



Institution Adour



UPPA



ifremer



Université Pôle Méditerranée-France



CNRS

Direction des Ressources Vivantes – Ressources Halieutiques
Laboratoire Halieutique d'Aquitaine - Bidart

Patrick Prouzet (IFREMER –DRV/RH – Laboratoire Halieutique d'Aquitaine)

Marie-Noëlle de Casamajor (ADERA / CERECA)

Florence Sanchez (ADERA / CERECA)

Muriel Lissardy (ADERA / CERECA)

Gilles Morandeau (IFREMER – Laboratoire Halieutique d'Aquitaine)

Sonia Gharbi (IFREMER – Laboratoire Halieutique d'Aquitaine)

Raymonde Lecomte-Finiger (Laboratoire d'Ictyologie et d'Ecologie de Perpignan – EPHE)

Dominique Blamart (Laboratoire Sciences du Climat et de l'Environnement Gif-sur-Yvette)

Noëlle Bru, Michel Lejeune & Gérard d'Aubigny (Université de Grenoble – Labsad)

François Xavier Cuende (Institution Adour)

Mohamed Amara (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LMA)

David Trujillo (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LMA)

Dana Capatina-Papaghiuc (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LMA)

Ahmed Boussouar (ADERA / CERECA)

Ovide Arino (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LMA)

Claude Mouchès (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LEM)

Christine Cagnon (Université de Pau et des Pays de l'Adour – LEM)

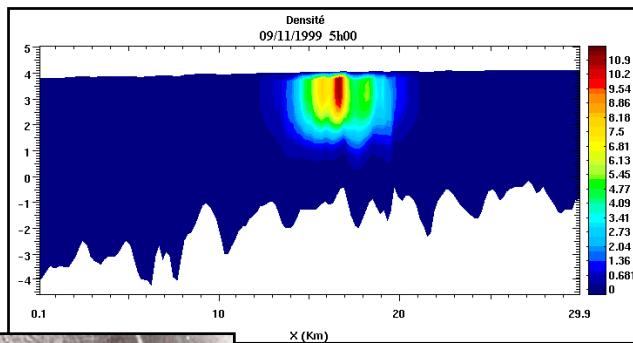
Benoît Truong – Van, Thomas Frisou (INSA Toulouse)

Henri Etcheber – Alexandra Coynel (Université Bordeaux I – DGO)

Juin 2003 - R.INT.DRV/RH/LHA

Étude sur la civelle (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour.

Pêche, biologie, comportement,
Modélisations hydrodynamique et comportementale,
Estimation des flux de civelles en estuaire



INTRODUCTION

Contexte général

Le Comité de gestion des poissons migrateurs (COGEPOMI) du bassin de l'Adour a adopté, le 28 avril 1999, un programme pluriannuel d'intervention sur les poissons migrateurs du bassin de l'Adour. Ce programme reposait sur une double préoccupation : d'une part, le constat scientifique d'un déficit chronique en géniteurs de saumon et, d'autre part, la part très forte de la civelle dans l'économie des pêches professionnelles du bassin. Il a été décliné en trois axes :

- une opération expérimentale de reconstitution du stock de saumon ;
- l'acquisition de connaissances sur le comportement du saumon dans l'estuaire de l'Adour (en particulier, vulnérabilité du saumon à la pêche au filet, efficacité des relèves décalées, etc.) ;
- l'acquisition de connaissances sur la civelle appliquées à la gestion (et notamment l'estimation des flux de civelles entrant dans le bassin).

La maîtrise d'ouvrage de ce programme a été confiée, suite à une demande explicite de l'Etat, à l'Institution Adour, établissement public territorial du bassin.

Préoccupations particulières à la civelle

La civelle présente un poids prépondérant dans l'économie de la pêche professionnelle dans le bassin de l'Adour, et cette prédominance n'est pas sans poser des problèmes, parmi lesquels :

- la difficulté d'une gestion locale alors que le stock est européen (contrairement au saumon, par exemple, l'anguille n'est pas inféodée au bassin fluvial d'où proviennent ses géniteurs) ;
- la fragilité de l'espèce au niveau européen, reconnue par l'ensemble de la communauté scientifique, et qui pourrait déboucher sur des restrictions de l'exploitation par pêche ;
- la complexité du partage de la ressource et des espaces exploités entre différentes catégories d'usagers.

Le programme proposé visait à répondre aux questions des gestionnaires, et particulièrement à celle sur l'impact de la pêche sur le devenir de ces ressources. Le problème majeur, en ce qui concerne le volet scientifique, est l'impossibilité d'établir une relation stock-recrutement ; il est donc nécessaire de développer d'autres approches (reposant sur des analyses des captures, des estimations directes, des modélisations, etc.).

Le défi relevé par les organismes de recherche était le suivant : "comment estimer, au moindre coût, un flux journalier de civelles transitant dans l'estuaire de l'Adour et en déduire le taux d'exploitation exercé par les marins pêcheurs utilisant le tamis poussé ?". Le but affiché était la mise au point d'un protocole d'échantillonnage et d'une méthode de calcul utilisable non seulement pour l'Adour, mais pour les autres estuaires ouverts de la façade atlantique française dans la zone soumise à la propagation de la marée.

Pour atteindre cet objectif, diverses étapes ont été franchies :

- étudier le comportement de la civelle en fonction des conditions environnementales dans l'estuaire ; puis modéliser ces comportements afin de comprendre la pénétration des civelles dans l'estuaire en fonction du

débit, du coefficient de la marée et leur présence près de la surface en fonction de la lumière pénétrant dans la colonne d'eau. La combinaison de ces comportements de migration longitudinale et verticale influant fortement sur la quantité de civelles accessible aux engins de pêche écrémant la surface de l'estuaire en zone maritime ;

- quantifier la quantité de civelles présente et surtout préciser la qualité de l'évaluation effectuée. La connaissance des captures effectuées dans la zone permettant d'estimer le taux d'exploitation effectué par la pêche aux tamis poussés ;
- rechercher des indicateurs de la qualité de la civelle, pour évaluer les individus ayant la meilleure aptitude à coloniser les zones continentales ;
- enfin, définir, élaborer et transmettre des outils utilisables par des structures techniques chargées de pérenniser ces suivis réclamés non seulement par les acteurs des COGEPOMI, mais aussi à une échelle plus large par l'Europe pour la mise en œuvre de plans de restauration de cette espèce. Cette pérennité des suivis se fera dans le cadre du projet INDICANG¹ présenté à la Commission INTERREGIII "Espace Atlantique".

Les programmes de recherche ont été menés dans une approche pluridisciplinaire, impliquant une large gamme d'équipes scientifiques ainsi que du personnel temporaire :

- IFREMER - Laboratoire Halieutique d'Aquitaine (Bidart), et Direction de l'environnement littoral / Applications opérationnelles (Brest) ;
- INSA Toulouse - Laboratoire de statistiques et probabilités ;
- Institution Adour Mission "poissons migrateurs" ;
- Université de Grenoble - LabSAD ;
- Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) - Laboratoire de mathématiques appliquées (LMA), Laboratoire d'écologie moléculaire (LEM) ;
- Université de Perpignan - Laboratoire d'ichtyologie, École pratique des hautes études ;
- en collaboration avec l'Association pour le développement de l'enseignement et des recherches auprès des universités, des centres de recherche et des entreprises d'Aquitaine (ADERA), sous la responsabilité de divers laboratoires précités.

Table des matières

Introduction	1
Pêche de la civelle dans le bassin de l'Adour	2
Modélisation hydrodynamique en deux dimensions	4
Modèle comportemental.....	6
Estimations de flux journalier	9
Mise au point de biomarqueurs d'exposition des anguilles à la pollution en estuaire	10
Études otolithométriques.....	11
Conclusions.....	12

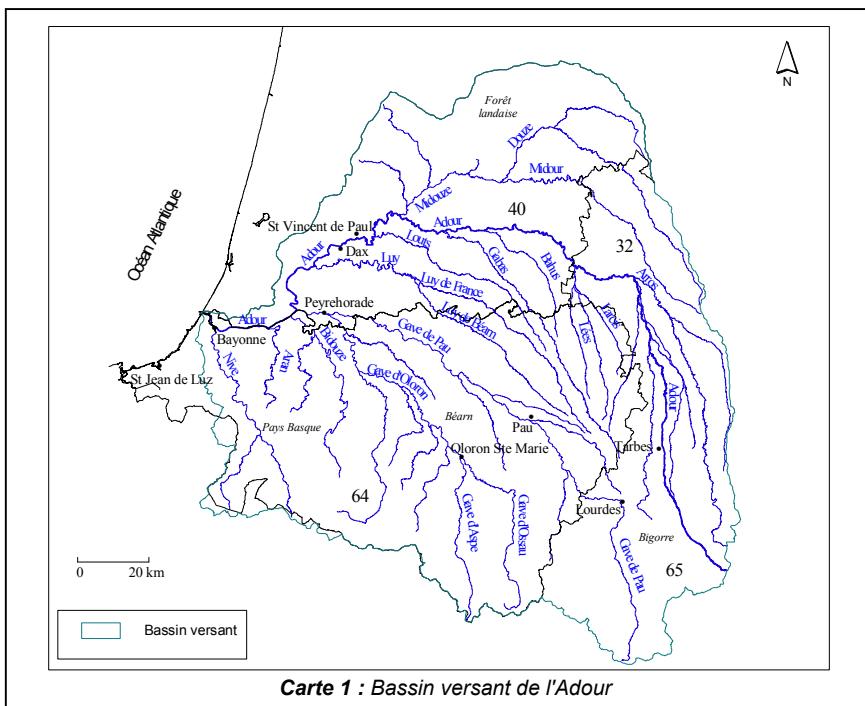
¹ INDICANG : mise en place d'un réseau d'indicateurs d'abondance et de colonisation sur l'anguille européenne dans le sud de la partie centrale de son aire de répartition.

PÊCHE DE LA CIVELLE DANS LE BASSIN DE L'ADOUR

La pêche de la civelle représente une activité sociale et économique de première importance et constitue, pour le golfe de Gascogne, une des toutes premières ressources ichthyologiques. Elle représente 34 millions d'euros à la première mise en marché pour la façade atlantique française.

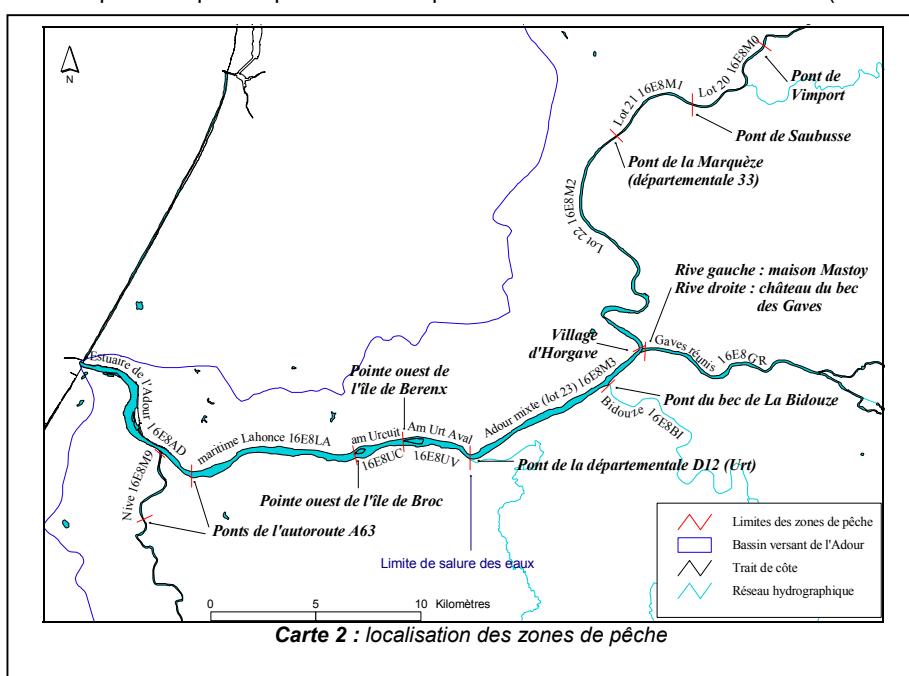
En France, 1200 à 1500 entreprises de pêche fluviale, estuarienne et littorale dépendent de l'exploitation de l'anguille (et surtout de la civelle) pour assurer l'équilibre financier de leurs activités.

Dans le bassin de l'Adour (carte 1), la civelle fait l'objet d'une pêche amateur et professionnelle. Les pêcheurs professionnels (environ 70 marins de l'estuaire et 130 fluviaux) sont très dépendants de cette activité qui représente environ 70% du chiffre d'affaires total de la pêcherie de poissons migrateurs. 60 à 70% des entreprises de pêche n'exploitent que cette espèce.



Pratique de la pêche professionnelle à la civelle

L'accès au droit de pêche fait l'objet d'un contingentement par des systèmes de licences (zone maritime des estuaires, eaux douces du domaine public) ou par une gestion locale (eaux douces privées, par exemple sur les courants côtiers landais). La zone de pêche exploitée par les marins pêcheurs se situe dans le bas Adour (carte 2).



Pour les besoins du suivi, l'aire exploitée par les marins pêcheur de l'estuaire est divisée en plusieurs parties :

- dans la partie maritime² correspond à un découpage déterminé par l'IFREMER et le CRTS³(16E8AD pour l'estuaire) ;
 - en eau douce, sur le domaine public fluvial, le découpage respecte les "lots", dont les limites sont fixées par le cahier des charges d'exploitation du droit de pêche de l'Etat.

La pêche s'exerce du 1^{er} novembre au 31 mars, à toute heure, et elle est limitée par des relèves décadaires (zone maritime) ou hebdomadaires (eau douce).

Sur les courants landais et sur le littoral, la pêche de la civelle est surtout le fait de pêcheurs à pied.

Jusqu'en 1995, la pêche professionnelle de la civelle dans l'estuaire de l'Adour se différenciait des pratiques de pêche dans les autres estuaires français. Elle se pratiquait généralement en zone fluviale, à l'aide d'un tamis manœuvré à la main depuis la berge ou le bateau et en surface uniquement. Après 1995, apparaît dans l'estuaire maritime, comme sur d'autres estuaires antérieurement, une pratique de pêche utilisant 2 tamis de taille réglementaire (1,2 m de diamètre et 1,3 m de profondeur) dressés sur le plat-bord du bateau et poussés en surface par celui-ci.

² La partie maritime de l'estuaire est la portion comprise entre la limite transversale de la mer (en aval) et la limite de salure des eaux (en amont, à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure de l'Adour).

3 Centre régional de traitement des statistiques des pêches maritimes.

Comportement et abondance de la civelle dans l'estuaire de l'Adour - Synthèse des études 1999-2002

Les données de pêche issues des déclarations obligatoires sur les fiches de pêche (zone maritime et mixte) sont répertoriées par le CRTS et l'IFREMER et sont intégrées dans une base de données amphihalins validée par l'IFREMER et l'ADERA-CERÉCA (Exemple 1).

Exemple 1 : Extrait de la table de données de pêche.

Microsoft Access - [Civelle de 84 à maintenant : Table]												
	début	fin	lieu ancien	lieu CRTS	engin	nb eng	heures	sortie	espèce	nbcapt	pdscapt	capt/sortie
	01/01/1985	31/01/1985	UAM	16E8M3	615	1		4	2299		10000	2500
	01/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0
	02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0
	02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0
	02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0
	02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0
	02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		1000	1000

Cette base de données permet d'accéder à des informations telles que les captures journalières, la répartition des captures en fonction du lieu de pêche ou la répartition des captures par types d'engins (tableau 1). Celle-ci est variable d'une année sur l'autre et fonction, principalement, des conditions hydroclimatiques (débit, turbidité, température de l'eau).

Tableau 1 : répartition des captures des marins pêcheurs de l'estuaire selon le type d'engin.

saison	tamis à main	tamis poussé	indéterminé
1999-2000	49%	51%	
2000-2001	21%	79%	
2001-2002	65%	25%	10%

Evolution historique des captures

Grâce à l'étude des carnets de pêche journaliers, deux grandes périodes peuvent être distinguées depuis le début du XXe siècle : la première est caractérisée par des prises moyennes par sortie comprises généralement entre 4 et 10 kg, avec pour certaines saisons (1930, 1967, 1969, 1973 ou 1975), des valeurs qui dépassent les 10 kg pour la campagne ; après le début des années quatre-vingt, les captures par sortie sont, inférieures ou voisines de 4 kg.

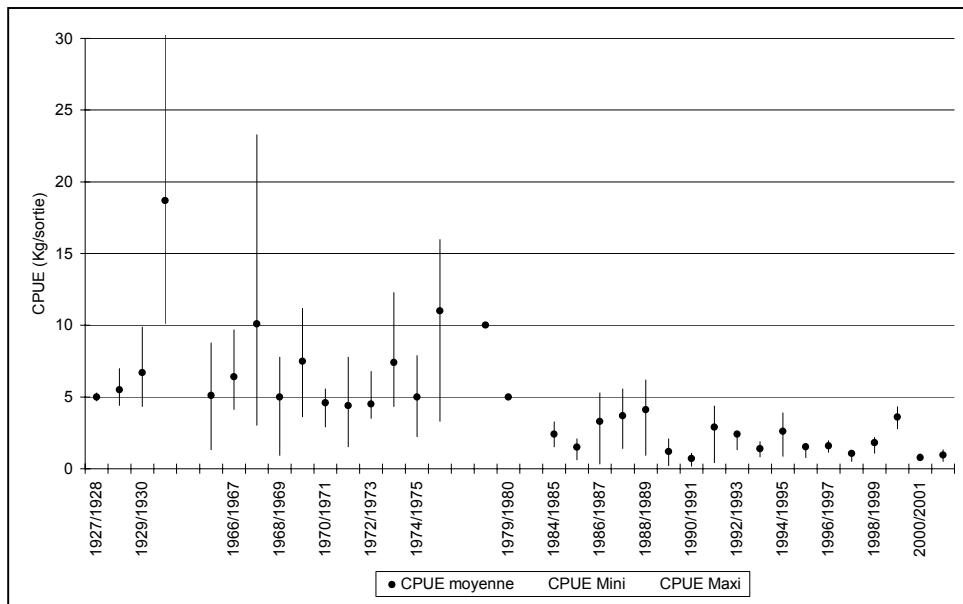


Figure 1 : Captures de civelle au tamis à main, par sortie de pêche, pour les différentes campagnes (valeurs moyennes, minimales et maximales).

MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE EN DEUX DIMENSIONS

La migration d'un flux de civelles ne peut se comprendre que par la schématisation de la dynamique de circulation des masses d'eau dans l'estuaire. C'est pourquoi, des efforts importants ont été consentis pour mettre au point un modèle bidimensionnel (couplage de deux modèles : 2D horizontal et 1D curvilinear) dans l'estuaire de l'Adour. Ce modèle permet de générer les dissymétries du courant dans la section transversale ainsi que les variations de la hauteur d'eau. Il traite le problème des îles et des confluences. Sa finesse de résolution permet de l'utiliser pour mieux comprendre le comportement des poissons amphihalins (dont l'anguille). Elle permettra *a fortiori* d'utiliser les résultats de ce modèle pour estimer les vitesses de courant et ultérieurement les risques d'inondations du lit majeur de l'Adour.

Pour que le modèle fonctionne, il faut préciser les conditions initiales sur tout le domaine ainsi que les conditions aux limites qui sont fournies en amont par le débit du fleuve et en aval par la hauteur d'eau de la marée au Boucau.

Le modèle hydrodynamique utilise une interface nommée "Erreka" à partir de laquelle sont renseignés les paramètres de simulation comme les débits de l'Adour et des principaux affluents ; le coefficient de frottement ; la vitesse du vent ou la résistance de l'air.

Ce modèle intègre la bathymétrie du fleuve avec les coordonnées géographiques des rives et des îles en mode point. Tous les autres paramètres sont à renseigner en fonction de la simulation voulue (date, heure de début, pas de temps maximal, etc.).

Une fois ces conditions précisées, le modèle calcule, pour l'ensemble des triangles du maillage :

- la pression et la hauteur d'eau à chaque sommet ;
- la vitesse aux sommets et au barycentre de chaque triangle.

Une phase de calage et de calibration, qui consiste à ajuster les paramètres du modèle (coefficient de frottement) par rapport à la réalité physique du fleuve, a été réalisée à partir de campagnes de courantométrie sur l'Adour à différents endroits du fleuve. Cela permet d'obtenir une bonne estimation de l'évolution et de l'hétérogénéité transversale des vitesses de courant (figures 2 et 3).

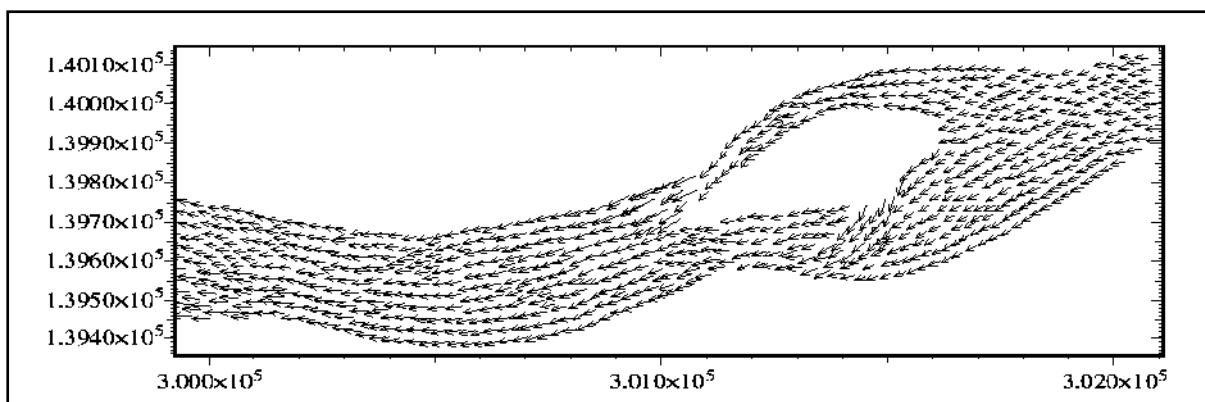


Figure 2 : Vitesses calculées au niveau de l'île de broc à un instant donné

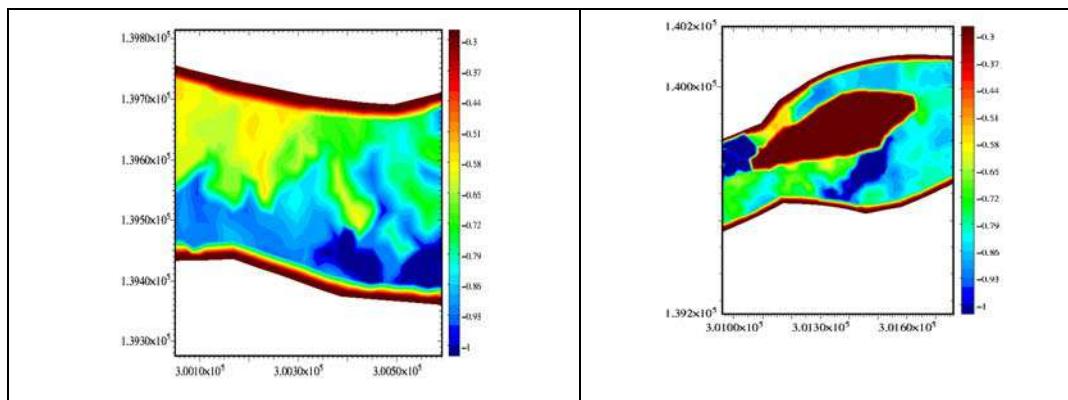
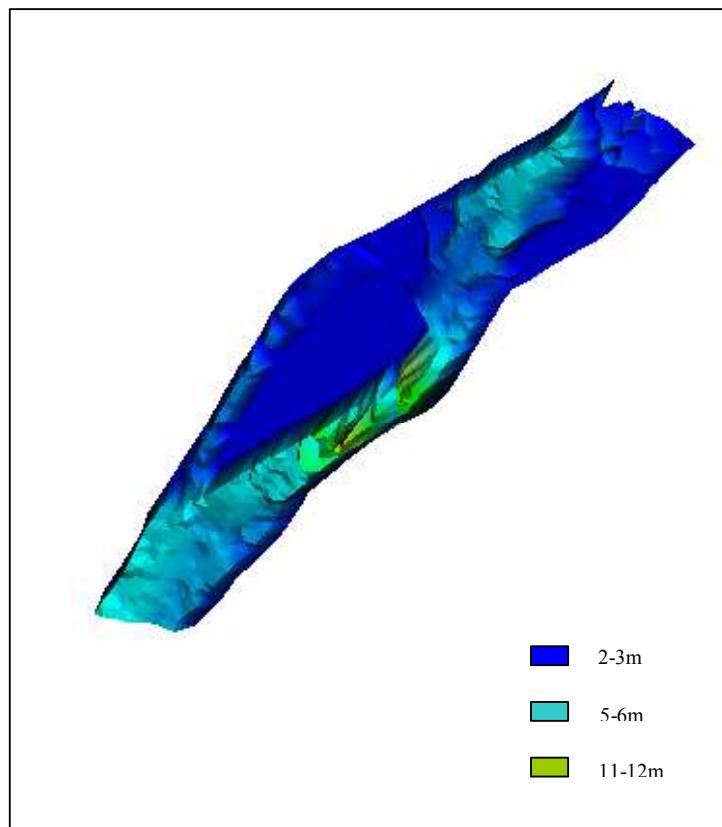


Figure 3 : Dissymétrie du courant au niveau de l'île de Broc.

Sur l'Adour, le modèle a été utilisé également pour établir le cahier des charges de la confection d'un barrage déflecteur pour le ramassage des déchets flottants (photo 1). Le bras gauche de l'île est caractérisé par des fonds assez importants compris entre 11 et 12 m. A la demande de l'Institution Adour, des simulations ont été effectuées pour trois conditions de coefficient de marée (39, 74 et 102) et de débit fluvial (180, 300 et 800 $m^3.s^{-1}$). Les vitesses moyennes calculées (sens amont-aval) dans la colonne d'eau variaient au maximum entre -1,1 et -1,4 $m.s^{-1}$.



Photo 1 : Barrage flottant installé sur le bras gauche de l'île de Berenx sur l'Adour (cliché : Institution Adour)



Bathymétrie 3D au niveau de l'île de Berenx.

MODÈLE COMPORTEMENTAL

Concept

Les premières analyses effectuées par les biologistes et les mathématiciens montrent un effet très marqué des phases lunaires et de la turbidité sur le comportement des civelles dans la colonne d'eau. L'intensité du coefficient de marée n'a pas un effet simple sur la variabilité des captures de civelles. Les travaux réalisés ont montré qu'il s'agit d'un effet combiné du coefficient de marée et de l'intensité du débit fluvial. C'est pourquoi un modèle hydrodynamique calculant la vitesse moyenne d'avancée du front de marée dynamique (lieu d'inversion du sens du courant) est utilisé comme base pour simuler la dispersion des flux de civelles. Ces analyses indiquent que les blocages hydrologiques provoquent des fortes concentrations dans l'estuaire.

Si les fortes concentrations de civelles dans la colonne d'eau sont conditionnées par le blocage de la marée en aval suivi d'une nouvelle propagation de la marée dans l'estuaire, l'accèsibilité des civelles aux engins de pêche est contrôlée en partie par la pénétration de la lumière dans l'eau : plus la colonne d'eau est éclairée par la clarté nocturne et plus la civelle migre en profondeur. Compte-tenu des travaux effectués, les biologistes ont proposé aux mathématiciens le schéma comportemental (figure 4).

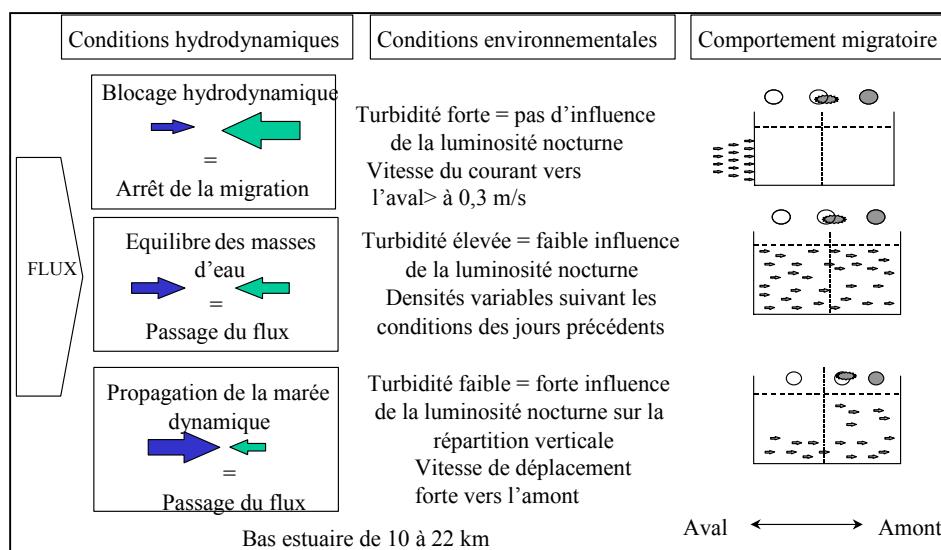


Figure 4 : Schéma explicatif du comportement migratoire de la civelle dans la partie maritime de l'estuaire de l'Adour .

Dans la composante horizontale : L'intensité du courant se traduit par des conditions plus ou moins favorables à la migration des civelles. Celles-ci ne migrent plus quand la vitesse maximale pendant le flot est supérieure à $-0,3 \text{ m.s}^{-1}$. Quand le débit fluvial diminue et les coefficients de marée augmentent, la marée se propage à nouveau dans l'estuaire et le flux de civelles pénètre dans la zone étudiée. C'est au cours de ces épisodes hydrologiques qui succèdent aux fortes crues que l'on observe les plus fortes densités de civelles. En l'absence de crues, celles-ci pénètrent en faible densité dans l'estuaire au rythme des marées et le traverse rapidement en 2 à 3 jours environ. Rien n'indique, pour le moment, qu'elles le font de manière active. Au contraire, les observations les plus récentes faites sur l'accumulation des civelles au voisinage du front de la marée dynamique laissent supposer qu'elles se déplacent plutôt passivement dans l'estuaire.

Dans la composante verticale : La localisation verticale des civelles résulte principalement de l'action des facteurs turbidité et phase lunaire. L'eau trouble favorise les déplacements sur toute la colonne d'eau, quelle que soit la phase du cycle lunaire. Les eaux claires favorisent plutôt les passages en profondeur surtout pendant la pleine lune. La nébulosité intervient comme un facteur modulateur de la luminosité nocturne qui peut atténuer la pénétration de la clarté lunaire durant les premiers et derniers quartiers. Les mouvements verticaux dans la colonne d'eau sont plutôt actifs et résultent d'un comportement lucifuge.

Simulation des déplacements de civelles à l'aide d'un modèle comportemental

En intégrant les différents facteurs qui jouent sur la migration longitudinale et verticale des civelles (cf. figure 4), ce modèle permet de voir comment les individus migrent dans le milieu en fonction des conditions environnementales dans l'estuaire.

Le modèle utilise les résultats de la simulation hydrodynamique unidimensionnelle pour le transport horizontal d'une particule soumise à des contraintes majeures : la particule assimilée à une civelle se plaque au fond dès que le courant est dirigé vers l'aval avec une vitesse supérieure à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$; elle migre près du fond ou évite de diffuser dans la couche d'eau superficielle dès que l'éclaircissement de la colonne d'eau dépasse un certain seuil qui dépend, en conditions nocturnes, de la turbidité et de la phase lunaire.

La possibilité d'une migration diurne est envisagée très près du fond si le flot se propage, mais le modèle permet de faire enfouir la civelle dans le sédiment durant le jour. Cela permet de tester cette hypothèse comportementale en confrontant les résultats obtenus avec ceux de l'observation des captures.

Au départ de la simulation, on "injecte" une densité de civelle de 50 g.100 m⁻³ à l'embouchure (ce qui semble cohérent avec les observations effectuées plus en amont lors des campagnes de prélèvement). Il est possible de "réinjecter" cette quantité toutes les 6 heures pour générer un déplacement de plusieurs groupes en attente du flot à l'embouchure.

A titre d'exemple, voici la simulation du déplacement d'un flux de civelles pour la période du 09/11/1999 au 12/11/1999. Ces dates correspondent à l'observation de deux pics de captures, l'un au tamis poussé en zone maritime le 09/11 et l'autre au tamis à main en zone fluviale le 12/11 (figure 5).

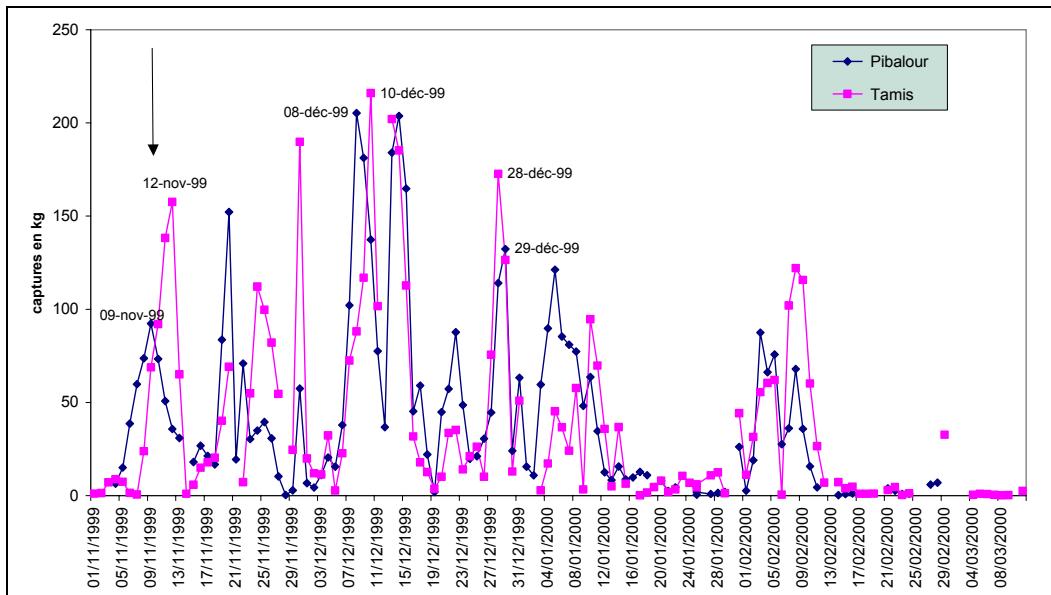


Figure 5 : Captures journalières au tamis poussé et au tamis à main pour la saison de pêche 99/2000.

En partant de l'hypothèse que le pic observé en zone fluviale appartient au même flux que celui capturé en zone maritime, le temps de remontée des civelles pour atteindre la zone fluviale (distance parcourue de 20 km environ) est de 2 ou 3 jours.

La simulation est menée pour les deux types de comportement possibles de la civelle :

- elle migre très près du fond le jour pendant le flot (figures 6 à 9) ;
- elle reste enfouie dans le sédiment (figures 10 à 13).

La simulation démarre le 08/11/1999 pour faire coïncider l'arrivée du flux en zone maritime avec le pic de captures observé aux tamis poussés le 09/11/1999.

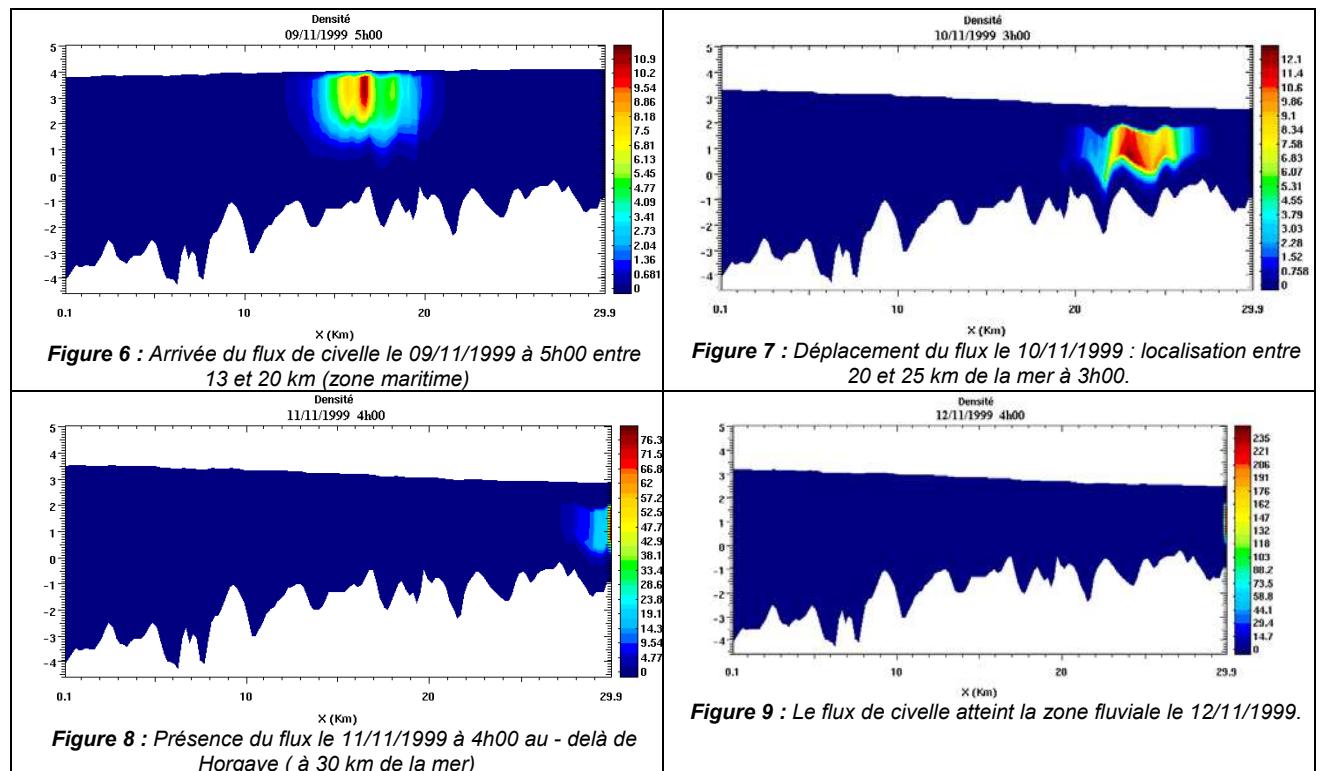
Les conditions hydrologiques entre le 09/11 et le 12/11 sont reportées dans le tableau 2.

Tableau 2 : conditions hydrologiques entre le 09/11/1999 et le 12/11/1999.

date	Heure de flot	coefficient	Débit (m ³ .s ⁻¹)	Vitesse moyenne du courant estimée (m.s ⁻¹) par le modèle 1D
Du 08/11 au 09/11	BM : 22h43 - PM : 4h57	86	140	0,5
09/11	BM : 10h57 - PM : 17h15	85	140	
Du 09/11 au 10/11	BM : 23h14 - PM : 5h29	83	145	0,5
10/11	BM : 11h30 - PM : 17h46	80	145	
Du 10/11 au 11/11	BM : 23h44 - PM : 6h00	78	137	0,5
11/11	BM : 11h30 - PM : 18h17	74	137	
12/11	BM : 00h15 - PM : 6h33	70	129	0,4
	BM : 12h36 - PM : 18h50	66	129	

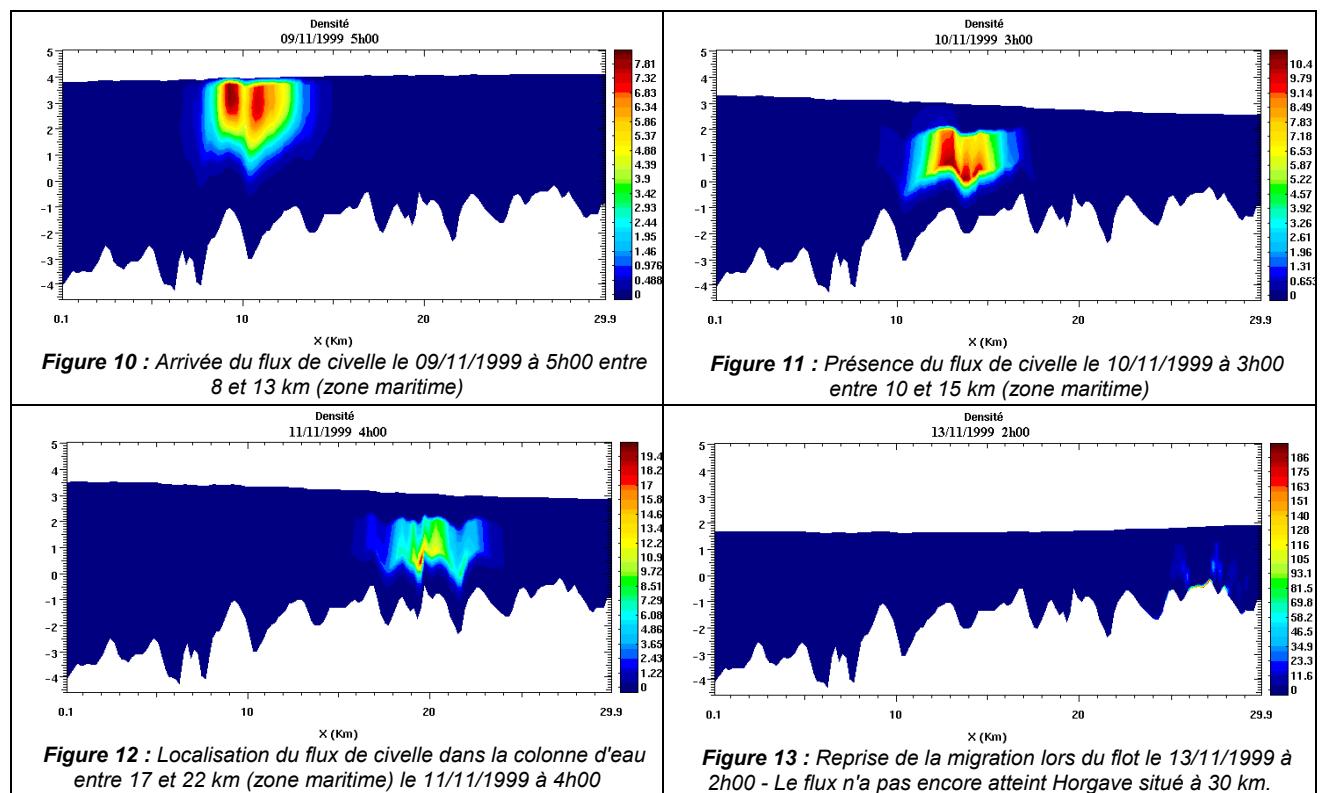
Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec migration près du fond durant le jour

En partant de l'hypothèse que les civelles migrent près du fond le jour durant le flot (figures 6 à 9), le modèle estime, pour des conditions hydrodynamiques moyennes (vitesse moyenne de courant estimé à 0,5 m.s⁻¹), que les civelles pourraient remonter l'estuaire sur une distance de 20 km environ en 2 ou 3 jours. Dans le modèle, le flux de civelles arrive en zone maritime le 09/11/1999 (entre 13 et 20 km). Ce même flux atteint la zone fluviale le 12/11/1999. Le modèle prévoit un temps de remontée identique à celui estimé par l'analyse du déplacement des pics de captures journaliers observés en zone maritime le 9 novembre et le 12 novembre en zone fluviale.



Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec enfouissement des civelles le jour

Si les civelles adoptent un comportement d'enfouissement le jour même durant le flot, la montée s'effectue à un rythme plus lent (figures 10 à 13). Le flux de civelles arrive en zone maritime le 09/11/1999 (entre 8 et 13 km). Ce même flux n'atteint pas encore le Bec des Gaves (Horgave) lors de la marée du 13/11/1999 à 2h00, ce qui laisse supposer qu'il serait en zone fluviale entre le 14/11/1999 et le 15/11/1999. Le temps de remontée par le modèle est estimé alors à 5 voire 6 jours si les civelles s'enfouissent dans le sédiment le jour. Ce qui ne correspond pas aux observations effectuées sur les captures aux tamis poussés.



ESTIMATIONS DE FLUX JOURNALIER

Une des questions récurrentes posées par les gestionnaires aux niveaux national et européen est : combien de civelles sont prélevées par la pêche professionnelle ? En d'autres termes peut-on estimer le taux d'exploitation effectué par une pêcherie dans des estuaires ouverts, de grandes dimensions, de manière fiable et en mobilisant des moyens parcimonieux pour pouvoir effectuer ces suivis fréquemment. C'est la réponse à cette question qui a motivé les travaux décrits brièvement dans ce chapitre.

