transfer to a planktonic species Eurytemora affinis (Calanoïda, copepoda). Part 1: PCBs and PAHs. Chemosphere 70, 270-280.

[9] Chapman P.M. et Wang F., 2001. Assessing sediment contamination in estuaries. Environmental Toxicology and Chemistry 20, 3-22.

[10] Johnson L.L. *et al.*, 1998. Assessing the effects of anthropogenic stressors on Puget Sound flatfish populations. Journal of Sea Research, 39, 125-137.

[11] Delpla I. *et al.*, 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. Environment International 35, 1225-1233.

[12] Whitehead P.G. *et al.*, 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. Hydrological Sciences 54, 101-121.

[13] UN, 2006. World Water Development Report 2: Water, a Shared Responsibility. UNESCO, Paris, 601 p.

[14] GEO-3, 2003. Global Environmental Outlook. United Nations, Environmental Program, 279 p. http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO__lac2003English.pdf.

[15] CEDEF (Centre de documentation Économie-Finances), 2006. http://www.minefe.gouv.fr/directions_services/cedef/synthese/reach/chiffres.htm (consulté en novembre 2010)

[16] EC, 2012. Proposition de directive du Parlement Européen et du Conseil modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau. COM (2011) 876 final, 31.1.2012, 35p.

[17] Cailleaud K. *et al.*, 2007. Seasonal variation of hydrophobic organic contaminant concentrations in the water-column of the seine Estuary and their transfer to a planktonic species Eurytemora affinis (Calanoïd, copepod). Part 2: Alkylphenol-polyethoxylates. Chemosphere 70, 281-287.

[18] Lanceleur L. *et al.*, 2011. Long-term (30 years) records and relationships of cadmium and silver contamination in sediment and oysters from the Gironde fluvial-estuarine continuum. Chemosphere 85, 1299-1305.

[19] UN, 2003. World Water Development Report: Water for Life, Water for People. UNESCO, Paris and Berghahn

Books, Barcelona, 36 pp.

[20] Bates B.C. *et al.*, 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.

[21] Diaz R.J., 2001. Overview of Hypoxia around the World. Journal of Environmental Quality 30, 275-281.

[22] Quintin J.Y. *et al.*, 2007. Surveillance écologique du site du Blayais, année 2006. Rapp. IFREMER RST DYNECO/AG/07-02, mars 2007, 220 p.

[23] Noyes P.D. *et al.*, 2009. The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. Environment International 35, 971-986.

[24] Lydy M.J. *et al.*, 1999. Effects of temperature on the toxicity of M-parathion, chlorpyrifos and pentachlorobenzene to *Chironomus tentans*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 37, 542-547.

[25] Monserrat J. et Bianchini A., 1995. Effects of temperature and salinity on the toxicity of a commercial formulation of methyl parathion to *Chasmagnathusgranulata* (Decapoda, Grapsidae). Braz. J. Med. Biol. Res. 28, 74-78.

[26] Fortin M.G. *et al.*, 2008. Effects of salinity on sublethal toxicity of atrazine to mummichog (*Fundulus heteroclitus*) larvae. Marine Environmental Research 65, 158-170.

[27] Waring C.P. et Moore A., 2004. The effect of atrazine on Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts in freshwater and after sea water transfer. Aquatic Toxicology 66, 93-104.

[28] Schwarzenbach R.P. *et al.*, 2003. Solubility and activity coefficient in water. Environmental organic chemistry. 2nd Edition. Hoboken, NJ., John Wiley & Sons, Inc.

[29] Song M.Y. et Brown J.J., 1998. Osmotic effects as a factor modifying insecticide toxicity on Aedes and Artemia. Ecotoxicology and Environmental Safety 41, 195-202.

[30] Riou V. et al., 2012. Impact of environmental DDT concentrations on gill adaptation to increased salinity in the tilapia *Sarotherodon melanotheron*. Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol. 156(1), 7-16.

[31] Hader D.P. *et al.*, 2007. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. Photochem. Photobiol. Sci. 6, 267-285.

[32] Zepp R. G. *et al.*, 2006. Interactive effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling, in "The Environmental Effects Assessment Panel Report for 2006".

[33] Sulzberger B. et Durisch-Kaiser E., 2009. Chemical characterization of dissolved organic matter (DOM): A prerequisite for understanding UV-induced changes of DOM absorption properties and bioavailability. Aquatic Sciences 71, 104-126.

[34] Isidori M. *et al.*, 2009. Effects of ranitidine and its photoderivatives in the aquatic environment. Environment International 35, 821-825.

[35] Trovó A.G. *et al.*, 2009. Photodegradation of sulfamethoxazole in various aqueous media: Persistence, toxicity and photoproducts assessment. Chemosphere 77, 1292-1298.

[36] Van Vliet M.T.H. et Zwolsman J.J.G., 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. Journal of Hydrology 353, 1-17.

[37] Ducharne A. *et al.*, 2007. Long term prospective of the Seine river system: confronting climatic and direct anthropogenic changes. Sci. Total Environ. 375, 292-311.

[38] Kaste Ø. *et al.*, 2006. Linked models to assess the impacts of climate change on nitrogen in a Norwegian river basin and fjord system. Sci Total Environ 365, 200-222.

[39] OIE, 2007. Synthèse nitrate 2004-2005. Résultats des campagnes de surveillance Nitrates réalisées au titre de la Directive Nitrates (Année 2004-2005). Office International de l'Eau, 23 p.

