



éduscol

Ressources pour le lycée général et technologique

Ressources pour la classe terminale
générale et technologique

Sciences de la vie et de la Terre Série S Enseignement de spécialité

Thème 2 Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

Ces documents peuvent être utilisés et modifiés librement dans le cadre des activités d'enseignement scolaire, hors exploitation commerciale.

Toute reproduction totale ou partielle à d'autres fins est soumise à une autorisation préalable du Directeur général de l'enseignement scolaire.

La violation de ces dispositions est passible des sanctions édictées à l'article L.335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

juillet 2012

Sommaire

Préambule	2
Les acquis des élèves	2
Exemples d'activités	3
Atmosphère terrestre initiale et transformation au cours des temps géologiques.....	3
Les apports de la glaciologie et autres arguments concernant le climat des 800 000 dernières années.	4
L'effet de serre et les prédictions de l'évolution du climat de la Terre.....	5
Traces des variations climatiques sur les grandes durées.....	6
Supports	7
Livres.....	7
Revue, articles	8
Sites internet	9
Vidéos	9
Logiciels	9
Focus scientifiques	10
L'atmosphère primitive.....	10
L'origine de l'atmosphère primitive à l'Hadéen (-4.55 Ga à -4 Ga).....	10
La composition chimique de l'atmosphère primitive prébiotique au cours de l'Hadéen	11
Évolution de l'atmosphère à l'Archéen: premiers liens entre atmosphère et activité biologique	13
L'oxygénation de l'atmosphère à partir du Protérozoïque	16
L'effet de serre	19
Définition et principe général.....	19
Les apports solaires	19
Les gaz à effet de serre.....	19
Le bilan radiatif	20
Notion de forçage :	21
Notion de modèle climatique	22
Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?	22
Comment sont construits et validés les modèles climatiques ?	23
Quelle est l'évolution possible du climat prévue par les derniers modèles climatiques ?	24
Les prédictions des modèles climatiques sont-elles fiables ?	27
En guise de conclusion :	28
Evolution du climat au cours des 800 000 dernières années	28
Les différents arguments paléoclimatiques utilisés.....	28
L'étude des techniques de datation des carottes de glace	30
L'étude de l'évolution de la composition des gaz dans les atmosphères du passé	30
L'utilisation des données géochimiques : le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces utilisé comme paléothermomètre	32
L'utilisation de données paléontologiques	35
L'utilisation des données géologiques et géomorphologiques : les glaciers et le relief glaciaire.....	36
Glaciations et périodes interglaciaires : des cycles sur 100 000 ans	38
Les événements Dansgaard-Oeschger (D/O) : des variations rapides du climat de forte amplitude	39
Les climats sur les derniers 10 000 ans.....	39
Les climats sur les derniers siècles.....	39

Préambule

Comme les autres thématiques de spécialité, l'objectif de cette partie du programme est de préparer les élèves à une poursuite d'études en renforçant l'acquisition de connaissances et les démarches spécifiques qui y sont associées. La thématique du climat, souvent abordée dans les médias, permettra ici d'apporter aux élèves des connaissances globales sur la relation entre les enveloppes fluides de la Terre et le climat, en s'appuyant sur des moments exemplaires de l'histoire de la Terre. Il ne s'agit pas de viser à une connaissance exhaustive de l'ensemble des éléments déterminants le climat dans l'histoire de la Terre, ni d'en connaître toutes les techniques d'études, mais d'aborder quelques aspects des interactions enveloppes fluides de la Terre-climats. Le traitement de cette thématique s'appuiera avec profit sur des démarches d'investigation permettant ici de renforcer des compétences variées des élèves (manipulations, observations, comparaison et analyse de données, etc.).

Cette partie du programme de spécialité permet aussi de conforter des compétences dans les domaines de l'éducation au développement durable, dans la maîtrise de la notion de modèle et de travailler les compétences documentaires.

L'éducation au développement durable :

Les fondements scientifiques rigoureux de l'évolution des climats sont posés dans cette partie. Fondements nécessaires à la compréhension des débats actuels sur le réchauffement climatique et ses causes. Une approche prenant en compte les enjeux et objectifs de l'éducation au développement durable est particulièrement indiquée. Elle permettra de parfaire la formation des élèves dans une approche systémique et complexe à différentes échelles de temps et d'espace.

La notion de modèle :

Les modèles climatiques sont essentiellement construits sur le mode du raisonnement inductif, peu mobilisé dans notre enseignement, tout en utilisant aussi le raisonnement déductif plus connu des élèves et mieux maîtrisé. Les modes de raisonnement, les conditions et limites des modèles puis leur utilisation sont des éléments importants de réflexion sur la démarche scientifique.

Les compétences documentaires :

Dans le cadre strict du raisonnement scientifique, il est important de travailler sur la validité des documents et modèles étudiés. Ce thème, très développé dans les médias, est sujet à débats et controverses. A ce niveau d'enseignement, il est nécessaire que les élèves sachent évaluer la pertinence, le statut et la valeur des documents trouvés lors des recherches et en tenir compte lors de leur étude.

Les acquis des élèves

Collège / socle commun :

- Responsabilité humaine en matière de santé et d'environnement : Comparer les conséquences environnementales entre l'utilisation des énergies renouvelables et non renouvelables.
- Repérer les facteurs d'origine humaine agissant sur l'effet de serre et en déduire les pratiques individuelles permettant de le limiter collectivement.
- Quatrième : utilisation, intérêts et limites d'un modèle analogique

Lycée :

- Seconde :
 - La Terre est une planète rocheuse du système solaire.
 - Les conditions physico-chimiques qui y règnent permettent l'existence d'eau liquide et d'une atmosphère compatible avec la vie.
 - Ces particularités sont liées à la taille de la Terre et à sa position dans le système solaire.
- Première S : La notion de modèle

Exemples d'activités

Les activités proposées ne constituent que des possibilités de travaux à mener avec les élèves et nullement des passages obligés pour l'enseignant, de même que celui-ci peut proposer des activités ne figurant pas dans la liste ci-dessous.

De nombreuses manipulations proposées ci-dessous portent sur les mêmes objets à celles proposées pour l'ancien programme de spécialité SVT, mais il faut être attentif au fait que les entrées et les optiques de ces manipulations sont souvent différentes.

De nombreux documents peuvent faire l'objet d'un travail de recherche documentaire, ou l'étude critique des sources utilisées et du mode de construction d'un document proposé par l'enseignant ou trouvé par les élèves.

Atmosphère terrestre initiale et transformation au cours des temps géologiques

Compétences travaillées	Activités	Commentaire
• Confronter des données • Réaliser techniquement • Lire des graphiques	• Comparaison des stromatolithes actuels et des stromatolithes archéens • Mise en évidence de la cristallisation de CaCO_3 grâce à l'activité des cyanobactéries • Construction d'un protocole expérimental ExAO mettant en évidence le dégagement de dioxygène par le métabolisme photosynthétique des cyanobactéries. • Manipulations chimiques permettant de caractériser différents états d'oxydation du fer, notamment l'oxydation d'ions Fe^{2+} sous une atmosphère oxydante • Mise en relation des résultats des manipulations avec des documents concernant les fers rubanés et les roches rouges continentales	• Document papier / animation vidéo • Les cyanobactéries sont cultivables au laboratoire : ◦ http://svt.ac-creteil.fr/?Faire-pousser-des-cyanobacteries ◦ www.ac-nancy-metz.fr/enseign/svt/labo/Microorg.htm • Exemples d'activités : http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/cyano/cyano.htm

Les apports de la glaciologie et autres arguments concernant le climat des 800 000 dernières années

Compétences travaillées	Activités	Commentaire
• Lire des graphiques, confronter des données, utiliser un logiciel	• Étude de la composition isotopique des glaces forées en Antarctique et en Arctique : mise en évidence de la globalité et de la périodicité des changements climatiques durant les 800 000 dernières années. • Étude de la composition des bulles d'air de la glace forée en Antarctique et en Arctique avec mise en évidence de la globalité et de la périodicité des changements climatiques durant les 800 000 dernières années. • Mise en relation des variations de température et des variations de la composition atmosphérique en CH₄.	• Données papier ou logiciel (<i>Vostok</i> ou <i>PaléoVu</i>)
• Réaliser techniquement ; lire des graphiques (tâche complexe)	• Mise en relation de l'index stomatique et du taux de CO₂ atmosphérique dans l'actuel puis exploitation des mesures faites sur des feuilles fossiles pour reconstituer d'anciens taux de CO₂ atmosphérique et donc d'anciens climats. • Réalisation d'une préparation microscopique de pollens à partir de tourbe, les identifier à l'aide d'une clé.	• Données papier + numérisation et traitement d'une photo de préparation microscopique de Gingko (logiciel <i>Mesurim</i>)
• Réaliser techniquement	• Construction et étude d'un diagramme pollinique de tourbière à l'aide des exigences écologiques des espèces représentées.	
• Utiliser un logiciel ; lire des graphiques • Confronter des données	• Comparaison de spectres polliniques provenant de pour quatre sites (voire plus...) ayant des altitudes et des latitudes similaires (en valeur absolue dans les hémisphères N et S)	• Données papier ou exploitation d'un fichier numérique dans un tableur • Logiciel <i>PaléoVu</i>

L'effet de serre et les prédictions de l'évolution du climat de la Terre

Compétences travaillées	Activités	Commentaire
• Confronter des données • Réaliser techniquement • Construire des graphiques (tâche complexe) • Confronter des données • Réaliser techniquement • Utiliser un logiciel	• Mise en évidence d'une corrélation entre la composition atmosphérique des planètes telluriques et l'écart de leur température moyenne réelle avec leur température moyenne théorique (calculée en fonction de leur distance au Soleil). • Construction d'un protocole expérimental, mesure et comparaison de l'évolution de la température en fonction du temps dans de l'air en tube à essai sous une lampe et dans de l'air enrichi en CO₂ et en vapeur d'eau dans un tube à essai sous une lampe. • Comparaison de l'énergie des différentes radiations infra-rouges émises théoriquement et réellement par la Terre (mesures satellitaires) et des radiations absorbées par les différents gaz atmosphériques. • Mise en évidence de la corrélation entre les variations des paramètres orbitaux de la Terre et des variations de la température moyenne de la Terre. • Comparaison du rayonnement réfléchi par différentes surfaces (mesures avec un luxmètre) et de la température du sol sous ces surfaces. • Mesure de la lumière solaire absorbée par différentes surfaces. • Mise en évidence d'un réchauffement climatique d'intensité variable en fonction des émissions anthropiques des gaz à effet de serre.	• Données papier • Données expérimentales ; utilisation possible de l'ExAO (expérience peu fiable mais qui permet de développer l'esprit critique des élèves vis-à-vis d'un modèle) • Données papier • Utilisation possible de l'ExAO • Acquisition des images des surfaces éclairées naturellement, traitement (mesure de l'absorption) par le logiciel Mesurim • Données papier ou utilisation d'un logiciel (Simclimat)

Traces des variations climatiques sur les grandes durées

Compétences travaillées	Activités	Commentaire
• Confronter des données	• Comparaison cartographique de la répartition mondiale de différents types de roches sédimentaires actuellement formées dans des conditions climatiques spécifiques (tillites, charbon, argiles rouges et blanches, évaporites...) à différentes époques géologiques • Mise en évidence d'une corrélation entre les variations de température terrestre à l'échelle du milliard d'années, les variations de la teneur en CO₂ atmosphérique et les variations du volcanisme et de l'érosion continentale par la tectonique des plaques	• Données papier

Livres

- Claude Allègre et René Dars : *Géologie : passé, présent et avenir de la Terre*, Ed Belin Pour La Science, 2009
- Claude Allègre : *Géologie isotopique*, Ed Belin, 2005
- André Berger : *Le climat de la Terre, un passé pour quel avenir* », Ed De Boeck Université, 1992
- Collectif, préface d'Erik Orsenna et Michel Petit : *Climat, une planète et des hommes – Quelle influence humaine sur le réchauffement climatique ?*, Ed Le Cherche Midi, 2011
- Jean-François Deconinck : *Paléoclimats, l'enregistrement des variations climatiques*, Ed Vuibert, 2006
- Frédéric Denhez : «*Atlas du changement climatique : du global au local : changer les comportements*,(+ 1 DVD), Ed Autrement, collection Atlas Monde, 2009
- Serge Elmi et Claude Babin : *Histoire de la Terre*, Ed Armand Colin, 2006
- Laurent Emmanuel, Marc de Rafélis et Ariane Pasco : *Géologie, maxi fiches*, Ed Dunod
- Jean-Louis Fellous : *Idées reçues : le climat*, Ed Le Cavalier bleu, 2005
- Jean-Louis Fellous, Catherine Gautier : *Comprendre le changement climatique*, Ed Odile Jacob, 2007
- G. Godet, A. Chapel, M. Fieux et al : *Océans et atmosphère*, Ed Hachette, collection Synapses, 1996
- Muriel Gargaud, Didier Despois et Jean-Pierre Parisot : *L'environnement de la Terre primitive*, Ed Presses Universitaires de Bordeaux, 2001
- Muriel Gargaud, Hervé Martin et al : *Le Soleil, la Terre, la vie : la quête des origines*, Ed Belin Pour La Science, 2009
- Jean-Marc Jancovici : *L'avenir climatique : Quel temps ferons-nous ?*, Ed Seuil, coll Points Sciences, 2005
- Sylvie Jousseume : *Climat, d'hier à demain*, Coll Savoir au présent, 1993
- Robert Kandel : *Le devenir des climats*, Ed Hachette pratique, 1995
- Robert Kandel : *L'incertitude des climats*, Ed Hachette littératures, Coll Pluriel, 1998
- Robert Kandel : *Le réchauffement climatique*, Ed PUF, Coll "Que sais-je ?", 2010
- Hervé Le Treut et Jean-Marc Jancovici : *L'effet de serre : Allons-nous changer le climat ?* Ed Flammarion, 2009
- Hervé Le Treut : *Nouveau climat sur la Terre : Comprendre, prédire, réagir*, Ed Flammarion, 2009
- André Legendre : *L'Homme est-il responsable du réchauffement climatique ?* Ed EDP Sciences, coll Bulles de science, 2009
- Emmanuel Leroy Ladurie : *Les fluctuations du climat de l'an mil à aujourd'hui*, Ed Fayard, 2011
- Stephen Marshak : *Terre, portrait d'une planète*, chapitre n°22 : "les secrets de la glace", Ed De Boeck, 2010
- Valérie Masson Delmotte : *Climat : le vrai et le faux*, Ed Le Pommier, 2011
- Jacques Merle : *L'océan gouverne-t-il le climat ? Histoire d'une conquête scientifique récente*, Ed Vuibert / IRD, 2009
- Adolphe Nicolas : *2050, Rendez-vous à risque*, Ed Belin Pour La Science, 2004
- Monique Rotaru, Jérôme Gaillardet, Michel Steinberg et Jean Trichet : *Les climats passés de la Terre*, Ed Vuibert, 2006
- Pierre Peycru, Jean Michel Dupin et al. : *Géologie tout-en-un, 1^{ère} et 2^{ème} années BCPST*, Ed Dunod
- Raphaël Trotignon : *Comprendre le réchauffement climatique*, Ed Pearson Education, coll Comme un expert", 2009
- Brigitte Van Vliet – Lanoë : *La planète des glaces, histoire et environnement de notre ère glaciaire*, Ed Vuibert, 2005

Revues, articles

L'atmosphère, *Dossier Pour La Science* n°12, juin 1996.

L'Europe se réchauffe, *La Recherche* n°321, juin 1999.

Le climat des 21 000 dernières années, *Dossier Pour la Science* n°43, avril-juin 2004.

Méthane et climat, *Pour la Science* n°323, septembre 2004.

Le risque climatique, *Les dossiers de La Recherche* n°17, nov - déc 2004.

Le changement climatique, Géosciences, *La revue du BRGM pour une Terre durable* n°3, mars 2006.

Comment estimer le changement climatique, *Dossier Pour la Science* n°52, juillet-sept. 2006.

800 000 ans d'histoire du climat lus dans la glace, *CLEFS CEA* n°54, automne 2006.

L'histoire de la Terre, *Les dossiers de La Recherche* n°25, nov 2006 – janv 2007.

L'odyssée de la Terre avant l'Homme, *Science Et Vie Hors Série* n°237, décembre 2006.

Le climat, *Dossier Pour La Science* n°54, janv – mars 2007.

Le réchauffement climatique, *Sciences Et Avenir Hors Série* n°150, mars – avril 2007.

Climat, le dossier vérité, *Science Et Vie Hors Série* n°240, septembre 2007.

Réchauffement climatique : le temps des certitudes, *Pour la Science* n°360, octobre 2007.

Le défi climatique, maîtriser le réchauffement, *Les dossiers de La Recherche* n°31, mai 2008.

Construire un monde durable, *Science Et Vie Hors Série* n°243, juin 2008.

Climat, comment les villes se préparent au changement, *Science Et Vie* "Questions Réponses / spécial sommet de Copenhague", décembre 2009.

Méthane, plantes et climat, *Pour la Science* n°353, mars 2007.

800 000 d'histoire du climat, *Pour la Science* n°355, mai 2007.

Les 3 inconnues du climat, *La Recherche* n°414, décembre 2007.

Le nickel à l'origine de la Grande Oxydation, *La Recherche* n°431, juin 2009.

Climats du passé : l'apport des forages profonds dans les glaces polaires, *Rayonnement du CNRS* n°54, juin 2010.

Le dernier réchauffement, *Pour La Science* n°408, octobre 2011.

Réchauffement, ce que mesurent les spécialistes, *La Recherche* n°457, décembre 2011.