Les méthodes mathématiques sont développées à partir d'un schéma d'échantillonnage imposé par les biologistes des pêches et se calquant sur le comportement migratoire de l'espèce. Il peut être schématisé de la manière suivante : pendant le flot, sur une station de référence, le bateau filtre, simultanément à l'aide d'un tamis de surface et d'un tamis "de fond", le volume d'eau selon trois transects positionnés en rives (droite et gauche) et au milieu dont la durée pour chacun est de 5 minutes. Le volume d'eau échantilloné est ainsi divisé en 6 zones de calcul correspondant aux 3 transects effectués en surface et aux 3 effectués en profondeur.

Première méthode

La méthode d'estimation développée utilise un modèle sinusoïdal de la vitesse, qui est une approche simplifiée du modèle hydrodynamique 1D, pour établir un modèle stochastique de variation de la densité observée (en g.100 m⁻³) en fonction de la vitesse du courant de flot, un jour donné.

Le calcul de la biomasse est effectué pour chaque sous-zone à partir d'une formulation prenant en compte la densité moyenne sur une zone et l'intégrale de la vitesse au cours du flot. Une formule approchée du coefficient de variation, en prenant constante la variance du terme d'erreur dans le temps pour le modèle liant les densités aux vitesses, est proposée.

Des estimations de biomasse sont fournies et comparées aux captures professionnelles (figure 14) effectuées dans les secteurs concernés par l'échantillonnage.

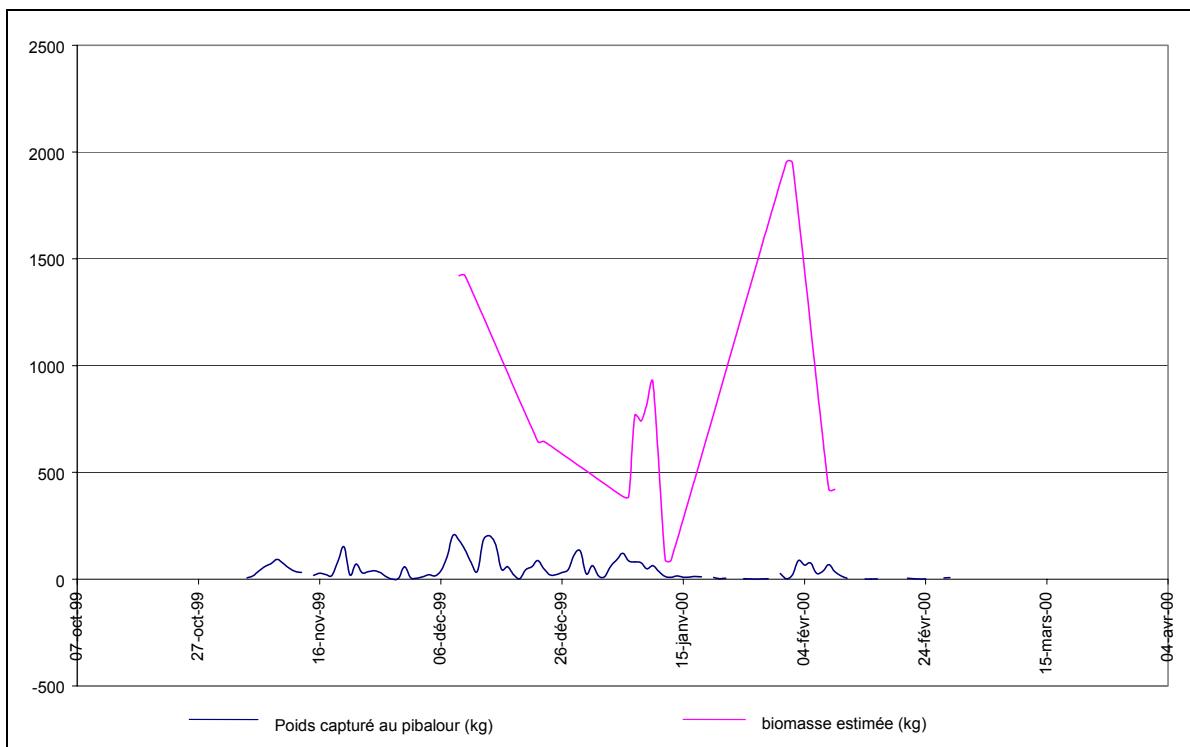


Figure 14 : Evolution de la biomasse estimée de civelles et du poids de civelles capturé par la pêcherie professionnelle en zone maritime : saison de migration 1999/2000.

Cela permet d'aboutir à des ordres de grandeur de taux d'exploitation journaliers dont les médianes pour les saisons de pêche 1998/1999, 1999/2000 et 2000/2001 sont comprises entre 6 et 26%.

Les estimations fournies par cette méthode sont généralement précises, sauf pour l'estimation de faibles biomasses (limites méthodologiques liées à la puissance de l'outil d'échantillonnage), et s'avèrent peu sensibles au découpage de la tranche d'eau.

Deuxième méthode

La méthode proposée relie les densités de civelles observées à la concentration locale initiale, via un modèle statistique obtenu par agrégation des concentrations locales, afin d'exprimer la biomasse d'un flux montant de civelles en fonction de cette concentration initiale.

Cette concentration locale initiale constitue la condition de bord du modèle de transport hydrodynamique d'un flux de civelles se présentant à l'estuaire (cela correspond, en simplifié, à la densité de civelles que l'on injecte de manière artificielle dans la maille du modèle comportemental à l'embouchure). Dans ce cadre, elle peut être alors définie par un faible nombre de paramètres dont les estimateurs permettent de déduire ceux de la biomasse dont la variance est ensuite approchée à partir des covariances des estimateurs des paramètres de la concentration initiale locale.

Les estimations fournies par cette seconde méthode sont généralement du même ordre de grandeur que ceux fournis par la première méthode. L'écart-type asymptotique n'excède généralement pas la biomasse estimée. Ce qui signifie que la précision avec laquelle la biomasse est évaluée, rend celle-ci utilisable comme indicateur d'abondance par les gestionnaires.

MISE AU POINT DE BIOMARQUEURS D'EXPOSITION DES ANGUILLES À LA POLLUTION EN ESTUAIRE

Ces travaux contribuent à répondre à la question suivante : comment peut-on apprécier chez un individu le stress physiologique et la répercussion sur son organisme lorsqu'il est soumis à des perturbations physico-chimiques de son milieu naturel de production ? Pour cela, deux biomarqueurs d'exposition des anguilles à ces types de pollutions ont été mis au point.

Biomarqueurs

Le premier biomarqueur est le suivi de l'induction du gène *cyp1a1*, induction qui conduit à la production de l'enzyme de détoxication à cytochrome P4501A1. Les suivis de la synthèse de cette enzyme et de l'induction de l'activité enzymatique qui en découle ont précédemment fait l'objet de nombreuses études, notamment chez les poissons comme la truite et le saumon. Ils y sont communément présentés et utilisés comme biomarqueurs d'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les milieux estuariens étant fréquemment contaminés par des HAP, le suivi de l'induction du gène *cyp1a1* chez l'anguille semble être un biomarqueur indiqué. Par ailleurs, le choix s'est porté sur un biomarqueur en amont de l'induction protéique, au niveau de l'induction génique. En effet, par rapport aux réponses obtenues avec les suivis de la synthèse protéique et de l'induction de l'activité enzymatique, le délai entre le début ou la fin de l'exposition à la pollution et la réponse du biomarqueur sera raccourci.

Le deuxième biomarqueur est le suivi de l'induction de gènes *mdr*. Les gènes *mdr* ont particulièrement été étudiés chez les mammifères. Les protéines codées par ces gènes (P-glycoprotéines ou P-gp) ont été découvertes du fait de leur implication dans la résistance des cellules cancéreuses aux traitements chimiothérapeutiques. Dans ce cas, la surexpression de P-gp dans la membrane cellulaire évite l'accumulation des drogues en les transportant activement à l'extérieur des cellules. Des protéines apparentées aux P-gp semblent être présentes chez le poisson (guppy et flétan) dans les organes d'excrétion (foie, vésicule biliaire, etc.). Cette localisation suggère un rôle d'excrétion des P-gp chez le poisson, par exemple l'excrétion de molécules xénobiotiques (produits phytosanitaires notamment). Cette constatation implique que les P-gp pourraient participer à la résistance des poissons aux polluants.

Construction des outils moléculaires

Des fragments du gène *cyp1a1* ont été amplifiés *in vitro* chez *Anguilla anguilla* en se basant sur la séquence complète du gène *cyp1a1* de *Anguilla japonica*. En ce qui concerne les gènes *mdr*, les travaux se sont basés sur la séquence des gènes humains et murins notamment pour obtenir des fragments correspondants chez l'anguille. Plusieurs séquences différentes ont été obtenues, ce qui suggère la présence de gènes différents.

Validation des biomarqueurs

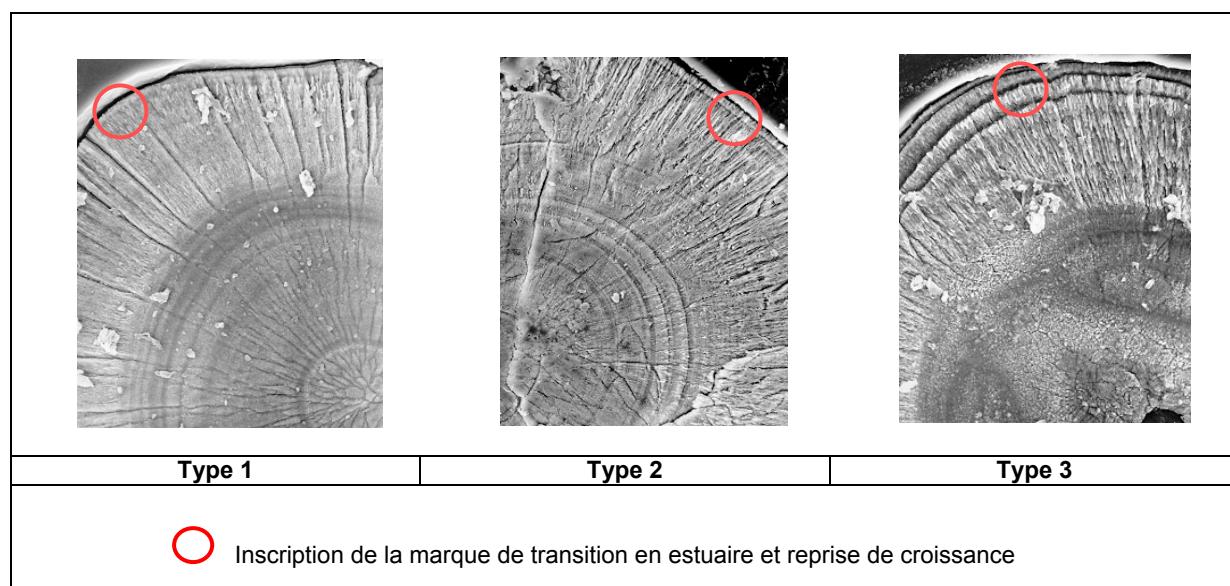
Une étude en conditions semi-contrôlées est actuellement en cours afin de suivre les modalités d'expression des systèmes de détoxication étudiés grâce aux sondes moléculaires obtenues pour chaque biomarqueur. Dans ce but, des anguillettes ont été maintenues en aquarium dans des conditions variables de stress chimique, c'est-à-dire en présence d'un inducteur spécifique du gène *cyp1a1*, la β-naphthoflavone, ou bien en présence de sédiments plus ou moins pollués des estuaires de la Ria de Bilbao et de l'Adour.

ÉTUDES OTOLITHOMÉTRIQUES

Elles ont été entreprises pour caractériser les civelles en migration dans le bassin de l'Adour à partir du plus gros des 3 otolithes : la *Sagittae*. Ces études permettent de mieux caractériser l'hétérogénéité des temps de résidence en estuaire et le moment de la pénétration de la civelle dans le bassin, l'analyse simple de la pigmentation s'avérant parfois très insuffisante. Elles permettent aussi de replacer les flux de civelles remontant l'estuaire de l'Adour dans le cadre plus général de l'aire de colonisation de l'espèce en Atlantique.

- **Typologie des otolithes :** L'analyse par microscopie électronique a permis de classer les otolithes en 3 catégories en fonction de leur temps de résidence en estuaire. Le type 1 (absence d'une double marque en bordure d'otolithe) : civelle fraîchement arrivée en estuaire ou encore résidente en mer ; le type 2 (présence d'une double marque) : civelle ayant séjourné en estuaire et le type 3 (développement de l'otolithe au-delà de la phase de transition) : civelle acclimatée à l'estuaire.

Il apparaît que le stade dit "estuarien" (stade pigmentaire VB, le plus commun dans les captures) regroupe en fait des civelles qui sont en estuaire depuis un temps très variable. La typologie des otolithes montre qu'il se produit un mélange des individus provenant de différents flux lors de la traversée de l'estuaire.



- **Mesures des zones de croissance** pendant la migration océanique : ces mesures réalisées sur chaque otolithe de civelles permettent de caractériser les zones de croissance pendant la phase leptocéphale au cours de la traversée de l'Atlantique, pendant la phase civelle au cours de la traversée du plateau continental et au cours de la phase de passage en estuaire.

Quelle que soit la date d'arrivée des civelles, la croissance pendant la phase leptocéphale et la phase civelle est identique. Les diminutions observées de la longueur et du poids des civelles au cours de la saison seraient d'avantage liées à leurs origines (zones ou dates de ponte en mer des Sargasses) plutôt qu'aux conditions qu'elles rencontrent lors de la traversée océanique.

- **Dosages isotopiques de l'oxygène ^{18}O et du carbone ^{13}C** : L'échantillon de civelles de l'Adour, dans la partie centrale de l'aire de répartition, a été intégré dans un pool de 8 estuaires répartis entre la Suède et le Maroc sur la façade européenne, l'objectif étant de caractériser par des dosages d'isotopes stables de l'Oxygène et du Carbone, les conditions thermiques de migration des civelles et d'identifier d'éventuelles voies de migration.

A l'échelle européenne, les variations des teneurs en ^{18}O et ^{13}C dans les otolithes montrent un gradient croissant en fonction de la latitude. Ce qui semble indiquer que les différentes larves subissent des conditions environnementales différentes lors de leurs traversées. Cela confirme les observations portant sur la génétique et la biométrie et qui indiquent que la population d'anguille européenne n'est pas aussi homogène que l'on aurait pu le supposer au départ.

CONCLUSIONS

Outre l'intérêt que ces travaux représentent pour une meilleure compréhension de la plasticité du comportement et des mécanismes physiologiques mis en jeu pour s'adapter aux perturbations naturelles ou anthropiques de l'environnement, les résultats obtenus ont permis de mieux adapter la réglementation de la pêche en estuaire, de mesurer l'efficacité des engins de pêche et de définir des méthodes et des outils d'estimation des flux de migrants.

Les études entreprises ont atteint l'ensemble des objectifs assignés par le COGEPOMI et les partenaires financiers :

- elles ont permis de mieux comprendre comment se faisait la migration d'un flux de civelles dans un estuaire soumis à la propagation de la marée dynamique dans la zone non stratifiée. En particulier, le rôle prépondérant des effets conjugués du débit, du coefficient de marée et de la turbidité sur la présence ou non des civelles en surface a bien été montré ;
- cette compréhension est utile pour le gestionnaire car elle permet d'expliquer les modifications de capturabilité (vulnérabilité de la civelle à l'engin de pêche) des individus présents dans l'estuaire et, par conséquent, de l'efficacité de la pêche. Cette variation d'efficacité avait été déjà signalée par les professionnels, elle est confirmée et quantifiée par les études entreprises ;
- ces travaux ont permis non seulement de décrire le phénomène comportemental, mais aussi de le modéliser puis de le simuler. Cette modélisation, difficile car devant schématiser des phénomènes hydrauliques à l'échelle d'un maillage très fin (dissymétrie du courant dans la section transversale notamment, prise en compte des confluences et des îles) a fait intervenir des méthodes mathématiques nouvelles qui permettent de simuler l'hétérogénéité des courants et des hauteurs d'eau avec réalisme comme en témoignent les résultats des campagnes de validation sur le terrain. Le modèle hydrodynamique d'écoulement a été mis à la portée des utilisateurs par l'élaboration d'une interface baptisée "Erreka" ;
- le simulateur comportemental élaboré à partir des observations et des connaissances acquises permet de visualiser l'avancée d'un groupe de civelles dans l'estuaire et son comportement dans la colonne d'eau. Il permet également de tester l'hypothèse d'une migration diurne en comparant les vitesses de déplacement simulées avec les déplacements des pics de captures observés successivement en zones maritime et fluviale. Cette réponse est également importante pour le gestionnaire car elle permet d'apprecier le degré d'échappement d'un flux de civelles à toute pêche en zone maritime. Les vitesses de migration estimées et confortées par l'observation des pics de captures sont de l'ordre de 2 à 3 jours en conditions normales de flot et de débit pour une distance de 20 km environ ;
- cet aspect descriptif a été complété par la mise au point d'une technique d'estimation du flux journalier de civelles en estuaire. Par la mise en place d'un plan d'échantillonnage de la veine d'eau, il est désormais possible et ce, pour des estuaires de dimensions importantes, d'évaluer l'abondance des civelles qui transitent en un point donné durant le flot. Cette méthode robuste est extrapolable à d'autres sites et sera utilisée dans d'autres estuaires dans le cadre du projet INDICANG ;
- par ce biais, le gestionnaire sait, maintenant, qu'il dispose d'un outil lui permettant de mesurer le taux d'exploitation exercé un jour donné par la pêcherie professionnelle aux tamis poussés ;
- l'étape suivante consiste à estimer l'abondance saisonnière des civelles. Les partenaires du programme "Amphihalins Adour" ont dressé et défini le cadre conceptuel de cette évaluation en prenant comme objectif de développer une méthode à la fois suffisamment précise pour qu'elle soit d'une quelque utilité pour la gestion, robuste pour qu'elle soit transférable à des structures techniques et parcimonieuse afin qu'elle soit utilisée de manière récurrente avec un coût de mise en œuvre raisonnable et compatible avec les financements publics. Cette méthode nécessite à la fois des statistiques de pêche précises, la mise en œuvre de suivis expérimentaux et la prise en compte d'un minimum de paramètres physiques identifiés comme modulateurs du comportement migratoire de la civelle en estuaire (débit, coefficient de marée, température, turbidité, nébulosité et phase lunaire).

Rédaction : Mohamed Amara (UPPA-LMA), Elena Aubry (UPPA-LMA), Ahmed Boussouar (ADERA-CERECA), Noëlle Bru (Univ. de Grenoble, LabSAD), Christine Cagnon (UPPA-LEM), François-Xavier Cuende (Institution Adour), Marie-Noëlle de Casamajor (ADERA-CERECA), Muriel Lissardy (ADERA-CERECA), Claude Mouchès (UPPA-LEM), Patrick Prouzet (IFREMER-LHA), Florence Sanchez (ADERA-CERECA), David Trujillo (UPPA-LMA).

Réalisation : Institution Adour, IFREMER-LHA, ADERA-CERECA - Juin 2003.

Ce programme a été réalisé grâce au soutien financier des partenaires suivants :



SOMMAIRE

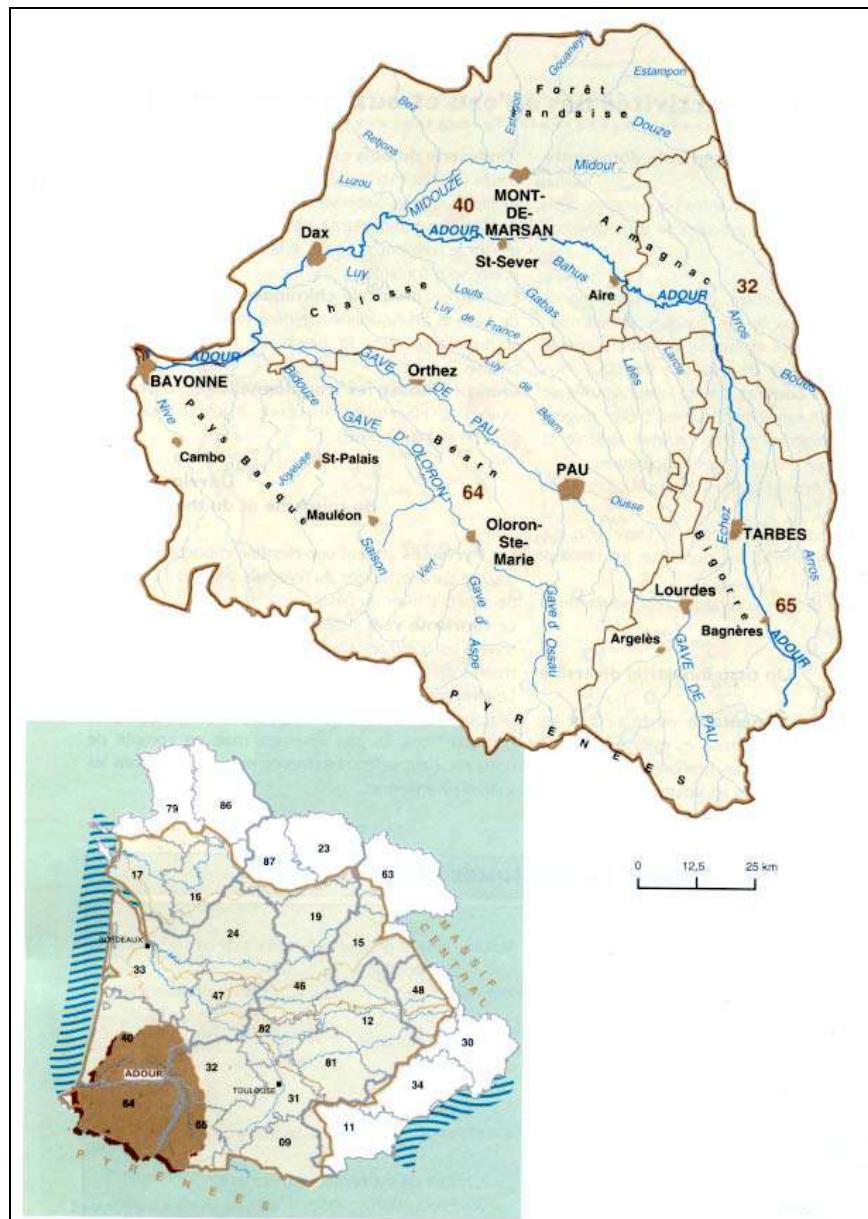
1	Présentation de l'Adour et de son bassin versant	1
1.1.	Bassin versant de l'Adour	1
1.1.1.	Géomorphologie	2
1.1.1.1.	Éléments topographiques	2
1.1.1.2.	Le substratum géologique	3
1.1.1.3.	Les sols	4
1.1.2.	Données climatiques	5
1.1.2.1.	Précipitations	5
1.1.2.2.	Températures	6
1.1.3.	L'Adour et ses affluents	6
1.1.4.	Les éléments de biotope	7
1.1.4.1.	La faune piscicole	7
1.1.4.2.	Les espèces amphihalines	8
1.1.4.3.	Les éléments de gestion de la faune et de la flore du bassin versant de l'Adour : un milieu particulier les Barthes de l'Adour	10
1.2.	L'entité littorale : la zone estuarienne (de l'embouchure jusqu'au Bec des Gaves)	12
1.2.1.	Caractéristiques morphologiques et bathymétriques de l'estuaire	12
1.2.2.	Hydrologie	16
1.2.3.	Caractéristiques de la marée	17
1.2.4.	Propagation de la marée en estuaire	18
1.2.5.	Stratification des masses d'eau	21
2	Description des outils de collecte de données des campagnes expérimentales et base de données	25
2.1.	Collecte des données des campagnes expérimentales	25
2.1.1.	Présentation et localisation des stations échantillonnées	26
2.1.2.	Protocole d'échantillonnage dans l'estuaire	28
2.1.3.	Paramètres étudiés	31
2.1.3.1.	Paramètres environnementaux	31
2.1.3.2.	Estimation des Densités	38
2.2.	Caractéristiques de la base de données	39
2.2.1.	Données physiques	39
2.2.2.	Données biologiques	41
2.2.3.	Données Halieutiques	46
2.2.4.	Données cartographiques	54
2.3.	Caractéristiques hydroclimatiques des saisons de pêche	65
2.3.1.	Conditions hydrodynamiques	65
2.3.2.	Pluviométrie	67
2.3.3.	Température de l'eau	68

3	Caractéristiques de la pêcherie de civelles dans l'estuaire de l'Adour	71
3.1.	Description de l'activité de pêche	71
3.1.1.	Législation et réglementation générale	71
3.1.2.	Découpage administratif et cadre réglementaire pour la pêche dans l'estuaire	72
3.1.3.	Type de navire et caractéristiques des engins de pêche	76
3.1.4.	Opérations de pêche	77
3.2.	Caractéristiques de la pêcherie de civelles sur l'Adour (saisons 1999/2000, 2000/2001 et 2001/2002)	78
3.2.1.	Campagne 1999-2000	78
3.2.2.	Campagne 2000-2001	82
3.2.3.	Campagne 2001-2002	86
3.2.4.	Évolution des captures depuis le début du siècle sur le bassin de l'Adour et des Gaves	93
4	Biologie et comportement	96
4.1.	Analyse exploratoire des données des campagnes d'échantillonnage effectuées à partir de 1998.	96
4.1.1.	Campagne 1998/1999	96
4.1.2.	Campagne 1999/2000	104
4.1.3.	Campagne 2000/2001	110
4.1.4.	Campagne 2001/2002	115
4.2.	Caractéristiques biologiques des civelles remontant l'estuaire de l'Adour.	124
4.2.1.	Variations des caractéristiques biométriques des civelles (cf Annexe 2 ; de Casamajor et al., 2003)	124
4.2.2.	Caractérisations biochimique et otolithométrique de la civelle sur le bassin de l'Adour.	126
4.2.2.1.	Caractérisation biochimique et état d'amaigrissement à partir du rapport ADN/Poids sec (cf. Annexe 3 ; de Casamajor et al., 2001)	126
4.2.2.2.	Caractérisation otolithométrique (cf. Annexe 4 de Casamajor et al., 2001)	128
4.2.3.	Étude du passé larvaire transatlantique de la civelle dans le golfe de Gascogne et à l'échelle européenne	130
4.3.	Diversité génétique des civelles en migration dans l'estuaire de l'Adour et effets des stress environnementaux.	132
4.3.1.	Diversité génétique des civelles en migration dans l'estuaire de l'Adour	132
4.3.1.1.	Choix des marqueurs moléculaires	133
4.3.1.1.1.	Les marqueurs microsatellites	134
4.3.1.1.2.	Les marqueurs microsatellites d'anguille	134
4.3.1.2.	Échantillons analysés	135
4.3.1.3.	Méthodes	136
4.3.1.3.1.	Extraction de l'ADN total	136
4.3.1.3.2.	Amplification par PCR des marqueurs microsatellites	136
4.3.1.3.3.	Analyse de la taille des fragments d'ADN par électrophorèse capillaire	136
4.3.1.4.	Résultats et discussion	137
4.3.2.	Réponses d' <i>A. anguilla</i> aux contaminants des différents habitats	145
4.3.3.	Perspectives de recherches	146

5	Principaux modèles élaborés	147
5.1.	Modèle estimant la température de l'eau	147
5.2.	Modèle estimant la turbidité	152
5.3.	Modélisation hydrodynamique de l'estuaire de l'Adour	155
5.3.1.	Modèle bidimensionnel : principe de fonctionnement	155
5.3.1.1.	Généralités.	156
5.3.1.2.	Dans le cadre de l'étude	156
5.3.2.	Mise en œuvre	157
5.3.3.	Etalonnage	158
5.3.3.1.	Protocole utilisé	159
5.3.3.2.	Matériels utilisés	160
5.3.4.	Résultats	161
5.3.4.1.	Mesures de vitesses de courant	161
5.3.4.2.	Calibration du modèle 2D	168
5.4.	Simulation des déplacements de civelles en estuaire à l'aide d'un modèle comportemental	182
5.4.1.	Description du modèle comportemental	184
5.4.1.1.	Domaine d'étude	184
5.4.1.2.	Le modèle	184
5.4.2.	Simulation comportementale en estuaire	191
5.4.2.1.	Présentation de la visualisation des résultats	191
5.4.2.2.	Estimation du temps de remontée des civelles en estuaire à partir des données de captures : l'exemple de la saison 1999/2000	192
5.4.2.3.	Application du modèle comportemental : Simulation de l'avancée d'un flux de civelles dans l'estuaire pour les périodes du 08/11/1999 au 12/11/1999 et du 08/12/1999 au 12/12/1999.	196
5.4.3.	Conclusion	202
6	Estimation des biomasses journalières et modélisation stochastique des densités	204
6.1.	Estimations journalières de la biomasse de civelles dans l'estuaire de l'Adour	204
6.1.1.	Méthode d'estimation utilisée et étude de la variabilité de ces estimations	207
6.1.2.	Résultats numériques : estimation de la quantité de civelles présentes et variabilité de ces estimations	211
6.2.	Deuxième méthode d'estimation de la biomasse de civelles transitant dans l'estuaire de l'Adour durant le flot de marée – Modélisation stochastique du flux de civelles	215
6.3.	Comparaison des estimations de biomasses obtenues par les deux méthodes proposées.	215
7	Extrapolation saisonnière de la biomasse à partir des données de captures des pêcheurs professionnels	217
7.1.	Principe de l'approche analytique	217
7.2.	Estimation de l'abondance des civelles durant la saison de pêche : cadre conceptuel.	218
	Bibliographie	220
	Annexes	

1. Présentation de l'Adour et de son bassin versant

1.1. Bassin versant de l'Adour

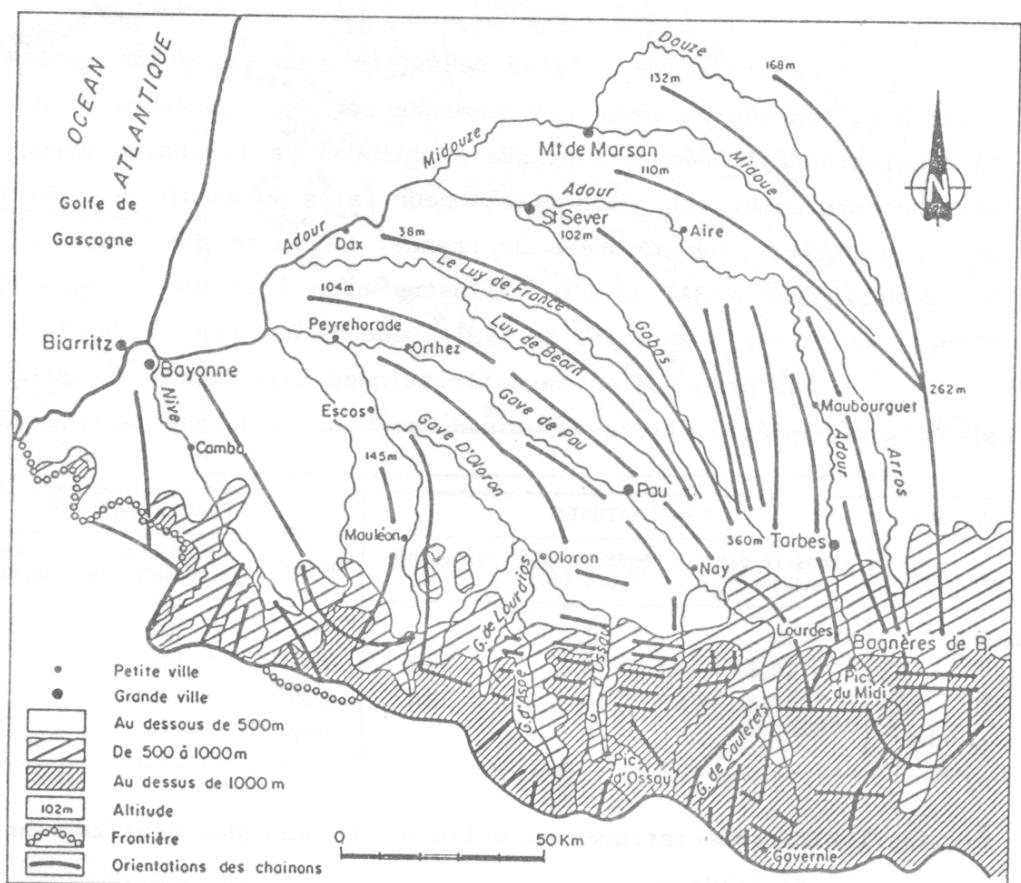


Carte 1 : Le bassin de l'Adour (Sources : Observatoire de l'eau, Gharbi, 2002).

1.1.1. Géomorphologie

1.1.1.1. Éléments topographiques

Le bassin versant de l'Adour (carte 1) couvre une superficie d'environ 17 000 km² et s'étend sur trois grandes régions où les conditions morphologiques sont sensiblement différentes (carte 2).



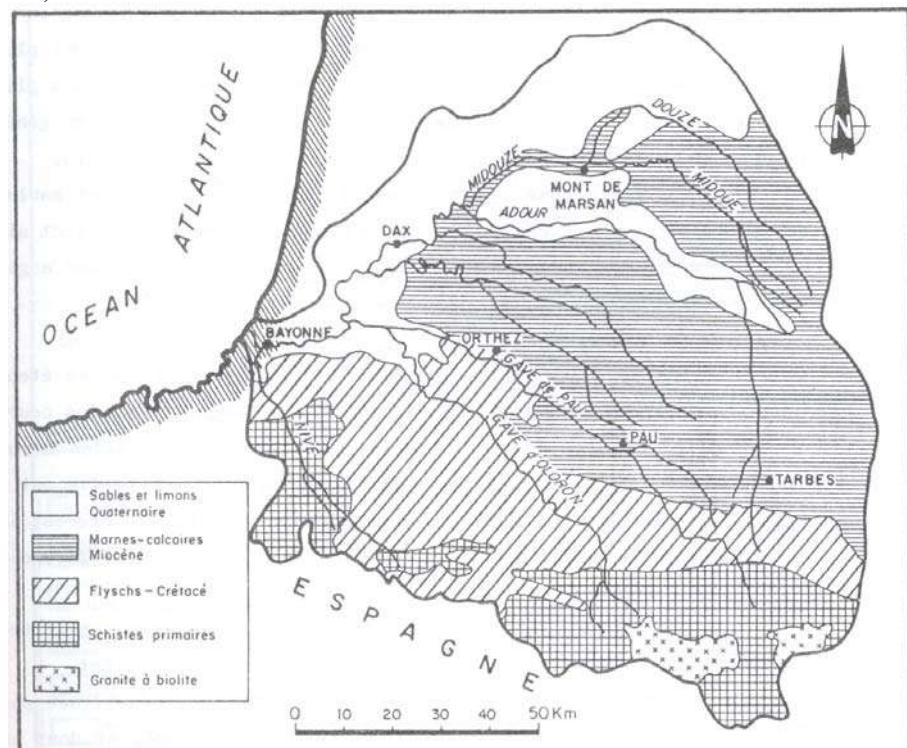
Carte 2 : Relief du bassin de l'Adour (Snoussi, 1988).

- au nord, une région de plaines d'une altitude moyenne de 100 mètres, drainée par l'Adour moyen et son affluent de droite : la Midouze ;
- au centre, un pays de plateaux et collines, aux reliefs arrondis appartenant à la Chalosse et au Béarn : l'altitude ne dépasse que rarement 300 mètres ;
- enfin au sud, la chaîne des Pyrénées où se rencontrent les altitudes les plus fortes du bassin, pouvant dépasser 3000 mètres.

- l'Adour draine dans sa majeure partie des régions de collines et plateaux au relief peu accentué, à l'exception des hauts bassins pyrénéens, où les pentes des talwegs sont extrêmement raides.

1.1.1.2. Le substratum géologique

Le bassin de l'Adour présente une grande variété de formation lithologique (carte 3).



Carte 3 : Carte géologique simplifiée du bassin de l'Adour (Source : Snoussi, 1988).

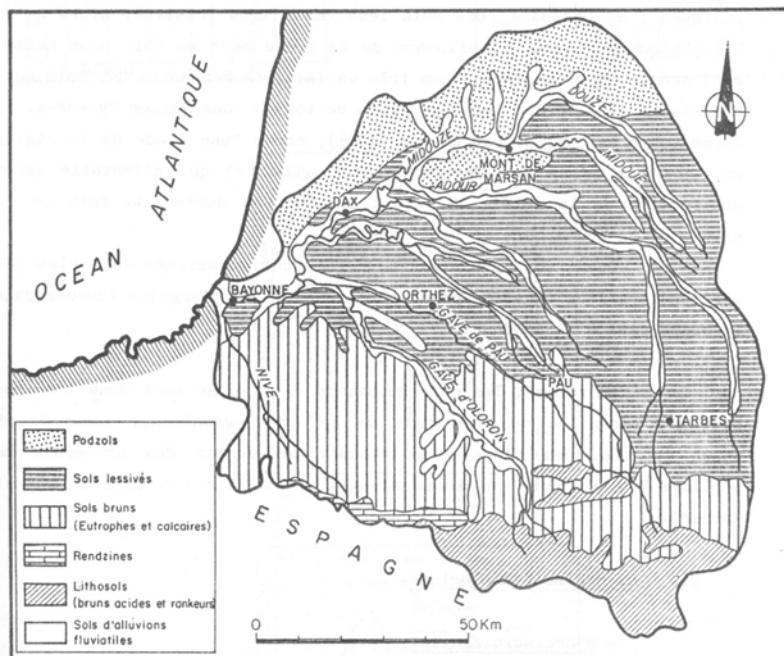
L'observation de la carte montre une extrême diversité des formations venant à l'affleurement dans le bassin. Les formations les plus étendues géographiquement sont généralement les marno-calcaires du miocène, puis les flyschs du crétacé et enfin les schistes d'âge primaire.

Les phénomènes d'altération chimique et de dénudation mécanique sont par conséquent très variés dans le bassin.

1.1.1.3. Les sols

La variété des sols dans le bassin de l'Adour est également très importante (carte 4). On peut distinguer principalement :

- au sud-est, dans la partie la plus élevée des Pyrénées Centrales, des terrains à dominante à la fois peu évoluée et peu lessivée (Lithosols, rankers, rendzines) ;
- plus à l'ouest, dans les zones basses du Béarn et du Pays Basque oriental, des sols bruns plus évolués, eutrophes ou, très localement lessivés ou calcaires, l'influence de la roche mère se fait nettement ressentir ;
- en Chalosse et dans la partie médiо-orientale, des formations alluviales cernées par des sols lessivés à très lessivés ;
- dans la partie nord et nord-ouest du bassin, des formations podzoliques de moins en moins évoluées vers l'ouest, entrent en contact avec les terrains littoraux.
- les sols alluviaux sont constitués de sables légèrement argileux dans les principales vallées et d'argiles lourdes dans la basse plaine de l'Adour.



Carte 4 : Carte pédologique simplifiée du bassin de l'Adour (Snoussi, 1988).

Les sols du bassin de l'Adour sont dans l'ensemble lessivés et assez évolués, ce qui laisse pressentir des processus de mobilité des éléments chimiques assez poussés dans ces sols de climat tempéré (Snoussi, 1988).

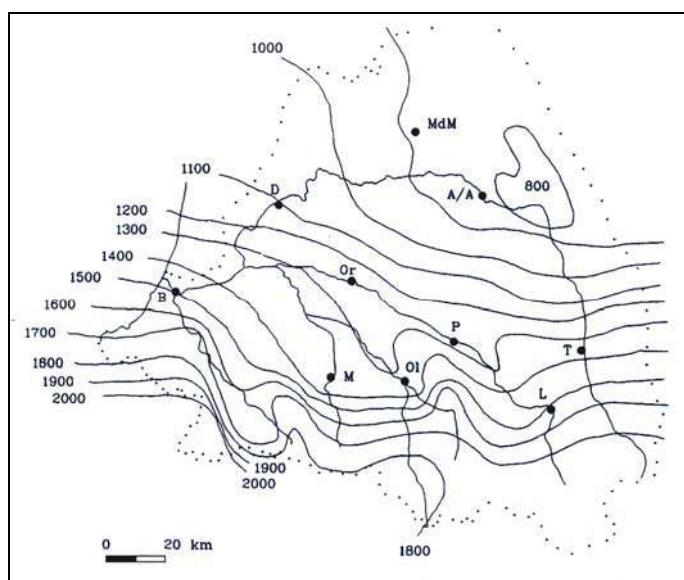
Cette relative structuration ne doit pas masquer la grande diversité pédologique du bassin. Le facteur pédogénétique dominant semble être bien entendu la nature de la roche mère. Cependant la circulation de l'eau (sous toutes ces formes) et le climat, sont à prendre en considération pour la localisation des formations.

1.1.2. Données climatiques

Le bassin de l'Adour bénéficie d'un climat de type tempéré océanique. Son régime moyen est commandé par deux facteurs principaux : la proximité de l'Océan Atlantique et l'écran de la chaîne pyrénéenne. Ces facteurs combinent leurs effets pour faire du bassin de l'Adour, une des régions les plus arrosées de France. Cette zone est soumise à l'influence océanique diminuant d'ouest en est et à celle de l'altitude diminuant du sud au nord.

1.1.2.1. Précipitations

La pluviométrie moyenne du bassin de l'Adour est de l'ordre de 1300 mm. Les précipitations n'ont pas une distribution uniforme sur l'ensemble du bassin (carte 5).



Carte 5 : Isohyètes moyennes (en millimètres) du bassin de l'Adour (Source : Cuende, 1994).



Les valeurs maximales sont enregistrées au niveau des reliefs, où elles peuvent atteindre 2500 mm. Cependant, la partie plus occidentale de la chaîne reçoit plus de 1500 mm. A ce niveau, les reliefs moins élevés reçoivent une action compensatrice des influences atlantiques.

On note un brusque infléchissement des isohyètes au niveau de la haute vallée du gave de Pau. Cette inflexion remonte (entre 1000 et 1300 mm) vers le nord-ouest le long de la vallée du gave de Pau, épousant à l'extrême nord du bassin les contours de la forêt des Landes. Elle sépare ainsi deux zones sous influence océanique. La plus occidentale bénéficie directement de l'influence maritime.

Le nord-est du bassin présente une pluviométrie plus faible.

Dans l'ensemble, les précipitations diminuent du sud au nord et de l'ouest à l'est. Les isohyètes découpent le bassin en bandes d'orientation générale nord-ouest-sud-est (Cuende, 1994).

1.1.2.2. Températures

La température inter-annuelle est de 13,8°C. Le minimum mensuel en moyenne est de 10°C en hiver et de 23°C en été.

Les isothermes (des valeurs minimales et maximales) sont sensiblement orientées parallèlement à l'axe de la chaîne, au sud du bassin, et s'infléchissent progressivement suivant une direction sud-ouest/nord-est (pour les minimales) ou sud-est/nord-ouest (pour les maximales) en remontant vers le nord du bassin.

Cette répartition est certainement due au passage d'une influence montagnarde (pyrénéenne) à une influence océanique (atlantique) pour les valeurs minimales, et au passage d'une influence montagnarde à une influence atlantico-continentale (girondine) pour les valeurs maximales.

1.1.3. L'Adour et ses affluents

Prenant sa source à environ 2200 mètres d'altitude, au pied du pic d'Espade (entre le Pic du Midi de Bigorre, 2872 m et le Pic des Quatre Termes, 2542 m), l'Adour (du basque "aturra", la source) rejoint l'Océan Atlantique à Bayonne, après 335 kilomètres de cours. Son débit moyen à l'embouchure est de $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($375 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la Seine).

Depuis les Pyrénées centrales, le fleuve étire sa large boucle vers le nord à travers le département des Hautes-Pyrénées, redescendant enfin obliquement vers l'océan pour longer, dans son cours inférieur, la limite entre les Landes et les Pyrénées-Atlantiques.

La morphologie du bassin aturrin permet de scinder l'ensemble des affluents selon leur appartenance à l'une ou l'autre rive.

Le réseau hydrographique de l'Adour est fortement dissymétrique. La rive droite se distingue par une densité de drainage relativement faible. Les apports de la rive gauche traduisent un réseau beaucoup plus dense et complexe.



Les affluents de la rive droite de l'Adour sont essentiellement constitués par le réseau de l'Arros (module de l'ordre de $10 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) d'une part, et celui de la Midouze (module de l'ordre de $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) d'autre part.

Le régime est modéré par le substrat sableux des Landes. Les sables jouent un rôle de tampon : absorption des premières pluies d'hiver, importante réalimentation des rivières en été par les nappes.

Beaucoup plus riche et complexe, le réseau de la rive gauche peut être décomposé en cinq sous-ensembles :

- les ruisseaux torrentiels pyrénéens et pré-pyrénéens ;
- l'Echez ($6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et ses affluents d'origine pyrénéenne, drainent les coteaux molassiques de la haute plaine et tissent le long de l'Adour un enchevêtrement de canaux ;
- les cours d'eau de la Chalosse s'étirent de plus en plus vers l'ouest des molasses vers la plaine. Ces petites rivières sont le plus souvent modestes, mais peuvent atteindre ou dépasser $6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ comme le Lées ou Gabas voire $15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour le Luy ;
- les Gaves et leurs tributaires (rivières d'alimentation de montagne) sont de puissants cours d'eau qui perdent leur caractère torrentiel qu'à très peu de distance avant la confluence. Ils apportent à l'Adour près de $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, triplant ainsi le débit moyen du fleuve ;
- les rivières du Bas-Adour (rivières océaniques), au débit inférieur ou égal à $10 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Bidouze, Joyeuse) ou celles avoisinant les $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour la Nive drainent les plus hauts reliefs du Pays Basque et lui imposent ainsi un régime capricieux.