[40] Akkanen J. *et al.*, 2004. Essential characteristics of natural dissolved organic matter affecting the sorption of hydrophobic organic contaminants. Aquatic Sciences 66, 171-177.

[41] Hirose K., 2007. Metal-organic matter interaction: Ecological roles of ligands in oceanic DOM. Applied Geochemistry 22, 1636-1645.

[42] Haitzer M. *et al.*, 1998. E ects of dissolved organic matter (DOM) on the bioconcentration of organic chemicals in aquatic organisms – a review. Chemosphere 37, 1335-1362.

[43] Bejarano A.C. *et al.*, 2005. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod Amphiascus tenuiremis. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 321, 43-57.

[44] Akkanen J. et Kukkonen J.V.K., 2003. Measuring the bioavailability of two hydrophobic organic compounds in the presence of dissolved organic matter. Environmental Toxicology Chemistry 22, 518-524.

[45] Hejzlar J. *et al.*, 2003. The apparent and potential effects of climate change on the inferred concentration of dissolved organic matter in a temperate stream (the Malše River, South Bohemia). Sci Total Environ 310, 143-152.

[46] Evans C.D. *et al.*, 2005. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impact. Environmental pollution 137, 55-71.

[47] Skjelkvale B.J. *et al.*, 2005. Regional scale evidence for improvements in surface water chemistry 1990-2001. Environmental Pollution 137, 165-176.

[48] Cory R.M. *et al.*, 2011. Spectral methods to advance understanding of dissolved organic carbon dynamics in forested catchments. Forest HyFreeman C. *et al.*, 2004. Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. Nature 430, 195-198.

[49] Brunetti M. *et al.*, 2001. Changes in total precipitation rainy days and extreme events in northeastern Italy. International Journal of Climatology 21, 861-71.

[50] Jöhnk K.D. *et al.*, 2008. Summer heatwaves promote blooms of harmful Cyanobacteria. Glob Chang Biol 14, 495-512.

[51] Wiedner C. *et al.*, 2007. Climate change affects timing and size of populations of an invasive cyanobacterium in temperate regions. Oecologia 152, 473-484.

[52] Brient L. *et al.*, 2008. Short communication: first occurrence of Cylindrospermopsin in freshwater in France. Environmental Toxicology 24, 415-420.

[53] Sun J. *et al.*, 2011. Effects of changing pCO_2 and phosphate availability on domoic acid production and physiology of the marine harmful bloom diatom Pseudo-nitzschia multiseries. Limnology and Oceanography 56, 829-840.

[54] Fu F. *et al.,* 2010. Effects of changing pCO2 and phosphate availability on toxin production and physiology of the harmful bloom dinoflagellate Karlodinium veneficum. Aquatic Microbial Ecology 59, 55-65.

[55] EEA, 2003. Europe's environment: The third assessment. Environmental assessment report n° 10. http://reports.eea.eu.int/environmental_assessment_report_2003_10/Chapter8. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

[56] Coynel A. *et al.*, 2007. Scenario of particulate trace metal transport during a major flood event inferred from transient geochemical signals. Appl. Geochem. 22, 821-836.

[57] Schäfer J. *et al.*, 2002. Ten-Year-Observation of the Gironde Fluvial System: Fluxes of Suspended Matter, Particulate Organic Carbon and Cadmium. Marine Chemistry 79, 229-242.

[58] Audry S. *et al.*, 2004. Anthropogenic components of Heavy metal budgets (Cd, Zn, Cu and Pb) in the Lot-Garonne fluvial system (France). Appl. Geochem 19, 769-786.

[59] Masson M. *et al.*, 2006. Geochemical signals and source contributions to heavy metal (Cd, Zn, Pb, Cu) fluxes into the Gironde Estuary via its major tributaries. Sci. Tot. Environ. 370, 133-146.

[60] Masson M. *et al.*, 2007. Seasonal Variations and Annual Fluxes of Arsenic in three contrasting watersheds: the Garonne, Dordogne and Isle Rivers. Sci. Total Environ. 373, 196-207.

[61] Masson M. *et al.*, 2011. Copper addition by organic matter degradation in the freshwater reaches of a turbid estuary. Sci. Total Environ. 409, 1539-1549.

[62] Mac Donald R.W. *et al.*, 2003. How will global climate change affect risks from long-range transport of persistent organic pollutants? Human Ecol Risk Assess 9, 643-660.

[63] Ma J. *et al.*, 2004. How do climate fluctuations affect persistent organic pollutant distribution in North America? Evidence from a decade of air monitoring. Environ. Sci. Technol. 38, 2538-2543.

[64] Meyer T. et Wania F., 2008. Organic contaminant amplification during snowmelt. Water Res. 42, 1847-1865.

[65] Blais J.M. *et al.*, 2001. A major source of persistent organochlorines to subalpine Bow Lake in Banff National Park, Canada. Ambio 30, 410-415.

[66] SOeS, 2011. Bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques continentaux - Période 2007-2009. Études & documents n° 54, 60 p.

[67] Ifen, 2003. Les pesticides dans les eaux - Cinquième bilan annuel - Données 2001. Études et travaux n° 37, 29 p.