Sites internet

www.developpement-durable.gouv.fr/-Effet-de-serre-et-changement-.html

www.cnrs.fr/cw/dossiers/dospoles/index.html#

www.educapoles.org/multimedia/animation_detail/climate_complexity

www.educapoles.org/multimedia/animation_detail/climate_modelling

<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/361/1470/903.long>

www.glaciers-climat.com/le-quatenaire.html

www.insu.cnrs.fr/co/environnement/climat-changement-climatique/les-resultats-des-modeles-climatiques

www.ipsl.fr/fr/Mediatheque/Multimedia/Animation-sur-la-modelisation-climatique

www.lsce.ipsl.fr/Phocaea/Vie_des_labos/Ast/ast_groupe.php?id_groupe=33

http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img363-2011-10-03.xml

http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img364-2011-10-10.xml

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-climat-masson-2002-conf.xml>
(diaporama « Les changements climatiques » de Valérie Masson-Delmotte, du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, journées SVT du 6 mars 2002)

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-co2-atm-temp.xml#id2900001>

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-series-temporelles2.xml>

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-stromatolithes.xml>

www.ujf-grenoble.fr/universite/medias-et-communications

www.universcience.fr/climobs

<http://sites.univ-provence.fr/cies> (« La mémoire de notre planète. Comment les archives de la Terre enregistrent son passé », Gilles MIRALLES)

Vidéos

Frédéric Denhez : « Atlas du changement climatique : du global au local : changer les comportements » DVD + livre, Ed Autrement, collection Atlas Monde, 2009

Al Gore : « Une vérité qui dérange », DVD Paramount Pictures, 2007

Gilles L'Hôte : « L'histoire du climat » DVD A La Source Du Savoir, 2008

Logiciels

Logiciel Vostok (forage dans la glace Antarctique, delta ^{18}O , composition des bulles d'air, paléotempératures) :

<http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/clindex/clindex.htm>

Logiciel PaleoVu :

www.inrp.fr/Acces/biotic/accueil.htm

Logiciel Oxygène (composition isotopique de l'eau, comportements différents de H_2^{16}O et de H_2^{18}O au cours des processus physiques) :

<http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/clindex/clindex.htm>

Logiciel Google Earth et son fichier « glaciations quaternaires.kmz » :

www.svt.ac-versailles.fr/spip.php?article286

Logiciel Climat2 (les paramètres astronomiques et leur influence sur le climat) :

www4.ac-lille.fr/~svt/svt/download.php?lng=fr

Logiciel SimClimat (simulation d'évolution du climat dans le futur) :

http://education.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?page_id=14804&document_id=25411&portlet_id=78716

L'objectif est d'apporter quelques éclairages scientifiques sur certains aspects du thème.

L'atmosphère primitive

Le programme de spécialité s'intéresse notamment au passage d'une atmosphère primitive à une atmosphère oxydante, c'est-à-dire avec un taux de dioxygène significativement élevé. Actuellement de 20,8 %, il était probablement nul dans l'atmosphère primitive initiale.

On utilise des indicateurs géologiques, en particulier certaines roches sédimentaires, pour retrouver la composition de l'atmosphère primitive. Cependant, l'atmosphère a pu commencer à se former très tôt au cours de l'éon Hadéen, correspondant à la période allant de la naissance de la Terre à la mise en place de la plus ancienne roche connue : un gneiss canadien daté de – 4 Ga. En l'absence de roche hadéenne, la chimie vient alors au secours des chercheurs. C'est plus précisément le fractionnement des isotopes de certains éléments qui permet de construire des hypothèses sur l'environnement primitif de notre planète, et donc, sur la première composition de son atmosphère.

L'origine de l'atmosphère primitive à l'Hadéen (-4.55 Ga à -4 Ga)

Plusieurs réservoirs d'éléments volatils

On retient comme réservoirs de volatils ayant pu contribuer à la mise en place de l'atmosphère primitive :

- la matière solaire, c'est-à-dire la nébuleuse protosolaire présente lors de la formation de la Terre
- le manteau terrestre qui a libéré de nombreux volatils lors d'un dégazage dès l'Hadéen
- les chondrites carbonées ayant bombardé la Terre après son accrétion

La contribution de la nébuleuse protosolaire

Les études convergent vers une formation de la Terre en 50 à 100 Ma, période au cours de laquelle se déroule l'accrétion des chondrites formant la Terre. La différenciation de la Terre a pris encore 10 à 60 Ma. La nébuleuse protosolaire ayant une durée de vie d'environ 20 Ma, elle a constitué l'environnement de la Terre en formation. Certains de ses éléments volatils ont pu être capturés gravitationnellement dans l'atmosphère primitive. Cette contribution est cependant limitée : la composition de l'atmosphère en nombreux isotopes de gaz rares est trop différente de celle de la matière solaire.

Le dégazage précoce à l'origine de l'atmosphère primitive

On enseigne depuis longtemps le concept de dégazage : l'énergie libérée sous forme de chaleur par l'accrétion puis la différenciation terrestre, à laquelle s'ajoute celle produite par les désintégrations radioactives, implique une Terre partiellement en fusion. Les magmas silicatés légers migrent en surface, formant un océan magmatique. Celui-ci dégaze alors massivement les éléments volatils à l'origine de l'atmosphère primitive.

Le refroidissement de la Terre a entraîné la formation d'une première croûte basaltique. Seuls certains modèles conçoivent la formation de croûte continentale primitive dès – 4,4 voire – 4,5 Ga (par fusion de la croûte basaltique subductée, comme à l'Archéen). Une fois la croûte réellement formée, on peut parler de « dégazage du manteau », terme couramment employé. Cependant, la croûte hadéenne peut avoir été partiellement ou totalement entraînée en fusion temporaire à cause du bombardement météoritique qui a continué après la formation de la Terre. La croûte et le manteau ont donc fourni des éléments volatils à l'atmosphère primitive par dégazage.

Ce dégazage s'est fait précocement dans l'histoire de la planète. En témoignent la composition de l'atmosphère actuelle en certains isotopes.

- Pour l'argon, le rapport atmosphérique $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, mesuré à 295,5, traduit un excès de ^{40}Ar car l'argon 36 est supposé être l'isotope de l'argon le plus abondant au moment de la formation du système solaire. La production de l'argon 40 à partir du potassium 40 radioactif est envisageable mais la demi-vie de l'argon 40 est de 1,25 Ga. De plus, les basaltes océaniques issus du manteau montrant des valeurs du rapport $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ jusqu'à 40 000, on s'aperçoit que le manteau est un

réservoir important d'argon 40. Non seulement le dégazage du manteau expliquerait l'excès d'argon 40 dans l'atmosphère, mais les modèles de cinétique chimique expliquant les transferts d'isotopes de l'argon entre manteau (et croûte) et l'atmosphère primitive indiquent un dégazage précoce, au cours des premiers 500 Ma d'existence terrestre, bien avant une influence significative de la production d'argon 40 par radioactivité.

- Dans des MORB (Mid Oceanic Ridge Basalt, basaltes de dorsale océanique), on a détecté un excès important de l'isotope du xénon ^{129}Xe . Cet isotope est par contre rare dans l'atmosphère. Le ^{129}Xe provient de la désintégration de l'iode ^{129}I , de demi-vie courte : 17 Ma. L'iode 129 s'est formé avant le système solaire, et a été piégé dans le manteau au cours de l'accrétion. Avec une demi-vie si courte, la production de xénon 129 par radioactivité aurait pu influencer la composition atmosphérique rapidement. Comme cet isotope est rare dans l'atmosphère, le dégazage du manteau se serait fait avant cette influence, là encore sans doute pendant les 500 premiers millions d'années de l'existence de la Terre.

Il semble que l'atmosphère primitive se soit mise en place relativement tôt, au cours des 500 premiers millions d'année d'existence de notre planète. **Le dégazage est l'événement le plus important pour former cette première atmosphère primitive.**

Le bombardement de la Terre après sa formation

Au cours de l'Hadéen, le bombardement de la Terre par des météorites et des comètes, de tailles kilométriques parfois, est attesté par les cratères d'impacts lunaires. La datation de ce bombardement est déterminée grâce à celle des basaltes lunaires. Ce bombardement aurait pu influencer la composition de la Terre comme celle de l'atmosphère primitive.

- La présence d'éléments sidérophiles dans le manteau, normalement absents après différenciation terrestre, suggère un ajout tardif par bombardements de chondrites carbonées.
- Les études du rapport deutérium/hydrogène (rapport D/H) de l'eau des océans et du manteau suggèrent aussi une filiation avec des chondrites carbonées.

Le bombardement de la Terre après sa formation par des chondrites carbonées aurait ainsi pu apporter un grand nombre d'éléments volatils à la Terre et à l'atmosphère. On pense notamment que le stock d'eau terrestre existe grâce à ce bombardement.

Au-delà de la capture primordiale de gaz de la nébuleuse protosolaire, capture ayant peu contribué à l'élaboration de l'atmosphère, le dégazage de la Terre est un des mécanismes qui a permis de stabiliser, dès -4,3 Ga, une atmosphère primitive. Le bombardement post-accrétion de notre jeune planète par des chondrites carbonées, à l'origine du stock terrestre d'eau, a permis d'enrichir l'atmosphère en certains éléments volatils.

La composition chimique de l'atmosphère primitive prébiotique au cours de l'Hadéen

Chondrites parentes et manteau terrestre

Le dégazage du manteau dépend de sa composition chimique, elle-même régie par la composition des corps s'étant accrétés pour former la terre primitive. On s'accorde à penser que ces corps sont des chondrites. Ce sont des météorites indifférenciées, dont la composition moyenne en éléments chimiques est la même que la composition moyenne terrestre, et que la composition moyenne solaire.

Les chondrites sont divisées cependant en plusieurs catégories, selon les variantes de leur chimie. Il y a deux types de chondrites susceptibles d'être à l'origine de la Terre :

- Les chondrites à enstatite : elles contiennent des minéraux mis en place dans des conditions réductrices. Elles seraient à l'origine d'un manteau plus réduit que le manteau actuel. Les conditions d'oxydation du manteau ont alors forcément évolué. Des chercheurs ont montré, d'après la chimie de laves archéennes (komatiites), que depuis -3,8 Ga, le manteau avait le même état d'oxydation qu'actuellement.
- Les chondrites carbonées : outre leur richesse en carbone, ce sont les météorites les plus similaires à la matière solaire. Elles sont aussi plus oxydées que les chondrites à enstatite.

Il y a des arguments pour une contribution de chaque type de chondrite cité ci-dessus : les chondrites à enstatite présentent une composition isotopique en oxygène plus proche de celle des roches terrestres. L'oxygène étant l'élément chimique le plus abondant, cela argumente l'idée d'une Terre formée à partir de ces météorites. Par contre, la composition en métaux comme Si, Al, Fe, Mg des roches terrestres est plus proche de celle des chondrites carbonées.

Il aurait pu y avoir des échanges entre les régions du système solaire où se forment les 2 types de météorites, en témoignent des inclusions minérales typiques de chondrites carbonées récemment découvertes piégées au sein de chondrites à enstatite, ce qui permet d'imaginer une contribution partagée des deux types de météorites pour la composition du manteau primitif.

Nature du manteau et dégazage à l'Hadéen

- Dans le cas d'un manteau réduit issu de chondrites à enstatite, le dégazage entraînerait la formation d'une atmosphère primitive réductrice pourvue en H_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 . On obtient les composants d'une atmosphère prébiotique réductrice proche de celle imaginée par Miller. Celui-ci, en 1953, a simulé un tel milieu. Il a pu mettre en évidence la mise en place de réactions chimiques ayant notamment produit des acides aminés du vivant.
- Dans le cas d'un manteau plus oxydé issu de chondrites carbonées, l'atmosphère primitive est logiquement plus oxydante. Par exemple, l'azote serait plutôt sous forme N_2 et le carbone sous forme de CO_2 . Plus oxydante certes, mais dépourvue de dioxygène.

En se basant sur l'état d'oxydation du cérium dans les zircons hadéens, donc des magmas à partir desquels ils se sont formés, les chercheurs pensent que l'atmosphère prébiotique n'a pas été une atmosphère réductrice riche en méthane et ammoniac, mais plutôt une atmosphère possédant CO_2 , SO_2 , N_2 et H_2O . Dépourvue de dioxygène mais pas réductrice, certains statuent sur une atmosphère neutre, d'autres sur une atmosphère presque aussi oxydante qu'actuellement.

- Une telle composition atmosphérique peut s'expliquer par le dégazage d'un manteau oxydant, celui-ci existant dès la formation de la Terre dans le cas d'une accrétion de chondrites carbonées. Si on part de chondrites à enstatite, il faut attendre l'oxydation progressive du manteau jusqu'à son niveau actuel il y a 3,8 Ga.
- D'autre part, le bombardement post accrétion par les chondrites carbonées contribue lui aussi à apporter à l'atmosphère les volatils sous forme oxydée, notamment N_2 , CO_2 , CO et H_2O .

Le problème de l'atmosphère primitive à l'Hadéen est la quasi-absence d'archives géologiques permettant de retrouver clairement ce qu'elle fut alors. On utilise un recoupement d'autres informations.

Richesse en dioxyde de carbone de l'atmosphère primitive hadéenne

L'importance de l'océan primitif

Les zircons sont des minéraux extrêmement résistants, certains zircons australiens sont les plus vieux minéraux datés par radiochronologie : – 4,3 à – 4,4 Ga. Leur richesse en ^{18}O suggère une interaction entre manteau et eau de mer. L'eau liquide se serait alors mise en place sur Terre formant un océan primordial dès l'Hadéen ... mais peut-être vaporisé plusieurs fois par le bombardement externe encore intense.

Ce qui importe est l'existence d'eau liquide dès l'Hadéen. L'eau liquide suppose une température de surface suffisante alors que la luminosité solaire était inférieure à l'actuelle. L'atmosphère devait donc assurer un effet de serre suffisant pour permettre l'existence de cette eau liquide.

Une atmosphère riche en CO_2 peut exercer un tel effet de serre. Or, la richesse en CO_2 de l'atmosphère primitive dès l'Hadéen est un concept argumenté par le bombardement terrestre par les chondrites carbonées ainsi que par le dégazage intense d'un manteau oxydé ou s'oxydant.

Carbonates et taux atmosphérique en CO_2

L'existence de l'eau liquide suppose aussi la mise en place du processus de sédimentation des carbonates. Ces carbonates ont cependant la vie dure à l'Hadéen. La croûte continentale se forme grâce au magmatisme lié à la subduction de la croûte océanique basaltique. Mais à l'époque, la croûte

basaltique subductée était bien plus jeune, elle devait avoir entre 10 à 20 Ma, contre 60 Ma en moyenne actuellement. Les fonds marins ayant une durée de vie courte, les carbonates étaient rapidement subductés, le carbone recyclé dans le manteau et à nouveau dégazé en CO_2 . Le contact avec les laves permet aussi une décomposition thermique des carbonates en surface. Les carbonates qui avaient éventuellement été déposés dans un océan hadéen transitoire auraient pu être décomposés thermiquement par la formation d'océans magmatiques locaux lors du bombardement par des météorites de taille kilométrique. Enfin, les carbonates se forment par l'altération et le lessivage de la croûte entraînant dans l'océan des ions Ca^{2+} . La croûte primitive était moins calcique (il existe cependant d'autres carbonates (FeCO_3 , MgCO_3 par exemple), mais surtout, la croûte continentale était encore peu formée, il n'y avait pas grand-chose à altérer et lessiver pour former des carbonates.

La pression partielle en CO_2 sur Vénus est de 90 bars (contre 0,3 mbar actuellement dans notre atmosphère). L'absence d'hydrosphère, donc de formation de carbonates, explique une telle accumulation de CO_2 . Une telle atmosphère aurait pu exister sur la Terre primitive très active, donc dégazant intensément le CO_2 (plus l'apport externe par le bombardement), sans qu'il soit piégé dans les carbonates.

L'atmosphère primitive hadéenne aurait ainsi pu être une atmosphère dense, avec une pression partielle de CO_2 de plusieurs dizaines de bars (60 bars si tout le carbone des carbonates actuels passait dans l'atmosphère).

A l'Hadéen, se met en place une première atmosphère primitive. L'importante activité interne et le bombardement intense génère très tôt une atmosphère probablement non réductrice, dense et riche en CO_2 . Elle est aussi assez riche en eau. Au cours de l'Hadéen, la condensation à l'origine de l'eau liquide signifie que la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère primitive a diminué.

Évolution de l'atmosphère à l'Archéen: premiers liens entre atmosphère et activité biologique

On ne sait pas exactement dater l'apparition de la vie. On pense que les premières activités biologiques ont pu apparaître pendant l'Hadéen, mais le bombardement terrestre encore trop intense ne permet pas de concevoir un océan hadéen stable. Il en va alors de même pour la vie.

L'Archéen est par contre une période de l'histoire de la planète ayant laissé des marqueurs géologiques bien plus nombreux. L'Archéen correspond à la mise en place d'un océan primitif et d'une activité biologique durable.

Diminution de la richesse en dioxyde carbone de l'atmosphère

L'analyse de paléosols de l'Archéen tardif (-2,8 Ga) montre l'absence de sidérite (FeCO_3), cela est interprété comme une pression partielle en CO_2 seulement jusqu'à 100 fois plus forte que l'actuelle.

L'atmosphère primitive est certes toujours plus riche en CO_2 que l'atmosphère actuelle, mais la limite maximale de 100 fois la pression partielle, voire seulement 33 fois pour d'autres, a une signification importante : **l'Archéen montre une diminution de la pression partielle en CO_2 de l'atmosphère primitive. Comment s'est produite une telle diminution?**

- Les plus anciens sédiments sont archéens (-3,88 Ga, Groenland), ils signifient la présence d'eau liquide. On conçoit donc l'existence d'un océan archéen mis en place entre - 4 et - 3,9 Ga. La diminution significative du bombardement terrestre par des corps de grande taille le rend (enfin) durable. D'autre part, la surface de la croûte continentale s'est accrue. L'atmosphère primitive aurait vu sa richesse en CO_2 diminuer significativement par formation de carbonates piégeant le CO_2 , de moins en moins vite recyclés du fait du ralentissement de l'activité interne lié au refroidissement progressif de la Terre.
- Le refroidissement terrestre implique aussi une diminution du dégazage. Le bombardement a lui aussi énormément diminué, donc son apport en CO_2 aussi.
- Peut-être aussi le CO_2 a-t-il commencé à être significativement consommé par les êtres vivants photosynthétiques.

Des modèles ont été établis pour chiffrer l'évolution de la pression partielle en CO₂. On passe de plusieurs dizaines de bars à :

- 30 mbar pour les modèles d'atmosphère archéenne relativement pauvre en CO₂
- 200 mbar pour les modèles les plus riches en CO₂.

On reste au dessus des 0,3 mbar actuels dans tous les cas.