1.1.4. Les éléments de biotope

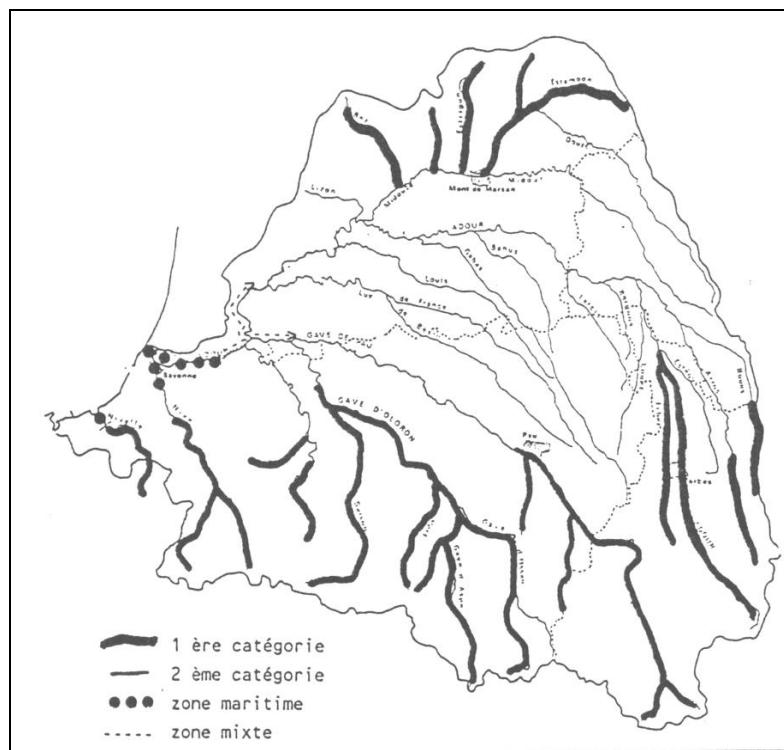
1.1.4.1. La faune piscicole

De part les caractéristiques physiques et hydrobiologiques variées, le bassin de l'Adour offre un fort potentiel piscicole. De nombreux cours d'eau sont classés en 1^{ère} ou 2^{ème} catégorie piscicole (carte 6). Établis par le Conseil Supérieur de la Pêche, ces classements tiennent compte de la biologie des espèces, les cours d'eau, canaux et plans d'eau

- la 1^{re} catégorie comprend ceux qui sont principalement peuplés de truites, ainsi que ceux où il paraît désirable d'assurer une protection spéciale des poissons de cette espèce (salmonidés dominants) ;
- la seconde catégorie regroupe tous les autres cours d'eau, canaux et plans d'eau (cyprinidés dominants).

Ce classement conditionne la mise en œuvre des dispositions relatives à la pratique de la pêche.





Carte 6 : Catégories piscicoles (Source: Observatoire de l'eau, 1998).

1.1.4.2. Les espèces amphihalines

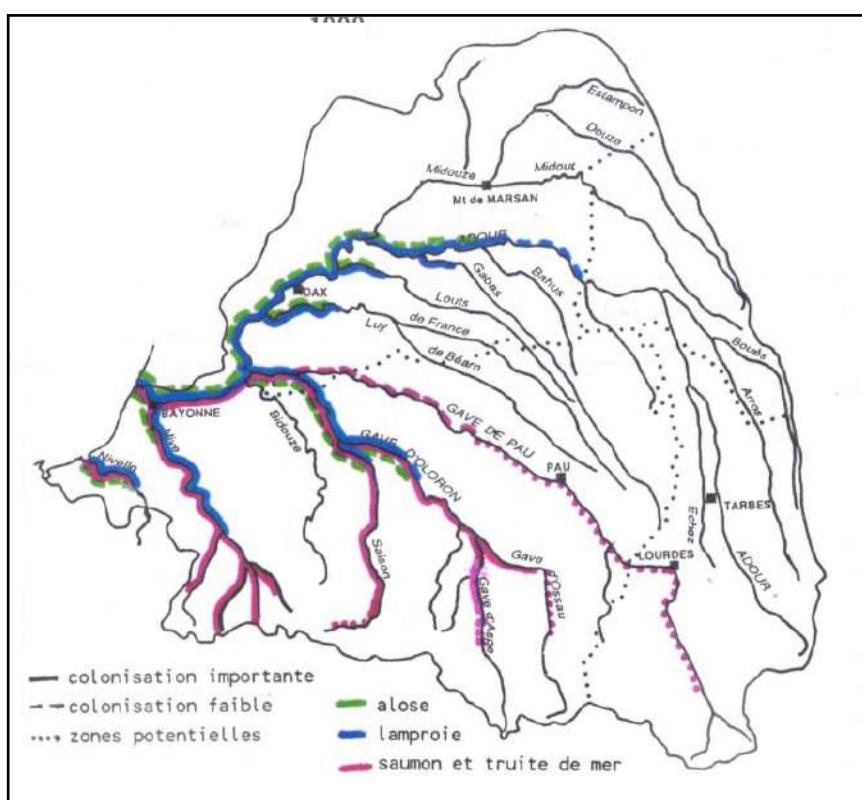
Le bassin de l'Adour est un bassin favorable aux grands migrateurs en particulier Saumon, Truite de mer, Lamproie Marine, Aloses, Anguille.

Il a la particularité d'accueillir des espèces amphihalines¹ (carte 7). Chaque espèce possède une amplitude différente de migration à l'intérieur du bassin (tableau 1).

Tableau 1 : Espèces colonisant les estuaires, amplitude et lieux de migration

¹ Espèces pouvant vivre à la fois en eau salée ou en eau douce selon son cycle biologique.

Amplitude de migration	PÉNÉTRATION	MOYENNE	FORTE
Espèces	Sole, dorade	Flet, bar, muge	Lamproie, Aloses, Anguille, Truite de mer, Saumon atlantique
Lieu de colonisation	Embouchure et partie salée de l'estuaire	Partie basse et moyenne des estuaires	Secteur de rivière plus lointain



Carte 7 : Zones de colonisation des migrants, état en 1990
(Source : Observatoire de l'eau, 1998).

1.1.4.3. Les éléments de gestion de la faune et de la flore du bassin versant de l'Adour : un milieu particulier les Barthes de l'Adour

Le bassin de l'Adour est composé de milieux spécifiques, des paysages et des milieux d'une grande variété et d'une grande richesse. L'inventaire des ZNIEFF² permet, en particulier, de classer les Barthes de l'Adour comme milieu remarquable (figure 1) :

Les Barthes sont constituées par des plaines alluviales inondables situées de part et d'autre de l'Adour et de deux de ses affluents.

Dès le XVII^{ème} siècle, ces milieux à l'origine zones régulièrement submersibles, ont été protégés des inondations et aménagés à des fins agricoles ou sylvicoles. Mais la subsistance d'un risque de crue a limité l'intensification agricole et a interdit l'urbanisation. Ainsi les Barthes sont une imbrication de milieux plus ou moins humides ou submersibles favorables à la diversité faunistique.

Elles constituent notamment un important lieu de gagnage pour les oiseaux d'eau : de nombreux limicoles et anatidés, la cigogne blanche, les fréquentent régulièrement. Parmi les autres vertébrés remarquables, on peut rencontrer : le Vison d'Europe, la Cistude, le Lézard vivipare... Les Barthes sont vouées traditionnellement à l'élevage extensif des bovins et équins ou à la production des chênes pédonculés. Les Barthes sont entièrement couvertes par les ZNIEFF de type II. Les ZNIEFF de type I se situent principalement sur la rive droite de l'Adour aval et concernent les zones marécageuses et les tourbières avec leurs faunes et flores caractéristiques (carte 8).

Certaines sont aménagées en réserve de chasse. Dans les secteurs non protégés, la pression est forte.

Ces milieux humides ont tendance à évoluer rapidement vers des conditions plus sèches par assainissement direct ou indirect et par la mise en culture.

² Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique. On distingue deux types de ZNIEFF : celles de type I qui concernent les secteurs les plus remarquables à l'intérieur de l'ensemble de type II ; et celles de types II qui sont des ensembles naturels d'intérêt écologique. Les ZNIEFF ne sont que des inventaires, elles n'offrent aucune protection réglementaire.

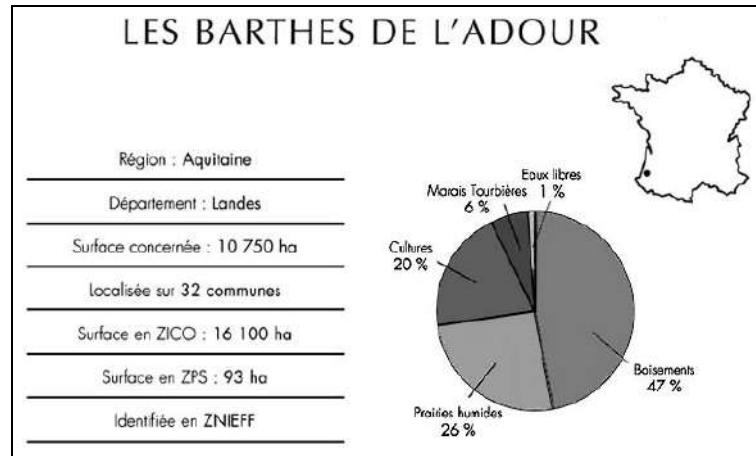


Figure 1 : Les Barthes de l'Adour (Source: site du ministère de l'écologie et du développement durable)

Les Barthes de l'Adour sont répertoriées comme site Natura 2000. Le réseau Natura 2000 a pour objectif de contribuer à préserver la diversité biologique sur le territoire de l'Union Européenne. Il assure le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des habitats naturels et des habitats d'espèces de la flore et de la faune sauvage d'intérêt communautaire. Il est composé de sites désignés spécialement par chacun des Etats membres en application des directives européennes dites "Oiseaux" et "Habitats" de 1979 et 1992. Sa création contribue, en outre, à la réalisation des objectifs de la convention sur la diversité biologique adoptée au "Sommet de la Terre" de Rio de Janeiro en juin 1992.

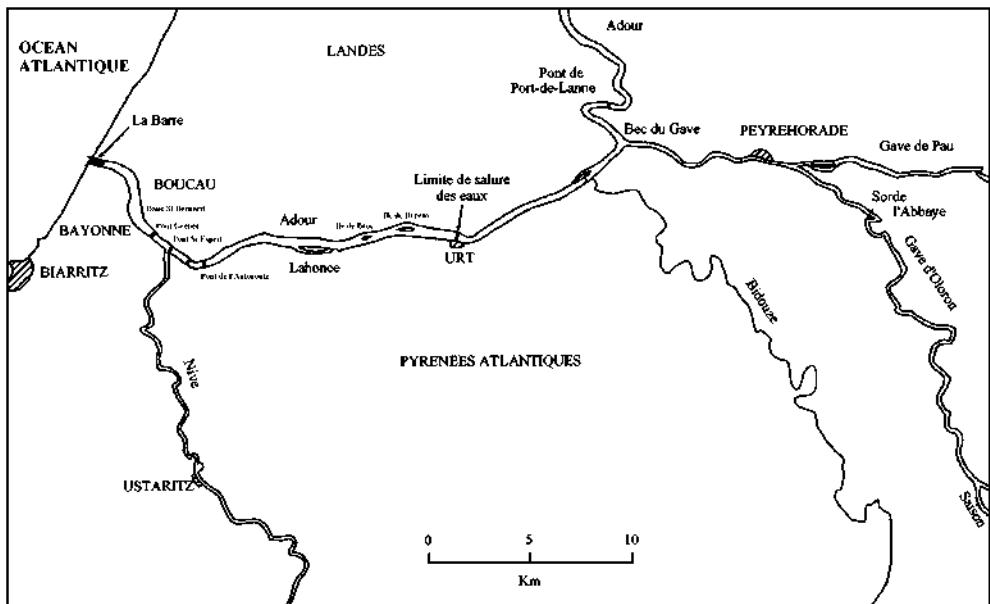


Carte 8 : Les barthes de l'Adour, site Natura 2000 (Source site du ministère de l'écologie et du développement durable)

1.2. L'entité littorale : la zone estuarienne (de l'embouchure jusqu'au Bec des Gaves)

1.2.1. Caractéristiques morphologiques et bathymétriques de l'estuaire

L'Adour se jette dans l'Océan Atlantique et rejoint le golfe de Gascogne à Bayonne après un parcours de 312 km depuis le Pied du Pic du Midi dans les Pyrénées. Ses principaux affluents sont le Gave de Pau, le Gave d'Oloron, la Nive et le Luy (carte 9).



Carte 9 : Estuaire de l'Adour.

L'embouchure de l'Adour se situe à 43°30 de latitude Nord et 1°32 de longitude Ouest. La largeur de l'estuaire au niveau de l'embouchure n'excède pas 150 m avec des fonds de 12 m en moyenne.

Dans sa partie basse, l'estuaire présente un chenal régulier caractérisé par des fonds qui varient entre 8 et 15 m (figure 2). La partie la plus large se situe au niveau du banc Saint Bernard (600 m environ). La partie la plus profonde se situe au niveau du Pont Saint-Esprit localisé à 7 km de la mer avec l'existence d'un seuil d'une dénivellation de 10 m (figure 3) qui matérialise l'assise du pont.

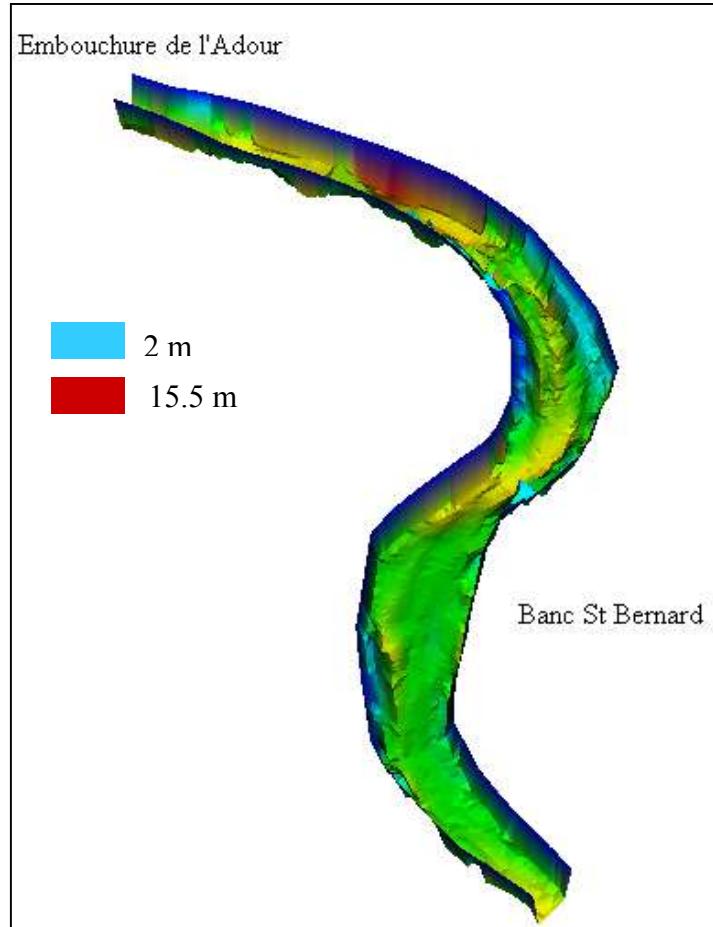


Figure 2 : Bas estuaire : embouchure – banc Saint Bernard

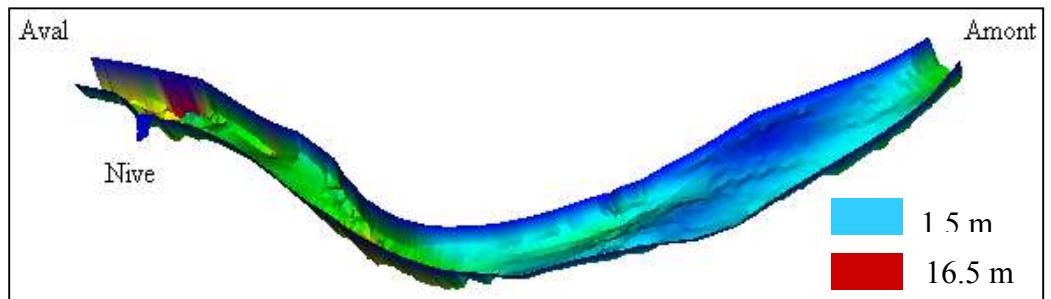


Figure 3 : Bas estuaire : Pont Saint-esprit – "Produits chimiques".

L'estuaire de l'Adour est entrecoupé d'îles entre Bayonne et Urt. L'île de Lahonce située à 14 km de la mer en rive gauche entraîne un rétrécissement de la section. La profondeur maximale est de 8 m environ (figure 4).

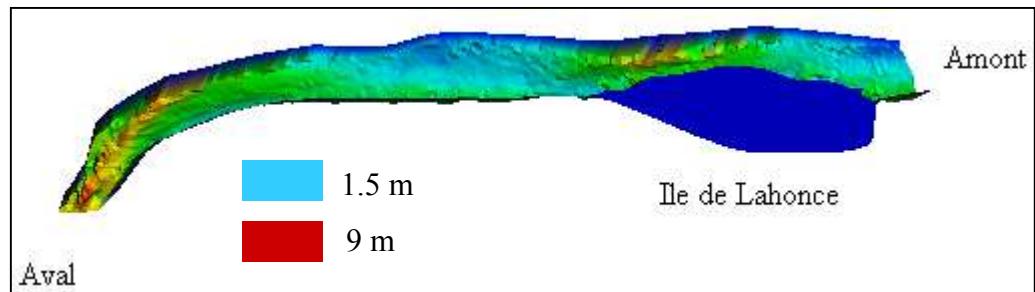


Figure 4 : Bas estuaire : Bâcheforêt – Île de Lahonce.

Le chenal est ensuite divisé en deux par l'île de Broc (longueur 600 mètres), puis par l'île de Berenx (longueur 1 km). L'île de Broc présente en rive gauche une profondeur de 8 m (figure 5). En amont, les fonds remontent de façon assez importante. Au niveau de l'île de Berenx, le bras principal est celui situé en rive gauche avec une profondeur importante de 13 m. Il s'agit d'une des zones les plus profondes de l'Adour (figure 5).

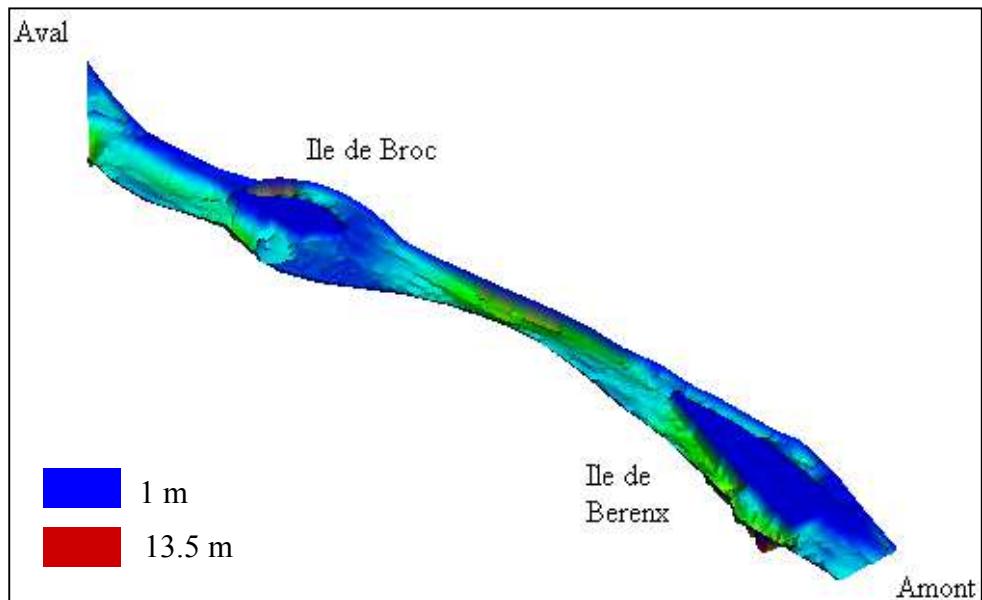


Figure 5 : Estuaire amont : Île de Broc – Île de Berenx

L'Adour se rétrécit à nouveau au niveau du pont d'Urt (P.K.³. 22) pour atteindre une largeur de 150 mètres (figure 6). La zone la plus profonde est située au niveau du pont d'Urt (15 m environ). La zone plus en amont est de largeur assez régulière jusqu'au Bec des Gaves et comprise entre 170 et 350 mètres (figure 7).

³ P.K. : Point kilométrique, représente la distance par rapport à l'embouchure

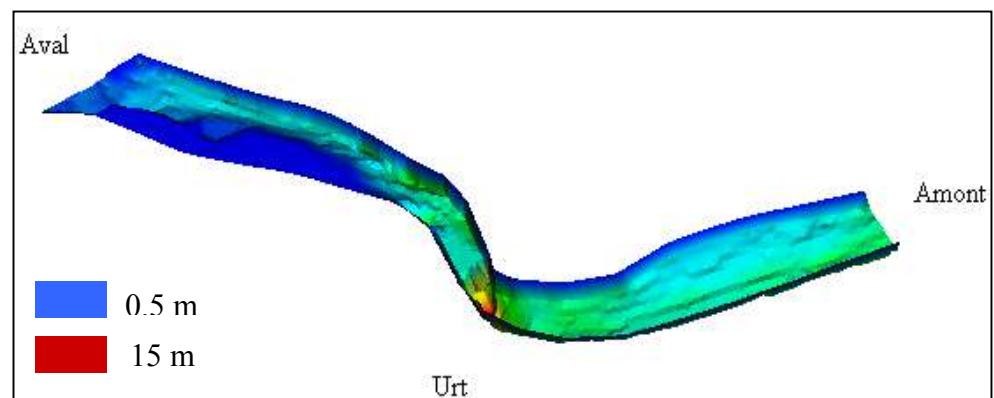


Figure 6 : Estuaire amont : Pont d'Urt.

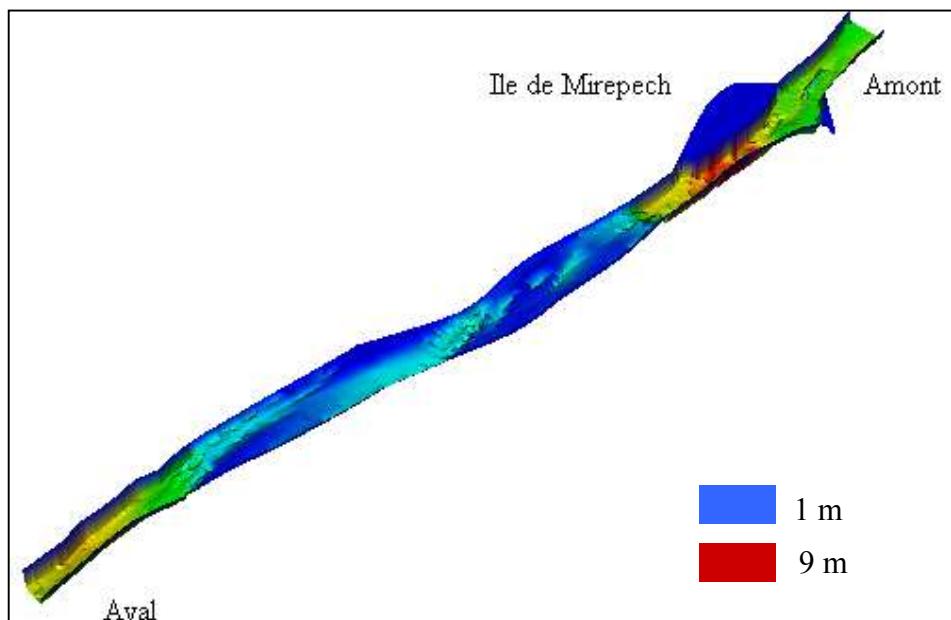


Figure 7 : Estuaire amont : Ile de Mirepech.

1.2.2. Hydrologie

L'Adour et ses affluents sont très dispersés et ne se rejoignent qu'à l'approche de l'océan (Snoussi, 1988). De ce fait, les débits sont pour la plus grande partie des cours d'eau relativement faibles, sauf dans la zone estuarienne. Les Gaves ont un régime nivo-pluvial avec des débits *maxima* en mai, parfois en juin, et des périodes d'étiage en hiver et en été (figure 8). Le gave de Pau présente un débit moyen de $82,3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (sur la période 1923-2002), le gave d'Oloron un débit moyen de $102 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (sur la période 1922-2002). La Nive et le Luy sont de plus petits affluents avec respectivement des débits moyens de $31,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (sur la période de 1967-2001) et de $19 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (sur la période de 1967-2002). Ils ont des débits *maxima* en avril et *minima* en août (figure 8).

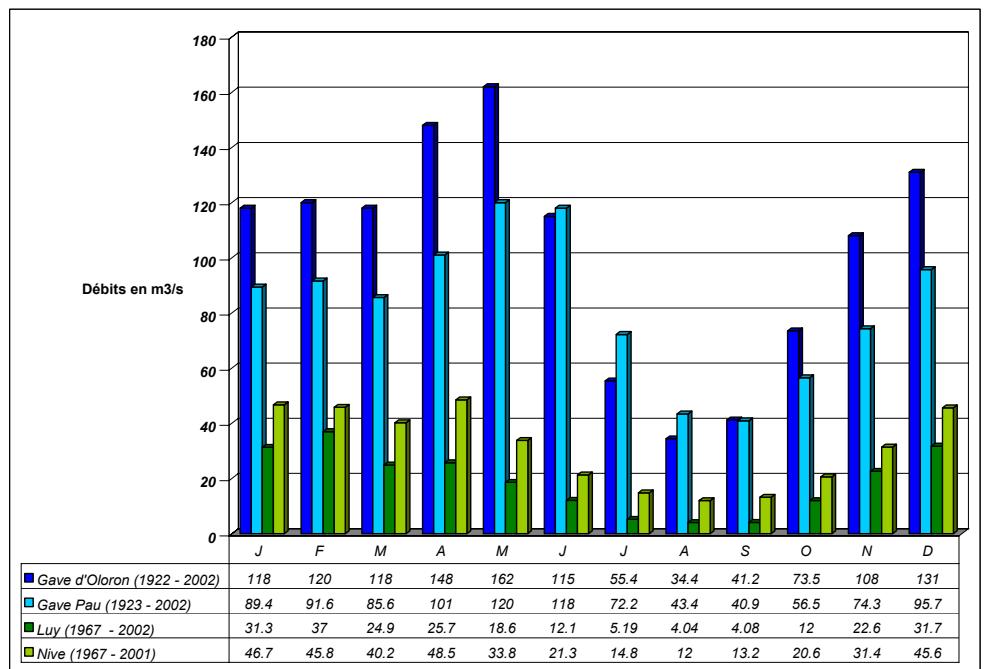


Figure 8 : Débits moyens mensuels des affluents de l'Adour (source Banque Hydro).

Le débit moyen de l'Adour en aval de la confluence de la Nive est de $275 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (période 1949-1992). L'étiage a généralement lieu en août et en septembre (figure 9). En moyenne, il y a trois crues supérieures à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ dans l'année : deux en hiver (en novembre/décembre et en janvier/février) et une au printemps (en avril/mai voire en juin).



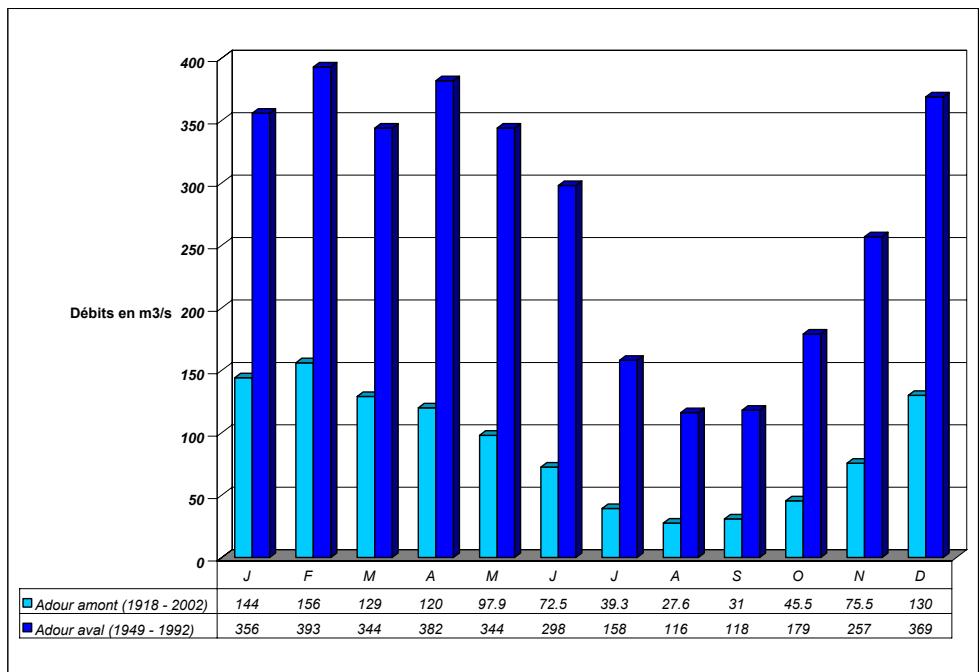


Figure 9 : Débits moyens mensuels de l'Adour amont à Saint Vincent-de-Paul et en aval (source Banque Hydro).

1.2.3. Caractéristiques de la marée

Dans le golfe de Gascogne, la marée est de type semi-diurne avec une période moyenne de 12 heures 25 minutes. La marée dynamique peut se faire sentir sur l'Adour jusqu'à Dax (P.K. 68), dans les Gaves Réunis jusqu'à Peyrehorade (P.K 40) et dans la Nive jusqu'au barrage de Haitze (P.K. 13) (Snoussi, 1988). Notons que la pénétration de l'eau de mer proprement dite correspond à la marée saline dont la limite se situe bien en deçà de celle de la marée dynamique. La limite de remontée de la salinité peut varier de façon importante en fonction du débit et des coefficients de marée. Sur l'Adour, la limite extrême (en période d'étiage) se situe au niveau du pont d'Urt (P.K. 23).

A l'influence de la marée astronomique décrite ci-dessus viennent s'ajouter les effets de la houle et du vent. L'embouchure de l'Adour est le siège d'une agitation résiduelle de la houle surtout quand celle-ci est de secteur ouest/sud-ouest et ouest/nord-ouest (dans 51,3 % des cas) (tableau 2).

Tableau 2 : Pourcentage des houles en fonction des directions à l'embouchure
(Anonyme 1995).

Direction	ouest	ouest/nord-ouest	nord-ouest	nord/nord-ouest	Indéterminée
Fréquence (%)	4	51,3	27,2	1,2	16,3

En période estivale 95% des houles présentent une hauteur inférieure à deux mètres tandis qu'en hiver 5 à 10% sont supérieures à quatre mètres. La houle peut engendrer, dans la zone comprise entre le déferlement et la côte, une surélévation du niveau moyen de la mer du 1/20 au 1/10 de la hauteur de la houle. Les courants de houles sont également à l'origine de courants de diffraction et d'expansion latérale qui atteignent en moyenne 1 à 1,5 m.s⁻¹. Au jusant, ils sont orientés sud-nord et plutôt nord-ouest et nord-est au flot (De Casamajor, 1998).

Le vent peut également influer sur le mélange des eaux marines et fluviales, lorsqu'il est orienté de la terre vers la mer avec une force supérieure à 10 m.s⁻¹. La majorité des vents sont de secteur sud/sud-ouest (Anonyme, 1995) et d'une force inférieure à 10 m.s⁻¹.

Depuis l'aménagement du chenal dans les années 1960, pour un débit de 80 m³.s⁻¹ et une marée de vive-eau moyenne, le volume d'eau oscillant⁴ à l'embouchure serait de l'ordre de 30 millions de m³ introduits et 33 millions de m³ évacués (Anonyme, 1995).

1.2.4. Propagation de la marée en estuaire

La subdivision hydraulique de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) du département des Pyrénées Atlantiques a collecté une base de données à partir des mesures des marégraphes situés de l'embouchure jusqu'à Dax. L'étude d'un certain nombre de ces données issues de trois marégraphes situés à l'embouchure, à Urt et à Dax permet de mettre en évidence certaines caractéristiques de la propagation de la marée dynamique sur l'Adour. La propagation de l'onde de marée dans l'estuaire est présentée pour un débit moyen et des coefficients de marées moyens et forts (figure 10). Les résultats obtenus avec des débits faibles ou forts sont en annexe 1.

⁴ Volume d'eau qui remonte l'Adour en marée montante et qui est restitué en marée descendante.

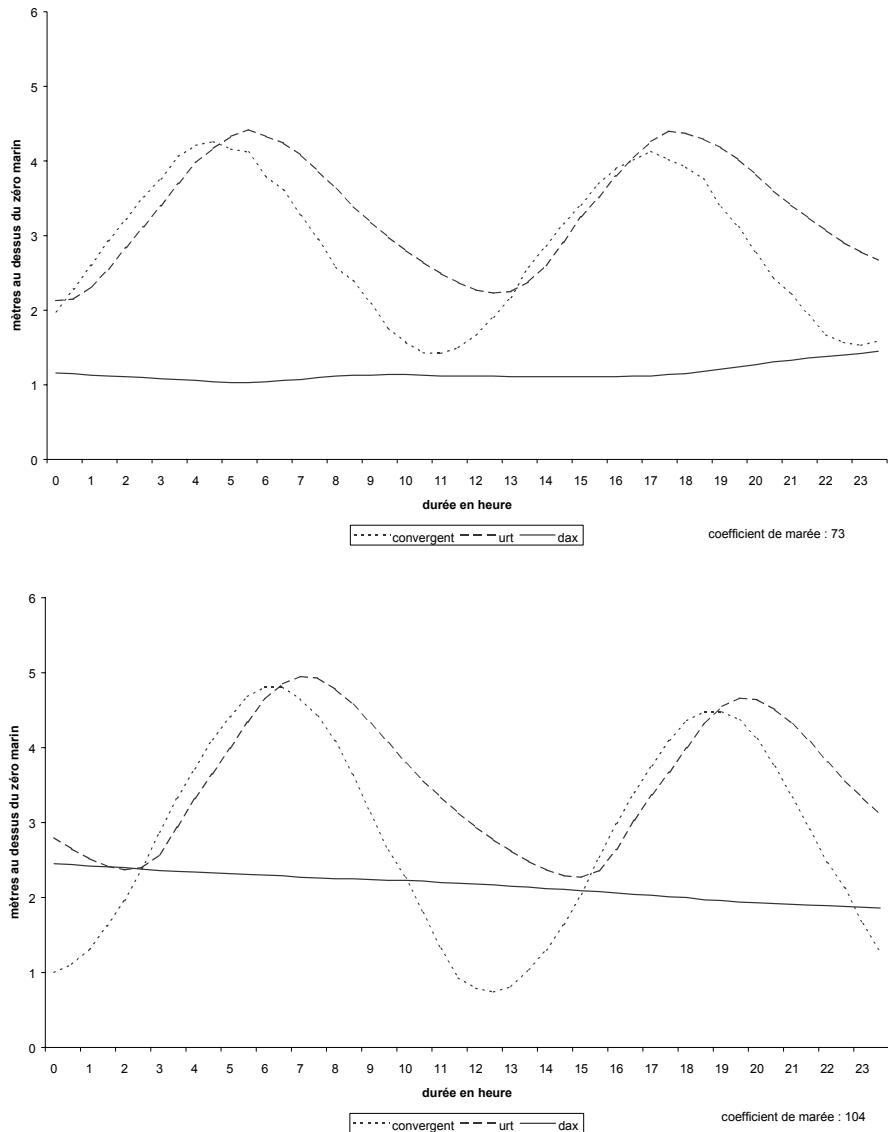


Figure 10 : Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique pour un débit de 430 à $510 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (d'après les données fournies par la subdivision hydraulique de la DDE 64).

Quel que soit le débit de l'Adour et pour des coefficients de marée croissants, la durée du flot peut diminuer jusqu'à deux heures, entre l'embouchure et Urt (station située à 20 km plus en amont) (tableau 3).

Tableau 3 : Comparaison de la durée du flot entre l'embouchure de l'Adour et une station située à 20 km plus en amont selon différentes conditions de débits et de coefficient de marée.

	Coefficient de marée	Durée du flot	
		Embouchure	Urt (20 km de l'embouchure)
Débit faible $214 \text{ à } 235 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	40	6h30	6h00
	68	6h30	5h00
	98	6h30	5h00
Débit moyen $430 \text{ à } 510 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	73	6h00	5h00
	104	6h00	4h30
Débit fort $910 \text{ à } 1190 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	45	6h30	5h30
	96	6h30	4h30

Pour tous les débits considérés, on observe une déformation de l'onde de marée entre l'embouchure et Urt (figure 11). Il faut selon les coefficients, deux à trois heures à la marée dynamique pour se faire ressentir au niveau de cette station. Pour que la marée dynamique ait une réelle influence sur le niveau d'eau à Dax, il faut que le coefficient soit important et le débit faible. Dans les autres cas de figure, seules les variations de débit ont une réelle influence.

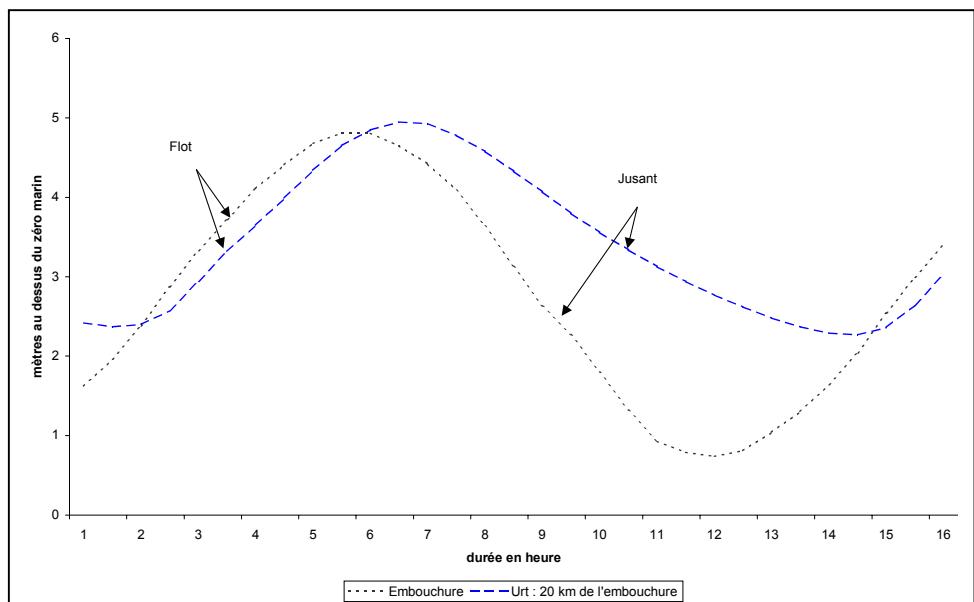


Figure 11 : Propagation de l'onde de marée sur l'Adour de l'embouchure à Urt (20 km plus en amont) pour un débit moyen de $430 \text{ à } 510 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et un coefficient de marée de 104, le 12 janvier 2001 (réalisé avec les données fournies par la subdivision hydraulique de la DDE 64).

1.2.5. Stratification des masses d'eau

L'étude effectuée par De Casamajor (1995) sur l'évolution du front de salinité permet de définir à quel type d'estuaire appartient l'Adour. Les mesures sont effectuées sur différentes stations réparties sur une zone allant de l'embouchure jusqu'au deuxième pont urbain (figure 12).

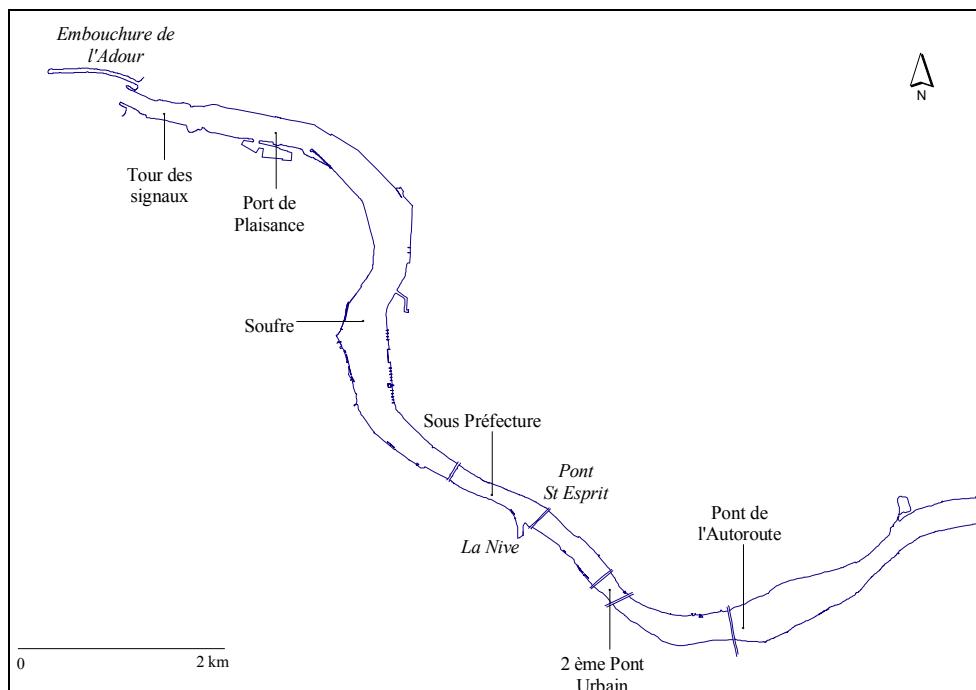


Figure 12 : Carte de localisation des stations d'échantillonnage sur l'estuaire de l'Adour pour la campagne de mesures de salinité et de température.

Pour un coefficient de marée moyen, l'entrée des eaux marines forme un front de salinité qui remonte jusqu'au niveau de la sous-préfecture. Au-delà les eaux marines continuent à remonter progressivement sans formation de coin salé (figure 13).

A - Tour des Signaux B - Port de plaisance C - Soufre D - Sous-préfecture E - 2^{ème} pont urbain

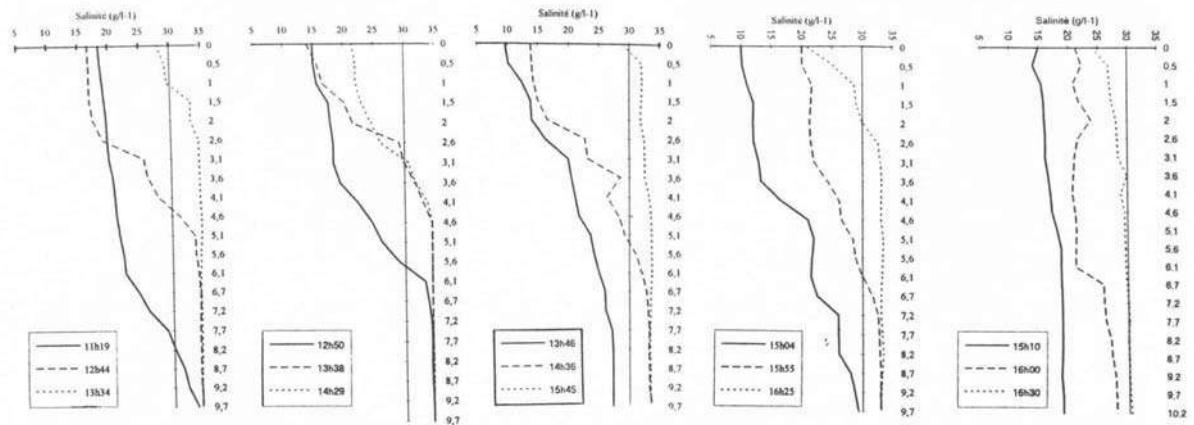


Figure 13 : Évolution du front de salinité en fonction de l'heure et de la profondeur le 24 août 1995 (basse mer : 10h18 : coefficient : 71 et débit : $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) pour les stations de la Tour des Signaux, du Port de plaisance, du Soufre, de la Sous-Préfecture et du 2^{ème} pont urbain.