[68] Benitez F.J. *et al.*, 2006. Photochemical oxidation processes for the elimination of phenyl-urea herbicides in waters. Journal of Hazardous Materials 138, 278-287.

[69] Bollmohr S. *et al.*, 2007. Temporal variability in particle-associated pesticide exposure in a temporarily open estuary, Western Cape, South Africa. Chemosphere 68, 479-488.

[70] Chiovarou E.D. et Siewicki T.C., 2007. Comparison of storm intensity and application timing on modeled transport and fate of six contaminants. Sci Total Environ 389, 87-100.

[71] Bloomfield J.P. *et al.*, 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater - a UK perspective. Sci. Total Environ. 369, 163-177.

[72] Probst M. *et al.,* 2005. Scenario-based simulation of runoff-related pesticide entries into small streams on a landscape level. Ecotox. Environ. Safe. 62, 145-159.

[73] Chen C.C. et McCarl B.A., 2001. An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. Climatic Change 50(4), 475-487.

[74] Reilly J. *et al.*, 2003. US agriculture and climate change: new results. Climatic Change 57, 43-69.

[75] Boreen A.L. *et al.*, 2003. Photodegradation of pharmaceuticals in the aquatic environment: a review. Aquatic Sciences 65, 320-341.

[76] Buerge I.J. *et al.*, 2006. Occurrence and fate of the cytostatic drugs, Cyclophosphamide and Ifosfamide in wastewaters and surface waters. Environ. Sci. Technol. 40, 7242-7250.

[77] Labadie P. et Budzinski H., 2005. Determination of steroidal hormone profiles along the Jalle d'Eysines River (near Bordeaux, France). Environ. Sci. Technol. 39, 5113-5120.

[78] Lissemore L. *et al.*, 2006. An exposure assessment for selected pharmaceuticals within a watershed in Southern Ontario. Chemosphere 64, 717-29.

[79] Petrovic M. *et al.*, 2011. Combined scenarios of chemical and ecological quality under water scarcity in Mediterranean rivers. Trends in Analytical Chemistry 30, 1269-1278.

[80] Oppel J. *et al.*, 2004. Leaching behaviour of pharmaceuticals in soil testing systems: a part of an environmental risk assessment for groundwater contamination. Sci. Total Environ. 328, 265-73.

[81] Capkin E. *et al.*, 2006. Water quality and fish size affect toxicity of endosulfan, an organochlorine pesticide, to rainbow trout. Chemosphere 64, 1793-1800.

[82] Schiedek D. *et al.*, 2007. Interactions between climate change and contaminants. Mar. Pollut. Bull. 54, 1845-1856.

[83] Carere M. et al., 2011. Potential effects of climate change on the chemical quality of aquatic biota. Trends in Analytical Chemistry 30, 1214-1232.

[84] Baudrimont M. et De Montaudouin X., 2007. Evidence of an altered protective effect of metallothioneins after cadmium exposure in the digenean parasites infected cockle (Cerastoderma edule). Parasitology 134, 1-9.

[85] Morin S. *et al.,* 2007. Dynamics of benthic diatom colonization in a cadmium/zinc-polluted river (Riou-Mort, France). Fundamental and Applied Limnology 168, 179-187.

[86] Duong T.T. *et al.*, 2008. Seasonal effects of cadmium accumulation in periphytic diatom communities of freshwater biofilms. Aquatic Toxicology 90, 19-28.

[87] Pierron F. *et al.*, 2009. Ovarian gene transcription and effect of cadmium pre-exposure during artificial sexual maturation of the European eel (Anguilla anguilla). BioMetals 22, 985-994.

[88] Gust M. *et al.*, 2011. Comprehensive biological effects of a complex field poly-metallic pollution gradient on the New Zealand mudsnail Potamopyrgus antipodarum (Gray). Aquatic Toxicology 101, 100-108.

[89] Legeay A. *et al.*, 2005. Impact of cadmium contamination and oxygen levels on biochemical responses in the Asiatic clam Corbicula fluminea. Aquatic Toxicology 74, 242-253.

[90] Pierron F. *et al.*, 2007. Common pattern of gene expression in response to hypoxia or cadmium in the gills of the European glass eel *Anguilla anguilla*. Environ. Sci. Technol. 41, 3005-3011.

[91] Roubeix V. *et al.*, 2012. Assessing the impact of chloroacetanilide herbicides and their metabolites on periphyton in the Leyre River (SW France) via short term growth inhibition tests on autochthonous diatoms. Journal of Environmental Monitoring 14, 1655-1663.

[92] Stirling I. *et al.*, 1999. Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change. Arctic 52, 294-306.

[93] Mac Donald R.W. *et al.*, 2005. Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. Sci Total Environ 342, 5-86.

[94] AMAP, 2004. Arctic Monitoring and Assessment Program. AMAP Assessment 2002: persistent organic pollutants in the Arctic. Oslo, Norway; 2004. Available at: http://www.amap.no/.

Chapitre 8.3

[1] Coynel A., 2005. Érosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, n° 014, 576 p.

[2] Sauquet E. (sous la dir. de), 2010. Imagine 2030. clIMat et Aménagement de la Garonne : Quelles INcertitudes sur la ressource en Eau en 2030 ? Programme RDT volet 2, MEEDDM. Cemagref - EDF - Agence de l'Eau Adour Garonne, 126 p.