Augmentation de la teneur en diazote dans l'atmosphère

Des modélisations ont établi que le N₂ a atteint une pression partielle proche de la valeur actuelle (0,8 bar) dès – 4,3 Ga, après son dégazage par le manteau. La diminution de la concentration atmosphérique en CO₂ et la condensation de l'eau dans l'océan primitif (qui a peut être existé avant l'Archéen) « profite » au N₂ qui devient progressivement le composant dominant de l'atmosphère. **La pression atmosphérique totale aurait été de 1 bar à l'Archéen, soit une pression similaire à la pression atmosphérique actuelle. L'atmosphère contient dès lors près de 80% de N₂. La richesse en N₂ est, dès l'Archéen, une caractéristique fixe de l'atmosphère terrestre.**

Le méthane dans l'atmosphère primitive archéenne

Outre un dégazage possible dans le cas d'un manteau plus réducteur, la vie aurait pu produire du CH₄ avant – 3,8 Ga (à partir de – 4,2 Ga). Parmi les organismes primitifs, existaient sans doute des procaryotes méthanogènes. L'effet de serre généré par la présence atmosphérique de ce méthane biogénique a favorisé le maintien de l'eau liquide sur Terre malgré une luminosité solaire inférieure à l'actuelle. Cette composante d'origine biologique de l'effet de serre aurait pu réchauffer le climat et favoriser la formation des carbonates par précipitation chimique, facteur de la diminution du taux de CO₂ atmosphérique à l'Archéen.

D'autre part, si la diminution de la quantité de CO₂ est importante (plutôt 30 mbar de pression partielle que 200 mbar), elle a dû être compensée pour maintenir un effet de serre suffisant pour l'existence de l'eau liquide sur Terre. L'atmosphère primitive archéenne enrichie en CH₄ d'origine biologique permet un tel effet de serre malgré la décroissance de la quantité de CO₂.

À la fin de l'Archéen, entre – 2,7 et – 2,5 Ga, on note une diminution de moitié des concentrations de nickel dans les roches sédimentaires comme les fers rubanés (Kornhauser et al.). Le refroidissement terrestre, donc le ralentissement de l'activité interne, aurait diminué l'apport hydrothermal de nickel dans les océans. Or, les procaryotes méthanogènes se nourrissant de nickel, leur importance dans la biosphère aurait significativement chuté. La production de méthane biogénique diminuant, le taux en méthane de l'atmosphère archéenne a diminué.

Le dioxygène dans l'atmosphère archéenne

Apparition de la photosynthèse

L'enrichissement en carbone 12 de sédiments archéens datés de – 3,7 à – 3,8 Ga pourrait montrer que, dès le début de l'Archéen voire peut-être avant, il y avait une activité photosynthétique, donc une libération de dioxygène possible. La plus ancienne formation sédimentaire interprétée comme résultante d'une activité biologique est la formation australienne de Pilbara, datée de – 3,5 Ga. Elle contient des structures appelées stromatolithes.

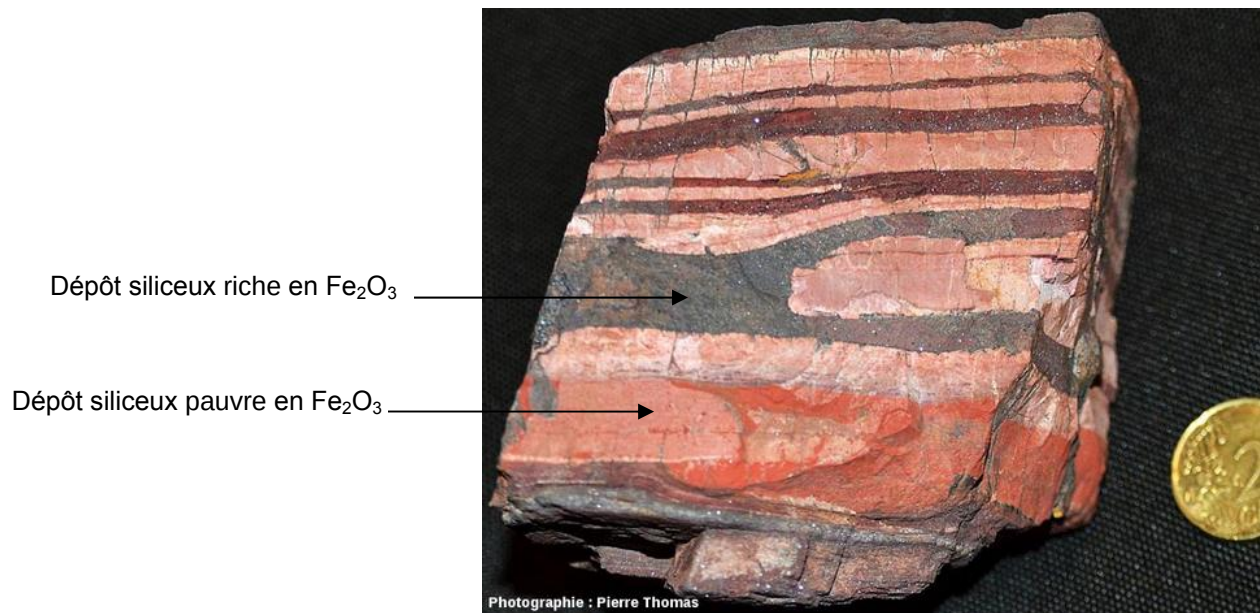
Les stromatolithes sont des formations carbonatées (plus rarement siliceuses) caractérisées par des dépôts laminaires de carbonates clairs, alternés avec des laminations sombres riches en matière organique (cf. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-stromatolithes.xml>).

Actuellement, ce type de formation se met en place grâce à l'activité photosynthétique des cyanobactéries. Ce sont des bactéries possédant des thylakoïdes libres dans leur cytoplasme, munis de photosystèmes leur permettant de réaliser la photosynthèse. Elles se développent en formant une colonie en tapis sur un support au moins humide. Dans le cas des stromatolithes, leur consommation de CO₂ favorise la précipitation de carbonates. Le tapis bactérien est alors recouvert par un dépôt de calcaire clair, les bactéries recouvertes sont « étouffées » et meurent ce qui forme le dépôt sombre. Les cyanobactéries recolonisent alors le substrat calcaire. La construction en couches alternées du stromatolithe se déroule ainsi cycliquement.

La présence de stromatolithes archéens montre l'existence de cyanobactéries réalisant la photosynthèse. Elles se sont aussi fossilisées dans des fers rubanés (voir paragraphe suivant). On pense qu'elles se sont développées dans l'océan archéen. De le dioxygène est donc libéré ... mais cela n'entraînera pas immédiatement l'oxygénation de l'atmosphère.

Les fers rubanés archéens

Une autre formation sédimentaire est présente à l'Archéen : les fers rubanés (ou formations ferrifères rubanées, *banded iron formation* ou BIFs). Ce sont de petits ensembles discontinus au sein de sédiments archéens, formés de dépôts sédimentaires siliceux alternativement riches et pauvres en oxydes de fer. Les lits gris, plus ou moins brillants, à éclat plus ou moins métallique, sont constitués d'hématite (Fe_2O_3) quasiment pure. Ces couches d'oxydes ferriques peuvent se colorer en brun rouge foncé, suite à des processus d'altération ou d'hydratation. Les lits roses ou « rouge brique » sont constitués de silice, plus ou moins colorée en rose ou rouge par des traces d'hématite. Cela explique l'allure rubanée de ces formations.



Échantillon de fer rubané daté de l'Archéen (http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planetterre/metadata/LOM-Img364-2011-10-10.xml)

La formation de ces oxydes de fer nécessite la présence initiale de fer ferreux réduit Fe^{2+} soluble dans l'océan archéen. Cela est impossible actuellement, l'hydrosphère étant oxydée.

Le dégagement de dioxygène par l'activité des cyanobactéries aurait oxydé Fe^{2+} en Fe^{3+} . Ce dernier, insoluble dans l'eau, aurait réagi avec le dioxygène pour former l'hématite. La magnétite est une combinaison d'hématite et d'oxyde ferreux FeO , issu de la combinaison de Fe^{2+} avec l'oxygène.

La précipitation de ces oxydes de fer implique deux choses :

- L'océan archéen est réduit car pourvu d'ions Fe^{2+}
- Le dioxygène dégagé par photosynthèse n'a pas oxydé immédiatement l'atmosphère, puisqu'il était piégé dans les oxydes de fer.

L'atmosphère archéenne était donc dépourvue de dioxygène, ou très pauvre en O_2 (moins de 0.2%)

D'autres arguments pour une atmosphère archéenne anoxique

D'autres roches sédimentaires témoignent de l'absence ou de la faible quantité de dioxygène dans l'atmosphère archéenne :

- Des poudingues à pyrite (photo ci-après), datés de l'Archéen, ont été trouvés dans le bassin sédimentaire du Witwatersrand, en Afrique du sud. Les poudingues sont des conglomérats à galets détritiques arrondis, usés, donc transportés longtemps par des cours d'eau. Or, la pyrite est instable dans les eaux oxydantes (elle devient oxyde ferrique). Cela signifie que les cours d'eau archéens n'étaient pas oxydés, donc que l'atmosphère archéenne était dépourvue de dioxygène.

Galets arrondis de pyrite



Galets arrondis, émoussés, de pyrite dans un poudingue archéen (http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/img_sem/XML/db/planetterre/metadata/LOM-lmq363-2011-10-03.xml)

- Dans certains paléosols archéens, on trouve de l'uraninite UO_2 . Or, celle-ci est instable en présence d' O_2 libre, elle est oxydée en UO_3 , soluble dans l'eau. La présence d'uraninite confirme l'absence (ou la très faible présence) d' O_2 dans l'atmosphère archéenne.

L'atmosphère archéenne est donc une atmosphère composée de 80% de N_2 , d'environ 20 % d'autres gaz dont les gaz effet de serre : soit seulement du CO_2 , soit du CO_2 et d'autres gaz dont le méthane. Les concentrations en CO_2 puis en méthane ont décliné au cours de l'Archéen. Malgré son dégagement par l'activité photosynthétique des cyanobactéries, le dioxygène est absent ou en quantité très faible. A la fin de l'Archéen, son taux atmosphérique devait être inférieur à 1 % du taux actuel, soit moins de 0,2 % de l'ensemble des gaz atmosphériques.

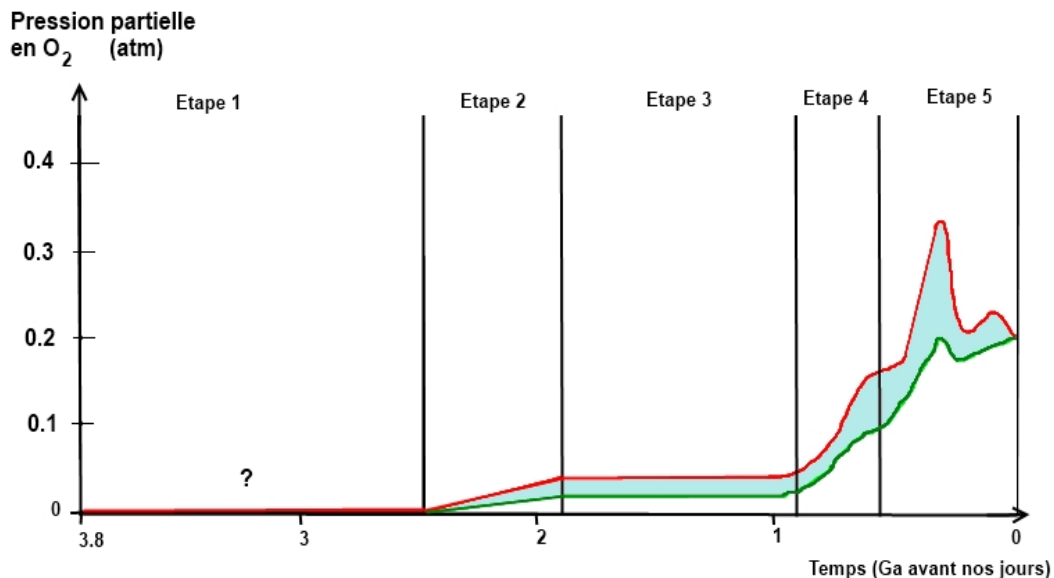
L'oxygénation de l'atmosphère à partir du Protérozoïque

Le Protérozoïque commence il y a 2,5 Ga, et s'achève au Cambrien (– 540 Ma). C'est pendant ce dernier éon du Précambrien que débute la « grande oxydation » des océans et de l'atmosphère. On date cette grande oxydation aux environs de – 2 Ga, en fait entre – 2,2 et – 1,9 Ga, soit longtemps après l'apparition des cyanobactéries photosynthétiques.

On peut diviser les temps géologiques en cinq étapes, chacune caractérisée par leur évolution atmosphérique pour le dioxygène.

Cinq étapes des temps géologiques

- 1 : Archéen
- 2 : Début du Protérozoïque, initiation de la grande oxydation
- 3 : Majeure partie du Protérozoïque
- 4 : Fin du Protérozoïque (Ediacarien)
- 5 : Phanérozoïque

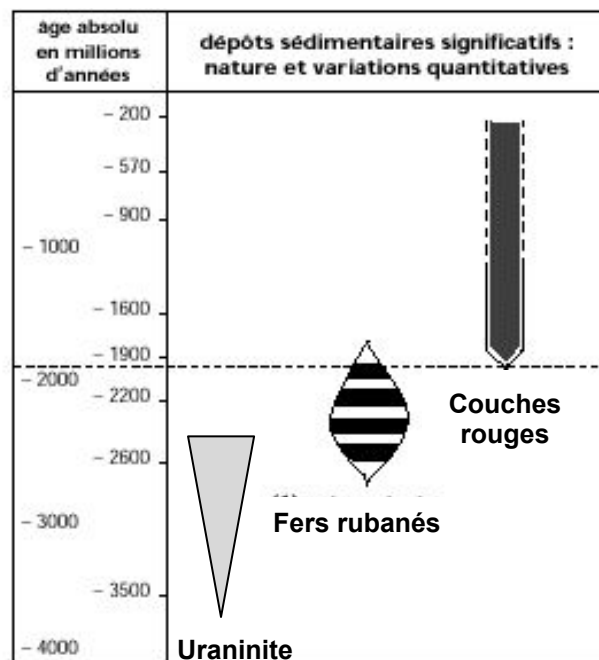


Évolution de la pression partielle atmosphérique en O₂ au cours des temps géologiques

Etapes 1 et 2 : pourquoi une oxygénation tardive ?

- L'oxydation du Fe²⁺ océanique empêche le dioxygène de se concentrer dans l'hydrosphère et de passer dans l'atmosphère. Les fers rubanés, témoins de cette oxydation du Fe²⁺, se forment d'ailleurs surtout entre – 2,5 et – 1,9 Ga.
- La matière organique créée par photosynthèse a pu être oxydée, ce qui consomme le dioxygène.
- Le dioxygène libéré dans l'atmosphère aurait pu oxyder le méthane pour redonner du CO₂, cela jusqu'à la diminution de sa production par les méthanogènes (– 2,7 à – 2,5 Ga).
- Les cyanobactéries ne sont pas toutes tolérantes face à un milieu aérobie. Elles auraient pu être intoxiquées dès l'augmentation de l'oxydation de leur milieu de vie jusqu'à l'apparition de formes plus tolérantes. Cela aurait ralenti la contribution de la photosynthèse à l'enrichissement en O₂ de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

Etape 2 : Les marqueurs géologiques de la grande oxydation autour de – 2 Ga



D'après un document du baccalauréat SVT, juin 2011, centre étranger

On voit notamment la disparition des marqueurs géologiques attestant d'une atmosphère anoxique à l'Archéen.

- L'uraninite est absente des sédiments détritiques à partir de – 2,2 Ga.
- Les fers rubanés ne se forment plus après – 1,9 Ga.
- Sur les continents, des formations de roches rouges à partir de – 2 Ga, riches en oxydes de fer, témoignent d'une érosion des continents sous une atmosphère sensiblement oxygénée.

On pense qu'entre – 2,2 et – 1,9 Ga, l'initiation de la grande oxydation, donc l'oxygénation des océans et de l'atmosphère, aurait permis progressivement d'obtenir une atmosphère significativement oxygénée. On serait passé de moins de 0,2% de dioxygène avant – 2,2 Ga à 3% de dioxygène après – 1,9 Ga.

Etape 3 : un niveau atmosphérique de dioxygène stagnant

- La formation des couches rouges continentales a piégé le dioxygène dans les oxydes de fer. Tant que ce réservoir à O_2 n'a pas été saturé, le dioxygène ne s'est pas accumulé dans l'atmosphère.
- Le dioxygène libéré dans l'atmosphère est soumis au rayonnement UV. Celui-ci déclenche la dissociation de la molécule O_2 en deux atomes d'oxygène. Un atome d'oxygène peut se combiner à une molécule de dioxygène O_2 pour former l'ozone O_3 . La formation de la couche d'ozone a donc consommé le dioxygène.

Ainsi, pendant le Protérozoïque, le taux de dioxygène n'atteint pas immédiatement des valeurs plus importantes.

Etapes 4 et 5 : augmentation de la teneur en O_2 et évolution de la biosphère

La fin du Protérozoïque montre le développement d'une faune constituée d'organismes de plus grande taille que les bactéries et les Eucaryotes développés jusqu'à ce moment. Ces fossiles, trouvés au sud de l'Australie (Ediacara Hills) indiquent une possibilité d'accroissement de taille des organismes vivants à cette époque. Si on conçoit que leur métabolisme est basé sur la respiration cellulaire, les eucaryotes ayant acquis les mitochondries entre – 2 et – 1,4 Ga, ces organismes devaient pouvoir fournir suffisamment de dioxygène à leurs cellules. Cela suppose un accroissement du taux de dioxygène à cette époque.

On a une explosion de la vie entre Protérozoïque et Phanérozoïque. L'acquisition d'un squelette minéralisé, la mise en place de constructions récifales, l'apparition des végétaux, les crises biologiques, sont autant d'indices permettant de retracer l'évolution de l'oxygénation de l'atmosphère jusqu'à notre époque.

Un tel développement de la biosphère indique une composition atmosphérique en O_2 dépassant les 10%. L'évolution de la biosphère au cours du Phanérozoïque implique sans doute des variations significatives de la teneur en O_2 de l'atmosphère, jusqu'aux 20,8% de nos jours.