Pour un même débit mais un coefficient de marée plus important, le front ne remonte pas au-delà du pont Saint-Esprit (figure 14). Plus en amont, les eaux marines progressent, mais de façon homogène sur toute la colonne d'eau. Ceci s'explique par la présence, au niveau du pont Saint-Esprit, d'un seuil à forte dénivellation résultant d'imposantes piles de pont et de la confluence de la Nive.

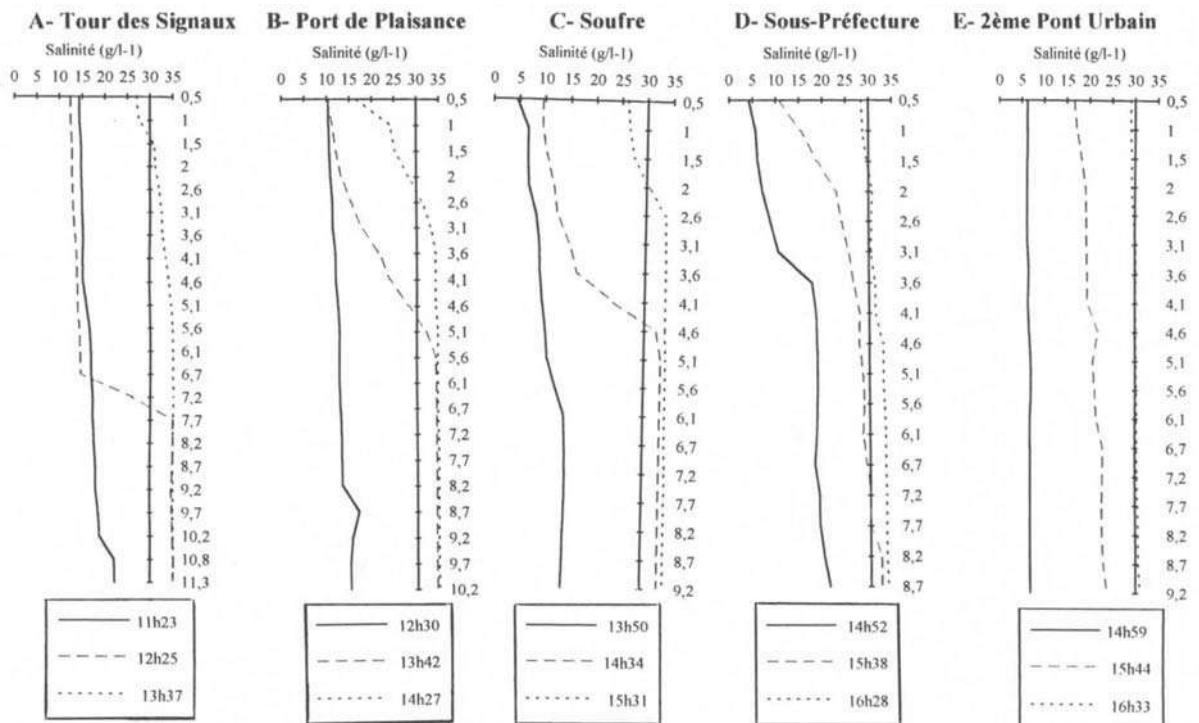


Figure 14 : Évolution du front de salinité en fonction de l'heure et de la profondeur le 9 octobre 1995 (basse mer : 10h35 ; coefficient : 98 et débit : $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pour les stations de la Tour des Signaux, du Port de plaisance, du Soufre, de la Sous-Préfecture et du 2^{ème} pont urbain.

Dans le cas d'un débit plus important et d'un coefficient de marée relativement faible, la couche de surface reste toujours faiblement salée. Ainsi la stratification des eaux est bien marquée même sur les stations situées en amont (figure 15).

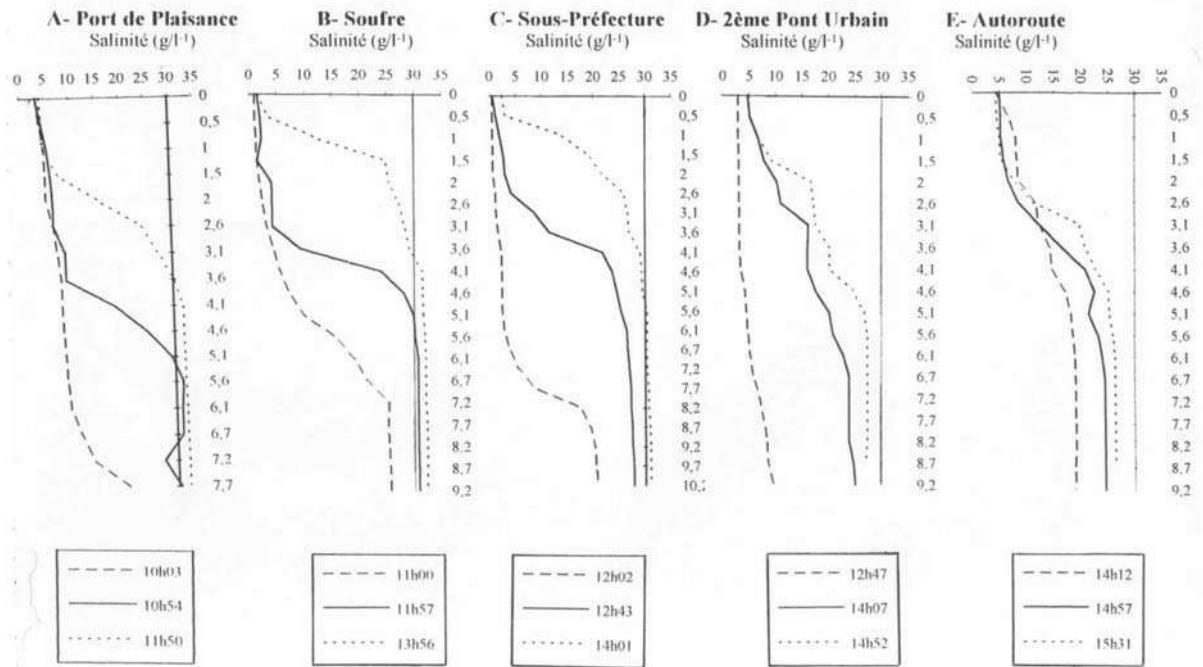


Figure 15 : Évolution du front de salinité en fonction de l'heure et de la profondeur le 31 janvier 1996 (basse mer : 8h01 ; coefficient : 43 et débit : $252 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pour les stations de la Tour des Signaux, du Port de plaisance, du Soufre, de la Sous-Préfecture et du 2^{ème} pont urbain.

Il semble que l'estuaire de l'Adour s'apparente à un estuaire à coin salé avec marée jusqu'au pont Saint-Esprit. À partir de ce dernier, les masses d'eau sont homogènes, sous l'influence des piles de pont et de la forte dénivellation. L'estuaire, en amont du pont Saint-Esprit, s'apparente plus à un estuaire homogène par débits faibles.

2. Description des outils de collecte de données des campagnes expérimentales et base de données

2.1. Collecte des données des campagnes expérimentales

Les campagnes d'échantillonnage réalisées en 1996/1997 et 1997/1998 avaient pour objectif de caractériser le comportement des civelles en fonction des conditions environnementales : comportement horizontal de migration en fonction des caractères hydrodynamiques de l'estuaire et le comportement vertical de migration en fonction de la pénétration de la luminosité nocturne dans la colonne d'eau (turbidité, phase lunaire et nébulosité). Les travaux de Casamajor (de) et al, (1999) analysent en détail le comportement migratoire des civelles issues des données de ces campagnes.

Dans le présent rapport, nous présentons uniquement les campagnes réalisées entre 1999 et 2002.

Ces campagnes ont pour objectif d'estimer la biomasse des flux migratoires de civelles qui transitent dans l'estuaire de l'Adour. L'échantillonnage se déroule toujours en zone de propagation de marée dynamique dans le même secteur géographique.

La campagne 2002 a pour objectif d'étudier la répartition des densités de civelles au sein de la veine d'eau et de voir dans quelle mesure cette répartition est influencée par l'hydrodynamisme estuarien. L'influence de l'hydrodynamisme est étudiée avec un modèle bi-dimensionnel mis au point par l'UPPA et validé par le biais de mesures de courantométrie.

L'utilisation d'appareils de mesure de haute technicité (thermosondes, salinomètre, GPS...) permet l'acquisition de données environnementales précises pour caractériser le milieu au moment des captures. Les variations des densités de civelles observées en différents points de l'estuaire au cours de la saison de migration peuvent être comparées aux fluctuations des paramètres environnementaux. En complément, les services administratifs communiquent les informations hydrodynamiques qui ne sont pas récoltées lors de la campagne (débit fluvial et coefficient de marée). Le protocole d'échantillonnage mené sur l'Adour a été possible grâce à une collaboration technique entre organismes de recherche : l'IFREMER/TMSI; l'IFREMER/DEL et le laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.



2.1.1. Présentation et localisation des stations échantillonnées

Campagne 1998/1999

Lors de cette saison de migration la station choisie est celle de Lahonce (figure 16 : $43^{\circ}29'80''$ N et $1^{\circ}23'10''$ O). Cette station a été déterminée en fonction de plusieurs facteurs et de profondeurs suffisantes pour permettre l'immersion simultanée des engins de pêche à deux niveaux différents. La section de l'estuaire étroite au niveau de Lahonce permet d'augmenter la précision de l'information par extrapolation des transects à l'ensemble de la section. Cette station a été prospectée 16 fois entre janvier et mars 1999.

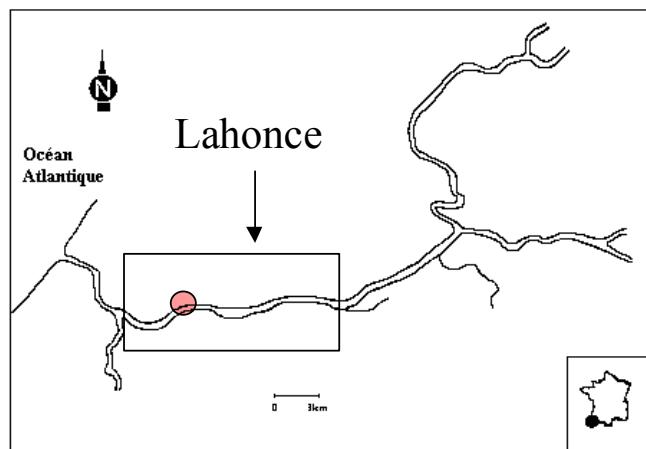


Figure 16 : Localisation de la station échantillonnée pendant la saison de migration 1998/1999.

Campagne 1999/2000 et 2000/2001

Pour évaluer l'intensité des flux en migration au cours du flot, il est apparu nécessaire de se positionner au même endroit dans l'estuaire pendant la durée de la propagation de la marée. Pour les saisons de pêche 1999/2000 et 2000/2001, la station d'échantillonnage est celle de l'île de Berenx située à $43^{\circ}30'15''$ N et $1^{\circ}20'30''$ O (figure 17). Elle présente les mêmes caractéristiques que celle de Lahonce. Cette station a été prospectée pour la saison 1999/2000 12 fois entre décembre et mars et pour la saison 2000/2001, 12 fois également entre décembre et février.

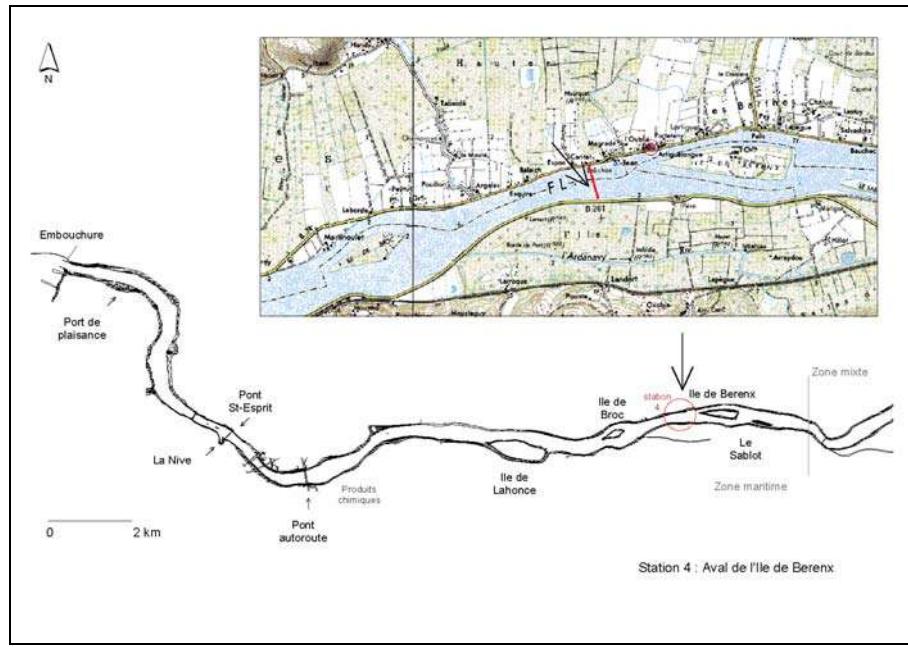


Figure 17 : Localisation de la station échantillonnée pour les campagnes de pêche 1999/2000 et 2000/2001.

Campagne 2001/2002

La campagne 2002 est effectuée sur différentes stations au cours du flot (figure 18) de l'aval vers l'amont. L'objectif est de mesurer le lien entre hydrodynamisme et dissymétrie des densités de civelles.

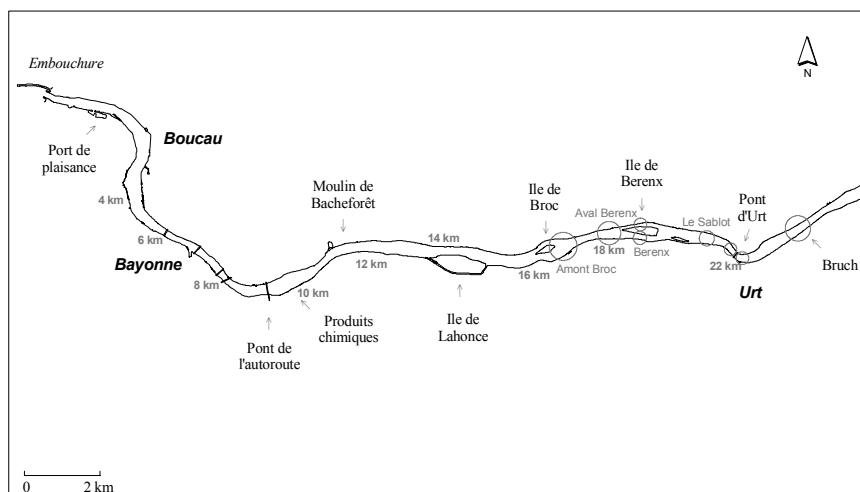


Figure 18 : Localisation des différentes stations échantillonnées durant la campagne de pêche 2001/2002.

2.1.2. Protocole d'échantillonnage dans l'estuaire

Campagne 1998/1999, 1999/2000 et 2000/2001

Les prélèvements s'effectuent à l'aide de deux embarcations motorisées (photos 1 et 2). Trois transects par station, un sur chaque rive et un au milieu de l'estuaire, déterminent la répartition transversale des individus en surface et en profondeur. Chaque transect dure 5 mn, le cap et la vitesse sont constants (transects parallèles à l'axe du fleuve à une vitesse au minimum de 1 nœud).



Photo 1 : Embarcation principale



Photo 2 : Embarcation secondaire

Campagne 2001/2002

La prospection s'effectue sur plusieurs stations localisées en zone maritime de l'aval vers l'amont entre l'île de Broc et en amont du Pont d'Urt (figure 18 et tableau 4). Chaque station est échantillonnée au moment de l'équilibre des masses d'eau. La vitesse de propagation du courant de flot permet d'échantillonner 4 stations (cinq au maximum).

Par station, deux transects sont réalisés, un en rive droite et un en rive gauche à la fois en surface et en profondeur (figure 19). Ils sont effectués sur une distance d'environ 400 mètres, ce qui représente une durée moyenne par transect de neuf minutes. Le cap et la vitesse sont constants (transect parallèle au fleuve et vitesse de l'ordre de 2 nœuds).



Ifremer

Étude sur la civelle (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour :
Pêche, biologie, comportement, modélisation hydrodynamique et comportementale, estimation
des flux

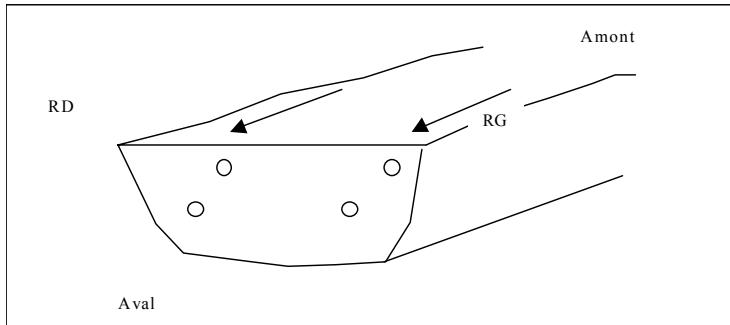


Figure 19 : Représentation schématique du protocole d'échantillonnage au niveau d'une station (RD : Rive Droite, RG : Rive Gauche). Les cercles représentent l'emplacement des tamis de surface et de profondeur.

Tableau 4 : Localisation des stations échantillonnées

Km de l'embouchure	Nom	21/11/2001 au 03/01/2002	09/01/2002 au 21/02/2002
17	Amont île de Broc		X
18	Aval île de Berenx		X
19	Ile de Berenx		X
21	Le Sablot	X	X
22	Aval du pont d'Urt	X	
23	Amont du pont d'Urt	X	
24	Bruch	X	

Prélèvements en surface

Les prélèvements de surface sont effectués à partir d'un bateau à coque plastique de 6,7 mètres de type Rio 650 avec un moteur de 100 CV. Le filet utilisé est un filet de surface circulaire de 0,65 mètres de diamètre, communément appelé "pibalour". Il est immergé sur bâbord à l'aide d'un treuil. Le filet mesure 2,4 mètres de long et présente une maille carrée de 1,6 mm au cône d'entrée puis de 1 mm au cylindre de collecte.



Photo 3 : Matériels de prélèvement.

Prélèvements en profondeur

Pour des raisons de maniabilité, les prélèvements en profondeur sont réalisés grâce à un deuxième bateau remorqué par le premier (figure 20). Il s'agit d'un bateau pneumatique de quatre mètres de long. Le "pibalour", semblable à celui utilisé en surface, est relié à l'embarcation principale par un câble. Il est maintenu par un opérateur et immergé le plus près possible du fond en fonction de la topographie du site. La profondeur maximale d'immersion possible est de sept mètres. Une sonde placée à l'entrée du tamis permet de connaître la température, la profondeur et la salinité.

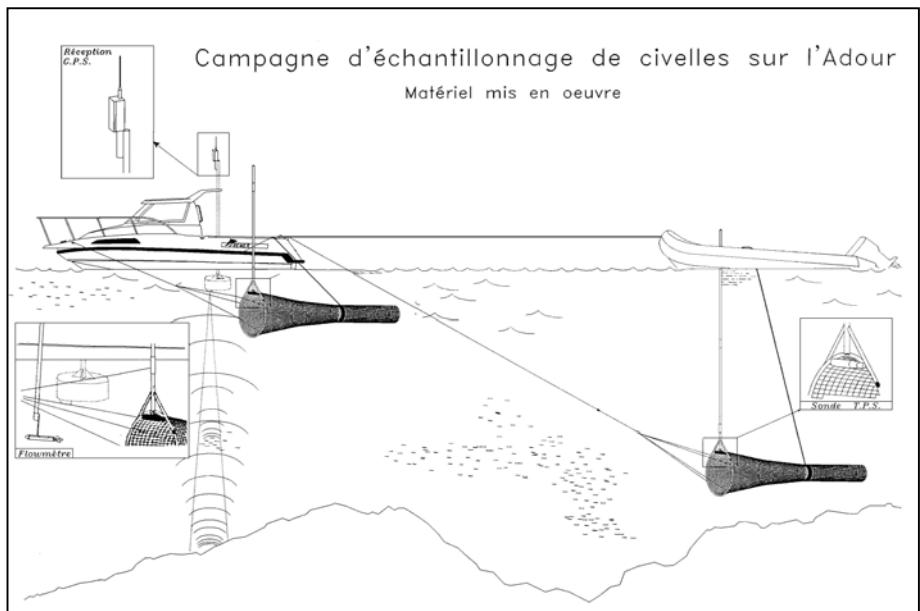


Figure 20 : Mise en œuvre du matériel pendant les campagnes d'échantillonnage 1999/2000 et 2000/2001.

2.1.3. Paramètres étudiés

2.1.3.1. Paramètres environnementaux

L'eau salée arrive dans ce secteur progressivement, sans stratification de la colonne d'eau (de Casamajor, 1995). La marée saline ne parvient jamais dans la zone échantillonnée au moment des prélevements. La majorité des sorties a lieu la nuit, pendant le flot, dans des conditions variables de coefficients de marée. Quelques sorties ont lieu à la tombée de la nuit ou au lever du jour. Elles ne révèlent aucun mouvement migratoire, aucune civelle n'a été capturée de jour en surface ou en pleine eau.

La campagne 1998/1999 débute en janvier jusqu'au mois de mars au rythme de deux sorties par semaine, 16 sorties ont été effectuées. Les deux dernières saisons ont permis de réaliser 12 sorties chacune, de décembre à mars en 1999/2000 et de décembre à février pour 2000/2001. Le début et la fin de saison ne sont pas échantillonnés car les densités dans l'estuaire sont généralement trop faibles. Un certain nombre de paramètres physico-chimiques sont pris en compte au cours des sorties pour caractériser au mieux les conditions de captures des civelles. Saison après saison, l'acquisition de ces paramètres a été adaptée et améliorée grâce aux observations de terrain. Nous décrivons ici les différents appareils de mesures utilisés au cours de ces saisons de migration permettant de constituer la base de données.

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Mesure de turbidité

La turbidité est mesurée près des berges pour vérifier l'homogénéité sur les 3 transects d'une même station. Après cette vérification, une mesure est réalisée par station.

Campagne 1998/1999 - Un turbidimètre avec un capteur optique (type TU-C avec capteur TUNA S10 de chez Poncelle. Longueur d'onde d'émission/réception $\lambda_0 = 950$ nm infra-rouge) sur 10 m de câble est immergé sur chaque station au niveau du chenal de l'estuaire. Une mesure est relevée en surface et une en profondeur. Les valeurs s'expriment en NTU (Nephelometric Turbidity Unit - 1NTU = 1 mg.l⁻¹), le degré de précision est de +/- 1 NTU. Les données recueillies reflètent l'intensité de la lumière nocturne qui pénètre dans la colonne d'eau.

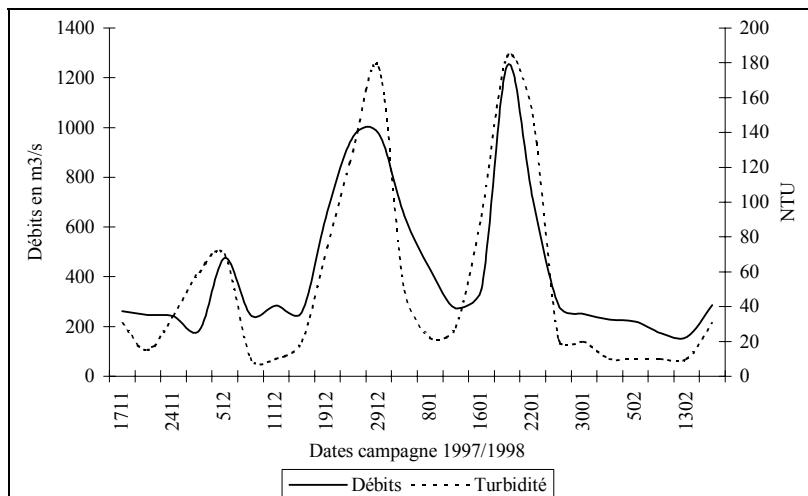


Figure 21 : Relations entre les fluctuations de la turbidité et du débit fluvial.

La turbidité et le débit fluvial sont deux variables fortement corrélées (figure 21). La turbidité est utilisée pour évaluer la pénétration de la luminosité nocturne. Le débit fluvial est une composante hydrodynamique modifiant la courantologie et les déplacements de civelles vers l'amont.

Campagnes 1999/2000 et 2000/2001 - Un nouveau capteur est utilisé (AANDERAA Instruments type 3712), il enregistre à la fois la température et la turbidité. Il émet une lumière de type infra-rouge par une DEL (Diode Émettrice de Lumière). Une photodiode permet la détection de la lumière dispersée par les particules en suspension dans l'eau. L'unité de mesure utilisée est la NTU et la gamme de mesures est comprise entre 0 et 500 NTU avec une précision de +/-2%.

Vitesse du courant

Campagnes 1998/1999, 1999/2000 - La vitesse du courant est calculée à partir de la vitesse surface mesurée avec le fluxmètre qui est retranchée à la vitesse fond donnée par le GPS.



Photo 4 : Fluxmètre

Un fluxmètre (General Oceanics, type 2030R) mesure la vitesse à l'entrée du tamis de surface (sur bâbord), au moment du transect et à vitesse constante (photo 4). Ces mesures sont indispensables pour calculer le volume d'eau filtrée lors de chaque trait de tamis afin de calculer les densités de civelles à partir du poids capturé.

Campagnes 2000/2001 - En plus de l'utilisation du fluxmètre, la mise en œuvre d'un courantomètre doppler (AANDERAA Instruments type DCS 3500) couplé avec le capteur de turbidité et de température, permet de connaître à la fois la direction et la vitesse du courant. Le calcul de la vitesse et de la direction du courant se fait par l'émission d'un signal acoustique, les ondes sont réverbérées sur des particules en suspension (plancton, particules fines d'origine minérale...). La gamme de mesure et la précision de cet appareil sont pour la vitesse de 0 à 500 cm.s⁻¹ (+/-2%) et pour la direction du courant de 0 à 360° (+/-5°).

Depuis la campagne 2000/2001, la connexion du courantomètre doppler et du turbidimètre permet la lecture de l'ensemble des données (vitesse du courant, direction du courant, turbidité et température) sur un boîtier de lecture (Display Unit type 3315) (figure 22). Le stockage des données et l'enregistrement (pas de temps = 1 minute) se fait sur une unité de stockage (Data Storage Unit 2990E). Cette unité est reliée à un boîtier de lecture (DSU Reader 2995), puis à un PC au laboratoire pour l'archivage dans la base de données.

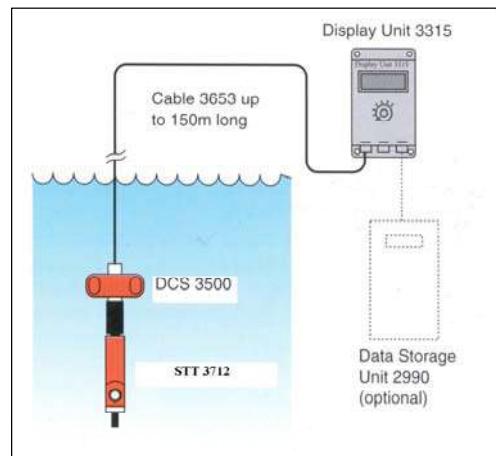


Figure 22 : Conditions d'utilisation du courantomètre doppler et du turbidimètre. (d'après document Aanderaa)

Température et salinité

Une sonde de type TPS35 de chez Micrel (température Profondeur Salinité utilisable entre 0 et 35 m de profondeur) donne la température ($+/- 0,1^{\circ}\text{C}$) et la salinité ($+/- 0,1 \text{ g.l}^{-1}$) en fonction de la profondeur ($+/- 0,5 \%$). Cette sonde (photo 5) effectue des enregistrements à un pas de temps déterminé par l'opérateur. Elle est ici programmée pour réaliser une mesure par seconde. On obtient, lors de chaque immersion, un profil des fluctuations thermo-halines sur la colonne d'eau pour détecter une éventuelle stratification des eaux marines et fluviales. Elle indique également la profondeur de prélèvement des individus par le tamis. L'utilisation d'un crayon optique (photo 6) permet de transférer les données vers un PC pour l'archivage.

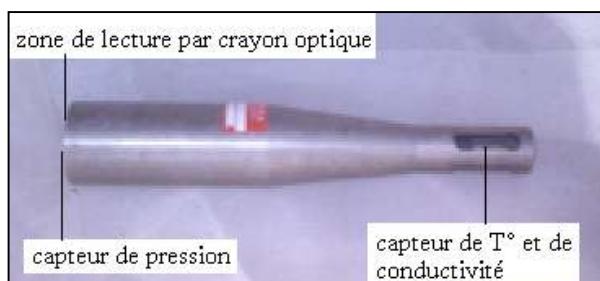


Photo 5 : Sonde TPS utilisée sur le tamis de fond pendant les campagnes civelles.

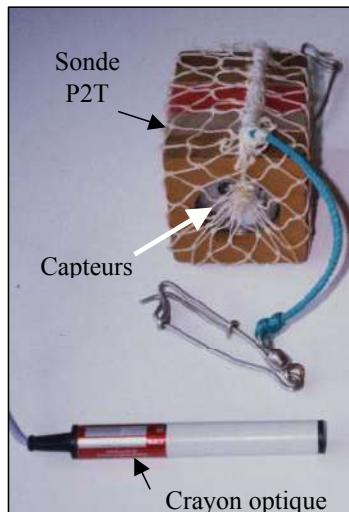


Photo 6 : Sonde P2T300 fixée à Urt pour les mesures en continu de la température des eaux estuariennes

Une sonde du même type, mais mesurant seulement la température et la profondeur (type P2T300 de chez Micrel utilisable entre 0 et 300 m de profondeur) est installée à poste fixe à Urt pour permettre un enregistrement en continu des données de température (photo 6). Cette sonde a été programmée pour réaliser une mesure par heure. Elle permet ainsi de suivre l'évolution journalière de la température de l'eau sur l'ensemble de la saison de migration de la civelle. Précision de température +/- 0,1°C et de profondeur +/- 0,5%.

Position dans l'estuaire

Le positionnement du bateau est assuré par un GPS de type NR58 de chez Sercel-Dassault (5 canaux de réception) équipé d'une antenne de correction différentielle dans la bande MF et HF (moyenne et haute fréquence). Une balise de type NDR104 de chez Sercel permet de traiter les corrections reçues dans la bande des ondes UHF (1575,42 MHz). Elle augmente la précision sur le positionnement (de 0,5 à 1 m) grâce à la réception d'une station de référence à terre des services maritimes de la Direction Départementale de l'Equipement. Cette station se localise à l'embouchure de l'estuaire de l'Adour. La balise est indispensable pour travailler en estuaire car les ondes MF et HF sont reçues uniquement en mer et en zone côtière. La zone prospectée pour l'échantillonnage de la civelle se localise trop loin de la limite transversale de la mer pour capter les ondes dans ces gammes de fréquences. Celles-ci circulent librement au niveau de la mer, mais leur propagation est limitée par des obstacles quand elles se propagent au-dessus de la terre (constructions, villes, collines, etc).

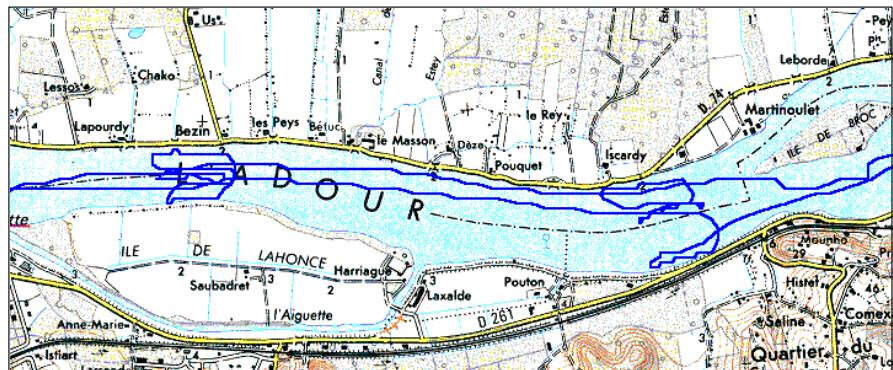


Figure 23 : Image du traceur de route lors de l'échantillonnage (Station 2 et 3).

Un traceur de route, logiciel MaxSea de la société Informatique et Mer sur PC portable (cartes IGN du tracé de l'Adour intégrées au logiciel), donne en temps réel la position du bateau ainsi que sa progression sur l'estuaire (figure 23). Le GPS précédemment décrit est connecté au traceur de route pour la localisation du bateau sur la carte. Ces deux appareils utilisent le même indicateur de référence cartographique WGS84 (World Geodesic System 84). Cet indicateur identifie la référence géodésique et le type de représentation avec lesquels la position affichée est déterminée.

Bathymétrie

Un sondeur numérique à haute résolution de type OSSIAN (campagnes 1996/1997 à 1998/1999) puis de type FISHEXPLORER (campagnes 1999/2000 et 2000/2001) sur un PC portable donne la profondeur au cm près. La base du sondeur ou transducteur se positionne sur le tribord du bateau dans un sabot métallique immergé à 50 cm sous la surface. Le profil du fond ainsi que les échos des différentes cibles rencontrées sont enregistrés en continu pendant la sortie (figure 24).

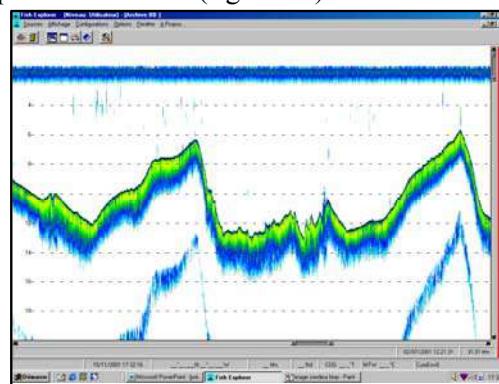


Figure 24 : Exemple d'échogramme au cours d'un trait de tamis.

Ces fichiers peuvent être traités en écho-intégration (extension OSSIAN et FISHEXPLORER) à partir de lectures de fichiers archivés. Cette technique se base sur la proportionnalité entre l'énergie de l'écho et la densité de poissons. Les paramètres de navigation sont également enregistrés dans ces fichiers : cap du navire, coordonnées géographiques, vitesse fond...

Ce type de sondeur permet de marquer des événements tels que les traits de tamis. L'opérateur crée une marque qui s'affiche à l'écran (et s'inscrit sur les fichiers archivés) au moment de l'immersion des engins de pêche et au moment où les filets sont relevés. Ceci permet de retrouver facilement les paramètres caractérisant chaque trait de tamis.

La hauteur d'eau séparant le fond et la profondeur d'immersion du tamis de fond peuvent être déterminées à partir du sondeur et de la sonde TPS.

Photo 7 : Passerelle du Val d'Adour avec la mise en œuvre des appareils de positionnement



Lors des premières campagnes (1996/1997), le transducteur utilisé est d'une fréquence de 50 kHz et d'une puissance de 500 W. La fréquence de tir est de 2 coups par seconde avec une durée d'impulsion de 0,6 ms. Le TVG (Gain variable dans le temps, compense les pertes de propagation du son dans l'eau) est de $20\log R$ (portée de 967 m). Lors de la campagne civelle 1997/1998, le transducteur utilisé est de 120 kHz avec une durée d'impulsion de 0,3 ms. Ce changement de transducteur, dans une optique d'écho-intégration des civelles (Sanchez, 1997) permet d'améliorer la détection des cibles de petites tailles. L'intérêt d'utiliser un transducteur à plus haute fréquence, dans le cadre de l'évaluation du comportement des flux de civelles, est de limiter la zone d'occultation de surface grâce à une durée d'impulsion plus courte. Le 120 kHz permet la détection à des profondeurs comprises entre 1 et 2 m. La détection du fond n'est possible qu'à partir de 2,7 m avec le 50 kHz. A partir de la campagne 1998/1999, les deux transducteurs sont utilisés simultanément grâce à une option bifréquence. Ainsi le transducteur 50 kHz reste positionné sur le tribord du bateau principal et le 120 kHz est positionné horizontalement à l'avant du même bateau dans le but de compléter la prospection acoustique dans la colonne d'eau.

L'interface de l'ensemble des appareils de mesures et de positionnement s'effectue par l'intermédiaire d'un rack où transitent les informations caractérisant les traits de chalut et les captures : durée, coordonnées géographiques, profondeur, vitesse surface, vitesse fond, cap du bateau (photo 8).



Photo 8 : Présentation du rack permettant l'interface du matériel de positionnement. A droite le transducteur 120 kHz.

2.1.3.2. Estimation des Densités

Calcul des volumes filtrés - Le volume filtré pendant un trait de tamis se calcule à partir de divers paramètres : aire des engins de pêche, vitesse réelle du courant à l'entrée du tamis (fluxmètre), temps de chalutage (ici 5 minutes). Au cours des deux saisons, quelques traits de tamis ont dû être interrompus suite à des problèmes techniques (présence de troncs d'arbres, accrochage du tamis au fond, ou d'autres causes). Ces traits sont refaits intégralement dans la majorité des cas sauf si les 5 minutes étaient pratiquement terminées. Dans ce cas le temps de chalutage est noté pour le calcul du volume d'eau filtré.

Calcul de l'aire de chaque engin de pêche :

$$\begin{aligned} \text{Tamis circulaire de } 65 &= 0,33 \text{ m}^2 \\ \text{Tamis circulaire de } 120 &= 1,13 \text{ m}^2 \\ \text{Tamis rectangulaire} &= 0,6 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Volume filtré (m}^3\text{)} = \text{Aire (m}^2\text{)} \times \text{Vitesse* (m.s}^{-1}\text{)} \times \text{Temps (s)}$$

* vitesse mesurée par le fluxmètre à l'entrée du tamis

Calcul des densités- Les densités sont calculées pour chaque trait de tamis. La précision du poids total de civelles de l'échantillon dans les 24 heures qui suivent les captures est de l'ordre du gramme.

$$\text{Densité (g.100m}^3\text{)} = \text{Poids capturé (g)} / \text{Volume filtré (m}^3\text{)} \times 100$$

2.2. Caractéristiques de la base de données

2.2.1. Données physiques

Les données physiques présentent à la fois les facteurs environnementaux et les mesures prises sur le terrain. Les premiers tableaux décrits ci-après reprennent les données concernant l'environnement général. Le coefficient de marée et les phases lunaires sont obtenus grâce à un calendrier des marées, la température de l'eau de mer et de l'air sont fournies par Météo France, et le débit de l'Adour par la DIREN Midi-Pyrénées.

Les bases de données sont articulées de la manière suivante :

- Première table : les données climatiques
- Date (jj/mm/aaa)
- Pluviométrie à Biarritz en mm d'eau
- Température de l'air à Biarritz en °C
- Phase lunaire (pL = pleine lune, DQ = dernier quartier, NL = nouvelle lune, PQ = premier quartier)
- Nébulosité (codé de 1 à 3 : 1 = ciel dégagé, 2 = ciel moyennement couvert, 3 = ciel entièrement couvert).

Tableau 5 : Nom de champ et format des données climatiques

Nom du champ	Type de données	Description
date	Date/Heure	jj/mm/aaaa
pluviométrie	Numérique	millimètre d'eau
T°C air	Numérique	degrés Celsius
phase lunaire	Texte	PQ : premier quartier, PL : pleine lune, DQ : dernier quartier, NL : nouvelle lune
nébulosité	Numérique	codé de 1 à 3

Exemple 1 : Extrait de la table de données climatiques

date	pluviométrie	T°C air	phase lunaire	nébulosité
06/03/1992	0.2	12.5	NL-PQ	3
07/03/1992	3.8	10.8	NL-PQ	3
08/03/1992	0	11.6	NL-PQ	3
09/03/1992	0	10.1	NL-PQ	1

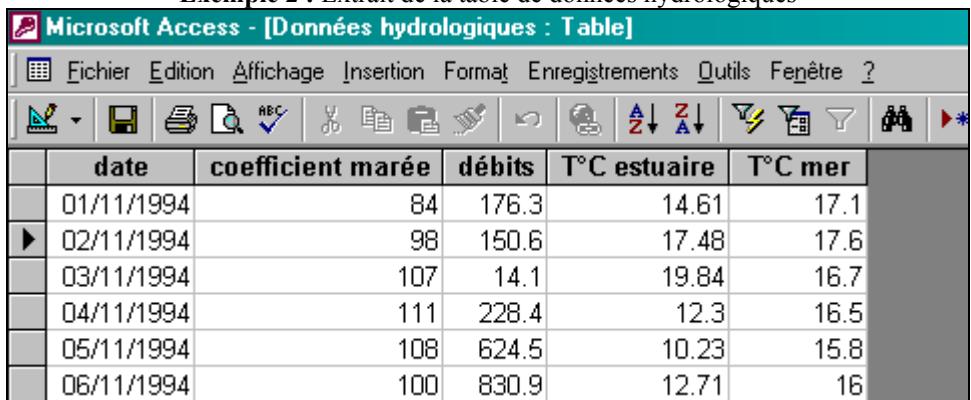
Deuxième table : Les données hydrologiques

- Coefficient de marée
- Température de l'eau prise à Urt (sonde fixe) en °C
- Température de l'eau de l'Adour (sonde TPS et courantomètre doppler mesuré durant la sortie) en °C
- Température de l'eau de mer en °C
- Débit de l'Adour en $m^3.s^{-1}$

Tableau 6 : Nom de champ et format des données hydrologiques

Nom du champ	Type de données	
date	Date/Heure	jj/mm/aaaa
coefficient marée	Numérique	entre 20 et 120
débits	Numérique	$m^3/seconde$
T°C estuaire	Numérique	degrès Celsius
T°C mer	Numérique	degrès Celsius

Exemple 2 : Extrait de la table de données hydrologiques



	date	coefficient marée	débits	T°C estuaire	T°C mer
	01/11/1994		84	176.3	14.61
▶	02/11/1994		98	150.6	17.48
	03/11/1994		107	14.1	19.84
	04/11/1994		111	228.4	12.3
	05/11/1994		108	624.5	10.23
	06/11/1994		100	830.9	12.71

Base de données bathymétriques

En parallèle aux tables de données de pêche professionnelle et expérimentale, existe également une base de données bathymétriques. Ces données sont prises sur le terrain par la DDE 64

Tableau 7 : Nom de champ et formats de la table bathymétrique

Nom du champ	Type de données	
longitude Est	Numérique	coordonnées en lambert III
latitude Nord	Numérique	coordonnées en lambert III
Profondeur	Numérique	en mètre

Exemple 3 : Extrait de la table de données bathymétriques

	longitude Est	latitude Nord	Profondeur
	293973.94	138891.73	5.2
	293984.16	138893.64	5.1
	293994.13	138896.38	4.9
	294003.72	138899.55	4.5
	294012.78	138903.92	4.8
	294022.69	138906.63	4.8

Cette table est ensuite utilisée dans Excel et après des modifications expliquées ci-après, des profils bathymétriques de l'Adour sont dessinés pour illustrer les stations d'échantillonnage.

2.2.2. Données biologiques

Cette base biométrique décrit les caractéristiques de civelles prises au hasard de l'échantillonnage. Pour une centaine d'individus sont notés le poids, la longueur et le stade pigmentaire (observé à la loupe binoculaire). A partir des stades pigmentaires, sont calculés des pourcentages d'individus à chaque stade, ce qui permet de caractériser et d'évaluer le temps de résidence de la population en estuaire.

Le tableau est le suivant :

- Date de prélèvement des individus (jj/mm/aaaa)
- Longueur en cm
- Poids en gramme
- Stade pigmentaire en chiffre romain
- Numéro échantillon correspondant au trait d'échantillonnage (localisation, et précision de la couche de surface (S) ou de profondeur (F))

Tableau 8 : Nom de champ et format des données biométriques

	Nom du champ	Type de données	
	Date	Date/Heure	jj/mm/aaaa
	Taille	Numérique	centimètre
	Poids	Numérique	gramme
	Pigmentation	Texte	chiffre romain
	Localisation	Texte	RD : rive droite, RG : rive gauche, M : milieu
	Station	Numérique	positionnement géographique
	TRANCHE	Texte	F : fond, S : surface

Exemple 4 : Extrait de la table de données biométriques

	Date	Taille	Poids	Pigmentation	Localisation	Station	TRANCHE
	06/01/1998	7.5	0.37	VB	RG		2 F
	06/01/1998	7	0.32	VB	RG		2 F
	06/01/1998	7.2	0.32	VB	RG		2 F
	06/01/1998	7.2	0.33	VIA1	RG		2 F
	06/01/1998	7.6	0.41	VB	RG		2 F
	06/01/1998	7.3	0.28	VIA2	RG		2 F

L'échantillonnage se fait de nuit au moment des phases de migrations importantes des civelles d'anguille (*Anguilla anguilla*) qui ont lieu principalement entre les mois de novembre et mars (cf. § 2.).

Des transects (déplacement d'un point à un autre) sont effectués d'amont en aval, le long des rives et au milieu de l'estuaire, durant un laps de temps déterminé pour certaines campagnes et sur une distance définie pour d'autres.