[3] EAUCÉA, 2008. Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde et prospective à moyen terme. Phase 1 : analyse des enjeux liés à l'eau, 120 p. ; Phase 2 : Prospective, priorités et indicateurs, 35 p.

[4] Wasson J.G., 1994. Écorégions et systèmes de référence. In Etat de santé des écosystèmes aquatiques : les variables biologiques comme indicateurs, Paris, 2 et 3 novembre 1994, N. Chartier-Touzé, Y. Galvin, C. Levêque et Y. Souchon (sous la dir. de), Cemagref Éditions, 55-66.

[5] Etchevers P. *et al.*, 2002. Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. Journal of geophysical research 107(16), ACL 6-1–ACL 6-18.

[6] Giuntoli I. et Renard B., 2010. Rapport ONEMA-Cemagref : Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.

[7] Caballero Y. *et al.*, 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. Water Resources Research 43, W07448.

[8] Boé J., 2007. Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France. *Thèse* de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 256 p.

[9] Tisseuil C. *et al.*, 2010. Statistical downscaling of river flows. Journal of Hydrology 385(1-4), 279-291.

[10] Boé J. *et al.*, 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during

the 21st century. Water Resources Research 45(8). doi:10.1029/2008WR007437

[11] Planton S. *et al.*, 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. C.R. Géoscience 337, 193-202.

[12] Coynel A. *et al.*, 2007. Scenario of particulate trace metal and metalloid transport during a major flood event inferred from transient geochemical signals. Applied Geochemistry 22, 821-836.

Chapitre 8.4

[1] Herbet C. *et al.,* 2009. Enseignements de la canicule 2003 pour la prise en compte des changements climatiques dans l'estimation des besoins futurs en eau potable, Colloque 193 SHF : « Étiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau », Lyon, 7-8 octobre 2009.

[2] Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2008. Changements globaux : les enjeux pour l'eau. Colloque AEAG, 7 novembre 2007.

[3] Pinson S. et Mardel V., 2011. Cartographie de la vulnérabilité des masses d'eau souterraines vis-à-vis du changement climatique - Rapport d'étape, BRGM/RP-59558-FR, 58 p.

[4] Douez O., 2007. Réponse d'un système aquifère multicouche aux variations paléoclimatiques et aux sollicitations anthropiques – Approche par modélisation couplée hydrodynamique, thermique et géochimique, Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 306 p.

[5] Joussaume S., 1993. Climat d'hier à demain, CNRS édition/CEA, 223 p.

[6] Lucas C *et al.*, 2011. Changements climatiques et eaux souterraines : état des connaissances sur le Bassin Adour-Garonne, rapport EGID, 126 p.

[7] Etchevers P. et E. Martin, 2002. Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne, Colloque International « L'eau en montagne », Mégève septembre 2002, 8 p.

[8] MC Callum J.L. *et al.*, 2010, Impacts of climate change on groundwater in Australia: a sensitivity analysis of recharge. Hydrogeology Journal 18, 1625-1638.

[9] Ducharne A. *et al.*, 2009. Projet RExHySS: Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Programme GICC - Rapport de fin de contrat, 62 p.

[10] Caballero Y. et J. Noilhan, 2003. Étude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne, 87 p.

[11] Vernoux J.F. *et al.*, 2010. Synthèse bibliographique sur les relations entre eau souterraine et eau de surface en lien avec la DCE - Rapport final, BRGM/RP-57044-FR, 235 p.

[12] EAUCEA, 2008. Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde. Phase 1 : Analyse des enjeux liés à l'eau, 120 p.

[13] EAUCEA, 2009, Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde. Phase 2 : Prospective, priorités et indicateurs, 36 p.

[14] Rey Fabrice, 2007. Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France) : géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, n° 3443.

[15] Grinsted A. *et al.*, 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. Climate Dynamics 34(4), 461-472.

[16] Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2010. Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. Synthèse n° 2, Février 2010, 6 p.

[17] Dörfliger N. *et al.*, 2011. Montée du niveau marin induite par le changement climatique - Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole - Rapport « intermédiaire », BRGM/RP-59456-FR, 147 p.

Chapitre 9

[1] McMichael A.J. et Haines A., 1997. Global climate change: the potential effects on health. BMJ 315(7111), 805-809.

[2] Guha-Sapir D. *et al.*, 2011. Annual Disaster Statistical Reviex 2010 : The Nimbers and Trends. Brussels, CRED. http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf

[3] Coquet S. et al, 2009. Phénomène climatique exceptionnel et intoxications au monoxyde de carbone : de la surveillance à l'action de santé publique, France, Sud-Ouest, janvier 2009. InVS, BEH 2011 n° 45-46.

[4] Anziani A., 2010. Rapport d'information fait au nom de la mission commune d'information sur les conséquences de la tempête Xynthia. Sénat, n° 647, session extra. 2009-2010. http://www.senat.fr/rap/r09-647-1/r09-647-11.pdf

[5] Rousseau D., 2006. Surmortalité des étés caniculaires et surmortalité hivernale en France. Climatologie 3, 43-54. http://www.climato.be/aic/publis/vol3_4/article_Daniel_ROUSSEAU_CLIMATOLOGIE_volume_3-4_pp43-54.pdf

[6] Bessemoulin P. *et al.,* 2004. La canicule d'août 2003 en France et en Europe. La météorologie 46, 25-33.

[7] Hemond D. et Jougla E., 2003. Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques. Paris, INSERM, 59 p.