Finalement, plus que l'état d'oxydation de l'atmosphère, c'est sa teneur en O_2 qui a changé au cours de son histoire, avec la grande oxydation ayant eu lieu autour de – 2Ga.

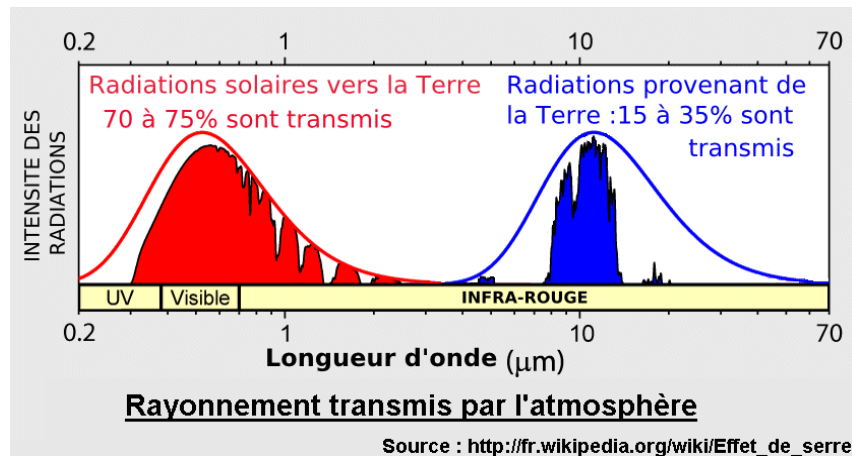
L'histoire de l'atmosphère montre, malgré une certaine incertitude, l'importance des variations des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, méthane et CO_2 en particulier. Sans cet effet de serre important, l'océan mondial primitif n'aurait pu exister sur Terre avec un jeune Soleil à la luminosité plus faible qu'actuellement. On ne peut pas présager complètement d'une impossibilité de l'apparition de la vie, mais il est difficile d'envisager une importante activité des cyanobactéries sans océan primitif.

Et c'est justement autour de – 2 Ga que la diminution sensible des concentrations en méthane et en CO_2 , donc un effet de serre faiblissant, est pallié par une luminosité solaire enfin suffisante.

Si l'histoire de l'atmosphère témoigne du lien étroit entre les événements planétaires et l'évolution de la vie, il reste un certain mystère quant à la genèse de cette vie. Si l'atmosphère primitive initiale n'était pas réductrice, elle n'était pas favorable aux réactions chimiques organiques à l'origine des briques du vivant reproduites dans l'expérience de Miller. Mais ces molécules à la base de la matière vivante n'auraient-elles pas une origine extraterrestre, apportées sur Terre par le bombardement météoritique et cométaire ? C'est une théorie scientifique : la panspermie.

L'effet de serre

Définition et principe général : L'effet de serre est un processus naturel dû à l'atmosphère, qui contribue à augmenter la température de surface par rapport à une planète ayant les mêmes caractéristiques (même constante solaire et même albédo...) mais sans atmosphère. L'atmosphère laisse passer, de jour, des rayonnements solaires (70 à 75 % de ce qui arrive au sommet de l'atmosphère). Le sol réfléchit une partie de ces rayonnements (= albédo) et absorbe l'autre partie, ce qui le réchauffe. Le sol cède ensuite cette chaleur en réémettant, de jour comme de nuit, vers le haut, un rayonnement infrarouge (rayonnement thermique du sol). La majorité des radiations issues du sol (65 à 85 %) est cette fois absorbée par certains gaz atmosphériques, dits gaz à effet de serre (GES). Cette action réchauffe l'atmosphère qui émet son propre rayonnement thermique dont la plus grande partie retourne vers le sol qui l'absorbe et s'échauffe.



Les apports solaires : Ne pas confondre :

- la constante solaire qui correspond à une puissance de rayonnement que recevrait une surface de 1 m² à 1 unité astronomique du Soleil (= une distance Terre – Soleil), la surface étant perpendiculaire aux rayons solaires et affranchie des effets de l'atmosphère. Sa valeur est de 1368 W/m² en moyenne (fluctuations selon cycles solaires).
- le flux solaire qui prend en compte la répartition de cette énergie solaire (la constante solaire) sur l'ensemble de la surface terrestre. Cette dernière est 4 fois plus grande que la section de la Terre (surface perpendiculaire aux rayons solaires, considérée dans la définition de la constante solaire), la surface d'une sphère valant $4 \pi r^2$ alors que la section de la sphère terrestre vaut πr^2 . C'est ainsi que la valeur du flux est de $1368 / 4 = 342 \text{ W/m}^2$, même si cette valeur est très théorique tant, en pratique, la différence est grande entre les régions de latitudes différentes (projection des rayons sur une surface plus ou moins proche de la perpendiculaire aux rayons).

Les gaz à effet de serre :

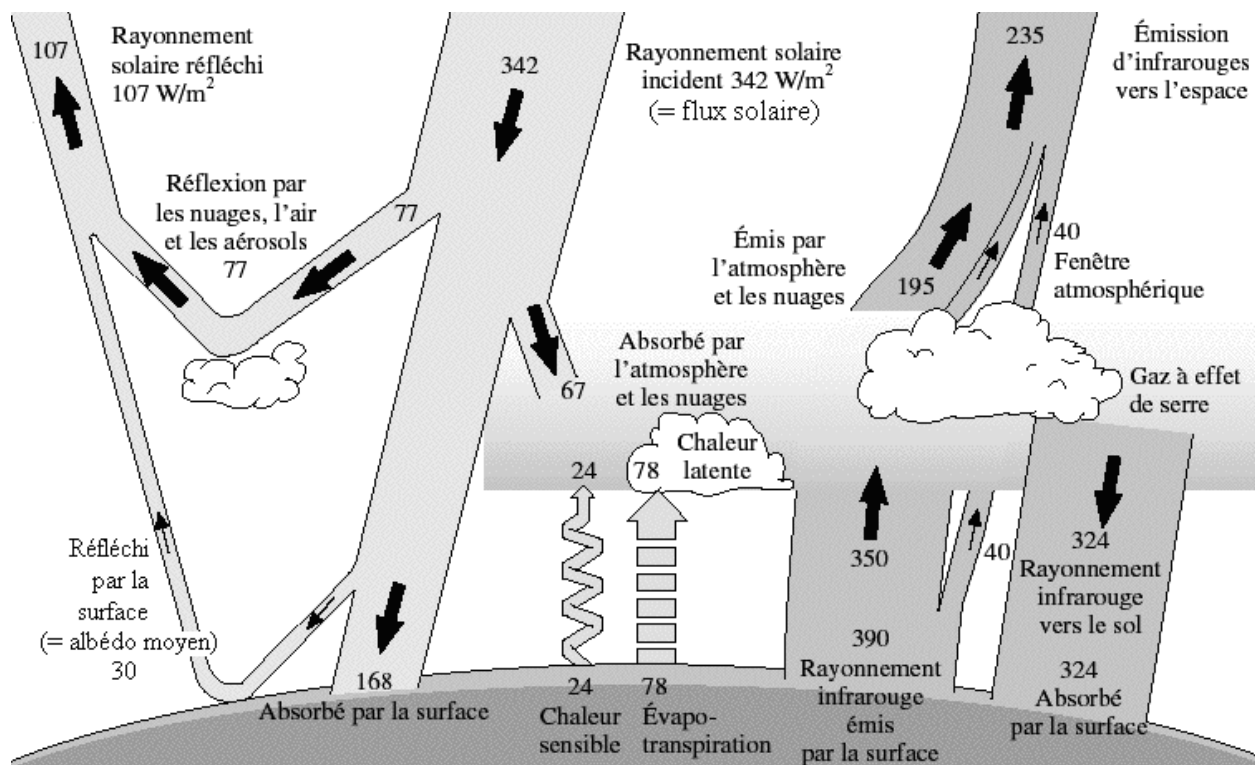
- Définition : Ce sont des composants gazeux de l'atmosphère qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, contribuant à produire un effet de serre. Chimiquement, ce sont des molécules ayant au minimum 3 atomes (ou potentiellement 2 atomes différents) et dont le dipôle électrique peut changer suite à une conversion d'état vibrationnel déclenchée par l'absorption d'un photon de la gamme infrarouge (les configurations asymétriques permettent un déplacement du centre de charge électrique, ce qui est impossible pour N₂ ou O₂ par exemple, dont la symétrie induit l'inexistence d'un dipôle électrique).
- Importance des principaux GES dans l'effet de serre naturel (d'après GIEC) :
 - Vapeur d'eau : 60 % (l'eau effectuerait 72 à 90 % de l'effet de serre une fois prise sous toutes ses formes incluant l'eau sous forme liquide et solide des nuages)
 - Dioxyde de carbone : 26 %
 - Ozone : 8 %
 - Méthane et Oxyde nitreux : 6 %

Ces chiffres indiquent l'implication des gaz dans l'effet de serre ; il faut y ajouter l'eau liquide et solide des nuages, qui participe à l'effet de serre global.

- Comparaison des effets de chaque gaz : Par exemple, le méthane produit globalement une contribution 9 fois moindre que celle du CO₂ à l'effet de serre exercé par notre atmosphère, mais c'est parce qu'il y est beaucoup moins concentré. A concentration égale son action est 23 fois plus forte. C'est ainsi que les scientifiques comparent l'action de chaque gaz en calculant son PRG (pouvoir de réchauffement global) à partir de son pouvoir d'absorption d'infrarouge et son temps de résidence dans l'atmosphère. Le PRG est calculé pour un effet sur 100 ans, non de façon absolue mais par comparaison avec le CO₂ dont on fixe le PRG comme étant égal à 1.

Gaz	Concentration préindustrielle = avant 1750	Concentration actuelle	PRG
Dioxyde de carbone	278 ppm	387 ppm	1
Vapeur d'eau	0,3 %	0,3 %	8
Méthane	0,7 ppm	1,7 ppm	23
Oxyde nitreux (N ₂ O)	0,275 ppm	0,311 ppm	310
Gaz artificiellement présents :			
• dichlorodifluorométhane	0	0,503 ppb	6 200 à 7 100
• chlorodifluorométhane	0	0,105 ppb	1 300 à 1 400
• tétrafluorométhane	0	0,070 ppb	6 500
• hexafluorure de soufre	0	0,032 ppb	22 800

Le bilan radiatif de la Terre dresse un bilan entre la quantité d'énergie reçue par le système climatique Terre – atmosphère et la quantité d'énergie réémise vers l'espace. Lorsque le bilan est nul, la température moyenne de la Terre reste constante.



Bilan radiatif (équilibré) de la Terre.

Source : Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements
www.cesr.fr

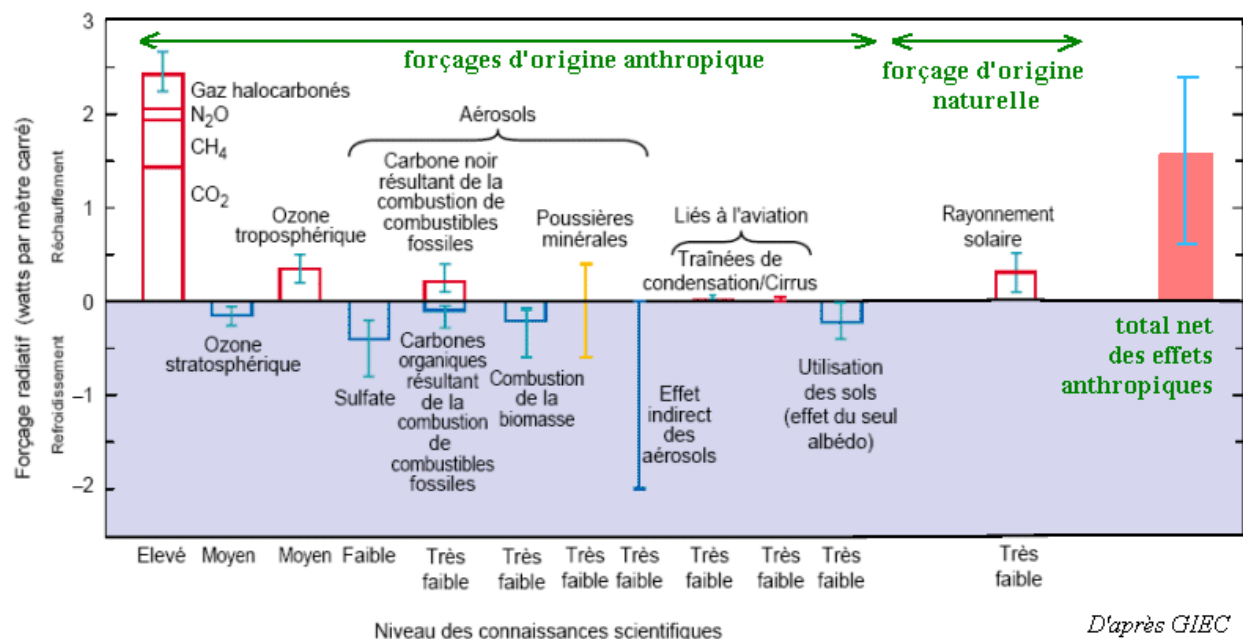
Notion de forçage :

Définition : Le terme de forçage s'emploie en climatologie pour désigner les perturbations dans l'équilibre énergétique de la Terre, perturbations qui engendrent des changements de température. On prend souvent comme référence les conditions de 1750 (avant l'ère industrielle). Les forçages sont quantifiés par leur effet au sommet de l'atmosphère et s'expriment en W/m^2 . On note positivement un forçage qui tend à réchauffer le système, négativement un forçage qui tend à le refroidir.

Identification des forçages :

- Forçages naturels : variations d'intensité du rayonnement solaire, variations orbitales de la Terre, éruptions volcaniques et émission de cendres voilant le Soleil (voir première figure ci-dessous), gaz à effet de serre naturellement présents ...
- Forçages d'origine anthropique : émission de GES, émission d'aérosols, déforestation et modification de l'albédo...

Effet des forçages : Dans la deuxième figure ci-dessous, on lit qu'à notre époque les forçages climatiques d'origine anthropique causeraient un réchauffement d'environ $1,5 W/m^2$ par rapport à la situation préindustrielle de 1750 (à quoi il faudrait ajouter $0,3 W/m^2$ de forçage naturel en raison d'une insolation plus puissante aujourd'hui qu'il y a 250 ans). On trouve là la valeur chiffrée de ce qu'on appelle classiquement "réchauffement climatique" ou "modification climatique", due à un déséquilibre du bilan radiatif d'environ $1,5 W/m^2$ dans le sens d'un gain de chaleur supérieur aux pertes de chaleur pour notre atmosphère.



forçage radiatif moyen global du système climatique en l'an 2000 par rapport à 1750

Source : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/motscler/images/forçage.html>

Remarques :

- Ne pas oublier que l'effet de serre est avant tout naturel et bénéfique (sans son existence, la température moyenne sur Terre serait de $-17^{\circ}C$ et non de $+14^{\circ}C$) : les effets anthropiques ne posent problème qu'en exagérant un phénomène naturel, pas en créant l'effet de serre.
- Limite du nom du modèle dit "de l'effet de serre" : Une vraie serre s'oppose au déplacement de l'air chauffé qui, sans la vitre de la serre, s'échapperait vers le haut... mécanisme très différent dans le cas de l'effet de serre atmosphérique.
- Ne pas oublier que toutes les radiations absorbées (UV, visible, IR...) réchauffent le sol (et pas seulement les rayonnements Infra-Rouge. (Les rayonnements IR des radiateurs sont plus efficaces

pour réchauffer le corps humain (surtout les peaux blanches) parce que l'eau contenue dans les tissus biologiques les absorbe fortement, alors que les radiations visibles sont moins absorbées).

- La chaleur d'origine interne n'est pas oubliée dans le bilan radiatif de la Terre mais volontairement négligée étant donné sa petitesse : $0,06 \text{ W/m}^2$ en moyenne (ce qui est très inférieur aux imprécisions du bilan radiatif global de la Terre).
- L'effet de serre n'explique pas à lui seul les températures mesurées sur Terre : il faut aussi considérer l'albédo, l'importance des circulations atmosphériques et océaniques, le cycle de l'eau...
- L'effet des nuages n'est pas aisé à quantifier, puisqu'ils interviennent sur le bilan thermique de la Terre à la fois positivement (effet de serre) et négativement (réflexion de radiations solaires incidentes).
- Climatologie et météorologie ne doivent pas être confondues. La première étudie le climat sur de longues durées (relevé de résultat pendant 30 années au minimum). La seconde a pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques (nuages, précipitations, vents...) dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent en fonction des paramètres mesurés tels que température, pression atmosphérique, humidité.
- Des unités de temps très diverses doivent être prises en compte : l'exemple peut être abordé à travers les effets des éruptions volcaniques. Instantanément, elles exercent un forçage négatif en raison des cendres mais cela dure peu de temps (quelques mois, deux ans tout au plus) tandis que le CO_2 qu'elles injectent dans l'atmosphère exerce un forçage positif plus faible mais plus durable (temps de résidence dans l'atmosphère de 15 à 200 ans).

Notion de modèle climatique

Le programme stipule que « La modélisation de la relation effet de serre / climat [...] permet de proposer des hypothèses d'évolutions possibles du climat de la planète [...]. » Se retrouve ici la notion de « modèle climatique », que nous allons développer.

Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?

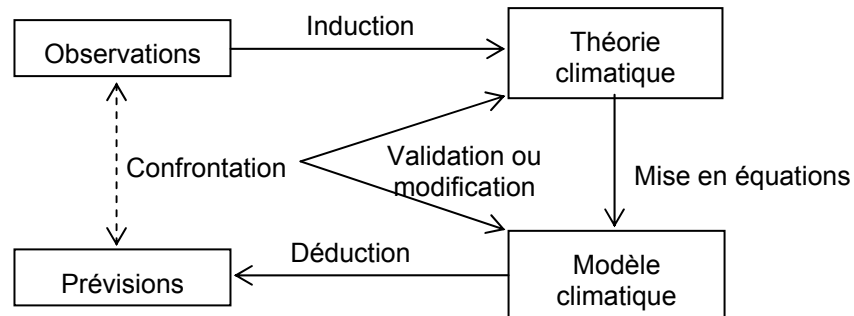
Alertée par la coïncidence de l'augmentation de la concentration du CO_2 atmosphérique observée depuis 1957 à Mauna Loa (Hawaï) et l'augmentation de la température observée depuis le début du 20^{ème} siècle, la communauté scientifique a créé en 1988 un groupe de travail, le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat), dont le premier objectif est d'évaluer le changement climatique : que deviendra le climat dans les décennies et les siècles à venir, compte tenu de l'évolution démographique et économique susceptible d'entraîner une augmentation accrue des émissions de gaz à effet de serre ?