La base de données de ces campagnes d'échantillonnage est mise en place grâce au logiciel Access ®. Les données sont réparties en deux tables, la première regroupe toutes les données prises sur le terrain le jour de la sortie.

Puis, à partir de celles-ci, dans une autre table, sont calculées un certain nombre de paramètres qui vont permettre d'analyser et de comparer les différentes années.

Toutes les mesures prises lors des campagnes sont retrouvées dans une seule et même table. Par souci de pratique en fonction du déroulement des manipulations sur le terrain les données ne sont pas rentrées dans la base selon des critères hydrologiques ou autres, mais en fonction des appareils de mesures. Cependant après analyse sommaire elles peuvent être regroupées de la manière suivante :

Première partie : Les données de campagnes expérimentales

- Date de sortie (jj/mm/aaaa)
- Localisation de la station d'échantillonnage sur l'Adour (rive droite, gauche ou milieu)
- Nombre de transects
- Caractérisation des engins (superficie en m²)
- Remarques générales selon le déroulement de la sortie

Lors des différentes campagnes les engins de pêche n'ont pas toujours été les mêmes, au début l'engin de surface était de forme rectangulaire de 0,6 m² de surface, puis il a été remplacé par un tamis circulaire. La surface de ces tamis circulaires a été diminuée de 1,13 à 0,33 m².

Deuxième partie : La caractérisation des transects (ou trait)

- Station d'échantillonnage sur l'Adour
- Localisation par rapport aux rives de l'Adour
- Numéro de trait
- Heure du GPS de début et fin de chaque trait
- Position géographique (latitude et longitude) du début et fin de chaque trait
- Vitesse du fond en nœud (lue sur GPS) pour chaque trait

- Salinité en g.l⁻¹ mesurée par la sonde TPS
- Profondeur du tamis en mètre donné par sonde TPS
- Profondeur de l'Adour en mètre mesurée par le sondeur bathymétrique (50 kHz)

- Compte tour du fluxmètre utilisé devant le tamis de surface (compte tour.s⁻¹)
- Durée du temps de mesure avec le fluxmètre
- Durée du chalutage en seconde

- Vitesse surface en cm.s⁻¹ du courantomètre doppler placé sur le zodiac
- Direction du courant en degré du courantomètre doppler
- Turbidité en NTU (turbidimètre couplé avec le courantomètre) pour les dernières campagnes

Troisième partie : données de pêches expérimentales

- Numéro de trait
- Poids en gramme des civelles capturées par trait d'échantillonnage (surface et fond)
- Nombre de civelles par trait d'échantillonnage (surface et fond)
- espèces accessoires

La première colonne nommée "index" est une clé primaire qui va permettre de définir de façon unique chaque enregistrement pour faciliter le regroupement les informations situées dans plusieurs tables.

Tableau 9 : Nom de champ et format des données d'échantillonnage

Nom du champ	Type de données	Description
index	NuméroAuto	clé primaire de "classement"
Coef marée	Numérique	entre 20 et 120
Date	Date/Heure	jj/mm/aaaa
Trait	Numérique	
station	Texte	localisation géographique
Localisation	Texte	RD : rive droite, RG : rive gauche, M : milieu
tranche	Texte	fond ou surface
heure GPS	Date/Heure	hh:mm:ss
Fin trait	Date/Heure	hh:mm:ss
Vit fond Nd (GPS)	Numérique	nœud
flow début	Numérique	compte tour
flow fin	Numérique	compte tour
durée chalut	Numérique	seconde
durée flow	Numérique	seconde
Vit couranto (surf)	Numérique	cm/s
Cap couranto	Numérique	degré
T°C Couranto	Numérique	degrés Celsius
Turbidité surf	Numérique	NTU
aire engin m ²	Numérique	m ²
poids fond (g)	Numérique	gramme
Nb civ f	Numérique	nombre d'individus au fond
espèces (fond)	Texte	espèces accessoires
poids surf (g)	Numérique	gramme
Nb civ s	Numérique	nombre d'individus en surface
espèces (surf)	Texte	espèces accessoires
T°C TPS	Numérique	degrés Celsius
prof tamis	Numérique	mètre
prof Adour	Numérique	mètre
salinité	Numérique	g/l
débit	Numérique	m ³ /s
T°C eau mer	Numérique	degrés Celsius
T°C air	Numérique	degrés Celsius
Lune	Texte	PQ : premier quartier, PL : pleine lune, DQ dernier quartier, NL : nouvelle lune
Remarques	Texte	

Le tableau final comporte 1857 lignes et 33 colonnes regroupant les campagnes d'échantillonnage des saisons 1996/1997 à 2002/2003.

Données calculées

Ainsi, à partir de toutes ces mesures plusieurs paramètres sont calculés automatiquement par simple requête sur Access ®.

→ Vitesse de surface en m.s⁻¹ calculée à partir des mesures du fluxmètre, (le calcul est issu d'un abaque indiquant les vitesses en fonction du nombre de tours effectués par le fluxmètre durant 30 secondes) :

$$(((2.625 * (([flow fin] - [flow début]) / [durée du flow])) + 4 / 100)$$

→ Vitesse fond en m.s⁻¹ (transformation de la vitesse en nœud en une vitesse en m.s⁻¹ du GPS) :

$$([Vitesse fond en nœud du GPS] * 0,514)$$

→ Vitesse de courant en m.s⁻¹ calculée à partir de la vitesse en cm.s⁻¹ du fluxmètre :

$$(([vitesse de surface du fluxmètre en m.s^{-1}]) / 100) - [vit fond en m.s^{-1} du GPS]$$

Exemple 5 : Extrait d'une partie des requêtes de calculs de vitesses

The screenshot shows the Microsoft Access 'Query Creation' window. On the left, a list of fields from the 'Campagnes expérimentales' table is visible, including 'Date', 'Tstat', 'station', 'Localisation', 'branche', 'heures GPS', 'Fin trac', 'Vit fond Nd (GPS)', 'flow début', 'flow fin', and 'durée chalut'. In the main area, there is a table with three columns. The first column contains the formula: 'Champ : vit surface m/s: ((2,625*((flow fin)-[flow début])/[durée flow]))+4)/100'. The second column contains: 'vit fond m/s: ([Vit fond Nd (GPS)]*0,514)'. The third column contains: 'vit courant (C) m/s: ((vit courant (surf))/100)-[vit fond m/s])'. Below the table, the 'Afficher' (Display) checkbox is checked for all three columns.

Tableau à partir duquel les calculs sont effectués

→ Vitesse du courant en m.s^{-1} à partir de la vitesse en m.s^{-1} du GPS :

$$([\text{vitesse de surface en m/s (flow.)}] - [\text{vitesse fond en m.s}^{-1} \text{ du GPS}])$$

→ Volume d'eau filtrée par le tamis en m^3 :

$$([\text{temps de chalutage en seconde}] * [\text{aire engin en m}^2] * [\text{vitesse de surface en m.s}^{-1}])$$

→ Densités de civelles au fond et en surface en g.100 m^{-3} :

$$(([\text{poids des civelles en surface}] / [\text{poids fond au fond}]) \text{ en g} / [\text{volume d'eau filtré}]) * 100)$$

Exemple 6 : suite de la requête de calculs.

The screenshot shows the Microsoft Access 'Query Creation' window. On the left, a list of fields from the 'Campagnes expérimentales' table is visible, including 'Cap courant', 'T°C Courant', 'Turbidité surf', 'aire engin m²', 'poids fond (g)', 'Nb crf', 'espèces (fond)', 'poids surf (g)', 'Nb crs', 'espèces (surf)', and 'T°C IPS'. In the main area, there is a table with three columns. The first column contains the formula: 'Champ : vit courant m/s: ([vit surface m/s]-[vit fond m/s])'. The second column contains: 'vol d'eau filtré: ([durée chalut]*[aire engin m²]*[vit surface m/s])'. The third column contains: 'densité fond (g/100m³): ((poids fond (g))/[vol d'eau filtré])*100'. Below the table, the 'Afficher' (Display) checkbox is checked for all three columns.

Tableau 10 : Nom de champ et format des données de la table de calculs.

Nom du champ	Type de données	
Date	Date/Heure	jj/mm/aaaa
Trait	Numérique	
station	Texte	positionnement géographique
Localisation	Texte	RD : rive droite, RG : rive gauche, M : milieu
tranche	Texte	fond ou surface
heure GPS	Date/Heure	hh:mm:ss
Direction courant	Numérique	degrés
Vit surf (C)	Numérique	m/s
Vit courant (C) m/s	Numérique	m/s
vit surface m/s	Numérique	m/s
vit fond m/s	Numérique	m/s
Vit courant m/s	Numérique	m/s
Turbidité surf	Numérique	NTU
vol d'eau filtré	Numérique	m3/s
densité fond (g/100m3)	Numérique	g/100m3
densité surf (g/100m3)	Numérique	g/100m3

2.2.3. Données Halieutiques

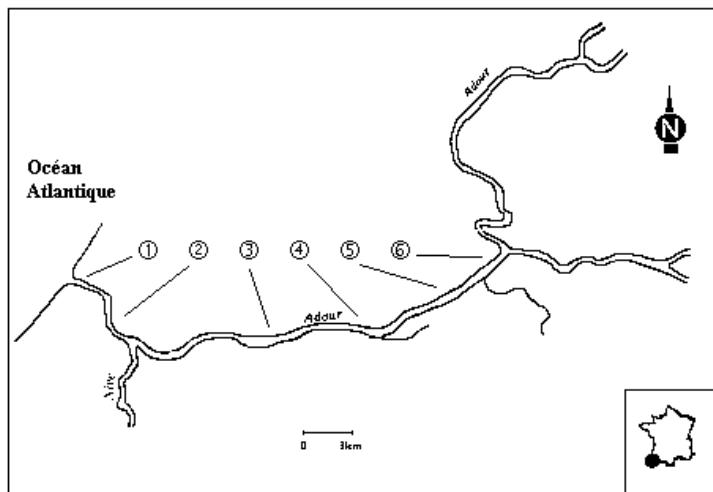
L'aire d'étude se situe à la fois en zone maritime et en zone mixte. Les quantités capturées sont estimées à partir de l'étude des carnets de pêche et des observations faites lors de sorties sur le terrain. L'évaluation du taux d'exploitation se fait uniquement à partir des carnets de pêche établis par les marins pêcheurs et qui utilisent le tamis poussé en zone maritime.

Sur chaque fiche mensuelle, le pêcheur déclare les captures journalières en distinguant les pêches effectuées dans les différentes zones de la rivière ou de l'estuaire concerné. Les pêcheurs ne sont autorisés à pêcher la civelle d'anguille que du 1^{er} novembre au 31 mars de l'année suivante.

Cette dernière base concerne uniquement les données récoltées auprès des pêcheurs de l'Adour (maritime et mixte) qui remplissent des carnets de pêche dont les informations sont ensuite saisies dans une base nationale dite base CRTS¹.

Certaines données sont codées comme l'espèce (2299 pour la civelle) ou l'engin (612 pour le tamis poussé et 615 pour le tamis à main). Les zones de pêche le sont également mais de deux manières différentes. Les pêcheurs indiquent des lieux de pêche en trois lettres (UAM pour Urt amont) qui sont ensuite transformés pour correspondre à des rectangles statistiques utilisés par le CRTS de La Rochelle (16E8M3 pour Urt amont).

¹ Centre Régional de Traitement Statistique



Carte 10 : Carte de situation géographique des principales pêcheries :
 ① La Barre (limite transversale de la mer), ② Soufre et Bayonne, ③ Urt aval, ④ Urt amont,
 ⑤ Cousté, ⑥ Bec des Gaves. Les pêcheries ①, ② et ③ sont en zone maritime, les pêcheries
 ④, ⑤ et ⑥ en zone mixte.

Les informations récoltées ont déjà été décrites dans le paragraphe précédent concernant les données halieutiques.

A partir de ces données, précisées par pêcheur, il est possible par une requête sous Access ® de calculer les captures par sortie journalière (exemple 8). Il suffit de ne plus tenir compte de l'information individuelle par pêcheur, mais d'additionner toutes les captures d'une seule journée en gardant par exemple la répartition de ces captures en fonction du lieu de pêche déclaré. On peut alors comparer les captures des professionnels en zone maritime et en zone fluviale (figure 25).

Base de données

Troisième table : Les données halieutiques

- Numéro CIPE (occulté)
 - Dates de début et de fin de la sortie de pêche (jj/mm/aaaa)
 - Lieu de pêche sur l'Adour (ancien code et code CRTS)
 - Engin utilisé (tamis à main 615 ou tamis poussé 612)
 - Nombre d'engins utilisés (de 1 à 2)
 - Nombre d'heures de pêche
 - Nombre de sorties (la déclaration peut en regrouper plusieurs)
 - Code de l'espèce (2299 pour la civelle d'anguille)
 - Poids capturé en gramme
 - CPUE en gramme (Captures Par Unité d'Effort : poids capturé / nombre de sortie)
- Cette table regroupe plus de 27 000 lignes pour les fiches de pêches de 1984 à 2003.

Tableau 11 : Nom de champ et format des données de pêche

Nom du champ	Type de données	
Index	NuméroAuto	clé primaire de "classement"
Immat	Numérique	6 chiffres (confidentiel)
nucipe	Texte	2 lettres et 3 chiffres (confidentiel)
début	Date/Heure	jj/mm/aaaa
fin	Date/Heure	jj/mm/aaaa
lieu ancien	Texte	3 lettres
lieu CRTS	Texte	code statistique
engin	Numérique	code à 3 chiffres
nb eng	Numérique	1 à 2
heures	Numérique	temps de pêche
sortie	Numérique	nombre de marée par jour
espèce	Numérique	code à 4 chiffres
nbcapt	Numérique	nombre de poissons
pdscapt	Numérique	gramme
capt/sortie	Numérique	calcul : pdscapt/sortie

Exemple 7 : Extrait de la table de données de pêche

Microsoft Access - [Civelle de 84 à maintenant : Table]												
Fichier Édition Affichage Insertion Format Enregistrements Outils Fenêtre ?												
Début Fin Lieu ancien Lieu CRTS Engin nb eng Heures Sortie Espèce Nbcapt Pdscapt Capt/Sortie												
début	fin	lieu ancien	lieu CRTS	engin	nb eng	heures	sortie	espèce	nbcapt	pdscapt	capt/sortie	
01/01/1985	31/01/1985	UAM	16E8M3	615	1		4	2299		10000	2500	
01/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0	
02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0	
02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0	
02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0	
02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		0	0	
02/01/1985		UAM	16E8M3	615	1		1	2299		1000	1000	

Exemple 8 : Requête de calculs des Captures Par Unité d'Effort (CPUE) des données de pêche.

The screenshot shows the Microsoft Access 'Requête Crédit' (Query Creation) window. The title bar reads 'Microsoft Access - [Calcul CPUE jour : Requête Crédit]'. The menu bar includes 'Fichier', 'Edition', 'Affichage', 'Insersion', 'Requête', 'Outils', 'Fenêtre', and '?'. The toolbar contains various icons for database management. The left pane displays the query structure with fields: 'Civelle de 84 à maintenant', 'Index', 'Immat', 'nucipe', 'début', 'fin', 'lieu ancien', 'lieu CRTS', 'engin', 'nb eng', 'heures', 'sortie', 'espèce', 'nbcapt', 'pdscapt', and 'capt/sortie'. The main pane is currently empty. The bottom pane shows the query definition grid:

Champ :	date début: début	date fin: fin	lieu CRTS	engin	espèce	Nb de sorties: sortie	poids total: pdscapt	capture par sortie: [poids t]
Table :	Civelle de 84 à ma	Civelle de 84	Civelle de 84	Civelle de 84	Civelle de 84 à maint	Civelle de 84 à main		
Opération :	Regroupement	Regroupemt	Regroupemt	Regroupeme	Regroupeme	Somme	Somme	Regroupement
Tri :								
Afficher :	<input checked="" type="checkbox"/>							
Critères :								

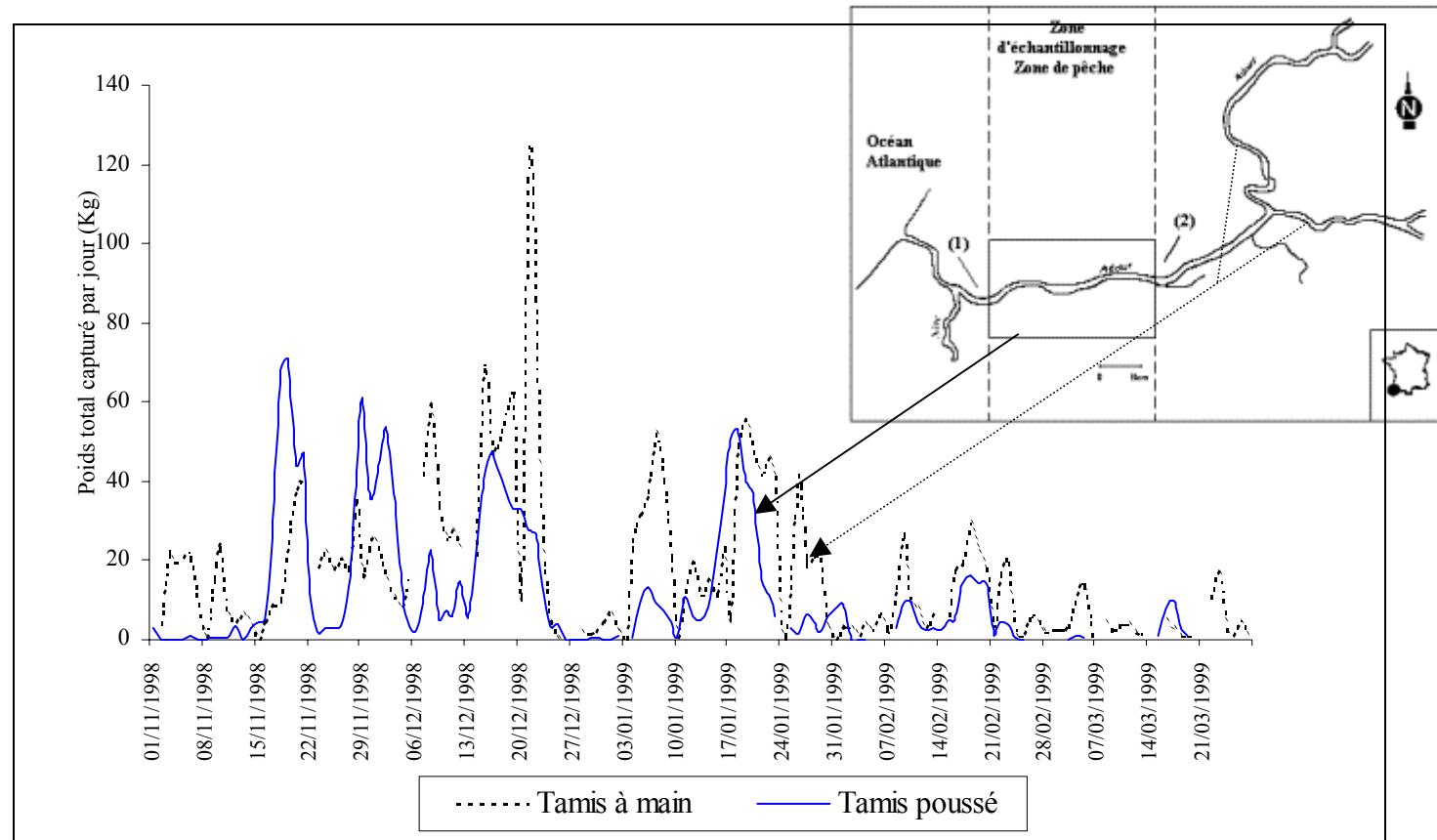


Figure 25 : Comparaison des captures professionnelles en zone maritime et en zone fluviale.

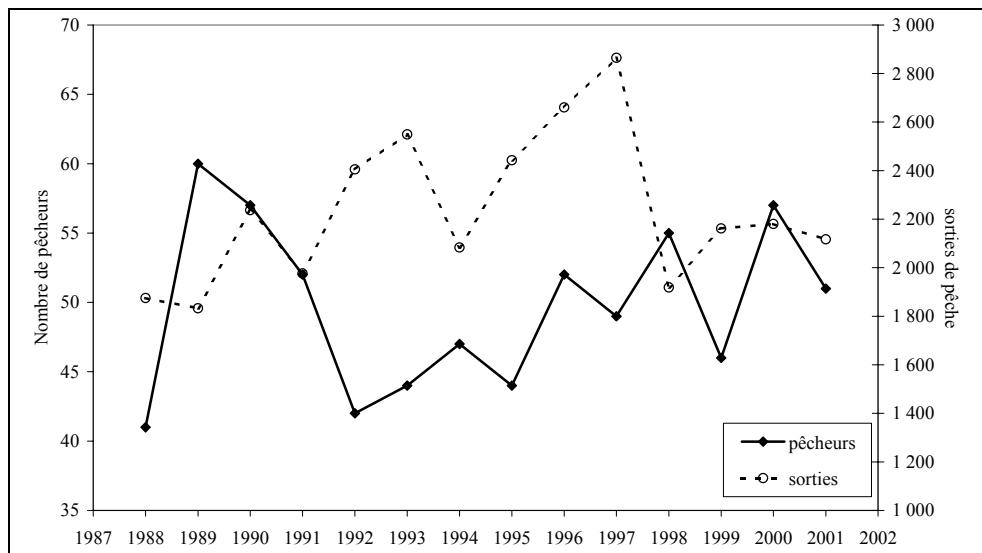


Figure 26 : Correspondances entre le nombre de sorties et le nombre de pêcheurs

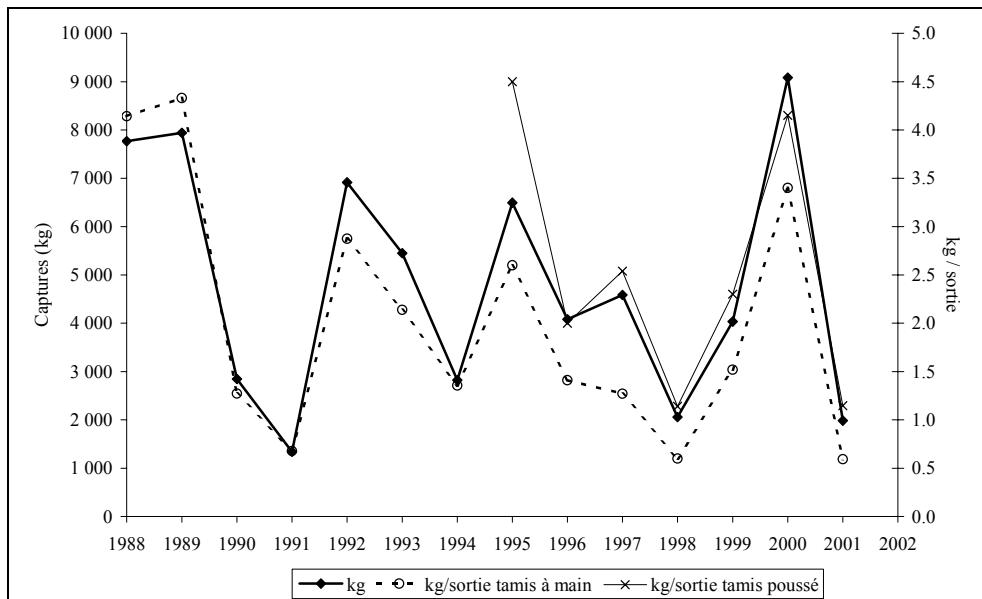


Figure 27 : Débarquements de civelles en kg et capture par unité d'effort (kg.sortie^{-1}) par les marins pêcheurs dans l'estuaire de l'Adour

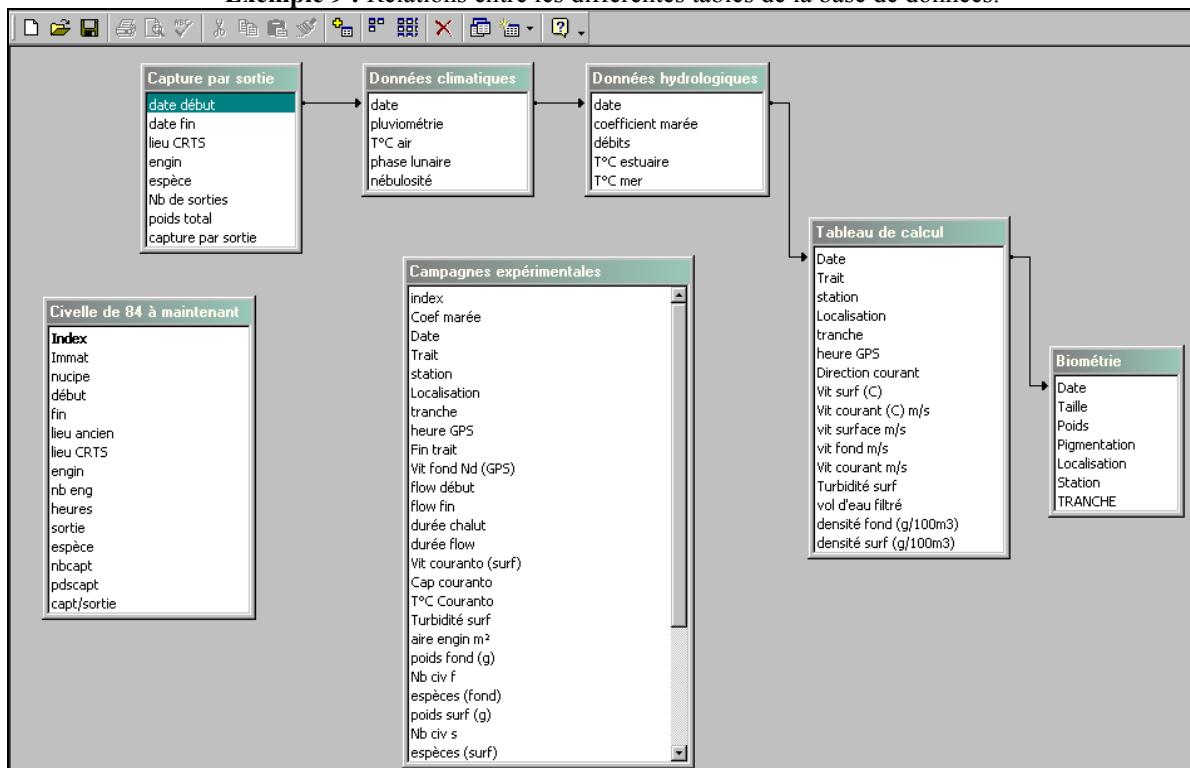
Les figures 25, 26 et 27 montrent quelques exemples de traitements et de sorties graphiques qui permettent de mieux illustrer historiquement les changements de production, d'efforts suivant les localisations des pêcheries et les techniques de pêche utilisées.

Tableau 12 : Nom et format des données de la table de calcul des captures

Nom du champ	Type de données	
date début	Date/Heure	jj/mm/aaaa
date fin	Date/Heure	jj/mm/aaaa
lieu CRTS	Texte	code statistique
engin	Numérique	code à 3 chiffres
espèce	Numérique	code à 4 chiffres
Nb de sorties	Numérique	nombre de marées par jour
poids total	Numérique	gramme
capture par sortie	Numérique	calcul : poids total/Nb de sorties

L'exemple 9, ci après, met en évidence les relations existantes entre les différentes tables. Les jointures sous Access ® sont de type 2, c'est-à-dire qu'elles incluent tous les enregistrements de la table de départ (capture par sortie par exemple) et seulement ceux de la table d'arrivée (données climatiques pour le même exemple) pour lesquels les enregistrements sont égaux.

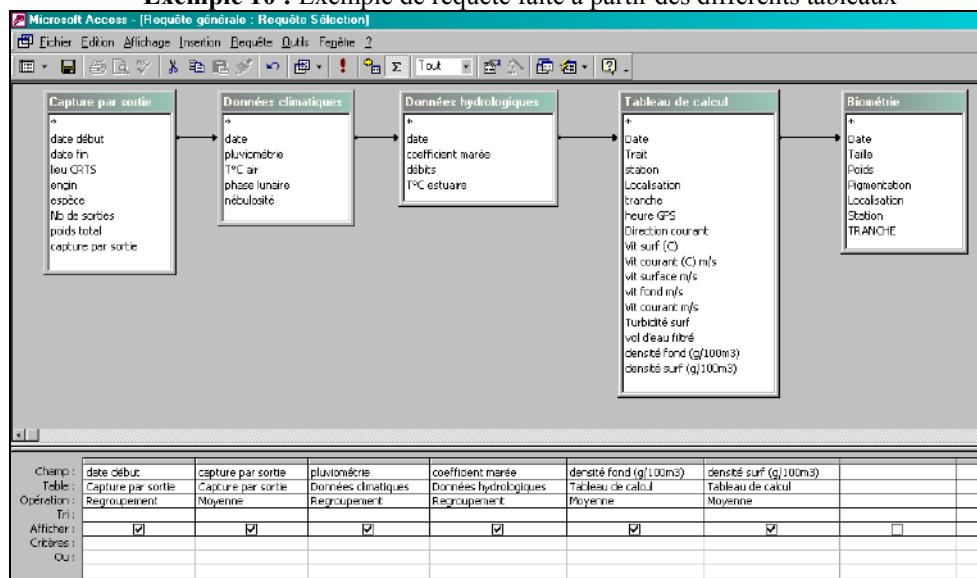
Les tables de départ des requêtes effectuées sont également mentionnées pour ce qui concerne les données de pêche et les données des captures expérimentales.

Exemple 9 : Relations entre les différentes tables de la base de données.

Description des requêtes mises en place sur Access ®

A partir de toutes ces tables, il est maintenant possible de mettre en relation un grand nombre d'informations. C'est-à-dire que pour une période de pêche donnée, on pourra comparer les densités calculées à partir des sorties sur le terrain, et également mettre en relation les données climatiques et hydrologiques qui pourraient nous paraître pertinentes.

Exemple 10 : Exemple de requête faite à partir des différents tableaux



La requête présentée en exemple 10 est un exemple simple à partir duquel nous avons les captures journalières et les densités calculées ces mêmes jours, avec le coefficient de marée et la pluviométrie correspondants.

Tableau 13 : Extrait de la table résultant de la requête.

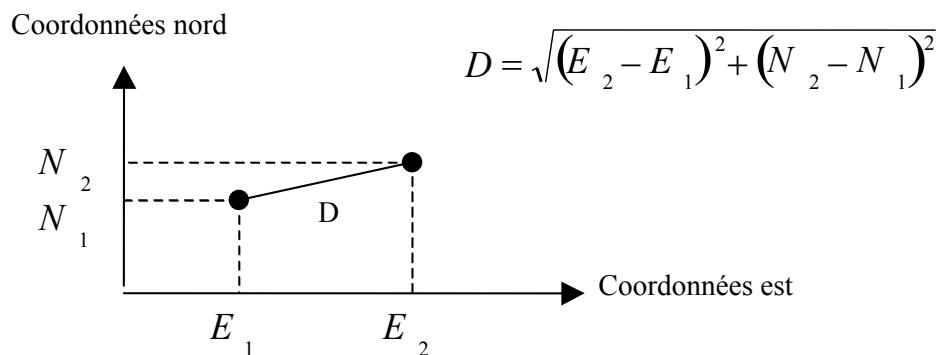
date début	moyenne de capture	pluviométrie	coefficient marée	moyenne de densité de fond (g/100m³)	moyenne de densité de surface (g/100m³)
05/01/2000	3568.12	0	71	3.33	10.0
06/01/2000	2918.85	0	75		
07/01/2000	2179.94	0	78	3.67	4.9
08/01/2000	3707.50	0	79	2.97	5.0
09/01/2000	3246.21	6.4	78	4.53	6.7
10/01/2000	4912.50	0	75		
11/01/2000	4768.74	0	71		
12/01/2000	2216.19	0	65	0.62	0.8
13/01/2000	1227.14	0	58		

2.2.4. Données cartographiques

Description des cartes sur le logiciel ArcView 3.2 ®

Sur les différentes cartes présentées ci-après, des profils bathymétriques ont été dessinés à partir des prospections effectuées par la DDE 64 en 2000. Chaque mesure de profondeur est ramenée au zéro des cartes et est exprimée en fonction de leurs coordonnées en Lambert 3 (NTF).

Dans le tableau de données les valeurs sont classées par ordre croissant de la coordonnée nord (N). Pour réaliser le profil, il suffit de représenter les profondeurs en fonction des distances cumulées entre les points de mesure, ces distances représentent la largeur (en m) de l'Adour (à un endroit précis du lieu d'échantillonnage). Ces distances entre deux points consécutifs sont calculées par le théorème de Pythagore en utilisant les coordonnées E et N selon le graphe et la formule suivante :



Ne connaissant pas le niveau zéro du fleuve sur les rives droite et gauche de chaque transect de prospection, nous avons choisi d'attribuer arbitrairement aux coordonnées (E et N) des berges la valeur zéro mètre pour que la visualisation graphique soit plus claire.

Toutes les cartes ont été faites par l'intermédiaire du logiciel Arcview 3.2 ® (SIG²). Il s'agit d'un outil cartographique permettant de visualiser des informations géographiques. Ces représentations cartographiques représentent les différents lieux d'échantillonnage des campagnes qui ont débuté en 1996.

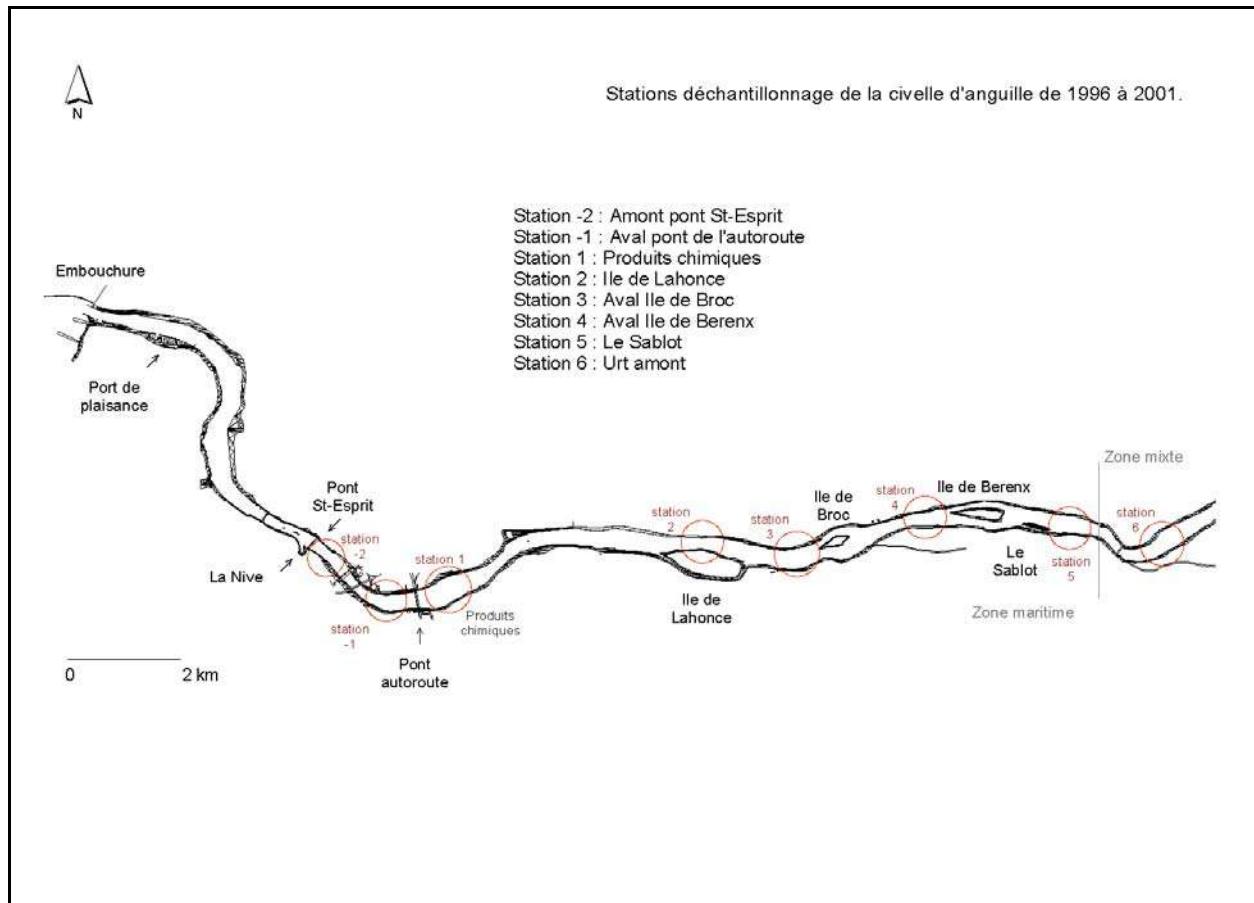
Les cartes géographiques placées en illustration sont tirées du logiciel Maxsea ® et proviennent de la numérisation de documents du SHOM³, ainsi que d'autres services Hydrographiques.

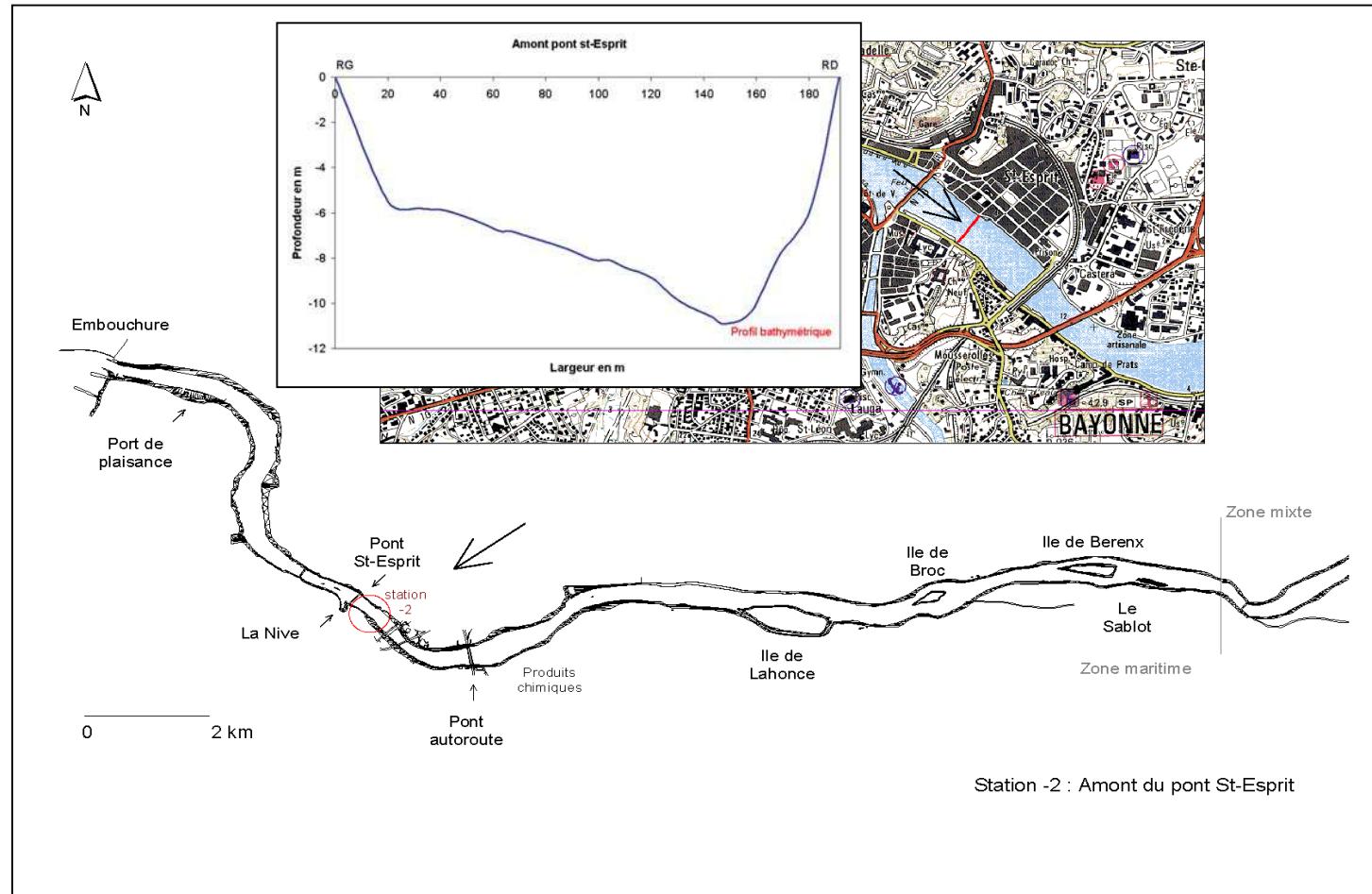
² Système d'Information Géographique

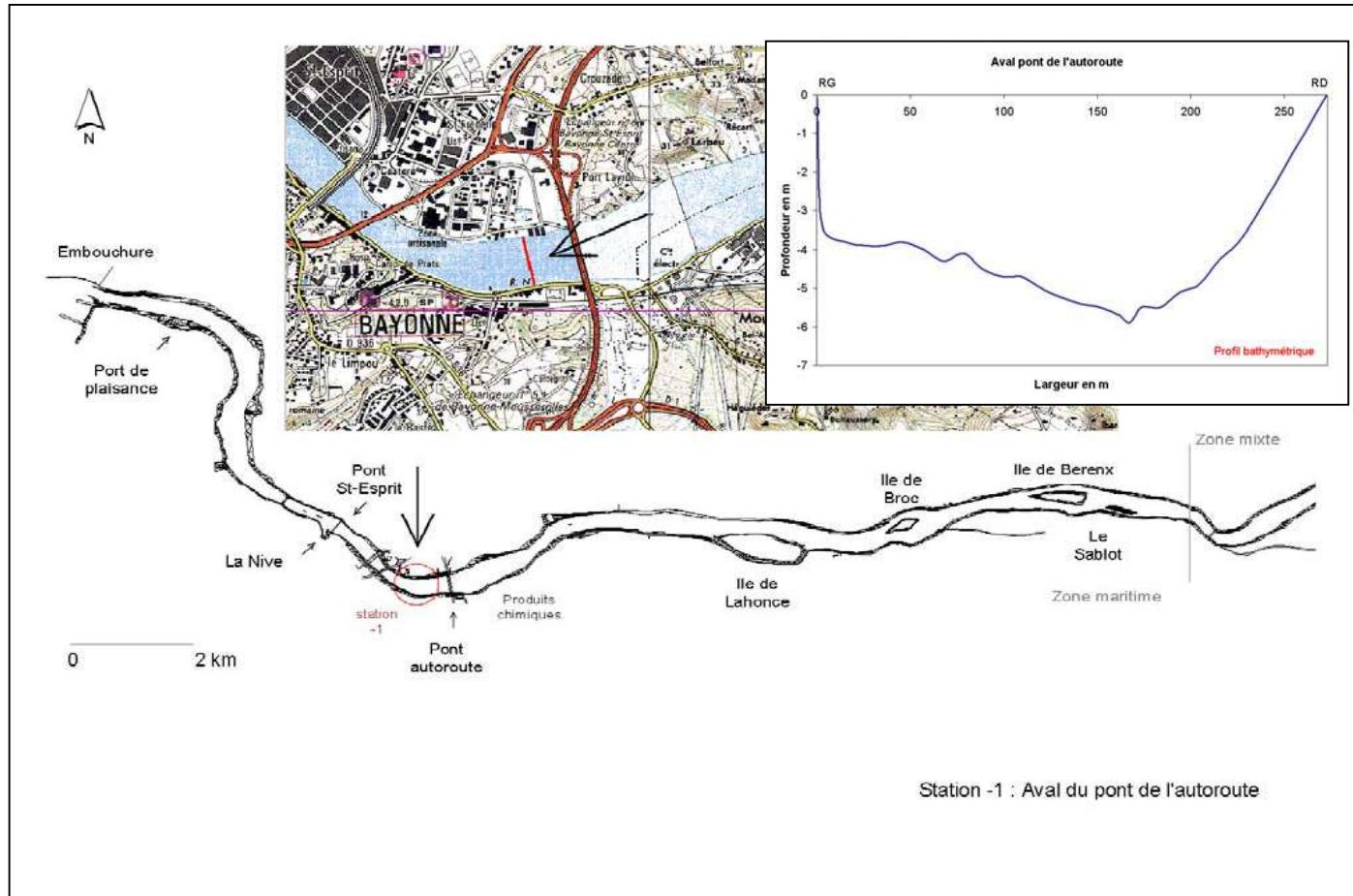
³ Services Hydrographiques et Océanographiques de la Marine

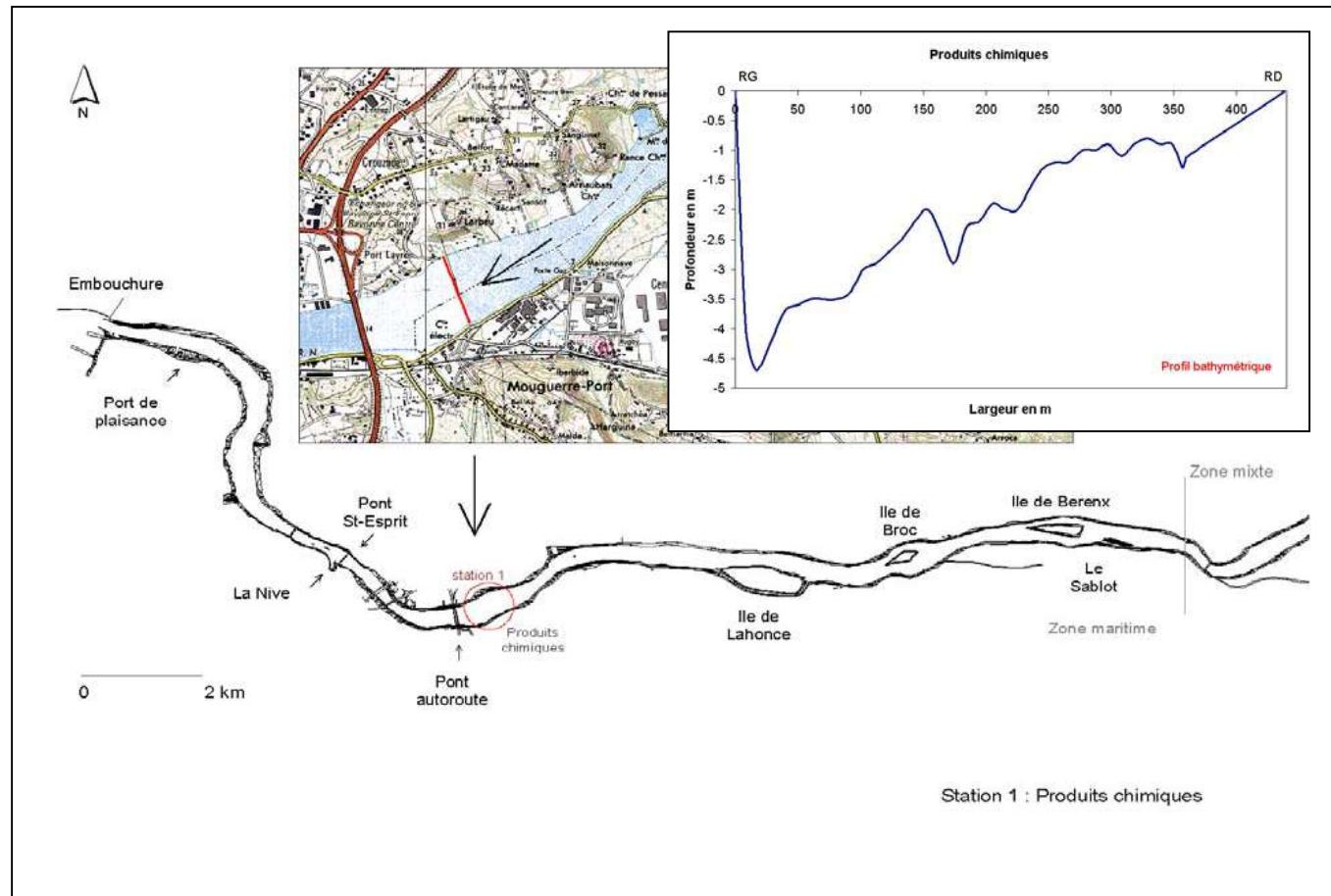
Cartes descriptives des campagnes.