[8] Fouillet A. *et al.*, 2006. Excess mortality related to the

August 2003 heat wave in France. Int Arch Occup Environ Health 80, 16-24.

[9] Laaidi K. *et al.*, 2012. Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire, 19 p.

[10] Gault G. *et al.*, 2007. Vague de chaleur de juillet 2006 en Gironde. Les données en Gironde montrent la pertinence du plan Canicule. Le concours médical 129(23-24), 771-773.

[11] Beaudeau P. *et al.*, 2004. Froid et santé. Eléments de synthèse bibliographique et perspectives. Rapport d'investigation. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire, 48 p.

[12] Fouillet A. *et al.*, 2009. Surveillance de la mortalité en France au cours de l'hiver 2008-2009, premiers éléments. BEH 2009 n° 15. http://www.invs.sante.fr/beh/2009/15/index.htm

[13] Van Vliet A.J.H. *et al.*, 2002. The influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands. International Journal of Climatology 22, 1757-1767.

[14] Raherison C. *et al.*, Prévalence de l'asthme chez l'enfant. Revue des Maladies Respiratoires 14(4), S33-39.

[15] Daurès J.-P. *et al.*, 1997. Prévalence de l'asthme et des symptômes évocateurs d'asthme chez l'adolescent. Revue des Maladies Respiratoires 14(4), S41-46.

[16] Kopperschmitt C. *et al.*, 1997. Prévalence de la rhinite chez les enfants de 6 et 7 ans. Revue des Maladies Respiratoires 14(4), S15-21.

[17] Nocent C. *et al.*, 2005. Étude de La sensibilisation au pollen de Pin Maritime dans la région bordelaise Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique 45, 298-302.

[18] Barnosky A.D. *et al.*, 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. Nature 486(7401), 52-58.

[19] Randolph S.E. *et al.*, 2008. Variable spikes in tick-borne encephalitis incidence in 2006 independent of variable tick abundance but related to weather. Parasites & Vectors 2008, 1-44.

[20] Organisation Mondiale de la Santé, 2008. Règlement sanitaire international (2005), 2e édition, Genève, 102 p. http://whqlibdoc.who.int/publications/2008/9789242580419_fre.pdf

[21] Décret n° 2013-30 du 9 janvier 2013 relatif à la mise en œuvre du règlement sanitaire international (2005). http://www.legifrance.gouv.fr/

[22] INSTRUCTION N° DGS/RI1-3/2012/168 du 23 avril 2012 mettant à jour le guide relatif aux modalités de mise en œuvre du plan anti-dissémination du chikungunya et de la dengue en métropole. http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2012/05/cir_35302.pdf

[23] European Centre for Disease Prevention and Control. The climatic suitability for dengue transmission in continental Europe. Stockholm: ECDC; 2012. 22 p.



Plantation expérimentale de pin maritime (Domaine de l'Hermitage, INRA, © Dong Vo Trung).



Les auteurs

Coordination : Groupe C_2A

Hervé LE TREUT
Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Membre de l'Académie des Sciences, Directeur IPSL, Paris.
herve.letreut@ipsl.jussieu.fr

Ses travaux portent sur la modélisation numérique du système climatique et la compréhension des perturbations radiatives du climat, en particulier le rôle de l'effet de serre additionnel lié aux activités humaines. Ses compétences, internationalement reconnues, lui ont valu de faire partie du GIEC.

Francis GROUSSET
Directeur de Recherche honoraire au CNRS, EPOC, Bordeaux.
mnf.grousset@gmail.com

Paléoclimatologue, géochimiste, expert en dynamique des paléocirculations océaniques et atmosphériques, dont les travaux portent sur l'évolution climatique de la Terre depuis quelques centaines de milliers d'années, et plus particulièrement sur les accidents climatiques passés et à venir.

Denis SALLES
Directeur de Recherche à l'IRSTEA, ADBX, Bordeaux.
Denis.Salles@irstea.fr

Ses recherches en sociologie de l'environnement et de l'action publique environnementale portent sur les processus de décision, les dispositifs de concertation et de participation, les mécanismes de responsabilisation dans la régulation des enjeux environnementaux.

Jean-Christophe PEREAU
Professeur des Universités (UB4), GREThA, Bordeaux.
jean-christophe.pereau@u-bordeaux4.fr

Économiste, ses recherches s'inscrivent dans les domaines de l'économie de l'environnement, de la modélisation bio-économique, de la théorie des jeux et de la viabilité. Les applications concernent la gestion des ressources renouvelables exploitées et de la biodiversité ainsi que les négociations internationales sur le changement climatique.

Nathalie OLLAT
Ingénieur de Recherche à l'INRA, EGFV/ISVV, Bordeaux.
ollat@bordeaux.inra.fr

Écophysiologiste, en charge de recherches sur le rôle du porte-greffe sur l'adaptation de la vigne à la sécheresse. Responsable du programme national d'amélioration des porte-greffe de vigne. Responsable du projet Laccave qui étudie les conditions d'adaptation de la filière viti-vinicole au changement climatique.

Antoine KREMER
Directeur de Recherche à l'INRA, BIOGECO, Bordeaux.
antoine.kremer@pierroton.inra.fr

Ses travaux portent sur la compréhension des mécanismes évolutifs qui ont conduit à l'organisation actuelle de la diversité des forêts, et s'intéressent à l'évolution future en réponse aux changements environnementaux.