Pour répondre à cette question, la modélisation mathématique (ou analytique) est indispensable car c'est le seul outil capable de considérer toutes les composantes du système climatique (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère, partie supérieure de la lithosphère) et les mécanismes mis en jeu dans les variations climatiques. Les modèles climatiques sont ainsi des programmes informatiques qui permettent de reproduire aussi fidèlement que possible le climat terrestre actuel, de reconstituer le climat passé et de prédire l'évolution future du climat de notre planète : ce sont des modèles à la fois reproductifs et prédictifs. Il existe actuellement une quinzaine de programmes dans le monde. En France, l'un des pôles de modélisation et d'étude du climat est l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace).

Comme tous les modèles, les modèles climatiques sont une simplification volontaire et reconnue du réel, ici le système climatique : ils sont bâtis sur des hypothèses concernant l'importance ou non (au moins momentanément, les modèles ayant évolué et pouvant évoluer encore) des différents éléments intervenant sur le climat. Les modèles climatiques résultent donc de théories implicites concernant le fonctionnement du système climatique terrestre. Sont ainsi utilisés deux modes de raisonnement distincts :

- l'induction (ou raisonnement inductif) : c'est une opération logique consistant, à partir de faits réels et sensibles, à aboutir à une loi (« Tous les hommes que je connais sont mortels, donc tous les hommes sont mortels ») ; c'est ce type de raisonnement qui permet de construire une théorie climatique (« À chaque fois que la concentration en CO_2 atmosphérique augmente, la température augmente, donc l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique provoque l'augmentation de la température ») ;

- la déduction (ou raisonnement déductif) : c'est une opération logique consistant à appliquer une loi considérée comme exacte à un cas particulier considéré comme entrant dans le cadre de la loi (« Tous les hommes sont mortels ; or Socrate est un homme, donc Socrate est mortel ») ; c'est ce type de raisonnement qui permet, en utilisant la théorie climatique précédemment construite par induction, de reproduire le climat actuel ou les climats passés (« On mesure telle concentration de CO₂ atmosphérique, donc la température doit être de tant ») et de prédire l'évolution climatique (« On prévoit telle concentration de CO₂ atmosphérique, donc la température sera de tant »).



Les raisonnements intervenant dans la construction d'un modèle climatique.

Les théories climatiques étant basées sur un raisonnement inductif, elles ne sont valides que tant que les faits ne les ont pas infirmées. Les prédictions réalisées par les modèles climatiques, qui utilisent ces théories climatiques, ne sont donc valides que tant que ces théories sont valides.

Comment sont construits et validés les modèles climatiques ?

Dans les modèles climatiques, la surface, les océans et l'atmosphère terrestres sont découpés en mailles cubiques de quelques centaines de kilomètres de côté (de 500 km de côté en 1980 à 100 km de côté en 2007) formant une grille tridimensionnelle.

Les programmes comportent ensuite :

- des paramètres (ou variables) climatiques concernant chaque maille (ou groupe de mailles), dont on rentre les valeurs actuelles ;
- des équations exprimant les lois qui régissent le comportement interne de chaque maille ;
- des équations exprimant les lois qui régissent les relations entre une maille et ses voisines.

La résolution informatique de l'ensemble des équations permet d'obtenir l'évolution spatiale et temporelle des différents paramètres.

Les premiers modèles climatiques, qui datent des années 1950, ne tenaient compte que d'une composante, l'atmosphère, avec ses paramètres (composition, température, pression, humidité, précipitations, vent) et ses équations (circulation atmosphérique, pouvoir réchauffant des gaz à effet de serre). Depuis, grâce aux données satellitales et aux progrès informatiques, de nouvelles composantes ont successivement été introduites. Aujourd'hui, les programmes¹ considèrent :

- l'activité solaire et l'activité volcanique ;
- l'atmosphère (avec en plus, par rapport aux modèles des années 1950, la couverture nuageuse, les aérosols sulfatés et autres aérosols, l'ozone stratosphérique, les réactions chimiques atmosphériques) ;
- les océans (évaporation, circulation océanique horizontale de surface, circulation océanique profonde) ;
- les banquises (formation / fonte des glaces de mer) ;
- les sols et la végétation (évapotranspiration, albédo, dynamique de la végétation) ;
- l'hydrologie continentale ;
- le cycle du carbone, incluant la biosphère et les écosystèmes marins.

¹ Voir le film de l'IPSL : www.ipsl.fr/fr/Mediatheque/Multimedia/Animation-sur-la-modelisation-climatique .

La validation d'un modèle climatique se fait par une batterie de tests, qui consistent à :

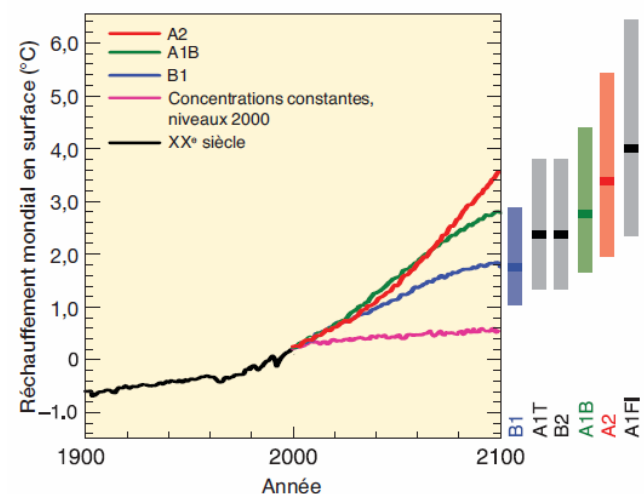
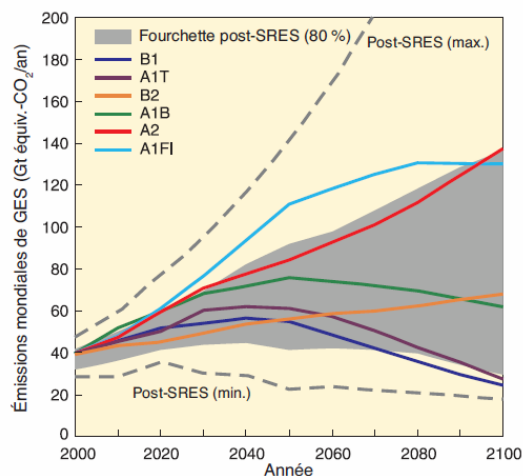
- confronter les résultats du modèle appliqué aux quelques décennies passées, aux observations qui ont été faites pendant la même période, en considérant les sources naturelles et anthropiques de variabilité climatique : on vérifie la reproduction des moyennes des paramètres atmosphériques et océaniques, ainsi que des principales variations connues (variations journalières, saisonnières, interannuelles, épisodes El Nino, moussons), etc ;
- confronter les résultats du modèle appliqué à des périodes lointaines comme l'Holocène (6 000 ans) ou le dernier maximum glaciaire (21 000 ans), aux données paléoclimatiques obtenues dans les glaces et les sédiments ;
- confronter les résultats des différents programmes entre eux.

Les programmes utilisés par le GIEC étant suffisamment reproductifs, ils sont supposés capables d'être prédictifs.

Quelle est l'évolution possible du climat prévue par les derniers modèles climatiques ?

Évolution possible de la température moyenne de la Terre

Quand on ajoute aux modèles climatiques une équation représentant l'évolution des émissions anthropiques des gaz à effet de serre, même s'ils sont construits différemment, même si les valeurs obtenues varient, ils aboutissent tous depuis 1950 au même résultat : un réchauffement global de la planète, d'autant plus important que ces émissions seraient importantes.



Évolutions projetées des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O et gaz fluorés) au cours du XXI^e siècle selon les six scénarios de référence du SRES.

Le SRES est le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission des gaz à effet de serre et des aérosols (2000). Ce rapport a retenu six scénarios considérant différentes voies de développement démographique, économique et technologique (voir tableau ci-dessous) mais gardant les politiques climatiques actuelles.

D'autres scénarios sont parus après le SRES : les lignes en pointillés délimitent la plage complète de ces scénarios et la zone grisée correspond à 80 % de ces scénarios.

Évolutions projetées de l'augmentation de la température moyenne mondiale à la surface du sol au cours du XXI^e siècle, par rapport à la période 1980-1999, selon trois des six scénarios de référence du SRES.

Pour chaque scénario, la courbe est une moyenne obtenue avec plusieurs modèles climatiques ; la dispersion des prédictions des différents modèles pour la période 2090-2099 est matérialisée par la barre à droite ; la zone plus foncée de la barre précise la valeur la plus probable, établie à partir d'une hiérarchie des modèles climatiques.

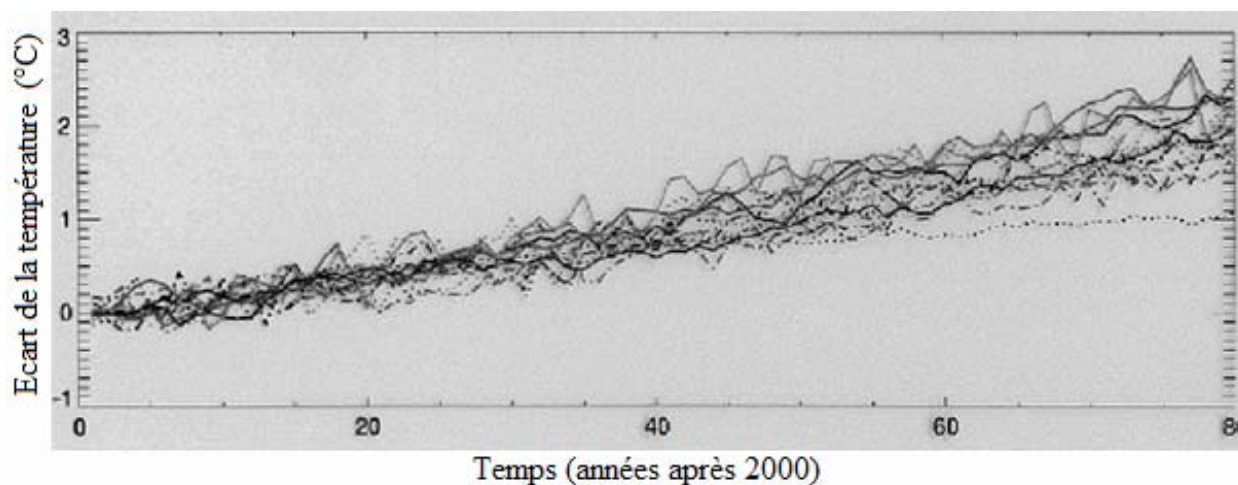
La courbe rose n'est pas un résultat de scénario mais sert de témoin en représentant l'augmentation de la température moyenne si les concentrations de gaz à effet de serre restaient constantes après 2000.

Bilan 2007 des changements climatiques du GIEC

	Scénarios A1	Scénario B1	Scénario A2	Scénario B2
Évolution démographique	Croissance jusqu'en 2050 et décroissance après		Forte croissance	Croissance moyenne
Évolution économique	Croissance très rapide		Croissance très hétérogène	
		Evolution vers une économie des services et de l'information		
Évolution technologique	Adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces utilisant les énergies surtout fossiles (A1FI), surtout non fossiles (A1T) ou un équilibre entre les deux (A1B)	Adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces utilisant surtout les énergies non fossiles	Croissance très hétérogène	

Les différentes évolutions démographiques, économiques et technologiques prévues par les différentes familles de scénarios du SRES (2000).

D'après IPCC

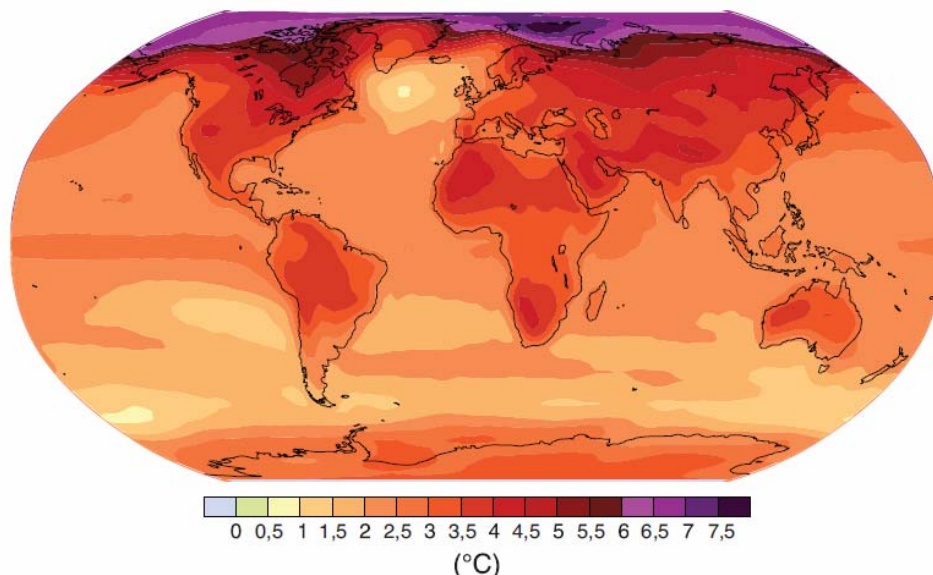


Évolutions projetées de l'augmentation de la température moyenne de l'air au niveau du sol de la Terre au cours du XXI^e siècle, par rapport à 2000, selon le scénario B2.

(Chaque courbe est le résultat d'un des modèles utilisés par le GIEC pour son rapport de 2007)

PCMDI/IPSL

D'après tous les modèles également, le réchauffement serait plus prononcé la nuit que le jour, l'hiver que l'été, aux pôles qu'à l'équateur, sur les continents que sur les océans. En effet, l'effet de serre ne disparaît pas quand la chaleur provenant du rayonnement solaire n'est pas ou peu là, donc il y est proportionnellement plus fort, donc l'augmentation de l'effet de serre a un effet plus sensible là et quand il n'y a pas ou peu de rayonnement solaire (la nuit, en hiver et aux pôles). Quant aux continents, ils ont une inertie thermique beaucoup plus faible que les océans, donc leur réactivité à l'augmentation de la température globale de la Terre est plus grande.

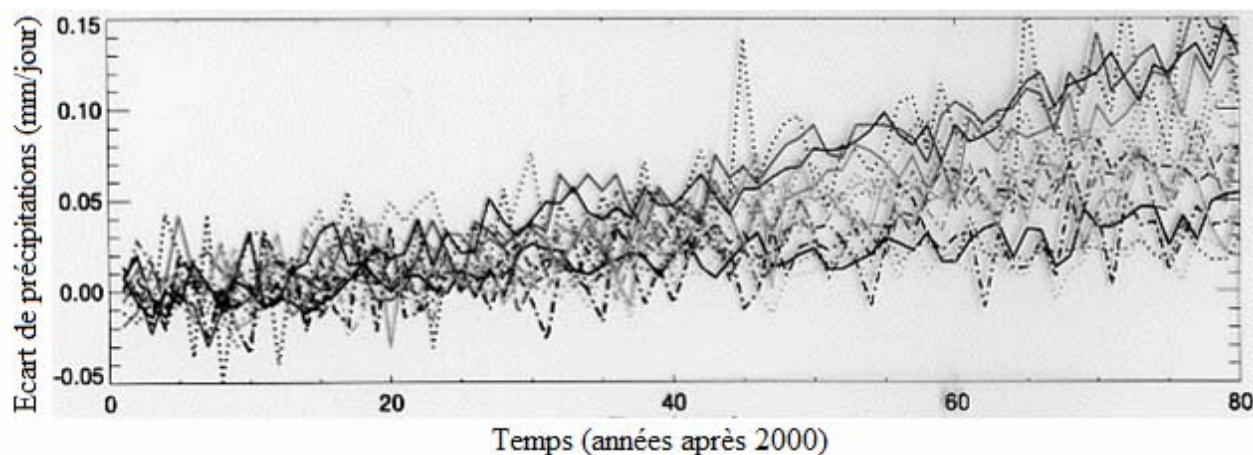


Projection de l'élévation de la température moyenne de l'air au niveau du sol pour la période 2090-2099², par rapport à la période 1980-1999, selon le scénario A1B.
(Moyennes obtenues avec plusieurs modèles climatiques)

Bilan 2007 des changements climatiques du GIEC

Évolution possible des précipitations moyennes de la Terre

Les modèles prédisent également une augmentation moyenne des précipitations. En effet, un air globalement plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau, donc l'évaporation augmentera, ce qui engendrera plus de précipitations.



Évolutions projetées des écarts de précipitations journalières moyennes au cours du XXI^e siècle par rapport à 2000, selon le scénario B2.

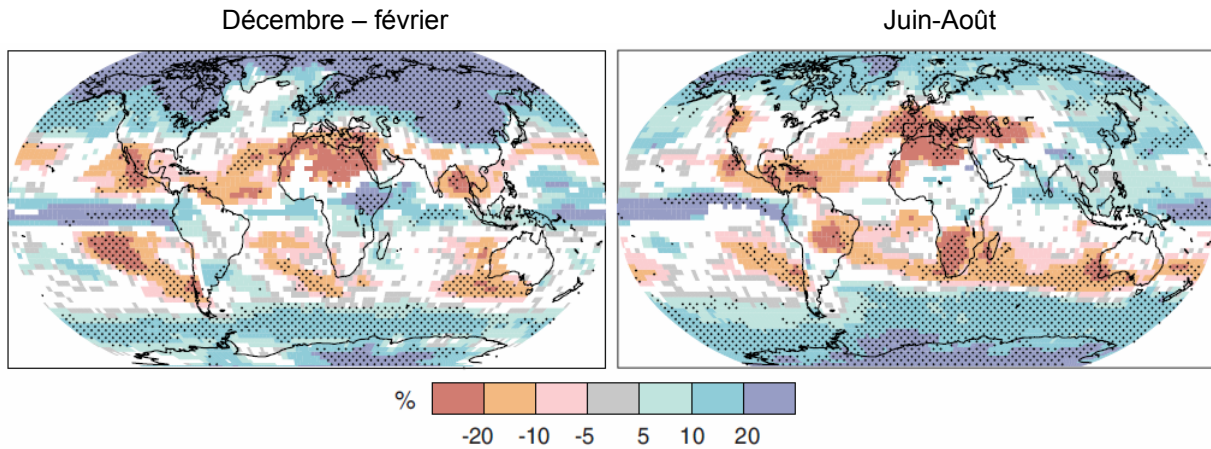
(Chaque courbe est le résultat d'un des modèles utilisés par le GIEC pour son rapport de 2007)

PCMDI/IPSL

Cette augmentation des précipitations ne sera cependant pas répartie équitablement à la surface du globe : elle sera plus importante à l'équateur et aux hautes latitudes par rapport aux latitudes subtropicales.