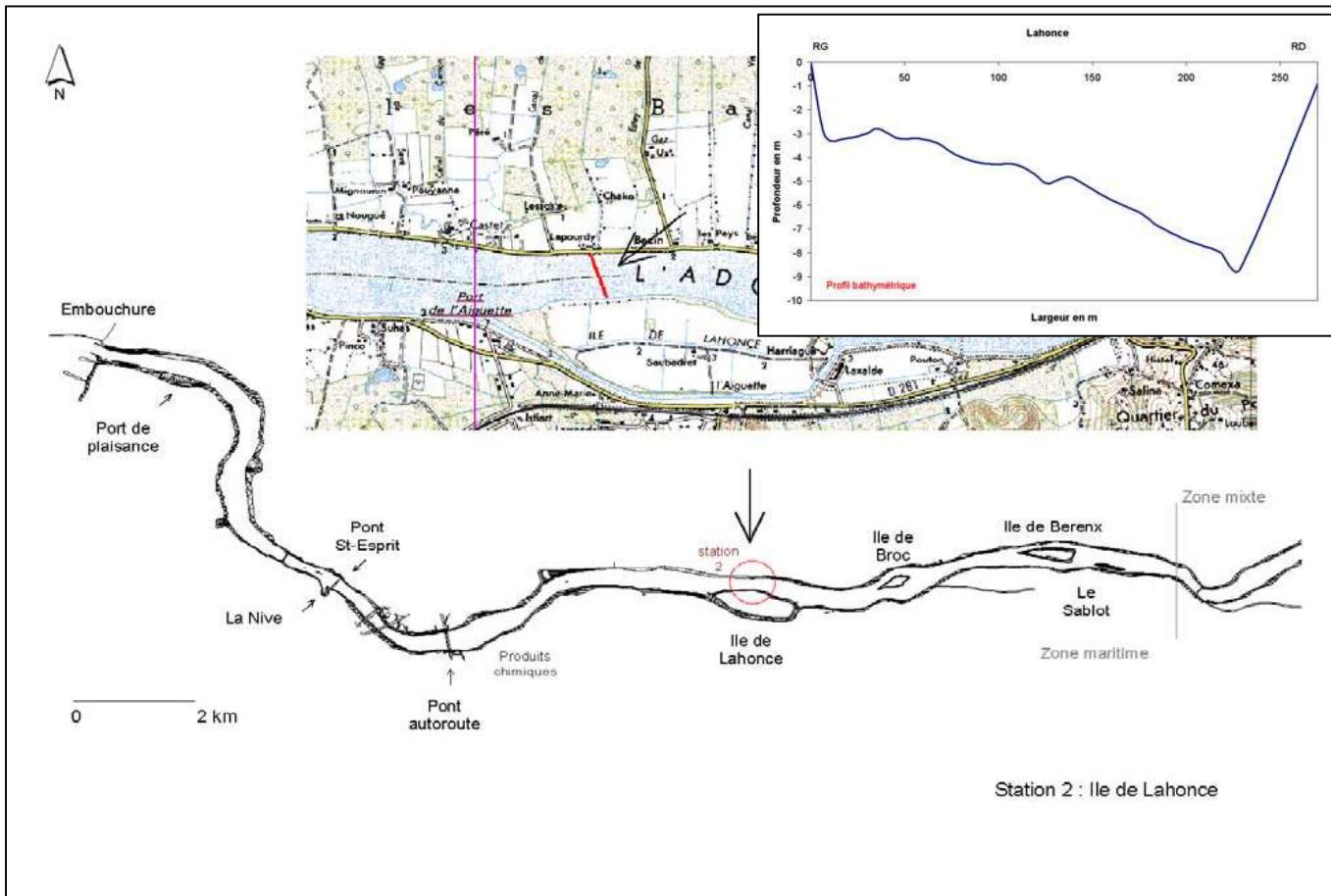
Comme il a été décrit précédemment les lieux d'échantillonnage ont varié d'une saison à l'autre. Les cartes qui suivent décrivent, de façon non exhaustive, les différentes stations tout au long de l'Adour pour les 5 campagnes, avec un exemple de profil bathymétrique caractéristique de chaque station.

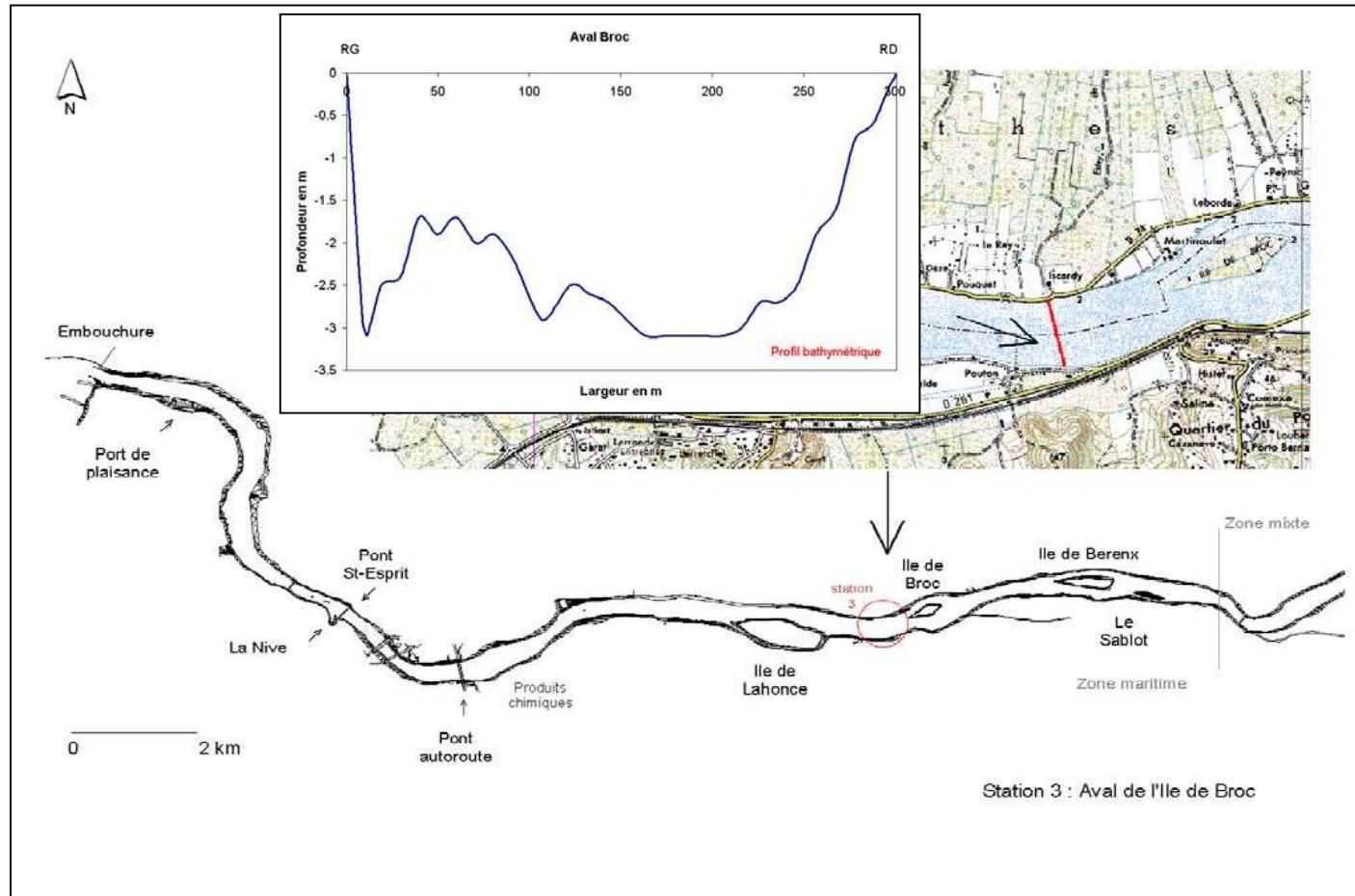


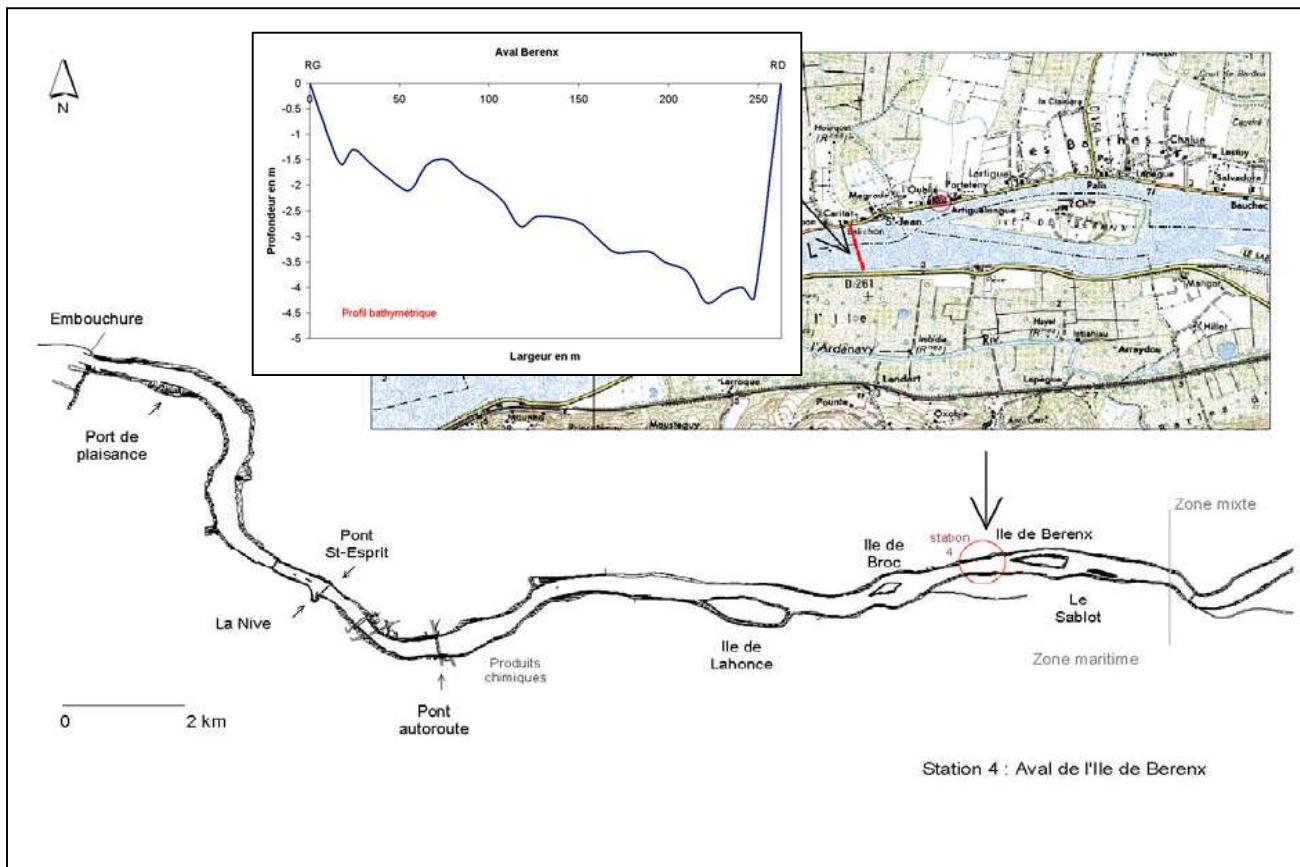


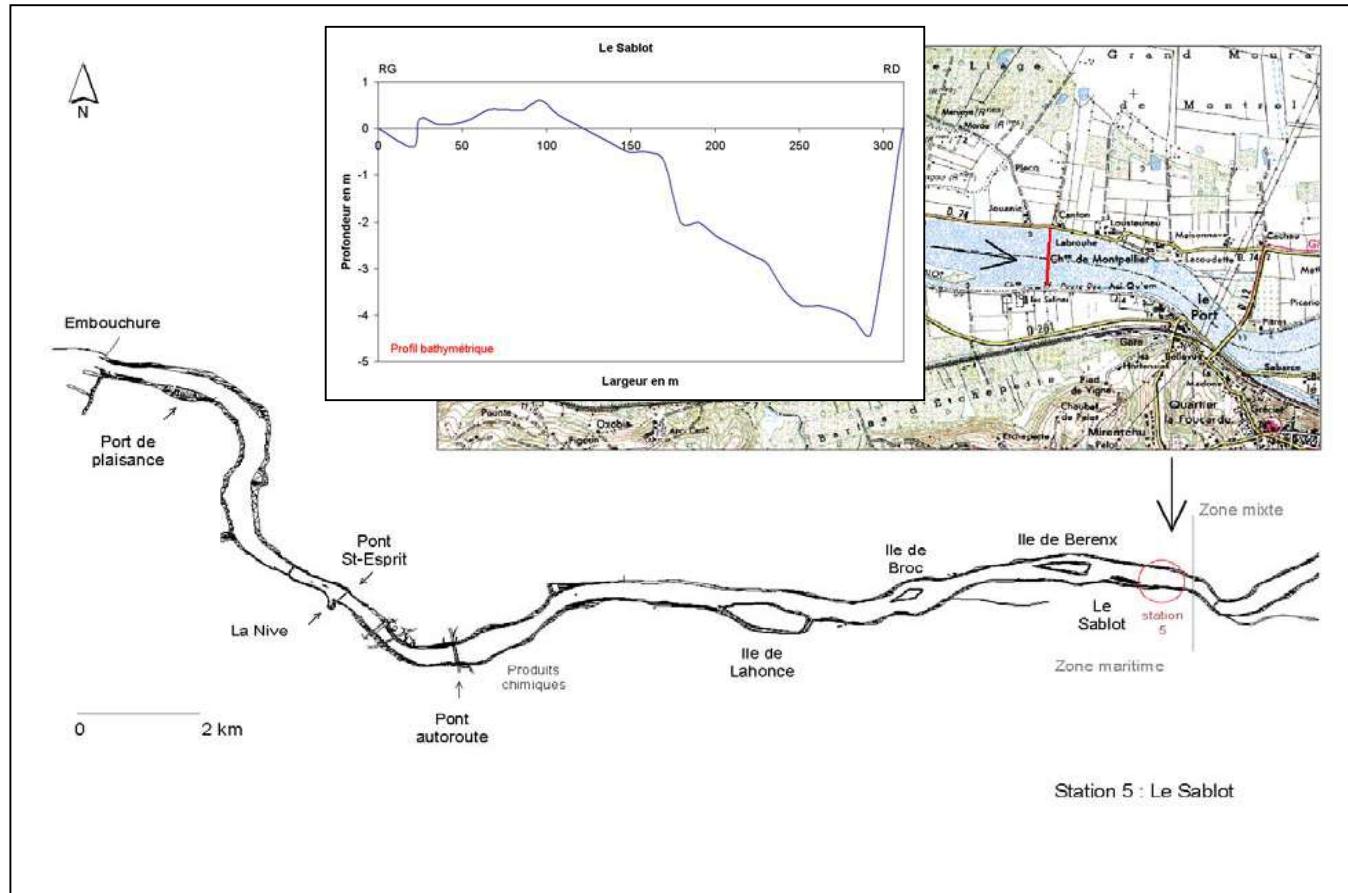


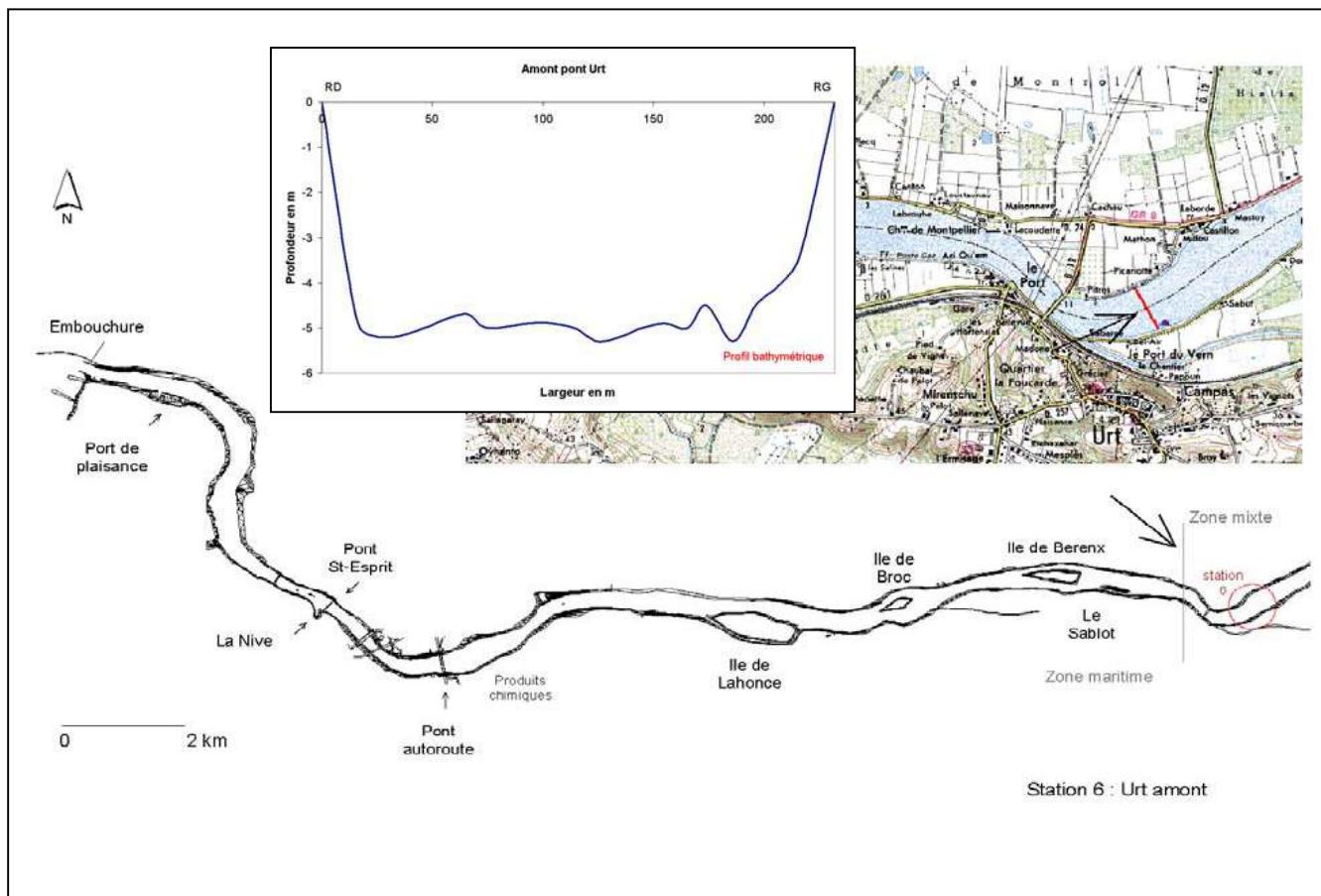












2.3. Caractéristiques hydroclimatiques des saisons de pêche

2.3.1. Conditions hydrodynamiques

Les coefficients de marées et les débits fluviaux alimentent le modèle hydrodynamique qui estime la vitesse du courant à partir de ces deux forces qui s'opposent pendant le flot et s'ajoutent pendant le jusant. La variable coefficient de marée est prévisible alors que la variable débit fluvial est conditionnée par les conditions climatiques et fortement variable d'une saison à l'autre.

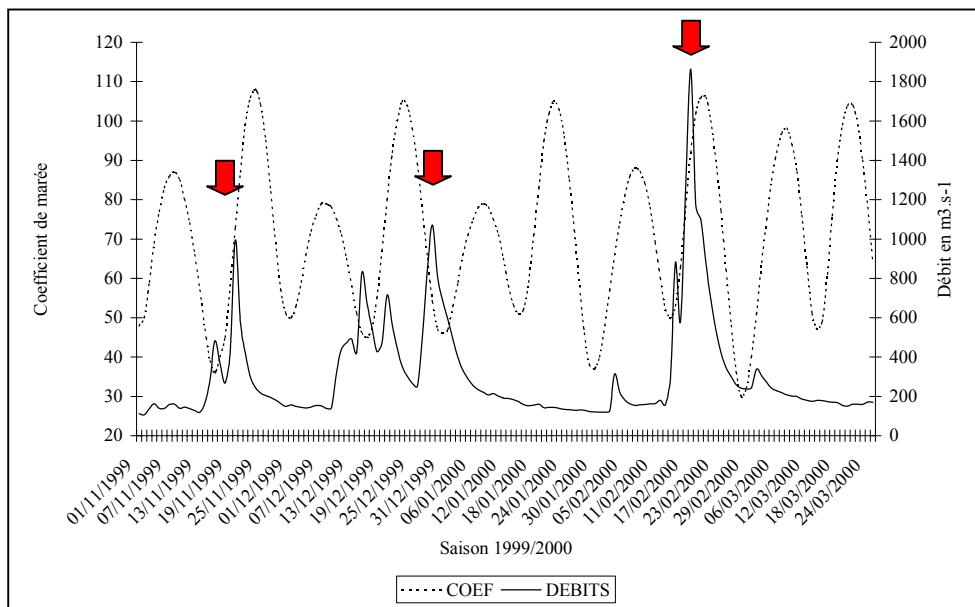


Figure 28 : Variations du coefficient de marée et du débit fluvial au cours de la saison 1999/2000 – (Les flèches rouges indiquent des conditions éventuelles de blocage pour les mouvements migratoires des civelles).

Durant la saison de pêche 1999/2000 (figure 28), on observe des crues modérées : autour de $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en novembre et décembre. Ces crues d'amplitude limitée peuvent être qualifiées de favorables à la montaison des civelles car elles ne provoquent pas d'importants blocages des masses d'eau marine. En février par contre, on observe une forte crue avec une pointe de débit de l'ordre de $1900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Une telle crue empêche les flux de civelles de poursuivre leurs migrations vers l'amont. Elles sont alors rejetées contre les berges où elles peuvent être capturées sous certaines conditions.

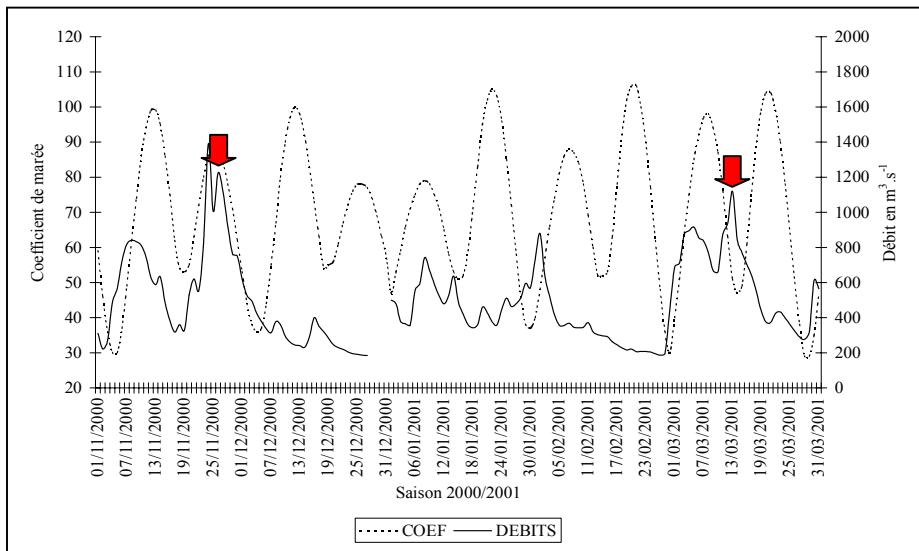


Figure 29 : Variations du coefficient de marée et du débit fluvial au cours de la saison 2000/2001 - (Les flèches rouges indiquent des conditions éventuelles de blocage pour les mouvements migratoires des civelles).

Durant la saison de pêche 2000/2001 (figure 29), on observe deux crues modérées de l'ordre de $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La première apparaît fin novembre au moment des forts coefficients de marée et la seconde à la mi-mars, de moindre ampleur instantanée, mais plus étalée dans le temps. Des augmentations rapides du débit apparaissent tout au long de la saison, mais toujours inférieures à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

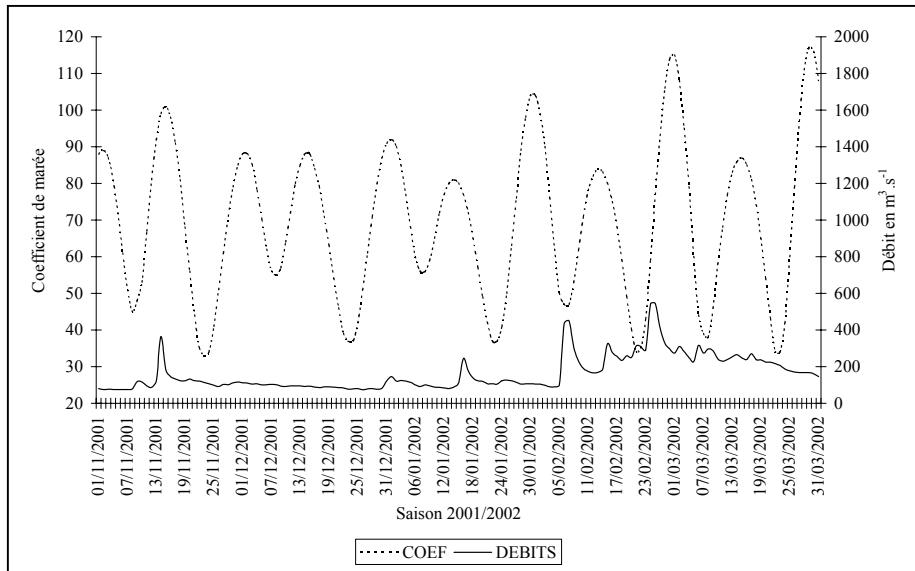


Figure 30 : Variation du coefficient de marée et du débit fluvial au cours de la saison 2001/2002.

La saison 2001/2002 de pêche est caractérisée par des débits très faibles surtout en début de saison et sans aucune forte variation instantanée (figure 30). Le débit moyen durant la période de pêche est resté très faible et inférieur à $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alors qu'il est généralement autour de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Seulement quelques coups d'eau compris entre 500 et $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sont observés. Ces conditions ne semblent pas particulièrement favorables à l'attraction des civelles migrant sur ou à proximité du talus continental (faible panache d'eau douce en mer).

2.3.2. Pluviométrie

Les données de pluviométrie sont issues de Météo France et proviennent de la station de Pau.

Les fluctuations de débits sont corrélées aux précipitations sur le bassin versant qui viennent alimenter les différents affluents de l'Adour. Les graphiques ci-dessous permettent de montrer les corrélations avec les fortes précipitations et l'augmentation du débit fluvial enregistré dans la zone estuarienne. On observe un décalage entre les pics de débits et les pics de précipitations, lié au temps de déplacement des masses d'eau entre l'amont et l'aval.

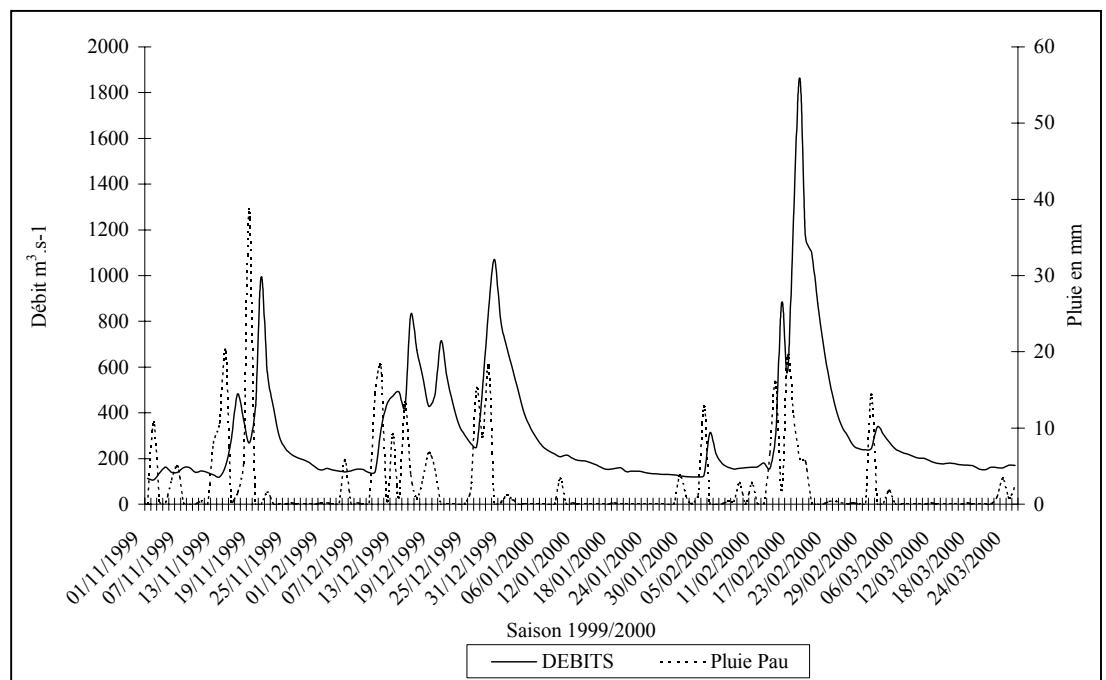


Figure 31 : Variations des débits en fonction des précipitations au cours de la saison de migration 1999/2000.

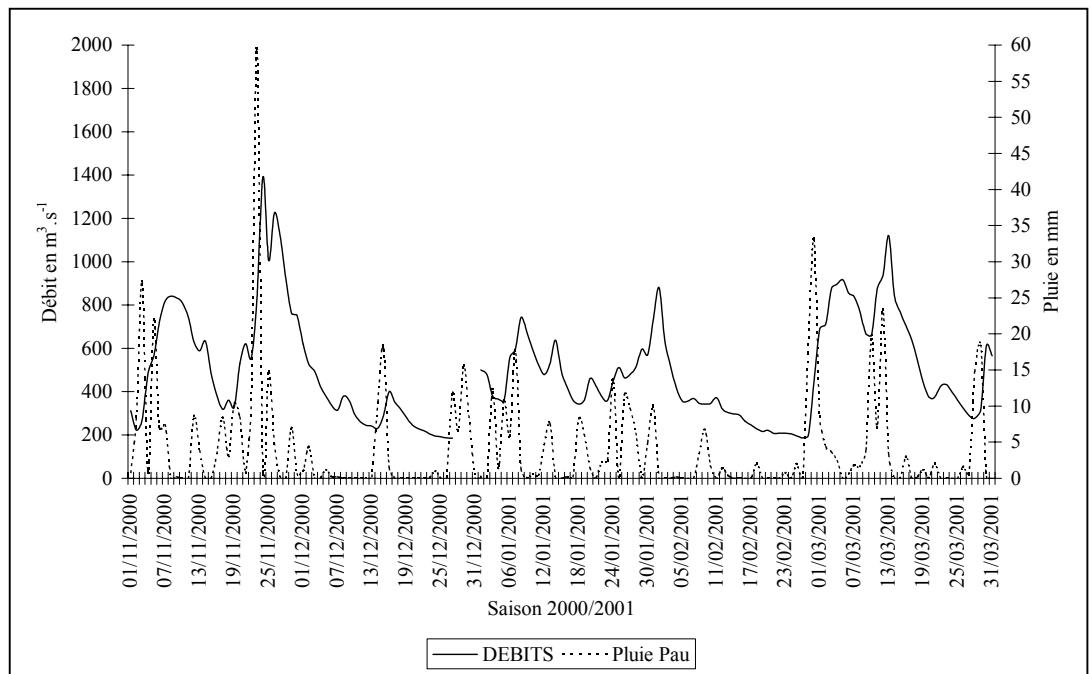


Figure 32 : Variations des débits en fonction des précipitations au cours de la saison de migration 2000/2001.

2.3.3. Température de l'eau

Si les forts débits fluviaux peuvent provoquer un blocage de la migration des civelles, certaines conditions thermiques le peuvent également :

- quand les températures sont inférieures à 5°C (Desaunay & al., 1987)
- quand la différence de température entre les eaux marines et les eaux fluviales est supérieure à 3°C (McGovern & McCarthy, 1992).

Les graphiques ci-dessous présentent les fluctuations conjointes des températures de l'estuaire de l'Adour et la température des eaux marines de surface. Ces deux sources d'informations peuvent être soumises à des variations liées aux fluctuations de la température de l'air qui engendre des modifications au niveau de la zone d'interface air/eau. Les périodes de blocages théoriques sont signalées par les flèches rouges.



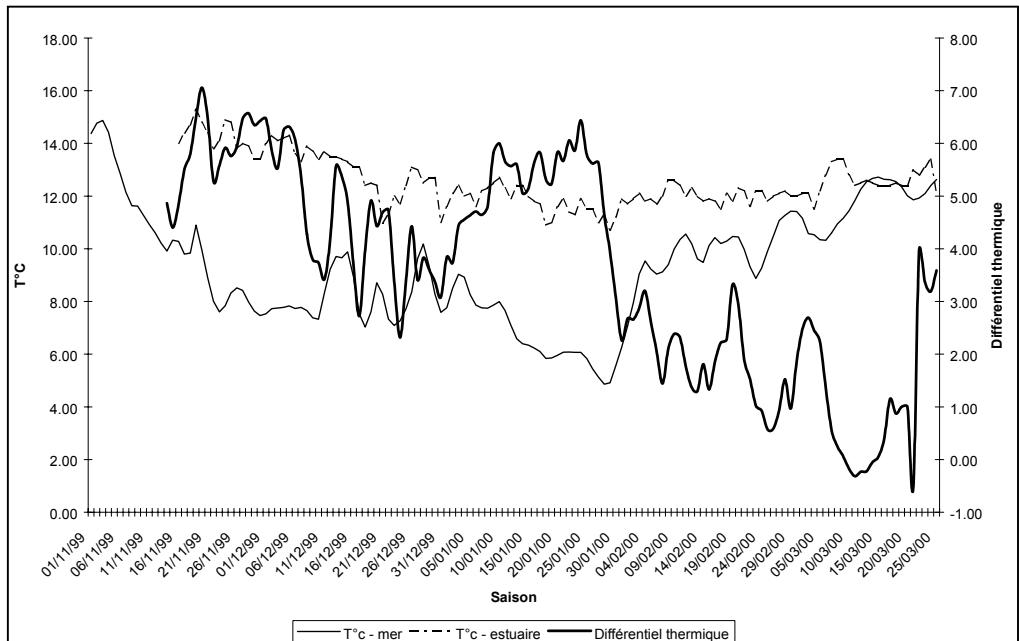


Figure 33 : Variations conjointes de la température de l'eau de mer et de l'eau de l'estuaire de l'Adour au cours de la saison 1999/2000.

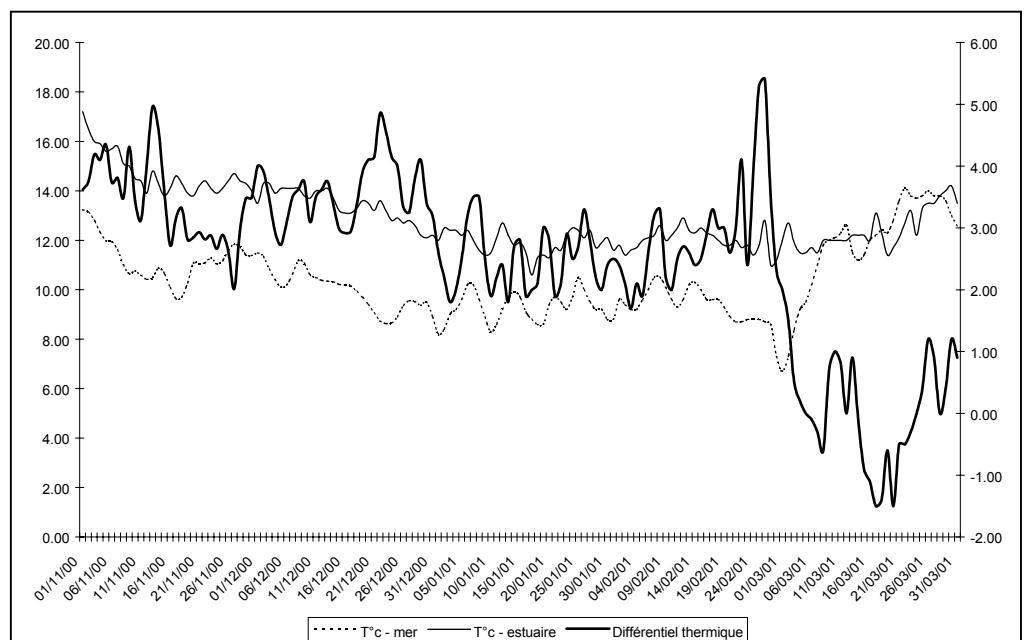


Figure 34 : Variations conjointes de la température de l'eau de mer et de l'eau de l'estuaire de l'Adour au cours de la saison 2000/2001.



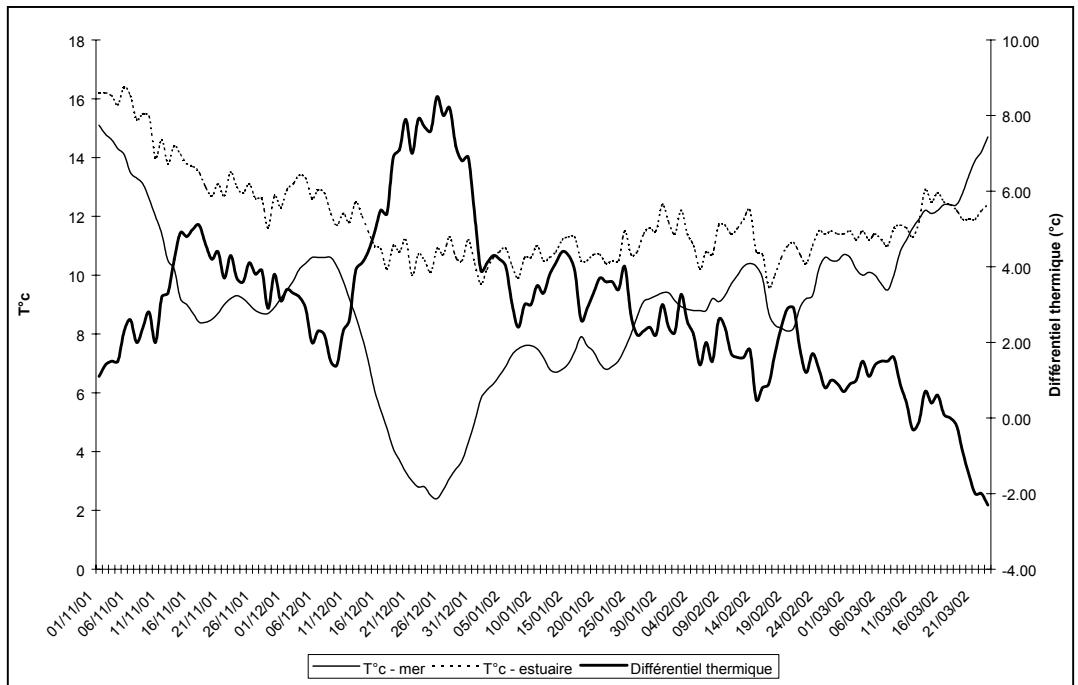


Figure 35 : Variations conjointes de la température de l'eau de mer et de l'eau de l'estuaire de l'Adour au cours de la saison 2001/2002.

3. Caractéristiques de la pêcherie de civelles dans l'estuaire de l'Adour

La pêche de la civelle représente une activité sociale et économique de première importance et constitue, pour le golfe de Gascogne, une des toutes premières ressources ichtyologiques. Elle représente 34 millions d'euros à la première mise en marché pour la façade atlantique française (Prouzet (coord.) 2002).

En France, 1200 à 1500 entreprises de pêche fluviale, estuarienne et littorale dépendent de l'exploitation de l'anguille (et surtout de la civelle) pour assurer l'équilibre financier de leurs activités. Dans le bassin de l'Adour, la civelle fait l'objet d'une pêche amateur et professionnelle. Les pêcheurs professionnels (environ 70 marins de l'estuaire et 130 fluviaux) sont très dépendants de cette activité qui représente environ 70% du chiffre d'affaires total de la pêcherie de poissons migrateurs. 60 à 70% des entreprises de pêche n'exploitent que cette espèce.

3.1. Description de l'activité de pêche

3.1.1. Législation et réglementation générale

Dans la zone estuarienne, pour l'accès à l'exercice de la pêche, il est nécessaire de distinguer deux cas :

- Celui où la pêche se pratique dans un secteur soumis à réglementation maritime : l'estuaire maritime.

La zone maritime: va de la limite transversale de la mer à la limite de salure des eaux¹. La pêche dans cette zone est sous réglementation maritime. Elle est réservée aux marins-pêcheurs.

- Celui où la pêche se pratique dans un secteur où la pêche est sous réglementation fluviale : zone mixte et zone fluviale "stricte".

La zone mixte : s'étend de la limite de salure des eaux jusqu'au premier obstacle à la navigation². Le terme "mixte" signifie le fait que la circulation dans cette zone est sous le régime des Affaires Maritimes tandis que la pêche est sous le régime fluvial et soumise à une réglementation relevant aujourd'hui du ministère de l'Environnement.

La zone fluviale *stricto sensu* : s'étend en amont de la limite d'influence des marées.