Philippe BONNETON
Directeur de Recherche au CNRS, EPOC, Bordeaux.
p.bonneton@epoc.u-bordeaux1.fr

Chercheur en mécanique des fluides géophysiques. Spécialiste de l'hydrodynamique et du transport sédimentaire en milieu littoral.

Benoît SAUTOUR
Professeur des universités (UB1), EPOC, Bordeaux.
b.sautour@epoc.u-bordeaux1.fr

Spécialiste de l'étude de la structure spatio-temporelle des communautés zooplanctoniques et des transferts de matière dans les réseaux trophiques dans le contexte actuel de modification des environnements marins sous l'influence du changement global.

Nathalie CAILL-MILLY
Cadre de recherche à l'IFREMER, LRHA, Anglet.
nathalie.caill.milly@ifremer.fr

Chercheuse en halieutique, elle est chargée du suivi de l'exploitation et de la dynamique de populations de palourdes et d'études sur les pêcheries côtières. Elle est par ailleurs responsable du Laboratoire Ressources Halieutiques d'Aquitaine.

Patrick PROUZET
Cadre de recherche honoraire à l'IFREMER, Anglet.
prouzet.patrick@ifremer.fr

Chercheur spécialiste en biologie des pêches et en écologie, une large part de ses travaux a été dédiée aux ressources migratrices et aux poissons amphihalins.

Frank D'AMICO
Maître de Conférences des Universités (UPPA), ECOBIOP, Anglet.
frank.damico@univ-pau.fr

Ses travaux portent sur l'écologie des communautés et sur l'écologie comportementale, dans leurs dimensions utiles à la biologie de la conservation, en milieu montagnard notamment. Ils s'inscrivent dans la logique fédératrice de l'étude des interactions entre les espèces et leur environnement.

Éric VILLENAVE
Professeur des universités (UB1), EPOC CNRS, Bordeaux.
Directeur de l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (OASU).
e.villenave@epoc.u-bordeaux1.fr

Chimiste de l'atmosphère, ses travaux portent sur la compréhension des processus de formation et de dégradation des polluants atmosphériques, dans le but d'une meilleure appréhension des problèmes de qualité de l'air et du climat.

Hélène BUDZINSKI
Directeur de Recherche au CNRS, EPOC, Bordeaux.
h.budzinski@epoc.u-bordeaux1.fr

Spécialiste en chimie de l'environnement et écotoxicologie. Ses travaux portent sur l'écodynamique des contaminants chimiques organiques et sur leur impact toxique sur les écosystèmes environnementaux. Ils s'inscrivent dans une logique d'intégration et d'appréhension des effets mélanges et des effets cumulés associant plusieurs types de pressions anthropiques.

Henri ETCHEBER
Chercheur honoraire Université UB1, Bordeaux.
h.etcheber@epoc.u-bordeaux1.fr

Ses travaux portent sur les cycles du carbone et de l'azote en milieux estuariens et fluviatiles avec une attention toute particulière prêtée à l'oxygénation de leurs eaux présente et future en réponse aux changements environnementaux attendus dans le futur.

Alain DUPUY

Maître de Conférences (ENSEGID-IPB), Géoressources et Environnement, Bordeaux.

Alain.Dupuy@ensegid.fr

Hydrogéologue spécialiste en hydrodynamique souterraine et en transferts de pression, masse et énergie dans les systèmes aquifères. Ses travaux sur les aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux souterraines contribuent à la gestion durable des ressources en eaux continentales.

Isabelle BALDI

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier, ISPED, Bordeaux.

Isabelle.Baldi@isped.u-bordeaux2.fr

Médecin spécialiste en médecine du travail et en santé publique, ses travaux sont de nature épidémiologique et portent sur les effets sur la santé des pesticides. Elle travaille actuellement au Laboratoire santé, travail, environnement (LSTE) de l'Université Bordeaux Segalen, au sein du centre INSERM U897.

Contribution et révision

Nous n'avons pas voulu rendre illisible la table des matières de ce livre en l'alourdissant de trop de noms, mais nous tenons à citer et remercier les multiples personnes qui ont contribué à cet ouvrage, ainsi que les institutions auxquelles elles appartiennent. Leur apport plus précis est explicité au niveau des différents chapitres. Pour rendre justice à tous, si vous souhaitez citer certains éléments de ce livre nous vous incitons à le faire en se référant au chapitre concerné et en mentionnant l'ensemble des auteurs de ce chapitre.