² Voir également une simulation animée au cours du 21^{ème} siècle :

www.ipsl.fr/Pour-tous/Les-animations-et-films/Evolution-des-temperatures-au-21eme-siecle



Projection des écarts de précipitations pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999, selon le scénario A1B.

Moyennes obtenues avec plusieurs modèles climatiques.

Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de variation. Les zones en pointillé correspondent aux régions où plus de 90 % des modèles concordent sur le sens de variation.

Bilan 2007 des changements climatiques du GIEC

Les prédictions des modèles climatiques sont-elles fiables ?

Les incertitudes concernant l'ampleur du réchauffement climatique au cours du XXI^e siècle sont certes dues à des différences entre les scénarios d'émission de gaz à effet de serre utilisés par les modèles mais également aux incertitudes des modèles eux-mêmes. Celles-ci peuvent être classées en trois catégories :

- **Les incertitudes sur les paramètres d'entrée des modèles :**

- les sources naturelles de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O), qui sont des gaz à effet de serre, ne sont pas quantifiées avec précision mais seulement estimées ;
- les mesures concernant la circulation océanique profonde sont difficiles ;
- la différence, due à l'ajout anthropique de gaz à effet de serre, entre l'énergie solaire absorbée par la surface du globe et l'énergie terrestre perdue par rayonnement infrarouges n'est pas mesurée car le système satellital actuel n'est pas encore assez précis, mais seulement estimée (à 1,5 W/m²).

- **Les incertitudes liées à l'absence ou à la mauvaise représentation de certains phénomènes, négligés ou difficilement modélisables :**

- l'augmentation de l'ozone troposphérique, qui participe à l'effet de serre, n'est pas prise en compte car elle dépend de réactions complexes ;
- les différents gaz à effet de serre ne sont pas toujours pris en compte de manière totalement indépendante (certains modèles font seulement la somme des différents gaz émis, pondérés par leur pouvoir de réchauffement), ce qui empêche de considérer l'effet de la température sur les émissions / éliminations naturelles de chaque gaz, principalement le méthane ;
- la modélisation de la couverture nuageuse est imprécise car les nuages sont plus petits que le maillage utilisé par les modèles ;
- les modifications de la végétation dépendent des conditions locales, qui varient de manière plus incertaine, donc plus difficilement modélisable, que les conditions globales ;
- l'évaporation continentale fait intervenir des processus de petite échelle qu'il est difficile de modéliser.

- **Le caractère partiellement chaotique du climat**, qui se traduit par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques proches calcule deux évolutions climatiques notablement différentes.

Les modèles climatiques actuellement utilisés par le GIEC ont donc certes été validés, comme cela a été signalé plus haut, mais tous leurs résultats concernant le climat actuel ou les climats passés ne sont pas corrects (le pourcentage de résultats corrects est important mais il n'est pas de 100 %) et surtout le taux

de validité d'un modèle sur ses prédictions climatiques n'est pas forcément identique au taux d'exactitude des résultats de ce modèle reproduisant le climat actuel ou des climats passés : par exemple, si un modèle climatique reproduit parfaitement 95 % des données du climat actuel, cela ne veut pas dire que 95 % de ses prédictions sont exactes.

En guise de conclusion :

Ainsi, les différents modèles climatiques aboutissent à la même prévision : le climat de la Terre se réchaufferait, ce qui serait dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Cependant, la modélisation de l'évolution du climat global de la Terre est rendue difficile par la complexité de certaines mesures et de la modélisation des phénomènes qui jouent un rôle dans le climat, ce qui aboutit à une incertitude concernant l'ampleur de ce réchauffement. Les progrès de la modélisation du système climatique terrestre sont donc essentiels pour affiner les scénarios d'évolution climatique future, comme ils ont déjà permis au GIEC d'être de plus en plus affirmatif quant à l'influence humaine sur le réchauffement climatique des dernières années.

Evolution du climat au cours des 800 000 dernières années

Le climat peut être défini comme étant les données météorologiques moyennes calculées d'après les observations faites dans un endroit précis sur une période d'au moins 30 ans (période climatique de référence définie par l'Organisation Météorologique Mondiale). Du fait de l'existence de cycles saisonniers, des moyennes sont calculées mois par mois. Pour ce calcul, on procède à une analyse statistique de longues séries chronologiques de mesures des données météorologiques (température, précipitations, vitesse du vent, humidité de l'air et ensoleillement) caractérisant l'atmosphère locale. Le climat correspond donc à un état « moyen » d'un système climatique, qui comprend cinq composantes majeures interagissant entre elles (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère et lithosphère dans sa partie superficielle). Ces composantes sont influencées à la fois par des fluctuations naturelles externes tels l'ensoleillement et l'orbite terrestre mais aussi par des fluctuations naturelles internes (les modifications de la teneur en aérosols à la suite d'éruptions volcaniques)... et l'activité humaine plus récemment.

L'étude de l'évolution du climat dans le passé permet de comprendre les mécanismes qui régissent les interactions entre ses différentes composantes : l'atmosphère, l'océan, la glace et les surfaces continentales. Mais elle s'inscrit aussi dans un contexte plus large de compréhension des causes des changements climatiques et ainsi d'évaluation de l'impact des activités humaines sur l'évolution climatique future, au cours des prochaines décennies.

Les différents arguments paléoclimatiques utilisés

Différentes sources de données climatiques peuvent être utilisées :

- Des données **météorologiques et océanographiques** mesurées directement à partir d'instruments dans un nombre important de stations ou obtenues grâce aux télémesures, satellitaires notamment. Ces données sont disponibles pour les 100 dernières années.
- Des **données historiques** pour les derniers millénaires : parmi les informations recueillies on dispose de données indirectes historiques (dates et volume des récoltes, des vendanges, dates des semis, des disettes, la localisation de certaines cultures à certaines époques...) et aussi des observations scientifiques qui existent depuis 270 ans au plus et seulement pour quelques lieux géographiques de la Terre.
- Des données **paléontologiques** avec des témoins recueillis au niveau des faunes et flores du passé (pollens, microfaune marine, mammifères....).
- Des données **géologiques et géomorphologiques** avec l'étude des types de sols, des dépôts sédimentaires, moraines, varves, loess, plages fossiles, évaporites...
- Des données **géochimiques** : celles obtenues à partir de la composition isotopique de l'oxygène, du deutérium et du carbone mesurée dans les calottes polaires, les sédiments océaniques et lacustres, et aussi dans les cernes des arbres. Ces données sont recueillies aujourd'hui sur le site de NEEM (North Greenland Eemian Ice Drilling) grâce à des détecteurs lasers de dernière génération développés et mis au point par le LSP (Laboratoire de Spectrométrie Physique) et le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) de Grenoble.

Des données « futures » seront recueillies à partir d'un projet utilisant aussi des lasers : ce projet appelé ICE et LASERS est piloté pour une durée de 5 ans (**2012-2017**) par Jérôme Chappellaz,

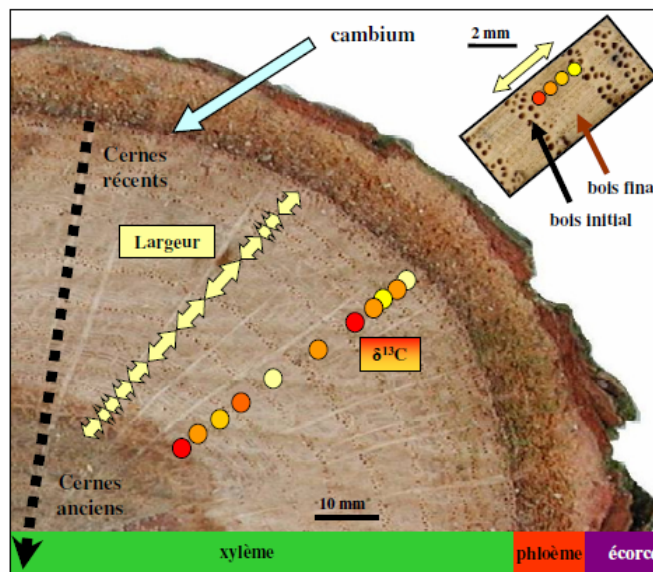
chercheur au LGGE. Plutôt que de forer de très longues carottes de glace, l'objectif est d'envoyer une sonde directement dans le glacier pour y analyser la glace en conditions in situ. L'intérêt du projet est d'offrir un moyen d'accès rapide à la glace profonde et une évaluation en temps réel de l'intérêt climatique de la glace forée. Projet qui permettra en cas de succès d'obtenir des informations climatiques primordiales en une seule campagne de terrain.

- Des données **biologiques** avec l'étude des cernes des arbres : la **dendroclimatologie**

Les cernes sont des archives du carbone utilisé par les arbres pour leur croissance, en lien avec les caractéristiques spécifiques de gestion du carbone et de réponse au climat. La période de formation du cerne est plus ou moins longue et sa durée dépend de l'espèce, de sa situation géographique (latitude, altitude) et du climat. De façon générale, en climat tempéré, elle se déroule au printemps et en été. Le cerne est constitué de deux parties, plus ou moins distinguables suivant le type de bois : le bois initial généralement formé au printemps et le bois final formé en été. Les cernes sont formés à partir des sucres solubles qui sont transportés par le phloème. Ces sucres sont un mélange, en proportions variables, des assimilats foliaires nouvellement synthétisés via la photosynthèse et des réserves carbonées qui sont mobilisées pour la croissance. Les cernes sont donc des archives du carbone utilisé par l'arbre pour sa croissance en réponse à des variations climatiques.

Ainsi, les cernes sont étudiés en paléoclimatologie pour reconstituer les variations climatiques passées.

Plusieurs caractéristiques peuvent être mesurées sur les cernes. Lorsqu'ils apportent des informations climatiques et fonctionnelles, on les désigne sous le terme de « proxy ». Ces proxys peuvent être, entre autres : la largeur de cerne, la composition isotopique en ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), en ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$), la densité ou encore la largeur des vaisseaux. Ils peuvent être mesurés à différentes échelles de temps : par décennie (en regroupant les cernes), par année (échelle interannuelle, en découpant cerne par cerne) ou même à l'échelle saisonnière (en découpant des lamelles au sein d'un même cerne).



Coupe transversale d'un tronc de chêne

(extrait du poster : www.gisclimat.fr/en/afoclim-poster-analyse-dendro-isotopique-du-fonctionnement-de-trois-essences-foresti%C3%A8res-face-aux)

L'ampleur du réchauffement récent du climat en relation avec l'augmentation des gaz à effet de serre, peut se mesurer par comparaison avec les variations annuelles du climat du dernier millénaire reconstruit à partir des cernes d'arbre.

La dendroclimatologie fondée sur des isotopes est un domaine de recherche relativement nouveau qui comprend l'examen de la composition en isotopes stables (carbone, oxygène et hydrogène) d'échantillons de bois. Les rapports d'isotopes stables dans les cernes sont des indicateurs très sensibles des conditions climatiques en raison de l'incidence directe de facteurs hydroclimatiques sur les processus physiologiques qui régulent la séparation isotopique, celle-ci se produisant quand les éléments de base (C, O et H) sont assimilés par les arbres.

L'étude des techniques de datation des carottes de glace

L'analyse des carottes de glace joue un rôle essentiel dans la compréhension des différents mécanismes impliqués dans l'évolution naturelle du climat au cours des derniers grands cycles de périodes glaciaires et interglaciaires. Les glaces conservent de l'air fossile, témoin des atmosphères du passé.

Avant d'analyser les informations retirées des calottes glaciaires, il faut disposer d'une échelle chronologique fiable qui permette de dater les couches de glaces prélevées.

Les carottes de glace nous offrent la possibilité d'établir des chronologies relatives qui permettent de comparer les enregistrements de différents sites carottés ainsi que des comparaisons avec d'autres types d'archives (océan / continent). Par contre, les chronologies absolues (par comptage annuel des couches) ne sont disponibles que pour les sites à fort taux d'accumulation (quantité de neige restant à la surface au bout d'une année) comme au Groenland ou sur les sites antarctiques côtiers.

Il existe aussi des marqueurs stratigraphiques permettant d'identifier des couches de glace comme : la radioactivité des essais nucléaires atmosphériques (1954-1958 et 1965-1966) ou celle de l'accident de Tchernobyl (avril 1986), les éruptions volcaniques, connues par ailleurs et repérées dans les glaces par les poussières et les acides qu'elles ont émis. Ces marqueurs permettent aussi de réaliser des corrélations entre des carottes de glace prélevées sur des sites différents.

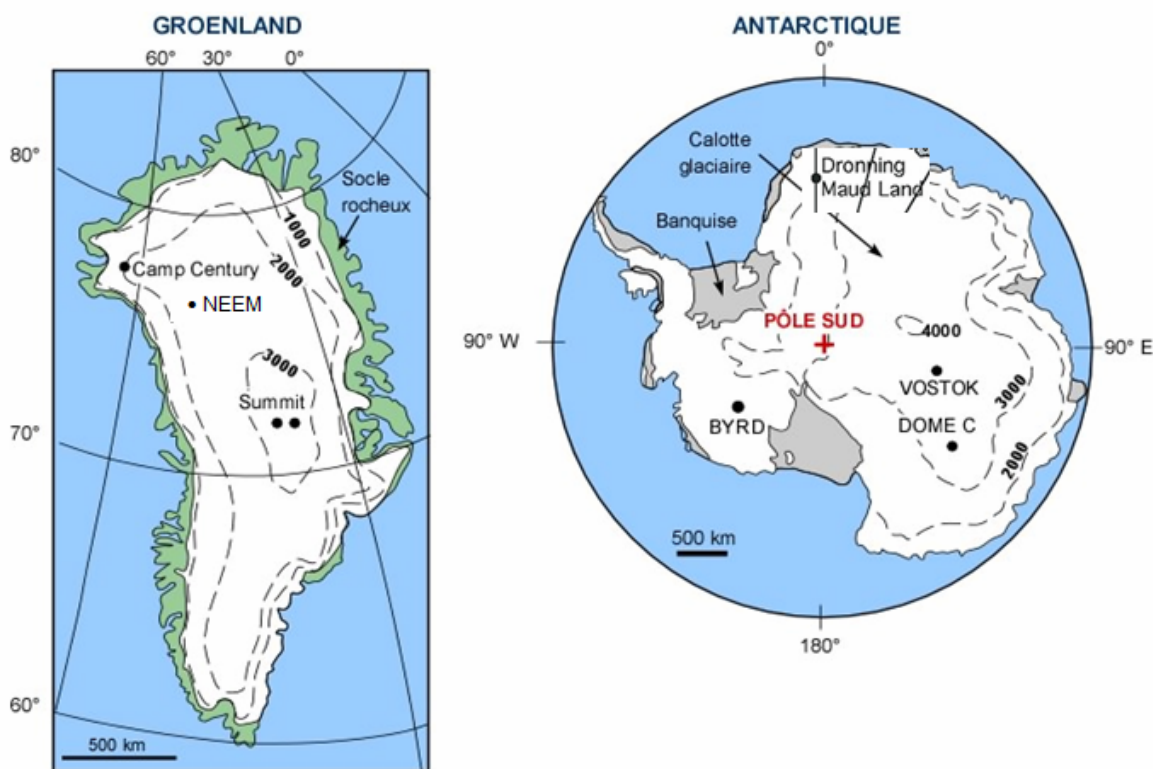
L'étude de l'évolution de la composition des gaz dans les atmosphères du passé

La neige est perméable à l'air lors de son dépôt. Elle se tasse petit à petit sous son poids et se transforme en glace, piégeant ainsi l'air sous forme de bulles. Ces bulles représentent environ 10% du volume des glaces. Vers 80 mètres de profondeur en moyenne, elles sont définitivement isolées de l'atmosphère.

Cette profondeur de fermeture des pores, appelée « Close-Off Depth » ou « COD », varie en fonction de la température de surface et du taux d'accumulation de neige.

Comme l'air diffuse rapidement au sein du névé, l'air et la glace prélevés à une même profondeur ne sont pas contemporains. **L'âge des bulles d'air est toujours inférieur à l'âge de glace environnante** (cette différence d'âge est appelée Δ age). La différence d'âge s'élève à plusieurs milliers d'années à Vostok, où le taux d'accumulation est faible. C'est une source d'incertitude non négligeable qu'il faut prendre en compte lorsqu'on analyse l'ensemble des informations pour en déduire les conditions climatiques.

L'évolution des gaz à effet de serre, enregistrée dans les bulles d'air, devra être recalée dans le temps sur celle de la température, mesurée dans la glace. Cela rend illusoire tout argument basé sur le décalage des courbes de variations de CO₂ et de la température pour discerner la cause et la conséquence (variation initiale de température ayant entraîné une variation de la concentration en CO₂ ou l'inverse).



Document 1 : Sites des différents forages en Arctique et Antarctique
Schémas légèrement modifiés tirés du site
www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/sondages_glaciaires.html

Quelles sont les différentes composantes analysées au niveau de l'air fossile piégé ?