¹ Limite des fleuves, rivières ou canaux en aval desquelles les eaux sont salées. Ces limites sont fixées réglementairement

² La limite des affaires maritimes : les navires munis d'un rôle d'équipage peuvent naviguer dans les estuaires, rivières, fleuves et canaux jusqu'à ces limites, fixées aujourd'hui "au niveau du premier obstacle à la navigation". Définies en 1959 par décret, la construction postérieure de pont aval des limites peut avoir modifier les données du texte de 1959.



En zone estuarienne, où la pêche est sous réglementation maritime, depuis 1979, la commission des poissons migrateurs et des estuaires (CIPE) a mis en place un système de "licence CIPE" qui permet de recenser les marins pêcheurs autorisés à pêcher dans les estuaires, ainsi que ceux qui pêchent les poissons migrateurs hors des estuaires. Cette licence est obligatoire pour la pêche ciblée de ces espèces jusqu'à la limite des eaux territoriales.

En 1993, la CIPE instaure un outil novateur de la gestion des ressources et des activités de pêche avec la mise en place d'un système de licences limitatives d'accès à la ressource³, l'objectif étant de réserver aux petits bateaux l'accès aux pêcheries estuariennes de manière à protéger le caractère artisanal de cette activité (Gharbi, 2002).

Depuis cette date, un quota de licences est fixé et validé chaque année par le CNPMEM (le Comité National des Pêches Maritimes et des Élevages Marins) et est distribué par les CRPMEM (Comité Régional des Pêches Maritimes et des Élevages Marins).

La délivrance des licences est basée sur trois critères :

- les capacités biologiques des eaux ;
- les caractéristiques des navires (sont admis les navires d'un tonnage inférieur ou égal à 10 tonneaux de jauge brute, d'une longueur hors-tout inférieure à 12 mètres, équipés d'un moteur d'une puissance maximale embarquée de 150 CV soit 110 kW ramené à 100 CV soit 73kW par bridage⁴) ;
- les antériorités de pêche du patron pêcheur (le marin pêcheur doit justifier de 36 mois de navigation à la pêche, avoir pratiqué la pêche professionnelle au moins 9 mois pendant les 12 derniers, s'acquitter des taxes professionnelles et effectuer des déclarations statistiques⁵).

3.1.2. Découpage administratif et cadre réglementaire pour la pêche dans l'estuaire

▪ Zones administratives

Comme les autres grands bassins fluviaux français, le bassin de l'Adour est découpé en trois zones administratives (carte 11). Les principaux points réglementaires sont rapportés dans le tableau 14.

³ Arrêté ministériel du 15 septembre 1993

⁴ délibération n°5/99 de la CIPE

⁵ délibération n°5/99 de la CIPE

Tableau 14: principaux points réglementaires appliqués aux trois zones administratives de l'Adour. (Source : Caill-Milly *et al.*, 2002)

Zone	Eau salée	Eau douce	
	zone maritime	zone fluviale mixte	zone fluviale stricte
Limite aval	limite transversale de la mer	limite de salure des eaux (à 22 km de l'embouchure sur l'Adour)	limite de la marée dynamique
Ouverture à la pêche professionnelle	en totalité total : environ 22 km	en totalité, réparties sur 7 lots, (5 dans les Landes, 2 dans les Pyrénées-Atlantiques) total : environ 44 km	en partie, sur 9 lots (tous dans les Landes) total : environ 47 km
Réglementation de la pêche	DRAM d'Aquitaine	DDAF des Landes DDAF des Pyrénées-Atlantiques	DDAF des Landes
Conditions particulières de pêche	pêche au filet interdite dans les parties salées des affluents de l'Adour (Nive, Bidouze, etc.)		
Contingentement de l'accès au droit de pêche public	licences CIPE pour toute la zone maritime (70 licences)	affermage par licences DDAF pour chaque lot (35 à 50 licences de grande pêche ⁶ , et 85 à 100 licences de pêche à la civelle selon les lots)	affermage par location DDAF pour chaque lot (1 seul pêcheur professionnel par lot)
Coût annuel de l'accès au droit de pêche	licence CIPE = 60 € en 2002 ⁷	licence DDAF40 grande pêche = 83,8 € (550 F) licence DDAF40 civelle = 71,6 € (470 F)	lot DDAF40 = 106,7 € à 853,7 € (de 700 F à 5600 F)

La zone de pêche exploitée par les marins pêcheurs de l'Adour se trouve dans la région du Bas-Adour. Elle comprend :

- la zone maritime de l'estuaire qui s'étend sur 22 km, depuis l'embouchure jusqu'à la limite de salure des eaux⁸ au pont d'Urt. La pêche y est sous réglementation maritime,
- La zone fluviale mixte : d'Urt au confluent des gaves de Pau et d'Oloron et au pont de Vimont sur l'Adour, se situe à 54 Km de l'embouchure, où la pêche est sous le contrôle de la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts (DDAF) des Landes et des Pyrénées-Atlantiques.

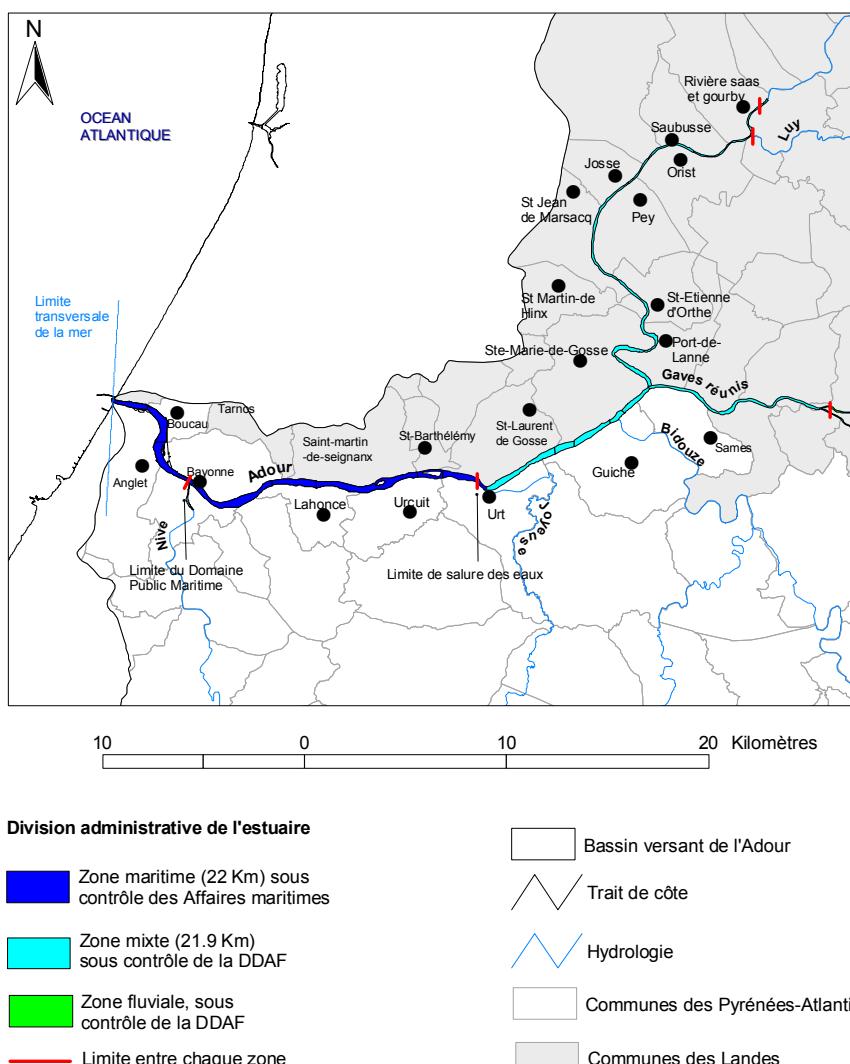
⁶ Dans le cadre de l'exploitation du droit de pêche de l'état en eau douce dans le bassin de l'Adour et des courants côtiers, la licence de « grande pêche » donne accès à la pêche de l'ensemble des espèces (y compris la civelle) et des engins autorisés à la pêche professionnelle. La licence « pibale » ne donne accès qu'à la pêche de la civelle.

⁷ 390 F (59,46 €) en 2000 et 2001.

⁸ Fixée par le décret du 4 juillet 1853

Pour exercer leurs droits dans cette zone, les pêcheurs (marins ou fluviaux) acquittent des taxes en fonction du nombre de lots qu'ils désirent exploiter.

- La zone fluviale stricte se situe en amont de la précédente. La pêche dans ces secteurs est soumise à une réglementation relevant du ministère de l'Environnement. L'activité de pêche en zone fluviale est soumise à l'obtention de droits de pêche de l'État en eau douce. Pour ce faire, les pêcheurs sont tenus de déposer un dossier d'entreprise de pêche professionnelle en eau douce auprès de la DDAF des Landes.



Carte 11 : Limites géographique et administrative de l'estuaire de l'Adour (Source : Gharbi, 2002).

▪ Catégories de pêcheurs professionnels

On distingue deux catégories de pêcheurs professionnels :

- les pêcheurs professionnels maritimes peuvent exercer leur métier en zone maritime, du fait de leur statut social de marins pêcheurs. Des droits historiques les autorisent à pêcher en zone mixte, à condition d'appartenir à une association interdépartementale de pêcheurs professionnels prévue par la loi sur la pêche fluviale du 29 juin 1984 (pour l'Adour il s'agit de l'Association Agréée Interdépartementale des Pêcheurs Professionnels du Bassin de l'Adour et Versants Côtiers) ; (cauvin & Paquignon, 2000) ;
- les pêcheurs professionnels sous régime agricole sont adhérents à une association agréée de pêcheurs professionnels en eau douce. Pour cela, ils doivent consacrer au moins 600 heures par an à la pêche⁹ et être affiliés au régime de protection sociale agricole.

Avec les marins pêcheurs exerçant en zone mixte, ils constituent le groupe des pêcheurs professionnels fluviaux.

▪ Ouverture de la pêche à la civelle

La saison réglementaire d'ouverture de la pêche à la civelle s'étend du 1^{er} janvier au 31 mars et du 1^{er} novembre au 31 décembre.

Le terme de saison de pêche pour la civelle désigne une saison à cheval sur deux années civiles, correspondant aux périodes de migration.

Le nouvel arrêté préfectoral du 17 mai 2002 réglementant la saison 2002/2003 de pêche maritime des poissons migrateurs en mer et sur l'Adour stipule pour la civelle :

- les dimensions des tamis à main et poussé ainsi que les conditions d'utilisation ;
- la réglementation concernant la pêche de loisir à pied ainsi que les dimensions du tamis alors autorisé (Article 3 de l'arrêté) ;
- l'interdiction de toutes opérations sur la civelle du 8 avril au 31 octobre ;
- les dates d'ouverture de la pêche à la civelle en fonction de l'engin utilisé ;
- les dates concernant l'obligation de relève décadaire durant la saison 2002/2003.

Remarquons que la pratique de la pêche de la civelle sur l'Adour se différencie de celles des autres estuaires (de Casamajor, 1998). En effet, longtemps le tamis à main manœuvré en surface depuis la berge ou d'un bateau à poste fixe a été seul autorisé en zones mixte et fluviale. En zone maritime, le tamis poussé en surface par une embarcation motorisée est autorisé depuis 1995.

⁹ Décret n° 94-555 du 28 juin 1994 modifiant l'article L. 234-37 du livre II du code rural

Une autre technique de pêche est autorisée à titre expérimental sur l'Adour depuis 2002 dans la partie fluviale. C'est celle du "tamis ancré" qui consiste à fixer au fond deux tamis qui peuvent être positionnés à deux profondeurs différentes.

3.1.3. Type de navire et caractéristiques des engins de pêche



Photo 9 : Couralin traditionnel opérant sur l'Adour (source : Gharbi, 2002).

Le navire traditionnellement employé par la pêche professionnelle dans le bassin de l'Adour est le "couralin", une barque de petite taille, à fond plat, large et courte. Il est apparu dans sa forme actuelle vers la fin du XIX^{ème} siècle. Le couralin traditionnel en bois, de 6 mètres de longueur environ, tend à disparaître.



Photo 10 : Embarcation opérant sur l'Adour et adaptée aux conditions de pêche dans le bas de l'estuaire (source : Ifremer).

Des embarcations plus modernes tendent peu à peu à remplacer les précédentes.

En matière plastique, aluminium ou acier inoxydable, aux formes plus adaptées aux conditions de pêche dans le bas de l'estuaire, près de l'embouchure.

Aujourd'hui, le bois concerne essentiellement les navires utilisés dans le haut de l'estuaire.

Tableau 15 : Caractéristiques des engins de pêche - engins employés, lieux de pêche.
(Source : Caill-Milly *et al.*, 2002)

Engin	Caractéristiques	Lieu de pêche
Tamis à civelle manié à la main	- diamètre maximal : 1,20 m - profondeur maximale : 1,30 m	- surtout en eau douce dans le bassin de l'Adour - en eau douce et en eau salée dans les courants côtiers
Tamis à civelle poussé par le navire	- diamètre maximal : 1,20 m - profondeur maximale : 3 m	uniquement en zone maritime (interdit en eau douce)



La technique du tamis poussé est, d'apparition récente, depuis sept ans environ. Son emploi, alors interdit, est constaté au cours de la saison de pêche à la civelle de 1995. Cette technique a été légalisée en 1999 (Arrêté maritime du 17/05/02 article 2¹⁰), pour la zone maritime seulement.

Photo 11 : Vue d'un tamis poussé utilisé dans la partie maritime de l'estuaire de l'Adour (source : ifremer)

3.1.4. Opérations de pêche

En zone maritime, la pêche de la civelle se pratique généralement avec deux tamis (de 1,20 m de diamètre) fixés et tractés par le navire. C'est la technique de "drossage".

Le déroulement de la pêche de la civelle au tamis poussé sur l'Adour est le suivant. Chaque professionnel effectue des allers et retours entre deux points fixes. Ces derniers peuvent être matérialisés par deux maisons dans l'estuaire. Le temps du trajet entre les deux repères correspond à la durée de poussée du tamis (soit environ 10 minutes). Au bout du trajet, le pêcheur relève les tamis pour vider ses prises dans un vivier présent sur chaque unité de pêche.

Cette organisation permet d'éviter tout conflit sur les zones de pêche puisque les bateaux ne se croisent ni ne chevauchent la zone de pêche d'un autre.

¹⁰ La pêche maritime professionnelle de la civelle s'exerce exclusivement à l'aide d'un tamis n'excédant pas 1,20 m dans sa plus grande dimension. Lorsque la pêche s'exerce à partir d'un navire, il ne peut être utilisé plus de deux tamis simultanément. La longueur de leur manche ne peut être supérieure à 3 mètres.

La pêche se pratique entre le coucher du soleil et le lever du jour, au moment le plus favorable ; c'est à dire depuis le niveau de basse mer jusqu'au niveau de pleine mer.

Traditionnellement dans l'Adour, la pêche à la civelle se pratique avec un seul tamis, que le pêcheur manipule à la main de la rive ou d'un navire ancré. Les bateaux éclairent leur travail à l'aide d'une lumière de faible intensité afin de localiser le sillon formé par les civelles et de l'exploiter de l'aval vers l'amont (de Casamajor, 1998).

3.2. Caractéristiques de la pêcherie de civelles sur l'Adour (saisons 1999/2000, 2000/2001 et 2001/2002)

L'aire de pêche exploitée par les marins pêcheurs de l'Adour se trouve dans la région du Bas-Adour. Elle comprend la zone maritime de l'estuaire (de l'embouchure à Urt) où la pêche est sous réglementation maritime, et la zone fluviale mixte (d'Urt au confluent des gaves de Pau et d'Oloron et au Vimport sur l'Adour), où la pêche est sous réglementation fluviale. La zone fluviale au sens strict en amont de la confluence des Gaves.

3.2.1. Campagne 1999-2000

Pour la saison 2000, 65 marins pêcheurs ont demandé et obtenu une licence de la CIPE (Commission des poissons migrateurs et des estuaires).

Pour la saison 1999-2000, trois pratiques ont été mises en œuvre dans l'estuaire de l'Adour :

- le tamis à main seul (16 pêcheurs) ;
- les tamis « poussés » (21 pêcheurs) ;
- les deux techniques combinées (20 pêcheurs).

L'année 1999/2000 confirme la grande dépendance économique de la pêcherie vis-à-vis de la "campagne civelle". Avec un chiffre d'affaires pour cette espèce supérieur à 7,5 millions de francs qui représente 80,4% du chiffre d'affaires.

Distribution des débarquements.

La production débarquée en 1999/2000 est estimée entre 9 et 10 tonnes pour les 57 marins pêcheurs titulaires de licence CIPE qui ont effectivement pêché, au tamis tenu à la main ou poussé, sur le bassin de l'Adour. Cette production a été réalisée pour 49 % au tamis à main, et pour 51 % aux tamis poussés. La saison peut-être qualifiée de précoce en raison des fortes productions enregistrées dès le mois de novembre.

Le nombre de pêcheurs ayant pratiqué la pêche est relativement constant au cours de la saison, il diminue légèrement au mois de février. Par contre, on observe une diminution brutale au mois de mars avec seulement deux pêcheurs au tamis à main et un faible nombre de sorties.

Tableau 16 : Caractéristiques mensuelles de la saison de pêche 1999/2000 en %.

1999/2000		Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Nombre total de sorties*		533	797	385	321	7
Main	Poussé	284 | 249	353 | 444	169 | 216	195 | 126	7 | 0
Nombre de pêcheurs**		41	46	46	43	2
Main	Poussé	24 | 26	28 | 32	21 | 25	23 | 21	2 | 0
Poids total capturé (Kg)		2345	4058	1372	1179	5,8
% Main	% Poussé	53 | 47	45,6 | 54,4	40,2 | 59,8	60,7 | 39,3	100 | 0
CPUE moyenne (Kg.sortie⁻¹)		3,64	4,34	3,15	3,58	2,38
Main	Poussé	3,44 | 3,84	4,4 | 4,28	3,02 | 3,29	3,91 | 3,25	2,05 | 2,72

* le nombre total de sorties prend en compte les sorties réalisées à la fois au tamis à main et aux tamis poussés y compris celles où le pêcheur ne spécifie pas l'engin utilisé. Ce qui explique que certaines sorties ne soient pas prises en compte pour le nombre de sorties par type d'engin.

** certains pêcheurs utilisent les deux types d'engins.

La répartition des productions suivant les mois de pêche (tableau 16) fait apparaître un effort de pêche concentré sur les deux premiers mois de la saison novembre et décembre.

Évolution des captures au cours de la saison

La figure 36 matérialise la quantité de civelles capturée par un pêcheur un jour donné selon le type d'engin utilisé. Les captures au tamis à main et aux tamis poussés montrent certaines similitudes lors de la saison 1999/2000. Les pics de capture apparaissent au même moment. L'amplitude de ces pics est plus marquée au mois de novembre et décembre. La majorité des fortes captures se situent entre 10 et 30 kg.sortie⁻¹.

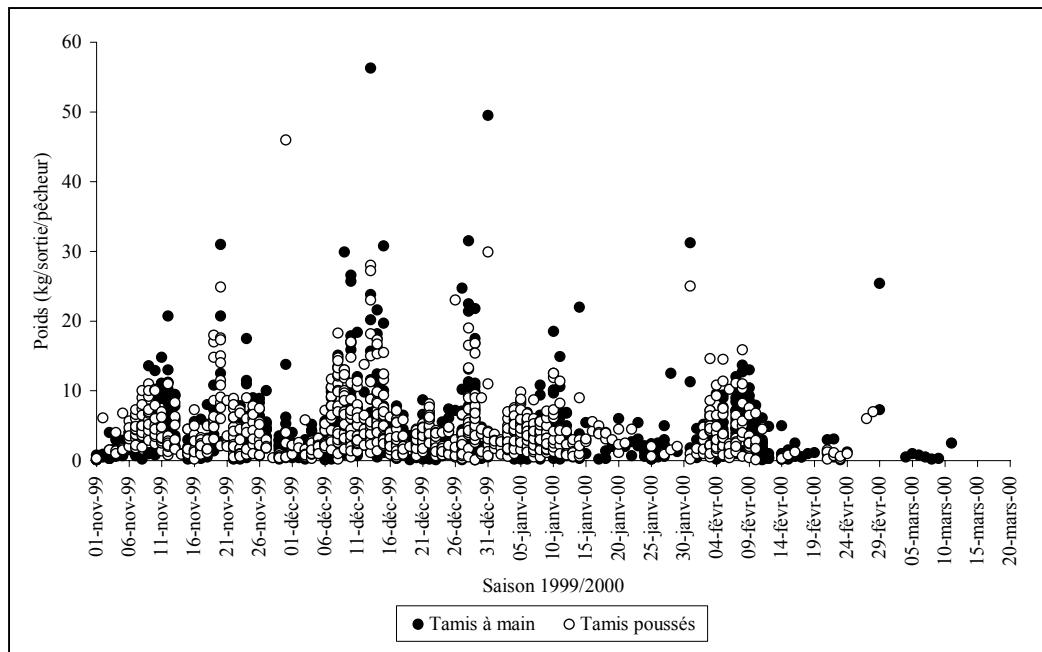


Figure 36 : Captures journalières de civelles aux tamis poussés et au tamis à main pour la saison 1999/2000,

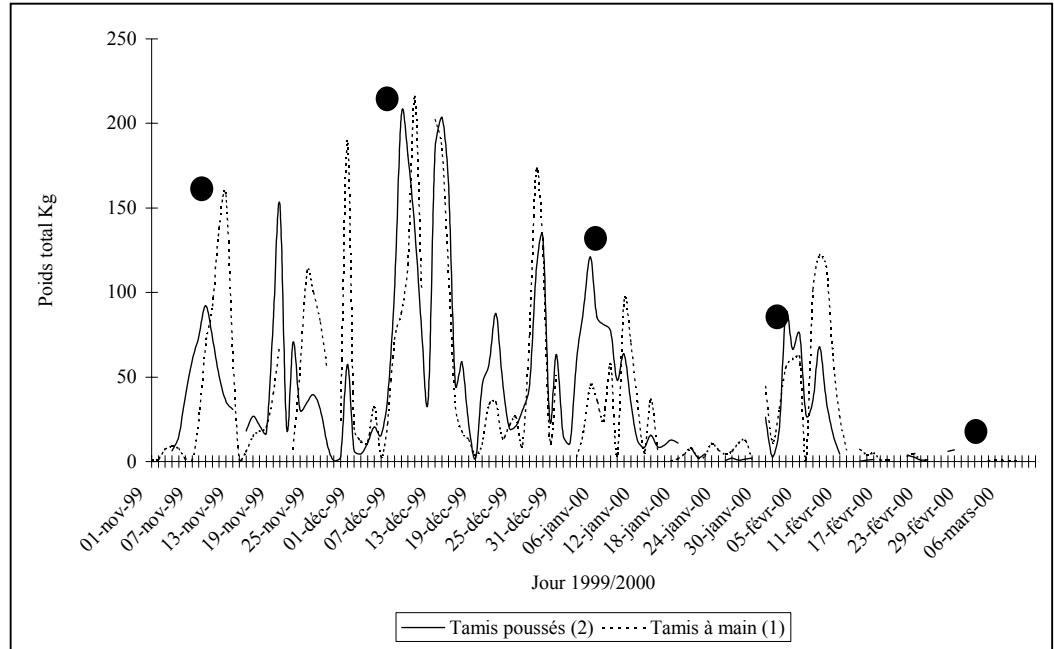


Figure 37 : Évolution du poids total capturé par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin utilisé au cours de la campagne de pêche 1999/2000,
(Nouvelle lune : ●)

La figure 37 permet de mettre en évidence les décalages existants entre les pics de captures aux tamis poussés et au tamis à main réalisés plus en amont en zone fluviale. Certains de ces pics matérialisent l'avancée des concentrations de civelles dans l'estuaire et permettent de valider les vitesses de migration (cf. modèle comportemental chapitre 5). Ce graphique montre qu'à chaque nouvelle lune des captures de civelles sont effectuées en abondance, mais des pics de captures peuvent également être observés entre 2 nouvelles lunes.

Les CPUE varient fortement lors de la saison de pêche et sont à un haut niveau puisque la moyenne est de l'ordre de 4 kg.sortie^{-1} (figure 38). On observe de nombreux pics de CPUE de l'ordre de $8 \text{ à } 12 \text{ kg.sortie}^{-1}$. La diminution des captures est bien visible dès le mois de février. On constate que les captures par sortie sont du même ordre de grandeur pour les 2 techniques de pêche. Cette campagne est marquée par des pics de forte amplitude entre 100 et 200 kg par jour.

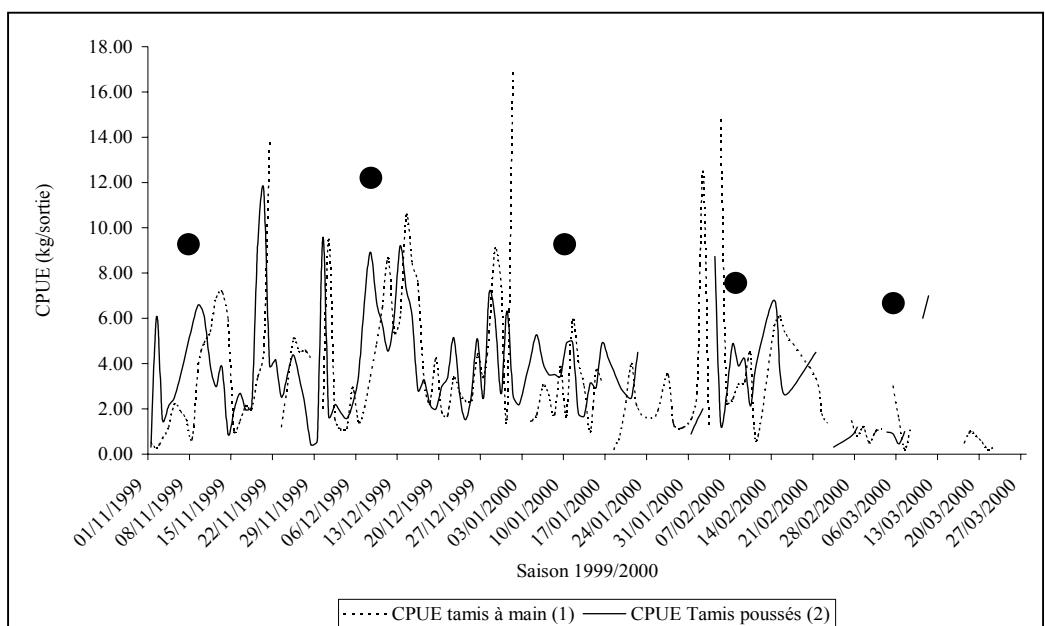


Figure 38 : Évolution des CPUE (Kg.sortie^{-1}) par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin de pêche utilisé au cours de la campagne de pêche 1999/2000,
(Nouvelle lune : ●)

3.2.2. Campagne 2000-2001

Pendant la saison 2000/2001, le nombre de marins pêcheurs ayant déclaré avoir pêché de la civelle dans l'estuaire de l'Adour est de 51 contre 57 en 1999/2000, Parmi ceux-là :

- 27 ont pratiqué la pêche aux tamis poussés (21 en 1999/2000) ;
- 11 ont pratiqué la pêche au tamis à main (16 en 1999/2000) ;
- 13 ont combiné les deux engins de pêche (20 en 1999/2000).

La proportion de pêcheurs aux tamis poussés augmente alors que l'utilisation du tamis à main diminue en 2000/2001. La production totale débarquée est estimée à 2 tonnes (1982,4 kg) alors qu'elle était aux alentours de 9 tonnes en 1999/2000, Il apparaît une différence importante entre les productions réalisées par les deux engins de pêche : 79% au tamis poussés et 21% au tamis à main alors qu'en 1999/2000, ce pourcentage était équivalent pour les deux techniques.

Distribution des débarquements

La production déclarée se concentre sur les trois premiers mois de la saison de pêche : 90% de la production totale est réalisée pendant cette période (tableau 17). Sur les deux derniers mois de la saison, les productions sont faibles et on note une diminution de l'effort de pêche nominal surtout au mois de mars (nombre de pêcheurs et nombre de sorties). Sur les 2117 sorties enregistrées, 1769 sont effectuées entre novembre, décembre et janvier. Sur l'ensemble de la saison, on comptabilise 402 sorties où il n'y a pas eu de civelles capturées. La diminution des CPUE est continue de novembre à mars pour le tamis à main. Elle est plus stable de novembre à janvier pour le tamis poussé, mais chute en février et semble remonter en mars, mois durant lequel l'effort de pêche est faible.

Tableau 17 : Caractéristiques mensuelles de la saison de pêche 2000/2001
(pêche au tamis à main = 1 seul engin - pêche aux tamis poussés = 2 engins)

2000/2001		Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Nombre total de sorties*		583	553	633	256	92
Main	Poussé	141 | 412	171 | 348	155 | 450	156 | 83	27 | 65
Nombre de pêcheurs**		45	45	43	31	16
Main	Poussé	14 | 38	18 | 37	14 | 33	17 | 17	9 | 6
Sorties nulles**		78	101	85	106	32
Main	Poussé	50 | 23	54 | 33	51 | 17	76 | 16	31 | 1
Poids total capturé (Kg)		703,4	492,5	600	120	66,5
% Main	% Poussé	16,1 | 83,9	25 | 75	13,6 | 86,4	60,8 | 39,2	30,8 | 69,2
CPUE moyenne (Kg.sortie⁻¹)		1,07	0,86	0,83	0,51	1
Main	Poussé	0,8 | 1,35	0,72 | 1	0,52 | 1,14	0,47 | 0,56	0,31 | 1,7

* le nombre total de sorties prend en compte les sorties réalisées à la fois au tamis à main et aux tamis poussés y compris celles où le pêcheur ne spécifie pas l'engin utilisé. Ce qui explique que certaines sorties ne soient pas prises en compte pour le nombre de sorties par type d'engin.

** certains pêcheurs utilisent les deux types d'engins.

L'effort de pêche a fortement diminué en fin de saison à cause d'un faible recrutement en civelles et des forts taux de mortalités après capture (en moyenne autour de 50% au lieu de 10% les autres années). Des analyses réalisées par le GDSAA¹¹ de Mont-de-Marsan, sur des civelles capturées en eau douce et en eau de mer ont montré une forte contamination bactérienne. La bactérie qui serait à l'origine de ces taux de mortalités anormalement élevés est un *Pseudomonas*.

La qualité du recrutement en civelle pourrait être un facteur important expliquant en partie la mauvaise saison 2000/2001. L'examen des caractéristiques biométriques des civelles, longueur et poids, a été réalisé sur des individus au même stade de pigmentation que ceux réalisés les années précédentes (tableau 18). On note, pour le mois de janvier correspondant à la période centrale de migration, des individus plus petits et plus maigres en moyenne en 2001 que ceux observés les 4 années précédentes.

Tableau 18 : Caractéristiques des civelles échantillonnées dans l'estuaire de l'Adour au cours des 5 dernières années au mois de janvier

Adour	Longueur moyenne en cm.	Poids moyen en g.	T°C *
Janvier 2001	6,96 (+/- 0,4)	0,30 (+/-0,06)	9,27
Janvier 2000	7,29 (+/-0,35)	0,36 (+/-0,06)	6,71
Janvier 1999	7,2 (+/- 0,42)	0,34 (+/-0,06)	7,79
Janvier 1998	7,06 (+/- 0,44)	0,33 (+/-0,06)	8,37
Janvier 1997	7,1 (+/- 0,39)	0,33 (+/-0,06)	6,03

Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart-type

* il s'agit de la moyenne de mesures journalières effectuées en aval du Pont d'Urt

¹¹ Groupement de Défense Sanitaire Aquacole d'Aquitaine.

Les conditions climatiques ont été également exceptionnelles lors de cette saison avec un régime de vent de sud pendant toute la période hivernale entraînant des températures particulièrement élevées (tableau 18). La température des eaux estuariennes est en moyenne de 10,36°C (9,27 °C en janvier) pendant les 5 mois de migration (mini : 6,7°C - maxi : 14,1°C) alors qu'elle était comprise, en moyenne, entre 8,5 et 9,2°C sur les 5 mois des 4 dernières saisons.

Évolution des captures au cours de la saison

La figure 39 présente l'ensemble des données collectées au cours de la saison de pêche 2000/2001.

Les meilleures captures ont été réalisées au mois de décembre où quelques pêcheurs ont totalisé des prises entre 5 et 8 kg au cours d'une sortie au tamis à main et aux tamis poussés alors que l'année précédente, les plus fortes captures se situaient entre 10 et 30 kg par sortie. La majorité des captures par unité d'effort se situe en dessous de 4 kg avec une augmentation de la fréquence des points entre 0 et 1 kg. Le nombre de 0, c'est à dire le nombre de fois où la sortie a eu lieu et où il n'y a pas eu de civelles capturées est important, particulièrement pour les captures au tamis à main. La moyenne des CPUE à l'échelle de la saison est de 0,87 kg.sortie⁻¹ tout engin confondu : 1,14 kg.sortie⁻¹ aux tamis poussés et 0,6 kg.sortie⁻¹ au tamis à main.

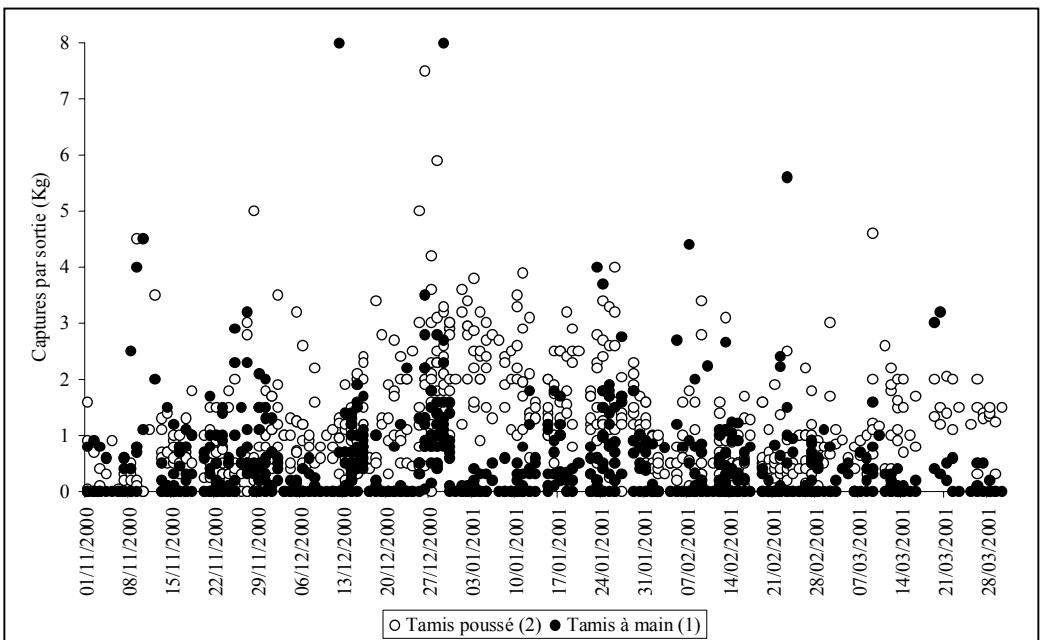


Figure 39 : Captures journalières de civelles aux tamis poussés et au tamis à main pour la saison 2000/2001.

Pour les 2 techniques, trois principaux pics de capture sont observés fin novembre, fin décembre et fin janvier au moment de la nouvelle lune (NL : 25 novembre, 25 décembre, 24 janvier). L'amplitude des pics journaliers de captures est plus forte aux tamis poussés qu'au tamis à main (figure 40). Les captures restent à un niveau bas sur l'ensemble de la saison particulièrement durant les deux derniers mois de pêche. On observe, comme les années précédentes, un décalage dans l'apparition des pics de captures au tamis à main et aux tamis poussés, lié au temps mis par les civelles pour rejoindre la zone fluviale où se pratique la pêche au tamis à main.

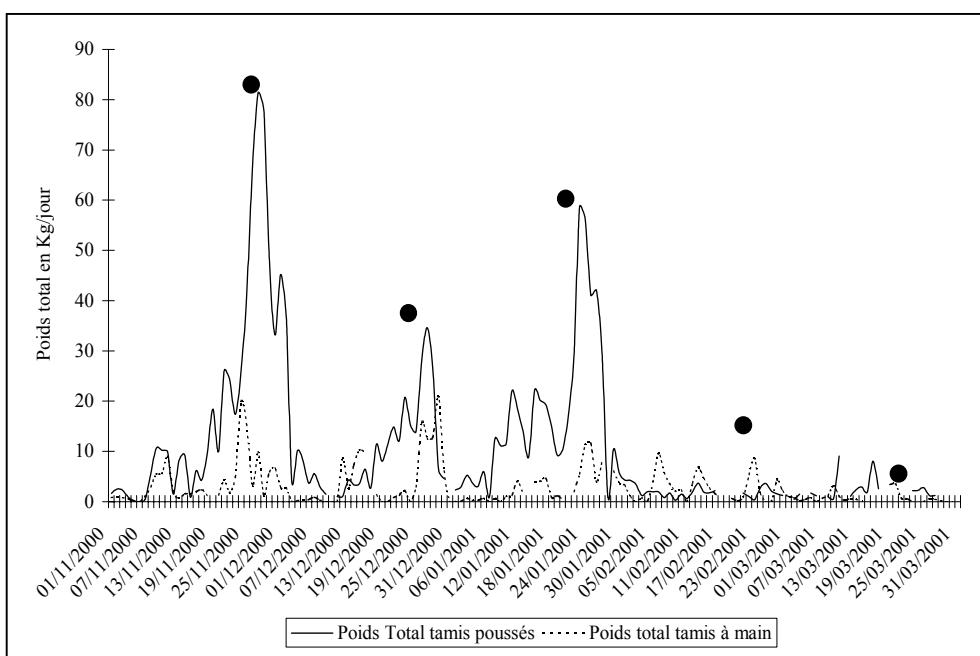


Figure 40 : Évolution du poids total capturé par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin utilisé au cours de la campagne de pêche 2000/2001.
(Nouvelle lune : ●)

En terme de CPUE, la courbe présente une plus grande variabilité y compris sur les deux derniers mois de la saison (figure 41). L'amplitude de ces pics est équivalente entre les deux engins de pêche alors qu'elle était très différente pour ce qui concerne la production totale journalière. On retrouve généralement cette similitude entre pics de captures et phases de nouvelle lune. Ces pics correspondent à la fois à une entrée du flux de civelles pendant les phases de coefficient de marée croissant et à un comportement de remontée des civelles dans la colonne d'eau en situation d'obscurité nocturne maximale.

Cependant, la variabilité observée est sous la dépendance de phénomènes hydroclimatiques et environnementaux plus complexes car on trouve des pics de CPUE qui ne correspondent pas parfois à ces phases de « lune noire » (captures du mois de mars par exemple).

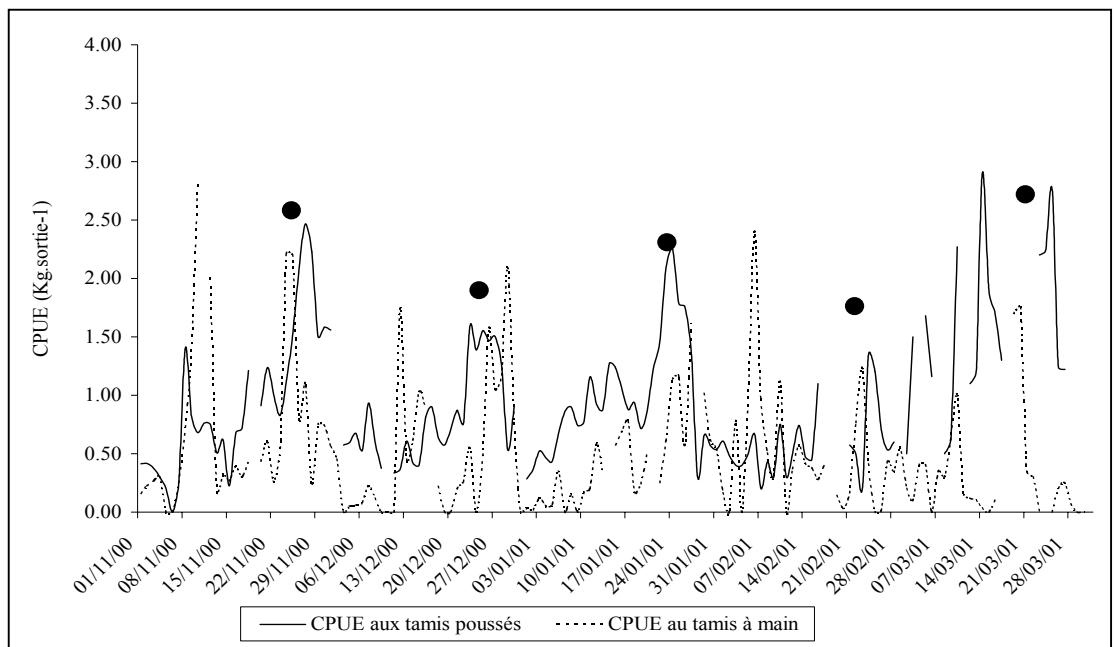


Figure 41 : Évolution des CPUE (Kg.sortie^{-1}) par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin de pêche utilisé au cours de la campagne de pêche 2000/2001.
(Nouvelle lune : ●)

3.2.3. Campagne 2001-2002

Pendant la saison 2001/2002, le nombre de marins pêcheurs ayant déclaré avoir pêché de la civelle dans l'estuaire de l'Adour est de 49 alors qu'ils étaient 51 en 2000/2001 et 57 en 1999/2000,

Tableau 19 : Nombre de pêcheurs ayant pratiqué la pêche de la civelle en fonction du type d'engin utilisé.

	Tamis à main	Tamis poussé	2 engins
1999/2000	16	21	20
2000/2001	11	27	13
2001/2002	16	16	15

2 pêcheurs n'ont pas renseigné l'engin utilisé en 2001/2002

La proportion de pêcheurs aux tamis poussés a diminué alors que l'utilisation du "tamis à main" augmente en 2001/2002 (tableau 19). On observe donc, un renversement de tendance par rapport aux années antérieures. Les conditions hydroclimatiques, eau claire et froide pendant une partie de la saison, ainsi que l'apparition du tamis ancré pourraient expliquer, en partie, ce renversement de tendance.

La production totale débarquée est estimée à 2,4 tonnes alors qu'elle était aux alentours de 2 tonnes en 2000/2001 et de 9 tonnes en 1999/2000. Elle reste donc à un niveau très bas.

Il apparaît une différence importante entre les productions des deux engins de pêche 25% de la production totale est réalisée aux tamis poussés et 65% au tamis à main (10% de la production non renseignée)¹². En 2000/2001, les proportions étaient inverses : 79% aux tamis poussés et 21% au tamis à main. En 1999/2000 ce pourcentage était équivalent pour les deux engins.

La saison de pêche 2001/2002 est caractérisée d'un point de vue hydroclimatique par des températures très froides au mois de décembre ainsi que l'absence de crues et un débit faible sur l'ensemble des 5 mois de pêche. Ces conditions hydroclimatiques "anormales" peuvent être évoquées pour expliquer les faibles rendements. Notons cependant (cf. § précédent) que des températures très clémentes n'ont pas permis le débarquement de quantités conséquentes de civelles l'année précédente.

Distribution des débarquements

Pour la saison 2001/2002, la production totale déclarée est de 2395 kg. Elle est répartie principalement sur les mois de novembre et de janvier (77 % de la production totale réalisée au cours de ces deux mois, tableau 20). Les productions sont faibles, en particulier durant le dernier mois de la saison. On note, comme les années précédentes, une nette diminution de l'effort de pêche en mars.

Tableau 20 : Caractéristiques mensuelles de la saison de pêche 2001/2002
(pêche au tamis à main = 1 seul engin - pêche aux tamis poussés = 2 engins)

2001/2002		Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Nombre total de sorties*		447	262	524	234	77
Main	Poussé	265 | 138	199 | 152	377 | 109	158 | 71	56 | 18
Nombre de pêcheurs**		45	32	35	32	13
Main	Poussé	24 | 25	22 | 11	26 | 17	23 | 16	9 | 4
Sorties nulles**		62	59	41	52	9
Main	Poussé	38 | 24	43 | 16	32 | 9	39 | 13	7 | 2
Poids total capturé *** Kg		989,3	235,5	858,8	254,1	57,3
% Main	% Poussé	56,6 | 33,9	76,6 | 20,4	71 | 15,3	64,9 | 23,8	67,4 | 23,2
CPUE moyenne (Kg.sortie⁻¹)		2,23	0,91	1,51	0,98	0,74
Main	Poussé	2,08 | 2,36	0,91 | 0,92	1,53 | 1,2	0,99 | 0,85	0,69 | 0,74

* le nombre total de sorties prend en compte les sorties réalisées à la fois au tamis à main et aux tamis poussés y compris celles où le pêcheur ne spécifie pas l'engin utilisé. Ainsi ce total peut-être supérieur à la somme des sorties pour chaque engin.