S. Abadie (SIAME CNRS UPPA)
G. Abril (EPOC CNRS UB1)
D. Amouroux (IPREM CNRS UPPA)
X. Arnauld De Sartre (SET CNRS UPPA)
I. Auby (LER Ifremer)
L. Augusto (TCEM INRA)
G. Bachelet (EPOC CNRS UB1)
V. Banos (INRA Paris)
A. Bardonnet (ECOBIOP INRA UPPA)
J. Baron (SMIDDEST)
M. Baudrimont (EPOC CNRSUB1)
M.L. Begout (LRHA Ifremer)
Y. Bérard (CRPLC CNRS Univ. AG)
V. Bernard (INSEE Bordeaux)
C. Bernard (SMIDDEST)
M. Berroneau (CISTUDE NATURE)
P. Bertran (INRAP et PACEA CNRS UB1)
G. Biais (LRHLR Ifremer)
G. Blanc (EPOC CNRS UB1)
P. Boet (EPBX Irstea)
A. Borja (AZTI Tecnalia)
C. Boschet (ADBX Irstea)
C. Bouisset (SET CNRS UPPA)
D. Breysse (I2M CNRS IPB)
N. Brisson
Y. Brunet (EPHYSE INRA)
C. Cassou (CERFACS)
I. Castège (Centre de la mer Côte Basque, ERMMA)
B. Castelle (EPOC CNRS UB1)
A. Chaalali (EPOC CNRS UB1)
G. Chust (AZTI Tecnalia)
S. Clarimont (SET CNRS UPPA)
B. Clavé-Papion (Terre & Océan)
A. Colin (AUSONIUS CNRS UB3)
D. Compagnon (Centre Émile Durkheim CNRS UB2)
E. Corcket (BIOGECO INRA UB1)
B. Coupry (EAUCEA)
G. Coureau (ISPED UB2)
A. Coynel (EPOC CNRS UB1)
F.X. Cuende (Institution Adour CG64)
J. D'Elbée (MNHN Paris)
J.C. Dauvin (M2C CNRS UCBN)
V. David (EPOC CNRS UB1)
B. De Grissac (AHSP)
X. De Montaudouin (EPOC CNRS UB1)
M.N. De Casamajor (LRHA Ifremer)
J. Dehez (ADBX Irstea)
Y. Del Amo (EPOC CNRS UB1)
S. Delzon (BIOGECO INRA UB1)
B. Denoyes (BFP INRA UB1&2)
M.L. Desprez-Loustau (BIOGECO INRA UB1)
P. Deuffic (ADBX Irstea)
M.H. Devier (EPOC CNRS UB1)
L. Doyen (MNHN & GREThA CNRS UB4)
J.C. Duplessy (LSCE CNRS CEA UVSQ)
J. Favennec (EUCC France)
I. Garcia de Cortazar-Atauri (Agroclim INRA)
E. Garnier (IUF & CRHQ CNRS UCBN)
G. Gault (ARS Cire Aquitaine)
D. Genty (LSCE CNRS CEA UVSQ)
E. George-Marcepoil (DTM Irstea)
O. Girardclos (CEDRE Univ. de Besançon)
N. Goñi (AZTI Tecnalia)
P. Gonzalez (EPOC CNRS UB1)
J.P. Goutouly (EGFV ISVV INRA)
P.Y. Guernion (AIRAQ)
V. Hanquiez (EPOC CNRS UB1)
F. Hissel (CETMEF)
F. Huneau (G&E ENSEGID)
D. Idier (BRGM)
G. Irichabeau (GREThA CNRS UB4)
H. Jactel (BIOGECO INRA UB1)
M. Jarry (ECOBIOP INRA UPPA)
R. Kantin (LER Ifremer)
M. Kleinhentz (BIOGECO INRA UB1)
V. Laborie (CETMEF)
E. Lamaud (EPHYSE INRA)
G. Largier (CBN Pyrénées et Midi-Pyrénées)
M. Launay (Agroclim INRA)
S. Lavaud (AUSONIUS CNRS UB3)
S. Lavorel (LECA CNRS UJF)
G. Le Cozannet (BRGM)
Y. Le Bagousse Pinguet (UB1)
M. Leandri (GREThA CNRS UB4)
N. Lenôtre (BRGM)
M. Lepage (EPBX Irstea)
T. Leurent (EAUCEA)
F. Levrault (Chambre d'agriculture Poitou-Charentes)
M. Lissardy (LRHA Ifremer)
L. Londeix (EPOC CNRS UB1)
D. Loustau (EPHYSE INRA)
C. Lucas (ADERA)
J.P. Maalouf (BIOGECO INRA UB1)
J.J. Malfait (GREThA CNRS UB4)
C. Mallet (BRGM)
D. Malvy (CHU Bdx & UB2)
P. Marchet (AEAG)
P. Maron (SIAME CNRS UPPA)
J.C. Martin (GREThA CNRS UB4)
S. Mathoulin-Pelissier (ISPED UB2)
J. Maugein (CG 33)
D. Maurer (LER Ifremer)
N. Mazella (REBX Irstea)
P. Mazellier (EPOC CNRS UB1)
C. Meredieu (BIOGECO INRA UB1)
R. Michalet (EPOC CNRS UB1)
O. Mora (DEPE INRA)
G. Morandeau (LRHA Ifremer)
V. Moreaux (EPHYSE INRA)
S. Morin (REBX Irstea)
T. Oblet (Centre Émile Durkheim CNRS UB2)
E. Perraudin (EPOC CNRS UB1)