- L'analyse des gaz à effets de serre

Pour analyser les atmosphères du passé, on utilise cet air fossile piégé dans les carottes de glace. Il nous renseigne sur l'évolution des gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 , etc.). Pour mener à bien de telles études, les glaciologues forent les glaciers antarctique et arctique sur plusieurs kilomètres de profondeur afin de remonter à la surface des carottes de glaces anciennes qui seront ensuite analysées en laboratoire. Trois kilomètres de carottes de glace ont été extraits du site de Dôme Concordia (ou Dôme C) placé sur le plateau central de l'Antarctique de l'Est à une altitude de plus de 3 230 m avec une température moyenne annuelle de $-54,5^\circ\text{C}$. C'est la glace la plus âgée extraite par le consortium européen EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) : elle a permis de reconstituer l'évolution des teneurs en dioxyde de carbone et de méthane durant les derniers 800 000 ans.

Le consortium EPICA, pour compléter le forage de Dôme C, a choisi d'extraire une seconde carotte de glace dans l'Antarctique, dans la région de la Terre de la Reine Maud (Dronning Maud Land). Sur ce second site, les températures sont plus clémentes ($-44,5^\circ\text{C}$ de moyenne annuelle). Ce forage a permis de récupérer en janvier 2006, 2 774 m de glace.

Si les glaces très profondes issues du forage de Dôme C n'ont pas battu le record de profondeur atteint sur le site de Vostok (plus de 3 600 m) elles représentent les plus anciennes archives climatiques obtenues jusqu'à présent dans les calottes polaires puisqu'elles remontent jusqu'à 800 000 ans.

L'étude du monoxyde de carbone (CO) permet de retracer l'évolution de la capacité oxydante de l'atmosphère.

- Les isotopes de l'oxygène atmosphérique, sensibles aux processus de respiration et de photosynthèse, donnent une estimation de la productivité biologique. Ils aident aussi à recaler dans le temps les résultats provenant des carottes de glace et ceux provenant de sédiments marins.

L'utilisation des données géochimiques : le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces utilisé comme paléothermomètre

L'oxygène est un mélange de deux principales formes isotopiques stables, en proportions très inégales : 99,8% de ^{16}O et 0,2% de ^{18}O . Ces proportions se retrouvent dans les molécules d'eau de mer et d'eau douce : H_2^{16}O et H_2^{18}O . Les proportions relatives des deux isotopes dans un échantillon d'eau liquide ou de glace peuvent être calculées par le rapport suivant appelé $\delta^{18}\text{O}$:

$$\delta^{18}\text{O} = \left\{ \frac{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{échantillon}} - \left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{SMOW}}}{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{SMOW}}} \right\} \times 1000$$

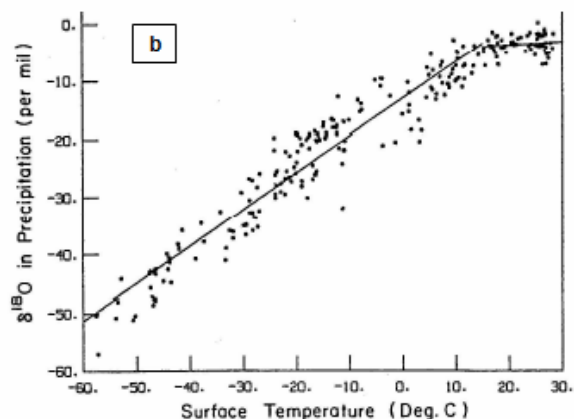
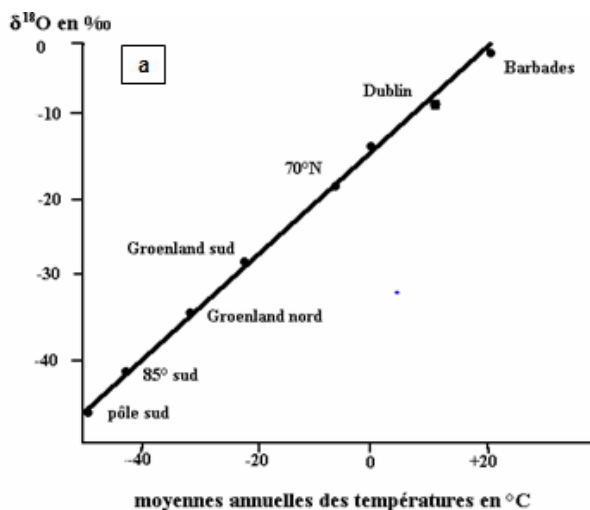
Ce rapport est exprimé en ‰. Ce type de rapport est introduit car :

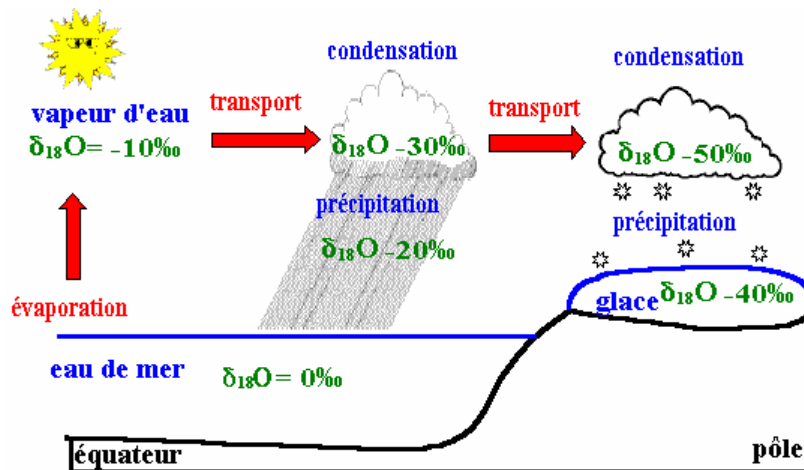
- Il est nécessaire d'avoir une référence par rapport à laquelle on compare des compositions isotopiques. La valeur de référence du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) est celui de la moyenne de l'eau de l'océan actuel (SMOW = Standard Mean Ocean Water)
- La différence relative entre les rapports isotopiques est faible.

La valeur du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'eau de mer actuelle (SMOW) est de 2.10^{-3} . La valeur du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer moyenne actuelle (SMOW) est logiquement de 0 ‰.

On a constaté que le $\delta^{18}\text{O}$ dans les chutes de neige actuelles dépend de la température atmosphérique du lieu et du moment de la chute. Des mesures du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) sont effectuées sur divers échantillons d'eau de mer, d'eau douce, de neige et de glace prélevés dans diverses stations à travers le monde et, connaissant la moyenne des températures annuelles de l'air de ces stations, une corrélation a pu être établie entre cette température et la valeur de ce rapport. Au final, la composition isotopique de la neige des calottes polaires dépend linéairement de la température de l'air au moment de la précipitation neigeuse : le principe, extrapolé, donne accès aux températures du passé.

La valeur de ce rapport dans les différents niveaux d'une carotte de glace retraçant le temps est donc un véritable « paléothermomètre ». Il donne les **variations locales** de la température au cours du temps.





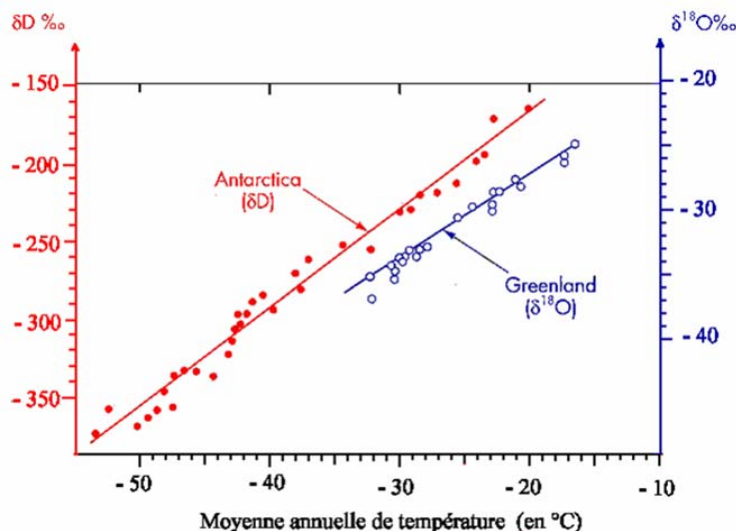
Document 3 : Le principe physique expliquant la variation de la composition isotopique de l'oxygène en fonction de la latitude et donc de la température, dans le cas du cycle de l'eau
<http://accres.ens-lyon.fr/accres/terre/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/indicateurs-paleoclimatiques/isotopes-oxygene>

L'évaporation favorise le passage de l'océan vers l'atmosphère des molécules les plus légères ; au contraire, la condensation favorise la précipitation des molécules les plus lourdes.

Plus la température du lieu de condensation est faible, plus la masse d'air a subi depuis sa formation un processus de condensation poussée et plus la teneur en isotope lourd (^{18}O) de la vapeur d'eau sera faible. Ainsi, l'eau évaporée au niveau de l'équateur et précipitée au niveau de l'Antarctique sous forme de neige contient environ 4% de ^{18}O de moins que l'eau de mer dont elle est issue (au pôle : $\delta^{18}\text{O}$ de l'ordre de - 40 ‰).

L'utilisation du δD des glaces comme paléothermomètre

Un autre rapport isotopique est couramment utilisé comme thermomètre isotopique. Il s'agit du rapport (D/H). Le deutérium (D) est l'isotope lourd de l'hydrogène de masse atomique 2 (^2H). Pour des raisons similaires à celles évoquées pour les isotopes de l'oxygène, on n'utilise pas ce rapport directement mais l'écart δD (en ‰) par rapport à un standard de référence de composition proche de celle de l'océan mondial. Le rapport isotopique du standard (D/H) = $155,76 \cdot 10^{-6}$



Document 4 : $\delta^{18}\text{O}$ et δD : des véritables paléothermomètres
<http://accres.ens-lyon.fr/accres/terre/paleo/variations/niveau-marin>

Pour la glace, on utilise maintenant surtout le δD qui, à température égale est environ égal à 8 fois le $\delta^{18}O$. Les mesures peuvent ainsi être plus précises.

Les glaces polaires constituent les seules archives qui, sur les mêmes échantillons, donnent accès à des informations à la fois sur la modification du climat de notre planète et sur celle de la composition de l'atmosphère.

L'utilisation du $\delta^{18}O$ des sédiments carbonatés comme paléothermomètre

Le $\delta^{18}O$ des carbonates est calculé selon le même principe que celui des glaces polaires mais il est rapporté à une autre référence : PDB (Pee Dee Belemnite du Crétacé).

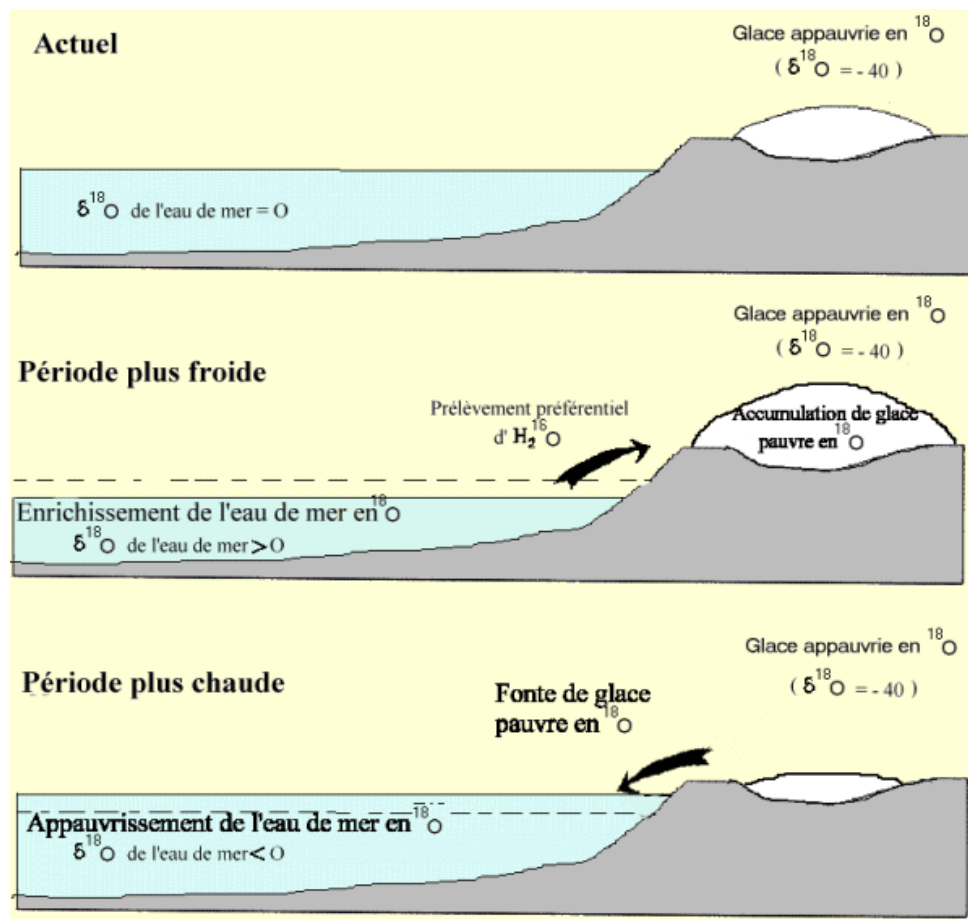
Le rapport ($^{18}O/^{16}O$) mesuré dans les tests carbonatés des foraminifères des sédiments océaniques récents est un traceur des variations du niveau de la mer et de l'extension des calottes polaires au cours du temps.

Lors du processus d'évaporation au dessus de l'océan, si la vapeur d'eau formée est appauvrie en ^{18}O , l'eau de l'océan quant à elle est enrichie relativement en ^{18}O .

Cet enrichissement de l'eau de mer, moyenné sur l'ensemble de l'océan, reste négligeable (quantité d'eau évaporée faible et cycle de l'eau équilibré). Tant que le volume de l'océan ne change pas significativement le $\delta^{18}O$ moyen de l'eau de mer ne varie pas.

Cependant, lors des périodes glaciaires le volume des calottes augmente, un volume significatif d'eau est ainsi transféré de l'océan pour être stocké sous forme de glace et le niveau de l'océan baisse. Plus l'extension des calottes est importante au niveau des pôles, plus l'eau de mer est concentrée en ^{18}O .

Dans ce cas le $\delta^{18}O$ moyen de l'eau de mer est supérieur à celui de l'océan actuel. Il faut remarquer que, dans ce cas, le $\delta^{18}O$ des carbonates varie en sens inverse de la température moyenne des eaux de surface.



Document 5 : Utilisation du $\delta^{18}O$ des sédiments carbonatés comme paléothermomètre
(<http://accres.ens-lyon.fr/accres/terre/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/indicateurs-paleoclimatiques/isotopes-oxygene>)

Le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'océan dans le passé ne peut pas être déterminé directement. Il peut en revanche l'être indirectement par l'étude des coquilles (tests) calcaires des foraminifères fossilisés (organismes de tailles microscopiques) et accumulés au cours du temps dans les sédiments.

Ces organismes élaborent leurs tests carbonatés (CaCO_3) à partir d'éléments chimiques en solution dans l'eau de mer et en particulier à partir de l'oxygène.

Suivant la température, la composition isotopique de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des ions carbonates (CO_3^{2-}) contenus dans le test des foraminifères varie. Ces tests s'accumulent en formant des sédiments carbonatés dans le fond des océans. La température moyenne de l'eau est ainsi fossilisée de la même façon que dans la glace. Comme les calottes glaciaires très anciennes ont totalement disparu, cette analyse isotopique nous donne des renseignements sur des périodes géologiques bien plus éloignées dans le temps.

Remarque : la quantité de ^{18}O incorporée dans la coquille au moment de sa fabrication dépend non seulement du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'eau mais aussi de sa température. On peut contourner cette double dépendance en étudiant des espèces de foraminifères qui vivent à grande profondeur sous la thermocline.

Les eaux profondes sont en effet à une température très basse, peu variable et proche de la température de congélation de l'eau. Lors des glaciations il est peu probable que les eaux profondes soient à une température différente de celle observée actuellement. Les tests foraminifères de grande profondeur (foraminifères benthiques) des sédiments océaniques peuvent donc être utilisés pour étudier les variations de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer au cours du temps.

Ils donnent accès à la variation du niveau des océans et du volume des glaces et donc aux **changements climatiques globaux** qui ont affecté la Terre dans le passé.

Les variations du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) observées pour les 800 000 dernières années dans les glaces sont parfaitement corrélées à celles mesurées pour la même période de temps dans les sédiments océaniques.

La mise en évidence de cette corrélation entre les enregistrements par les glaces et par les sédiments permet l'étude des changements climatiques majeurs de la planète.

L'utilisation de données paléontologiques

Pour reconstituer l'évolution des climats, on peut utiliser des « paléothermomètres » biologiques. Certains groupes d'animaux ou de végétaux donnent une bonne indication du climat car ils ne vivent que dans des climats chauds ou froids. Les coraux, par exemple, sont d'excellents indicateurs biologiques : ils ne se développent que dans les mers chaudes des zones tropicales. En milieu continental, les grains de pollen produits par les plantes à fleurs et les spores produites par d'autres végétaux peuvent se conserver durant des milliers d'années dans des tourbières ou dans des grottes, et donner ainsi des renseignements sur la flore qui existait à cette période, et donc sur le climat de l'époque. Pour les derniers milliers d'années, l'étude de l'épaisseur des anneaux de croissance des arbres permet de repérer les moments de croissance particulièrement faibles, c'est-à-dire les années très froides. Cependant, la majorité des dépôts anciens ne contient pas de fossiles simples à interpréter. De plus, les indicateurs biologiques reflètent un climat local et il n'est pas toujours aisé de le mettre en relation avec le climat global.

Les spores et les grains de pollen sont disséminés par les plantes et se conservent durant des centaines de milliers d'années quand ils sont enfouis dans les sédiments de milieux humides (lacs, tourbières, océan ...). Les sédiments archivent de cette manière les états successifs de la végétation environnante. La palynologie permet d'identifier les plantes qui émettent le pollen à partir de la forme des grains et par là de reconstituer le paysage végétal correspondant. Cette reconstitution nécessite de connaître la relation entre les types de végétation et leur production de pollen ainsi que la dispersion de ce dernier. Cette question fait l'objet de nombreuses études. Le palynologue mesure l'abondance des différents taxons identifiés dans chaque niveau du sédiment et établit ainsi un « assemblage » ou encore « spectre » pollinique à chaque étape du passé. Ce sont les fluctuations de ces assemblages le long d'un profil sédimentaire, représentées sous forme d'un diagramme pollinique, qui sont utilisées pour reconstituer l'histoire de la végétation à proximité du site de prélèvement. Des techniques statistiques appropriées permettent d'en déduire l'histoire du climat.