P. Pieri (EGFV ISVV INRA)
D. Piou (BIOGECO INRA UB1)
S. Planton (CNRM-GAME CNRS Météo France)
P. Point (GREThA CNRS UB4)
J.C. Quéro (Ifremer)
C. Raherison (CHU Bdx & UB2)
T. Rambonilaza (ADBX Irstea)
J.P. Rebillard (AEAG)
P. Régnacq (Observatoire de l'eau du bassin de l'adour UPPA)
M. Regolini (BIOGECO INRAUB1)
T. Renault (SG2M Ifremer)
A. Ribes (CNRM-GAME CNRS Météo France)
E. Rochard (EPBX Irstea)
N. Rocle (ADBX Irstea)
P. Rolland (ARS Cire Aquitaine)
R. Salamon (ISPED UB2)
F. Sanchez (LRHA Ifremer)
M.F. Sanchez-Goñi (EPOC CNRS UB1)
E. Sauquet (HHLY Irstea)
J. Schäfer (EPOC CNRS UB1)
B. Seguin (INRA Avignon)
G Simonet (CERTOP CNRS Univ. Toulouse)
A. Sota (OPCC CTP)
A. Sottolichio (EPOC CNRS UB1)
J.P. Tastet (EPOC CNRS UB1)
J.P. Terreaux (ADBX Irstea)
B. Touzard (BIOGECO INRA UB1)
P. Trichet (EPHYSE INRA)
J.P. Urcun (LPO Aquitaine, Organbidexka Col Libre)
C. Van Leeuwen (EGFV ISVV INRA)
S. Vaucelle (ADES CNRS UB2&3)
F. Verdin (AUSONIUS CNRS UB3)
V. Vles (SET CNRS UPPA)
S. Zaragosi (EPOC CNRS UB1)



Les blockhaus de la Seconde Guerre mondiale, à l'époque au sommet des dunes, se retrouvent aujourd'hui, par l'action de l'érosion littorale sur l'estran, Cap Ferret (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

BON DE COMMANDE

DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES

Nom ..... Prénom .....
Adresse postale d'expédition .....
Code postal ..... Ville ..... Pays .....
Adresse postale de facturation .....
Code postal ..... Ville ..... Pays .....
Téléphone ..... Adresse électronique .....

Je souscris à un abonnement (2 numéros) pour l'année 20.... au prix de ....,..... €

A paraître : Dynamiques Environnementales 30 : Quels enjeux pour le littoral atlantique français ?

Dernières parutions :







Tarifs abonnement annuel (France et Etranger)

Prix au numéro :	25 € [2]
Abonnement [1] :	45 € [2]

[1] *pour 2 numéros*
[2] *frais de port inclus.*

http://www.pub.u-bordeaux3.fr

Les anciens numéros de la revue les *« Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée »* (n°1 à 26, le 25 et le 26 étant épuisés) sont au tarif de 12 € l'unité.

Je commande les anciens numéros suivants : .....

soit une somme totale de : ....,..... €

Signature :

Fait le ..... à .....

MODALITÉS DE COMMANDE ET DE RÈGLEMENT

- Pour les institutions et les entreprises, établir le bon de commande sur un papier à en-tête de l'entité sur lequel est indiqué le n° de TVA intra-communautaire ; en retour, une facture sera adressée pour établir votre règlement.
- Pour les particuliers, joindre à votre commande le règlement par chèque en euros, à l'ordre de l'***Agent comptable de l'Université Bordeaux 3***.
- Depuis l'étranger, à défaut de pouvoir réaliser votre règlement à partir d'un compte bancaire domicilié en France, merci d'effectuer votre paiement par virement international en euros correspondant au montant de la facture, sur le compte bancaire ci-dessous aux codes suivants :

Code BIC : BDF EFR PP XXX
Code IBAN : FR 76 1007 1330 0000 0010 0001 035
Code RIB : 00001000010 clé 35

- Bon de commande à signer et à retourner accompagné de son règlement à l'adresse suivante :

Revue ***Dynamiques Environnementales***
Presses Universitaires de Bordeaux
Université Michel de Montaigne-Bordeaux 3
Domaine universitaire
33607 PESSAC CEDEX
Courriel : helene.michaud@u-bordeaux3.fr











Les impacts du changement climatique en Aquitaine

Quel sera l'impact du changement climatique à l'échelle de l'Aquitaine ? Comment se traduirait un réchauffement global de plusieurs degrés sur ses paysages et ses ressources ? Quelles seraient les perspectives d'adaptation du milieu et des Hommes ?

Ce sont les questions auxquelles tente de répondre le travail dirigé par Hervé Le Treut, climatologue, membre de l'Académie des Sciences et expert auprès du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat) en s'appuyant sur la collaboration de plus de 150 chercheurs, toutes disciplines confondues. Les auteurs réfléchissent au devenir de l'Aquitaine, à sa vulnérabilité face au changement climatique, en envisageant les conséquences probables sur l'économie (agriculture, viticulture, forêts…), le paysage (littoral, montagne, estuaires, forêts...) et la population. À travers le territoire aquitain, cet ouvrage décline les principaux enjeux auxquels il convient dès maintenant de faire face.

Richement illustré et accessible à tous, ce livre donne une vision d'ensemble, mais ancrée localement, des impacts relatifs au changement climatique et préconise des solutions, des pistes à privilégier pour que les sociétés aquitaines puissent s'adapter à ces modifications.

Ont collaboré à cet ouvrage, comme coordinateurs de chapitre, Isabelle Baldi, Philippe Bonneton, Hélène Budzinski, Nathalie Caill-Milly, Frank D'Amico, Alain Dupuy, Henri Etcheber, Francis Grousset, Antoine Kremer, Hervé Le Treut, Nathalie Ollat, Jean-Christophe Pereau, Patrick Prouzet, Denis Salles, Benoît Sautour et Eric Villenave.

Prix : 25 €

ISBN : 978-2-86781-874-5

PUB

LGPA-Editions

RÉGION AQUITAINE

9 782867 818745