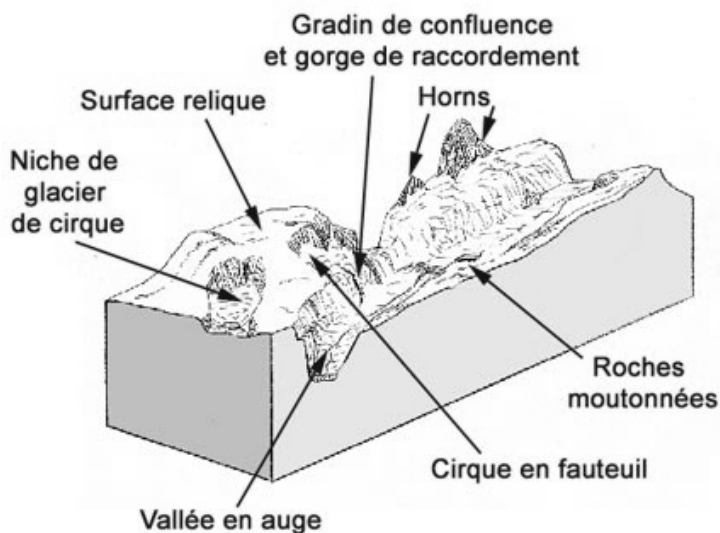
En Europe, des milliers de diagrammes polliniques couvrant l'histoire de la végétation passée depuis des milliers d'années ont été établis depuis des décennies. Afin de préserver ces archives et surtout de pouvoir établir des synthèses à l'échelle du continent, il a été décidé en 1989 d'établir une base européenne de données polliniques (EPD). Cela suppose un cadre informatique bien établi et un important effort d'harmonisation des données, en particulier du point de vue de la nomenclature taxonomique.

L'utilisation des données géologiques et géomorphologiques : les glaciers et le relief glaciaire

Le volume des glaciers stockés sur les reliefs continentaux fluctue au cours des temps géologiques, laissant son empreinte dans le paysage.

Au cours du Quaternaire, la surface englacée a couvert jusqu'à 30% du globe terrestre. Aujourd'hui, 5 % des glaces sont stockées dans des glaciers centrés sur des reliefs. Leur morphologie est particulière, en langues de glace coalescentes s'écoulant à une vitesse très variable de 10 à 100 m/an.

La glace a un comportement de fluide très visqueux et, à la condition d'une pente, flue sous l'effet de son poids. Le profil d'érosion est caractéristique :



Document 6 : Modelé glaciaire (www.paysagesglaciaires.net)

Remarques :

Un **Horn** est un sommet, aux pentes souvent abruptes, dû à l'action de trois ou quatre glaciers de cirque œuvrant sur les deux versants d'une arête sommitale.

Le terme « **roches moutonnées** » ne fait pas référence à une éventuelle ressemblance avec une toison ou un troupeau de moutons. Il s'agit en fait d'une analogie avec une perruque du XVIII^e siècle, que l'on « moutonnait » avec une peau de mouton.

Les différentes actions des glaciers sont :

- une action **érosive** due à l'effet des chocs thermiques qui fragmentent les roches,
- une action **ablative**, la glace déloge les fragments et les entraîne dans son déplacement,
- une action **abrasive** liée aux moraines de fond qui strient, usent et moutonnent le socle rocheux.

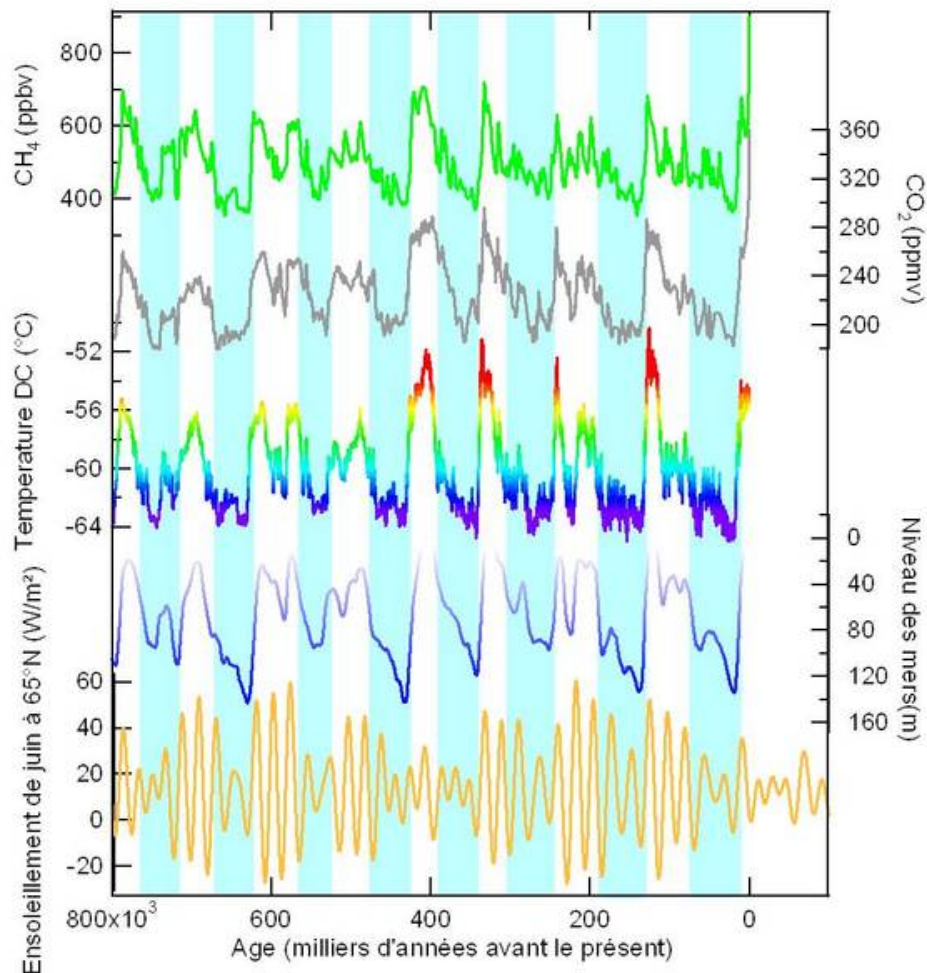
Quand le glacier recule et fond, on retrouve : des cordons et des arcs de moraines frontales et latérales, des vallées en U bordées par des épaulements, des cirques glaciaires, des roches polies, striées et des blocs erratiques de grande taille. On utilise le terme « till » pour qualifier l'ensemble des sédiments glaciaires et lorsque ces sédiments sont indurés on parle de « tillites ».

En périphérie des zones glaciaires, on a des sols souvent gelés (permafrost), cryoturbés et/ou, découpés par des réseaux de fentes parfois hexagonales. Le vent prend en charge les particules fines et les accumule sous forme de loess (limon, argile et sable) plus ou moins riches en carbonates.

Dans les dépressions, s'installent des lacs peu à peu comblés de façon saisonnière par des sédiments très fins formant des varves.

Les formes d'érosion glaciaires, les sédiments glaciaires et les morphologies périglaciaires marquent les paysages et permettent ainsi de reconstituer les fluctuations climatiques du passé.

Bilan : Une reconstitution des grandes variations climatiques au cours des 800 000 dernières années.



Document 7 : Graphique des grandes variations climatiques déduites de l'évolution de différents paramètres (www.ipsl.fr/fr/Pour-tous/Foire-aux-questions-sur-le-climat/Paleoclimatologie-Holocene-4)

L'axe horizontal représente le temps, en milliers d'années avant l'actuel (1950 A.D.), du passé (à gauche) vers le présent (« 0 »). Les bandes bleues verticales soulignent les périodes glaciaires. Le moteur des changements climatiques est représenté, sur l'axe vertical, à travers l'ensoleillement d'été à 65°N (en watt par mètre carré). Quatre variables décrivent l'évolution du climat, de bas en haut :

- les variations du niveau des mers (en mètre), déduites de l'analyse du $\delta^{18}\text{O}$ des sédiments marins, qui reflètent l'intensité des glaciations ;
- la température en Antarctique (en degré Celsius), déduite de l'analyse des glaces du forage EPICA Dôme C ;
- les teneurs de l'atmosphère en méthane (en partie par milliard en volume) et en dioxyde de carbone (en partie par million en volume), issues de l'analyse de l'air de la glace des forages de Vostok et Dôme C (Antarctique).

Le zéro de l'axe vertical concernant l'ensoleillement de juin à 65°N (W/m^2) correspond à la valeur moyenne de l'ensoleillement actuel en juin à la latitude 65°N (355 W/m^2). Ainsi, l'insolation estivale des zones polaires varie de plus ou moins 40 W/m^2 autour de cette valeur moyenne.

La réponse du climat aux changements d'ensoleillement est amplifiée par les rétroactions positives liées à la variation de l'extension des glaces continentales (qui modifie l'albédo) et par celles liées aux changements du taux de CO_2 atmosphérique responsable en partie de l'effet de serre (lors d'une période de plus grande insolation, le CO_2 de l'eau des océans diffuse davantage dans l'atmosphère ce qui augmente l'effet de serre et inversement lors de période de plus faible insolation la solubilité du CO_2 atmosphérique augmente et donc l'effet de serre diminue).

Glaciations et périodes interglaciaires : des cycles sur 100 000 ans

L'enregistrement climatique de Dôme C révèle de nouvelles informations sur l'évolution du climat. Il confirme les éléments sur l'histoire des températures antarctiques dont les scientifiques disposent sur un autre site, Vostok, pour la période depuis 400 000 ans. Typiquement, l'amplitude des changements de température entre la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans, et la période actuelle est de 9 ± 2 °C. Ces reconstructions de température sont essentielles pour tester le réalisme des modèles de climat, utilisés également pour prévoir son évolution future. Il semble que les modèles de climat aient tendance à sous-estimer les changements passés de température dans les régions polaires. Le forage de Dôme C couvre 800 000 ans, ce qui autorise l'étude de plusieurs glaciations. Ces périodes se succèdent à un rythme de l'ordre de 100 000 ans, comme l'étude des sédiments marins l'avait déjà dévoilé. Étant donné que le climat est majoritairement en condition glaciaire au cours de cette période, un enregistrement long permet de caractériser finement les subtiles différences entre les différentes périodes interglaciaires « chaudes » qui se produisent entre deux glaciations. Les glaces de Dôme C révèlent ainsi que les périodes les plus chaudes atteignent des températures supérieures d'environ 5 °C, au maximum, par rapport à aujourd'hui. Elles indiquent également que les périodes chaudes présentent une grande variété de durée et d'intensité.

Comprendre les mécanismes qui produisent la fin d'une période chaude est essentiel vis-à-vis de l'évolution du climat actuel et de la capacité des climatologues à prévoir quand aura lieu la prochaine glaciation.

L'augmentation de l'effet de serre peut être caractérisée par rapport à la variabilité naturelle des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, déduite de l'analyse des gaz piégés dans la glace de Dôme C. Réalisées à l'université de Berne en Suisse et au LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement), ces mesures ont été publiées pour les derniers 650 000 ans. Les résultats confirment l'analyse de l'air de la glace de Vostok et révèlent que les niveaux actuels de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère, actuellement à 380 ppmv et 1 700 ppbv, sont sans précédent en termes de niveaux atteints et de rythme d'augmentation, sur l'ensemble de cette période.

La publication des enregistrements de gaz à effet de serre dans la glace a également donné confiance aux climatologues dans l'exploitation des mesures isotopiques dans la glace de Dôme C.

Ces données indiquent que l'histoire du climat antarctique est cohérente avec celles de l'ensemble de notre planète à l'échelle glaciaire-interglaciaire, ce que confirment les modèles de climat, qui montrent que le changement de température au centre de l'Antarctique est proportionnel à celui qui affecte la moyenne globale des températures. Or, les enregistrements des températures antarctiques et ceux des concentrations en gaz à effet de serre révèlent tous deux une modification très importante dans l'intensité des changements climatiques pour la partie la plus ancienne, avant 400 000 ans. Pour ces périodes anciennes, les paléoclimatologues observent des périodes interglaciaires « tièdes », d'une intensité bien plus faible que les périodes interglaciaires les plus récentes. Pour l'instant, ils élaborent des hypothèses pour expliquer ce changement profond dans l'intensité des périodes chaudes.

Enfin, la corrélation étroite entre les variations passées de température en Antarctique et la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone et méthane montre qu'il existe un couplage fort entre l'évolution du climat, pilotée par les paramètres de l'orbite de la Terre, et les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone. En d'autres termes, quand le climat se modifie, les puits et sources naturels de carbone se réorganisent, ce qui peut amplifier les changements climatiques. Les mêmes processus sont en jeu actuellement. L'utilisation massive de combustibles fossiles, la déforestation et l'agriculture intensive rejettent des composés à effet de serre, qui modifient le bilan radiatif de la Terre et provoquent un réchauffement. Les changements climatiques entraînent des réorganisations des puits et sources de carbone, à travers des évolutions dans la circulation océanique et dans l'apport de précipitations favorables à la croissance de la végétation. Les études de modélisation conduites au LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement) suggèrent que l'effet du changement climatique à venir sur les puits et sources de carbone pourrait accroître de manière significative l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et ainsi amplifier les bouleversements climatiques.

Les événements Dansgaard-Oeschger (D/O) : des variations rapides du climat de forte amplitude

Un des résultats majeurs obtenu grâce à la résolution temporelle de la carotte groenlandaise de GRIP, est la mise en évidence des événements Dansgaard-Oeschger (D/O) qui sont des variations rapides du climat de forte amplitude. L'enregistrement de ces événements est identique dans les différentes carottes du Groenland, ce qui indique que ces événements reflètent des changements climatiques au moins à l'échelle du Groenland. Les fluctuations en CO_2 associées aux événements D/O sont de l'ordre de 50 ppmv au Groenland. Ces fluctuations, mises à part certaines beaucoup plus faibles (de l'ordre de 10 ppmv), n'ont pas été observées sur le profil CO_2 à haute résolution de la carotte antarctique de Byrd.

Pour ce qui est du méthane les deux enregistrements, GRIP au Groenland et Vostok en Antarctique, sont compatibles. Les résultats détaillés obtenus sur la carotte de GRIP montrent un parallélisme remarquable entre les fluctuations du climat et les teneurs en CH_4 .

Ce résultat suggère que les oscillations rapides du climat enregistrées dans la carotte de GRIP n'ont pas affecté seulement le Groenland mais aussi les zones émettrices de méthane que sont les basses latitudes.

Les climats sur les derniers 10 000 ans

Durant les derniers 10 000 ans (période de l'Holocène) le climat est resté interglaciaire, proche de celui que nous connaissons actuellement, avec des fluctuations de faibles amplitudes. Cette période est donc intéressante pour étudier les interactions climat/cycle des gaz à effet de serre dans les conditions actuelles.

Peu de résultats sur les teneurs en CO_2 sont actuellement disponibles. Cependant les résultats de Neftel et al. (1988) concernant le début de l'Holocène suggèrent une oscillation d'environ 40 ppmv entre 10 et 5 000 ans B.P., avec un minimum vers 8 000 ans B.P. Ces résultats concernent une période marquée par la fin de la désintégration des grandes calottes de l'hémisphère nord et donc de l'élévation du niveau marin. Cette période ne peut donc pas être considérée comme stable vis à vis du cycle du carbone. Grâce à la carotte groenlandaise de GRIP, nous disposons maintenant d'un enregistrement complet du méthane durant l'Holocène. Bien que gardant des valeurs élevées, le méthane montre une large oscillation sur l'ensemble de cette période, avec un minimum d'environ 140 ppbv vers 5 500 ans BP. Cette oscillation est entrecoupée par une oscillation rapide d'environ 100 ppbv vers 8 200 ans BP, qui coïncide avec un refroidissement très rapide et court.

Ces modifications des teneurs du CH_4 atmosphérique sont attribuées principalement à des changements dans la superficie des zones marécageuses sous les tropiques pendant la première moitié de l'Holocène, puis au développement des tourbières boréales au cours des derniers 5 000 ans.

Les climats sur les derniers siècles

Depuis la fin du XVIII^e siècle, une augmentation progressive et continue est enregistrée pour la teneur en CO_2 et la teneur en méthane. Cette évolution aboutit à l'heure actuelle à une augmentation d'environ 25% de la teneur en CO_2 et environ 150% de la teneur en méthane. Elle est le résultat de l'activité anthropique particulièrement développée depuis le début de l'industrialisation. Les archives glaciaires permettent de replacer cette évolution dans le contexte naturel : depuis plusieurs centaines de milliers d'années les niveaux naturels de ces gaz n'ont jamais excédé 280 ppmv (CO_2) et 750 ppbv (CH_4) ; elles atteignent aujourd'hui respectivement de 380 ppmv et 1 700 ppbv.

Bilan : Carottes de glace et paléoclimat

Les glaces de l'Antarctique et du Groenland ont, depuis une vingtaine d'années, fourni des résultats importants permettant de comprendre l'évolution passée et future de notre climat avec la mise en évidence d'une relation entre climat et gaz à effet de serre dans le passé et la découverte de variations climatiques rapides. Les deux dernières années ont permis d'accroître considérablement l'information disponible à partir de ces glaces polaires grâce aux forages de North GRIP au Groenland et de Dôme C en Antarctique, permettant respectivement d'étendre les enregistrements au dernier interglaciaire (North GRIP) et aux huit derniers cycles climatiques (Dôme C). Ces résultats indiquent que le dernier interglaciaire était, aussi bien au Groenland qu'en Antarctique, plus chaud que l'Holocène, d'environ 5°C. Ils mettent en évidence un lien étroit entre les variations rapides caractéristiques de la dernière période glaciaire au Groenland et les variations millénaires enregistrées en Antarctique. Dans cette région, le rythme des variations climatiques s'est modifié de façon notable il y a un peu plus de 400 000 ans et ce même changement de rythme est observé pour les concentrations en CO_2 dont la relation avec le climat antarctique a été remarquablement stable depuis 800 000 ans. A aucun moment de cette période, les concentrations de CO_2 , CH_4 et N_2O n'apparaissent avoir été aussi élevées qu'actuellement.