** certains pêcheurs utilisent les deux types d'engins.

¹² on note l'utilisation de plus en plus fréquente, lorsque la force de la marée le permet, de l'utilisation de 2 tamis ancrés en zone fluviale. Cette pratique permet de pêcher en profondeur et d'exploiter la civelle qui passe près du fond par eaux froides et claires.

La production diminue fortement au mois de décembre alors que les années précédentes, les captures restaient à un bon niveau au cours de ce mois. Sur les 1544 sorties réalisées au cours de la saison, on comptabilise 223 sorties où il n'y a pas eu de civelles capturées.

Les CPUE restent à un niveau bas toute la saison et plus particulièrement aux mois de décembre, février et mars ; mois où l'effort de pêche est le plus faible. Les meilleurs rendements (en kg.sortie⁻¹) sont observés au mois de novembre.

La saison 2001/2002 peut-être caractérisée comme une année précoce car le mois de novembre est le meilleur, devant le mois de janvier (tableau 20). Les mauvaises captures du mois de décembre peuvent s'expliquer par une vague de froid qui a entraîné une forte diminution de la température de l'eau (2,4°C le 25 décembre 2001) dans l'estuaire et un blocage thermique de la migration qui semble apparaître en dessous de 6°C. Une campagne de pêche expérimentale a été effectuée le 18 décembre 2001 afin de vérifier la présence des civelles dans la colonne d'eau. Aucune civelle n'a été capturée lors de cette sortie. Ce blocage a duré 15 jours : du 16 décembre au 1^{er} janvier. Il s'agit des températures les plus basses enregistrées depuis 1996, date à laquelle une sonde a été mise en place pour enregistrer les fluctuations journalières de la température de l'eau de l'estuaire.

Par la suite et durant tout le reste de la saison de pêche, la température de l'eau restant au dessus de la barre des 6°C

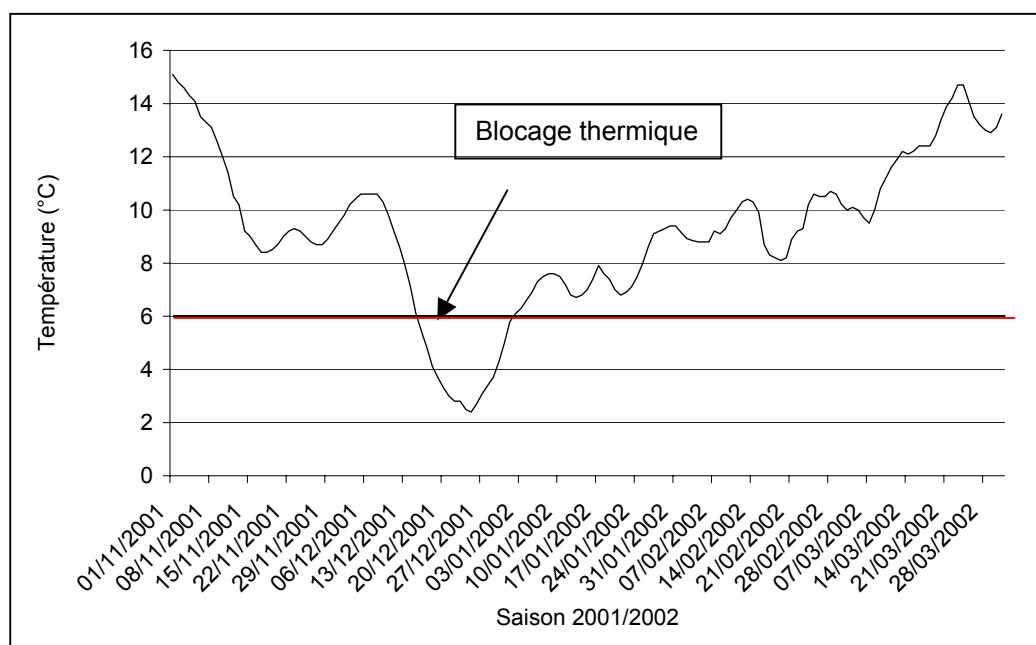


Figure 42 : Chute de la température dans l'estuaire pendant le mois de décembre.
 (— seuil en dessous duquel les civelles ne migrent plus)

La qualité du recrutement en civelles est un facteur qui avait été évoqué pour expliquer en partie la mauvaise saison 2000/2001 : des civelles petites et maigres et un état sanitaire préoccupant caractérisé par une infestation bactérienne, ces paramètres étant en grande partie à l'origine des taux de mortalités élevés.

Tableau 21 : Caractéristiques des civelles échantillonnées dans l'estuaire de l'Adour au cours des 5 dernières années au mois de janvier

Adour	Longueur moyenne en cm.	Poids moyen en g.	T°C *
Janvier 2002	7,64 (+/-0,42)	0,39 (+/-0,07)	7,49
Janvier 2001	6,96 (+/- 0,4)	0,3 (+/-0,06)	9,27
Janvier 2000	7,29 (+/-0,35)	0,36 (+/-0,06)	6,71
Janvier 1999	7,2 (+/- 0,42)	0,34 (+/-0,06)	7,79
Janvier 1998	7,06 (+/- 0,44)	0,33 (+/-0,06)	8,37
Janvier 1997	7,1 (+/- 0,39)	0,33 (+/-0,06)	6,03

Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart-type

* il s'agit de la moyenne de mesures journalières effectuées en aval du Pont d'Urt.

Pour la saison 2001/2002, les caractéristiques biométriques ne peuvent être évoquées pour expliquer les faibles captures. En effet, il s'agit des civelles les plus grosses et les plus longues répertoriées depuis la saison de migration 1996/1997 (tableau 21). Pour le mois de janvier, si on compare les civelles 2002 aux civelles des 5 années précédentes, elles sont en moyenne plus longues de 0,54 cm et plus lourdes de 0,06 g.

Évolution des captures au cours de la saison

La figure 43 présente l'ensemble des données collectées au cours de la saison de pêche 2001/2002.

Deux pics de captures ont été enregistrés aux mois de novembre et janvier. Quelques pêcheurs ont totalisé des prises de plus de 8 kg au cours d'une sortie au tamis à main. Cependant la majorité des captures par unité d'effort se situe bien en dessous de ce niveau. Le nombre de 0, c'est à dire le nombre de fois où la sortie a eu lieu et où il n'y a pas eu de civelles capturées est aussi important pour les captures au tamis à main que pour les captures aux tamis poussés (14,4% de l'ensemble des sorties). Cela est inhabituel comparé à la situation des campagnes précédentes.

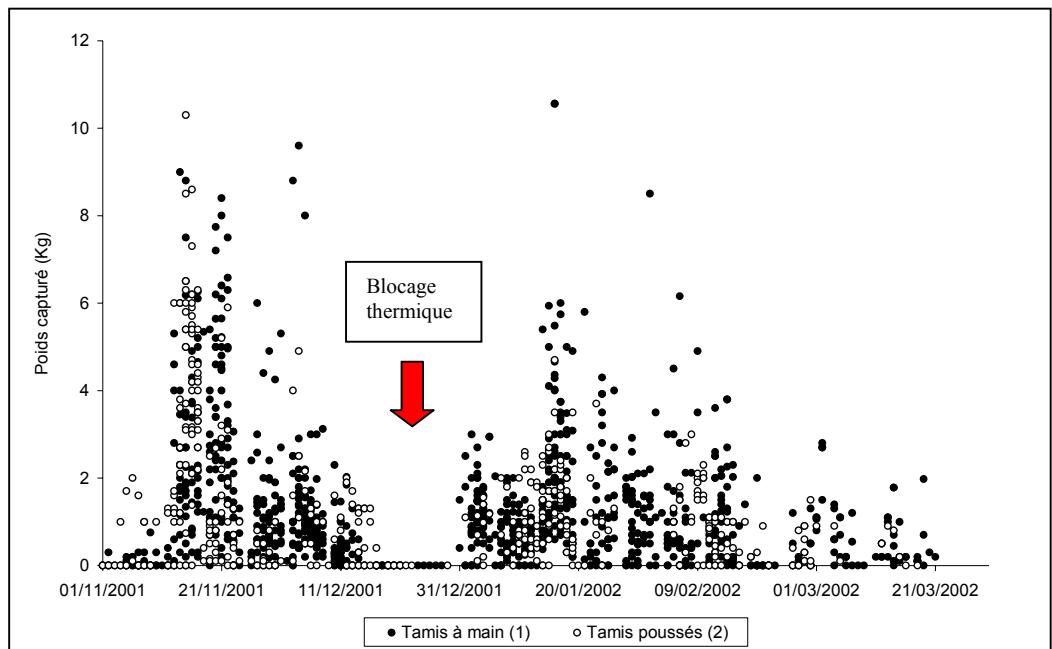


Figure 43 : Captures journalières de civelles aux tamis poussés et au tamis à main pour la saison 2001/2002.

On observe deux principaux pics de production au cours de la saison 2001/2002, aussi bien au tamis à main qu'aux tamis poussés, mi-novembre, mi-janvier au moment de la nouvelle lune (NL : 15 novembre, 13 janvier). L'amplitude des pics de production est supérieure au tamis à main par rapport aux tamis poussés (figure 44), ce qui est inhabituel.

Globalement, les captures restent faibles une fois de plus sur l'ensemble de la saison et ce, malgré des conditions hydroclimatiques très différentes. La fin de la saison est particulièrement précoce car dès la mi février les débarquements deviennent très faibles¹³.

¹³ La saison de pêche de la lamproie marine et de la civelle se chevauchent dans le temps. L'effort se concentre sur l'espèce dont la pêche est la plus rentable. Cette diminution s'explique en partie par le fait que la saison de migration ait été particulièrement précoce pour la lamproie marine en 2002, dès la mi-janvier. Pendant la période d'ouverture de pêche de la civelle entre le 15 janvier et le 31 mars, 3434 kg de lamproies ont été débarqués en zone maritime et 9978 kg en zone fluviale.

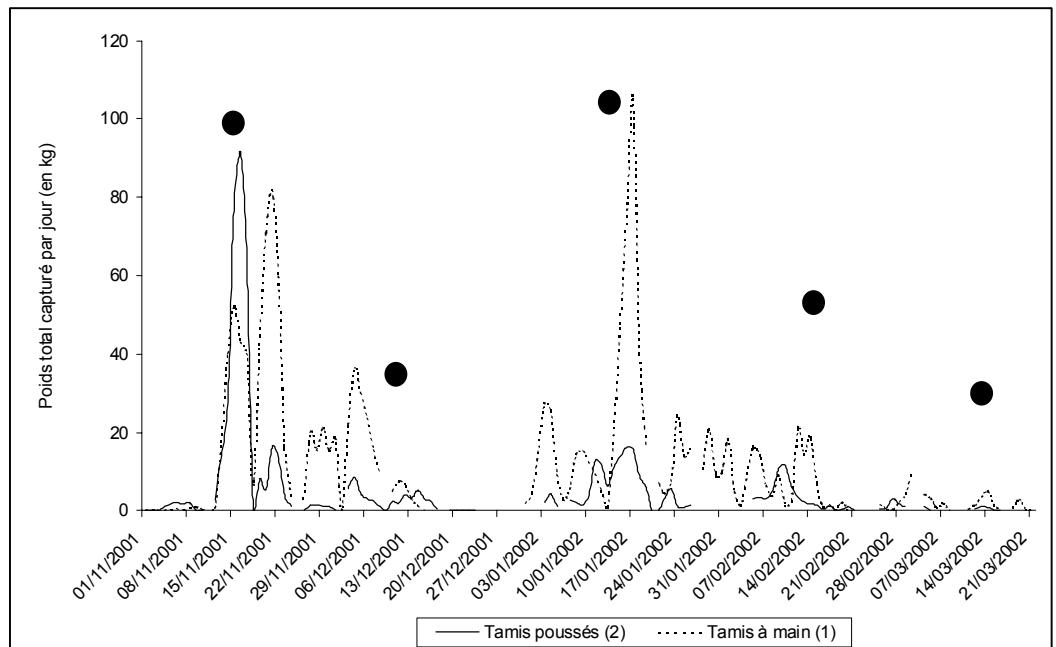


Figure 44 : Évolution du poids total capturé par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin utilisé au cours de la campagne de pêche 2001/2002.

(Nouvelle lune : ●)

La moyenne des CPUE à l'échelle de la saison est de 0,93 kg par sortie tout engin confondu (0,89 kg.sortie⁻¹ aux tamis poussés et 0,95 kg.sortie⁻¹ au tamis à main).

Quelques pics de CPUE au cours de la saison sont observés (figure 45), avec un très faible décalage entre les pics de CPUE en zones maritime et fluviale. Cela confirme le caractère particulier de la pêcherie durant cette saison. La pression de pêche en zone fluviale, comme le signalent les pêcheurs, s'est exercée beaucoup plus bas dans l'estuaire dans le lot B23 soit juste en amont du Bec des Gaves (cf carte 1)¹⁴.

L'augmentation des débits de fin de saison n'a pas provoqué de nouvelles arrivées significatives de civelles dans l'estuaire. La saison 2001/2002 est caractérisée par des débits faibles à moyens et un blocage thermique coupant visiblement toute migration dans l'estuaire lors de la deuxième quinzaine de décembre (figure 46).

¹⁴ Comme il l'a été dit précédemment, une modification de la pratique de pêche est apparue en zone fluviale. L'utilisation de 2 tamis ancrés attachés au bateau mouillé sur son ancre. Ces 2 tamis peuvent, comme nous l'avons déjà signalé, pêcher en profondeur ce qui n'est pas le cas du tamis poussé. Lorsque les eaux sont claires et que le débit est faible, cette technique peut être, dans ces conditions, plus efficace que la pratique du tamis poussé. Cela expliquerait la plus forte CPUE moyenne obtenue cette saison par l'utilisation du « tamis à main ».

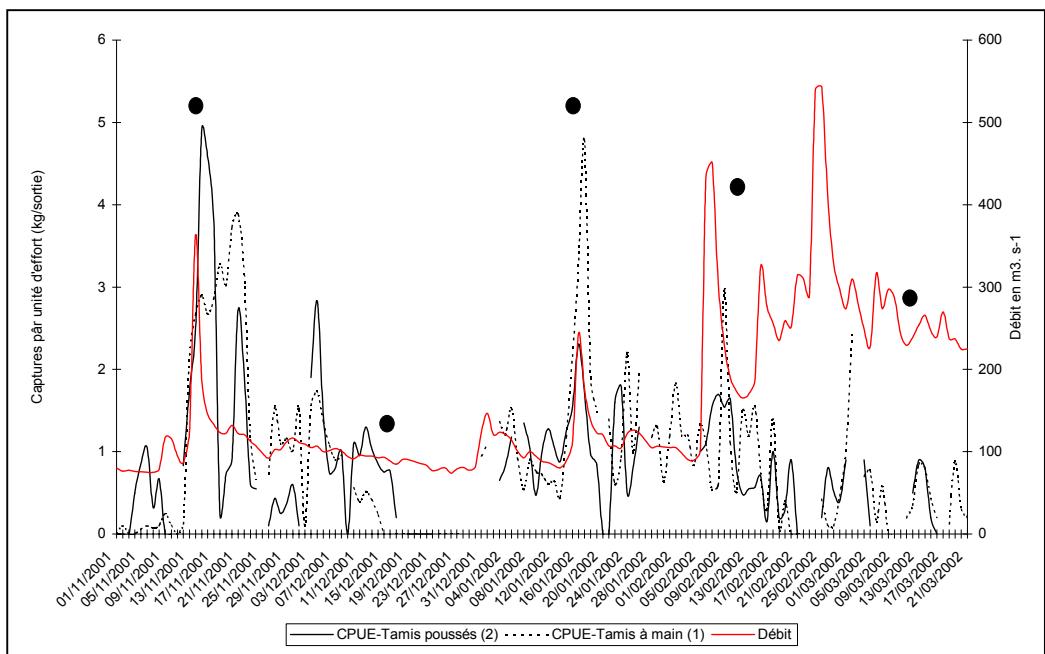


Figure 45 : Évolution des CPUE (Kg.sortie^{-1}) par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin de pêche utilisé au cours de la campagne de pêche 2001/2002. Évolution parallèle des débits. (Nouvelle lune : ●)

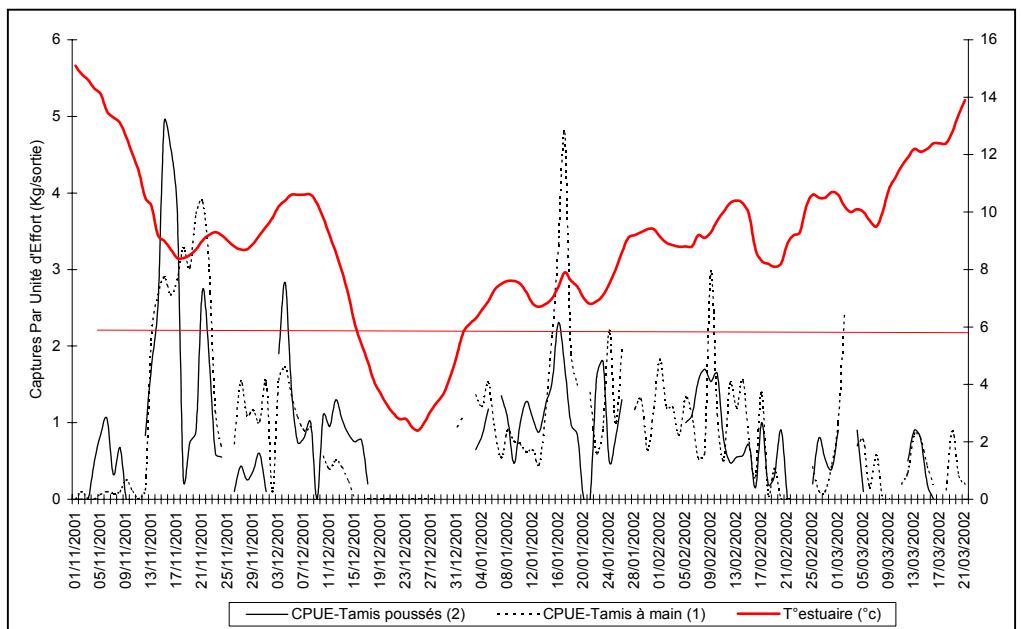


Figure 46 : Évolution des CPUE (Kg.sortie^{-1}) par jour pour l'ensemble des pêcheurs en fonction de l'engin de pêche utilisé au cours de la campagne de pêche 2001/2002. Évolution parallèle des températures.

3.2.4. Évolution des captures depuis le début du siècle sur le bassin de l'Adour et des Gaves

Tendances à long terme (figure 47)

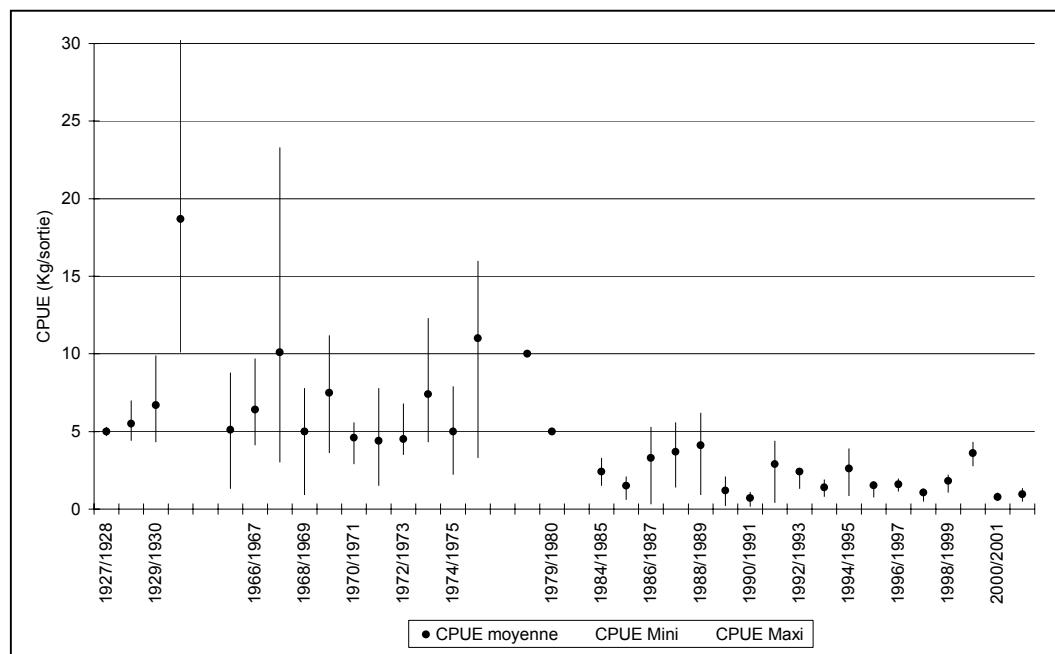


Figure 47 : Évolution de la pêche au tamis à main à partir de la moyenne des captures par sortie et valeurs minimales et maximales observées selon les différentes campagnes. (de 1927/1928 à nos jours)

La fin des années soixante-dix marque l'apparition d'un nouveau palier dans les captures totales ou relatives. Cette diminution des prises matérialise une baisse de l'abondance du recrutement en civelle qui s'est manifestée dans l'ensemble des estuaires de la zone centrale de répartition de l'anguille jaune (Portugal – Cornouaille Britannique). Elle confirme la baisse du recrutement antérieurement observée dans les zones plus septentrionales (Pays scandinaves et Baltique notamment) juste après la seconde guerre mondiale (Anonyme, 2002). Depuis le début des années 1980, les CPUE sont, en moyenne, comprises entre 2 et 4 kg sur l'ensemble de la saison, alors qu'elles étaient comprises entre 5 et 10 kg auparavant. Rien ne laisse supposer actuellement un inversement de tendance bien au contraire. La figure 47 montre que sur les sept dernières années, une seule bonne saison de production a été enregistrée (saison 1999-2000).

Avec la saison de pêche 1990/1991, les saisons 2000/2001 et 2001/2002¹⁵ sont les plus mauvaises années enregistrées depuis 1927/1928. Les CPUE sont en moyenne comprises entre 0,5 et 1 kg.

Évolution sur la période récente des captures par sortie.

L'apparition de la pêche aux tamis poussés depuis la saison 1994/1995 n'a pas permis de modifier les niveaux de CPUE (figure 48). Les courbes de CPUE réalisées à partir des données "tamis à main" et "tamis poussés (2 engins)" suivent les mêmes variations.

La différence entre les rendements (exprimés en kg par sortie) s'est peu à peu estompée au fil des saisons. L'analyse des comportements des pêcheurs montre que l'évolution des pratiques de pêche explique en grande partie cette tendance.

On constate, en particulier, une spécialisation de plus en plus grande de certains marins-pêcheurs qui ont choisi de rester en zone maritime, tendance renforcée par l'arrivée, ces dernières années, de bateaux côtiers du port de Saint-Jean-de-Luz qui n'ont pas la possibilité de remonter en zone fluviale. Or le succès de la pratique du tamis poussé est lié à l'opacité de l'eau qui provoque la remontée des civelles près de la surface. Lorsque les eaux sont claires, ce qui est le cas généralement lorsque les débits restent modérés, la pêche au tamis à main permet de capturer les civelles plus en amont quand elles longent les rives et est de ce fait plus efficace que la pêche aux tamis poussés. L'absence de possibilité du choix pour une partie de la flottille conduit à des captures faibles dans les périodes d'eaux claires ce qui fait baisser la moyenne des captures effectuées par le drossage des 2 tamis poussés.

Cela n'était pas le cas au début de la mise en place de cette technique de pêche car les professionnels montaient généralement en zone fluviale pour pratiquer la pêche au tamis à main lorsque les conditions étaient peu favorables en zone maritime. En outre, il s'est développé « officieusement » ces deux dernières saisons, en zone fluviale, une autre pratique de pêche dite du « tamis ancré ». Celle-ci consiste à mouiller 2 tamis à des profondeurs variables, ce qui permet d'exploiter le flux de civelles au large des rives et à n'importe quelle profondeur. Les captures effectuées par cette pratique sont mélangées sur les carnets de pêche avec celles effectuées au tamis à main. Lors de la saison 2002/2003, il a été demandé dans le cadre du COGEPOMI que cette technique de pêche soit testée à titre expérimental et que les prises effectuées soient bien différenciées de celles obtenues par les 2 autres pratiques.

¹⁵ 2002/2003 confirme cette mauvaise tendance.

En résumé, l'adaptation des techniques de pêche aux conditions environnementales n'a pas permis d'augmenter les CPUE par rapport à la période où seul le tamis tenu à la main était utilisé. Les rendements moyens saisonniers exprimés en kg par sortie fluctuent toujours dans la même gamme de valeurs depuis 1987 (entre 0,5 et 4,5 kg). Ces 2 dernières saisons un rendement moyen très faible est observé. Ceci semble le cas pour la saison 2002/2003.

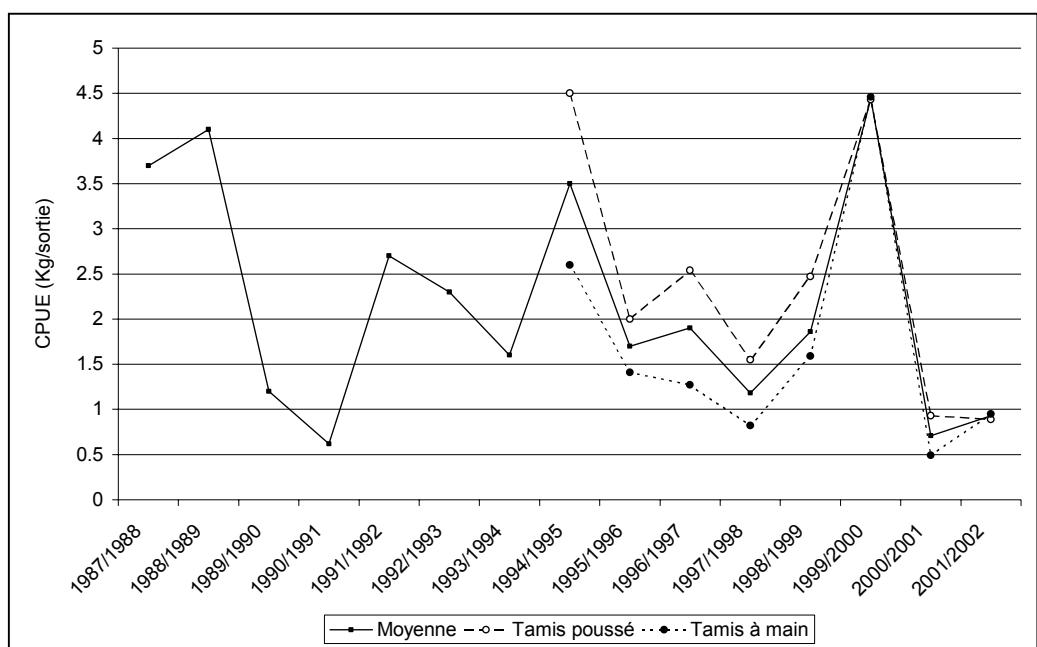


Figure 48 : Évolution de la moyenne annuelle des CPUE et de la moyenne annuelle de la CPUE par engin de pêche utilisé sur la période récente.

4. Biologie et comportement

4.1. Analyse exploratoire des données des campagnes d'échantillonnage effectuées à partir de 1998¹.

4.1.1. Campagne 1998/1999

La campagne 1998/1999 s'est déroulée à poste fixe à 14 km de l'embouchure au niveau de l'île de Lahonce (cf chapitre 2). Elle débute en janvier jusqu'au mois de mars au rythme de deux sorties par semaine. Au total, 16 sorties ont été effectuées (tableau 22).

Tableau 22 : Conditions hydrologiques de la campagne 1998/1999.

Date	débit m ³ .s ⁻¹	coefficient marée	T°C estuaire	Turbidité moyenne en surface NTU
12/01/1999	403.5	40	6.67	114
14/01/1999	377.8	57	6.67	48
19/01/1999	426.8	90	7.80	57
22/01/1999	270,4	81	7.05	73
26/01/1999	200,7	55	7.46	20
28/01/1999	745.9	66	8.75	108
03/02/1999	336.8	92	5.43	53
05/02/1999	271.3	74	6.38	38
09/02/1999	407.9	33	8.87	69
11/02/1999	428.8	38	7.19	79
17/02/1999	239.7	101	6.40	25
19/02/1999	386.9	100	8.91	32
23/02/1999	999.5	56	10,10	140
03/03/1999	344.9	97	10,06	48
17/03/1999	329.5	101	12.20	48
19/03/1999	283.5	111	12.53	40

Évolution des densités de civelles en surface

Le tableau 23 présente l'évolution des densités moyennes de civelles en surface. La figure 49 permet de mettre en évidence la forte variabilité des valeurs pour un jour d'échantillonnage donné.

¹ Les campagnes précédentes sont décrites dans la thèse de Marie-Noelle de Casamajor (1998) et ne font pas l'objet de ce rapport.

Tableau 23 : Paramètres statistiques descriptifs de la densité de civelles ($\text{g.}100\text{m}^{-3}$) en surface selon les sorties pour la campagne 1998/1999.

Dates	Moyenne ($\text{g.}100\text{ m}^{-3}$)	Ecart-type	Erreur standard	Coeff. de variation (en %)	Maximum ($\text{g.}100\text{ m}^{-3}$)	Minimum ($\text{g.}100\text{ m}^{-3}$)
12/01/1999	3,75	2,82	0,73	75	9,26	0
14/01/1999	7,72	3,22	0,78	43	15,27	2,52
19/01/1999	6,64	3,34	0,86	50	14,70	2,75
22/01/1999	0,48	0,42	0,10	87	1,40	0
26/01/1999	0,04	0,09	0,02	194	0,22	0
28/01/1999	1,24	1,46	0,35	116	4,72	0
03/02/1999	0,15	0,22	0,06	148	0,66	0
05/02/1999	0,36	0,33	0,08	93	1,14	0
09/02/1999	3,63	2,58	0,61	71	8,95	0,27
11/02/1999	1,91	1,38	0,33	72	5,52	0,25
17/02/1999	1,71	1,27	0,30	74	4,72	0
19/02/1999	1,91	1,20	0,28	63	4,05	0
23/02/1999	0,14	0,18	0,05	122	0,54	0
03/03/1999	0,29	0,31	0,07	107	0,85	0
17/03/1999	1,03	0,58	0,14	56	1,88	0,17
19/03/1999	0,27	0,27	0,07	100	0,91	0

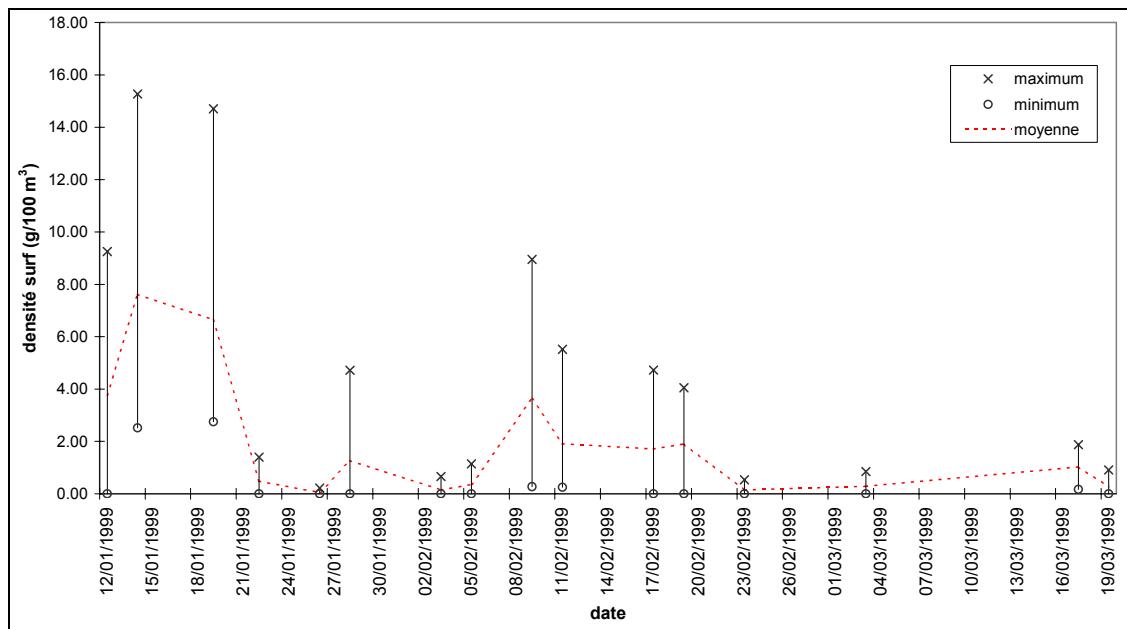


Figure 49 : Maxima, minima et moyennes des densités de civelles en surface pour chaque sortie.

Pour la majorité des sorties, la densité de civelles en surface la plus faible correspond à 0 (figure 49). Il n'y a que vers la mi-janvier que la valeur minimum est non nulle (2,52 g.100 m⁻³ le 14 janvier et 2,75 g.100 m⁻³ le 19 janvier).

Les densités moyennes les plus élevées sont enregistrées mi-janvier et début février avec des moyennes de 7 et de 3 g.100 m⁻³ respectivement. Les plus faibles sont observées fin janvier et fin février (entre 0,04 et 0,29 g.100 m⁻³).

Évolution des densités de civelles en profondeur

Les densités moyennes de civelles en profondeur sont présentées dans le tableau 24 et la figure 50.

Tableau 24 : Paramètres statistiques descriptifs de la densité (en g.100 m⁻³) de civelles en profondeur selon les sorties pour la campagne 1998/1999.

Dates	Moyenne (g.100 m ⁻³)	Ecartype	Erreur standard	Coef. de variation (en %)	Maximum (g.100 m ⁻³)
12/01/1999	0,91	1,22	0,32	136	5,10
14/01/1999	2,07	1,78	0,42	88	6,13
19/01/1999	2,45	1,90	0,49	77	7,10
22/01/1999	1,12	1,01	0,24	90	3
26/01/1999	0,34	0,34	0,08	102	1,15
28/01/1999	0,32	0,52	0,12	158	2,15
03/02/1999	0,10	0,14	0,05	181	0,46
05/02/1999	0,35	0,45	0,11	129	1,20
09/02/1999	0,79	0,75	0,18	95	2,45
11/02/1999	0,81	0,69	0,16	86	2,35
17/02/1999	0,77	0,67	0,16	87	2,48
19/02/1999	1,41	1,31	0,31	92	4,06
23/02/1999	0,08	0,13	0,04	165	0,35
03/03/1999	0,6	0,81	0,19	135	3,14
17/03/1999	0,84	0,68	0,16	81	2,21
19/03/1999	0,41	0,36	0,09	86	1,27

- La densité minimale observée pour chaque sortie est égale à 0 (figure 50). Les densités maximales sont observées au début janvier (entre 5 et 7 g.100 m⁻³), et à la mi-février (entre 2 et 4 g.100 m⁻³).
- Les densités moyennes les plus élevées sont enregistrées entre le 14 et le 19 janvier (2,07 et 2,45 g.100 m⁻³). Les densités moyennes les plus faibles sont observées à la fin janvier et au début février (entre 0,1 et 0,3 g.100 m⁻³). Les densités moyennes remontent légèrement entre le 9 et le 19 février (entre 0,4 et 1,41 g.100 m⁻³).
- La variabilité des valeurs de densités en profondeur est plus forte que celle observée pour les densités en surface.

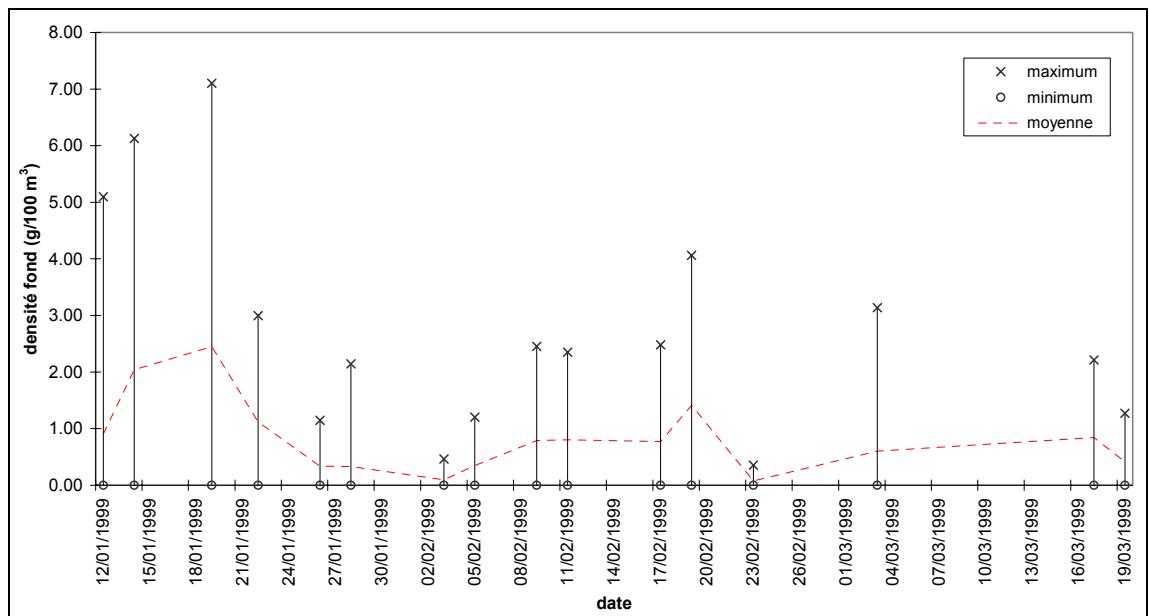


Figure 50 : Maxima, minima et moyennes des densités de civelles en profondeur pour chaque sortie.

Les tableaux 23 et 24 mettent en lumière, comme lors de la saison d'échantillonnage précédente, la grande variabilité des données. Les écart-types des distributions sont généralement supérieurs aux moyennes.

Les densités de civelles les plus élevées sont enregistrées au mois de janvier (entre 1 et 7 g.100 m⁻³). Les densités en surface sont supérieures à celles répertoriées en profondeur (figure 51). En milieu de saison (février), les densités sont plus faibles (entre 0,1 et 3 g.100 m⁻³) mais les densités en surface restent toujours plus importantes. En fin de saison, les densités observées sont beaucoup plus faibles (entre 0,2 et 1 g.100 m⁻³).

Les densités les plus faibles sont observées lors d'épisodes de crues ou bien lorsque la température de l'eau est froide (< 6°C) (tableau 22).

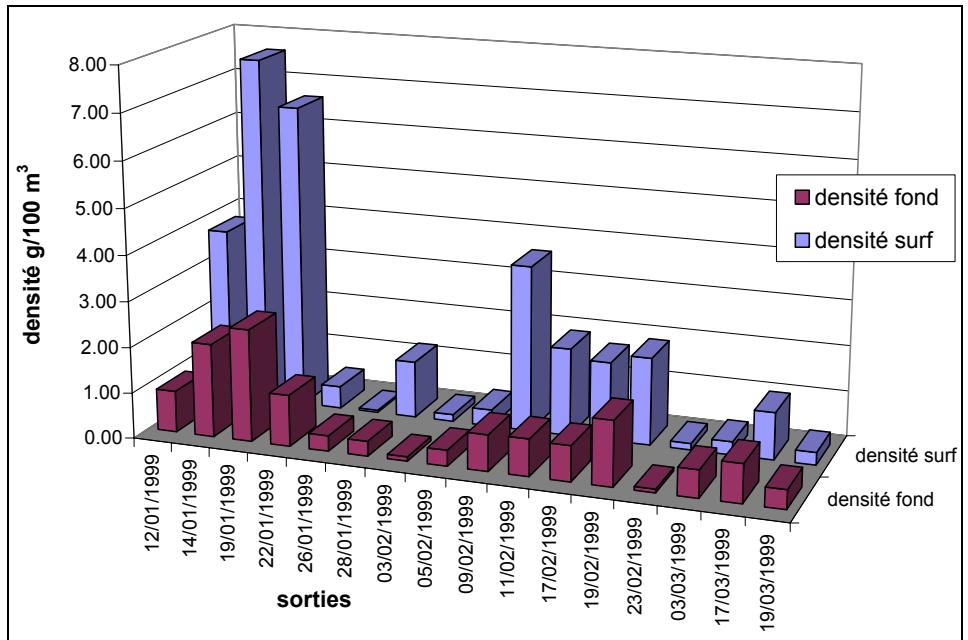


Figure 51 : Répartition des densités moyennes de civelles en surface et en profondeur au cours de la saison.

Distribution des valeurs de densités

Pour les densités de surface, nous avons défini 12 classes d'amplitude égale (tableau 25) auxquelles nous avons rajouté celle qui ne contient que des densités nulles. L'amplitude de chaque classe est de $1,5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$.

Tableau 25 : Distribution des effectifs et des fréquences relatives de la densité-surface

Classe des densités surf	distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	65	0.24
] $0 ; 1.5[$	103	0.38
] $1.5 ; 3[$	41	0.15
] $3 ; 4.5[$	19	0.07
] $4.5 ; 6[$	17	0.06
] $6 ; 7.5[$	9	0.03
] $7.5 ; 9[$	8	0.03
] $9 ; 10.5[$	3	0.01
] $10.5 ; 12[$	1	0.00
] $12 ; 13.5[$	2	0.01
] $13.5 ; 15[$	1	0.00
] $15 ; 16.5[$	1	0.00
] $16.5 ; 18[$	0	0.00

90 % des densités sont inférieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ (figure 52). Les densités supérieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ représentent seulement 13 % des densités répertoriées en surface. On observe une proportion de valeurs nulles assez forte (24 %).

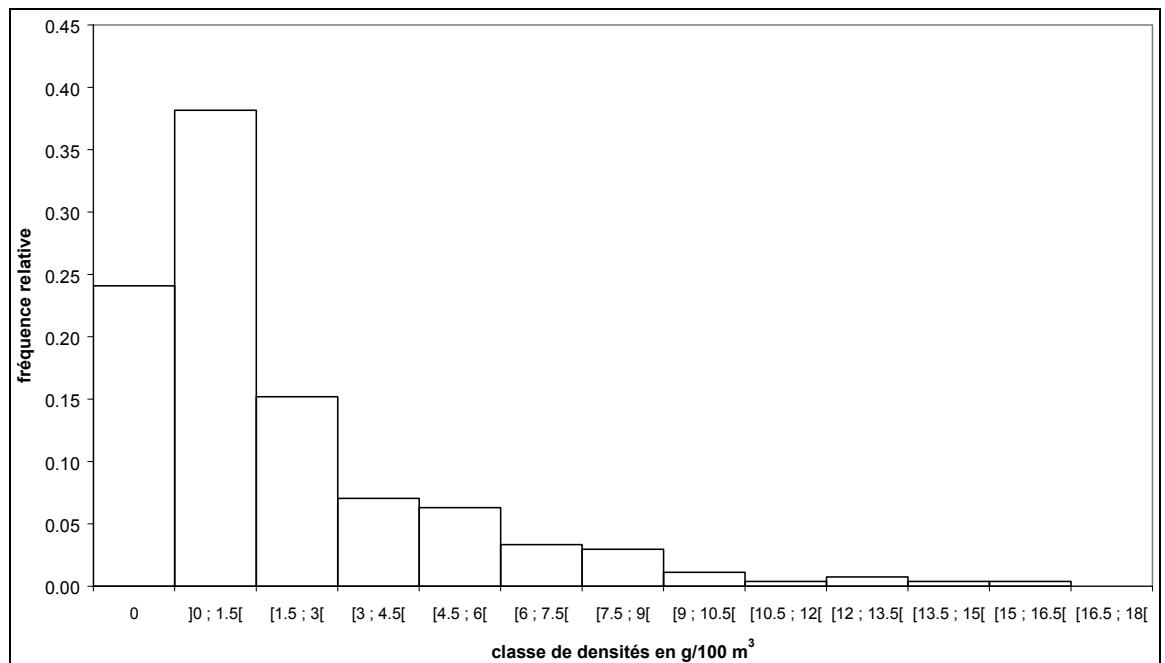


Figure 52 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en surface.

Pour les densités en profondeur, nous avons défini 6 classes d'amplitude égale à 1,5 g.100 m⁻³ auxquelles nous avons rajouté celle qui ne contient que des valeurs nulles (tableau 26).

Tableau 26 : Distribution des effectifs et des fréquences relatives de la densité-fond.

Classe des densités fond	distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	74	0.27
]0 ; 1.5[	149	0.55
[1.5 ; 3[	34	0.13
[3 ; 4.5[	8	0.03
[4.5 ; 6[	2	0.01
[6 ; 7.5[	3	0.01
[7.5 ; 9[	0	0.00

Les densités nulles représentent 27 % de la totalité de l'effectif des observations effectuées en profondeur (figure 53) 55 % des densités sont comprises entre 0,1 et 1,5 g.100 m⁻³. Les densités inférieures à 5 g.100 m⁻³ représentent 99 % de l'ensemble des observations effectuées en profondeur.

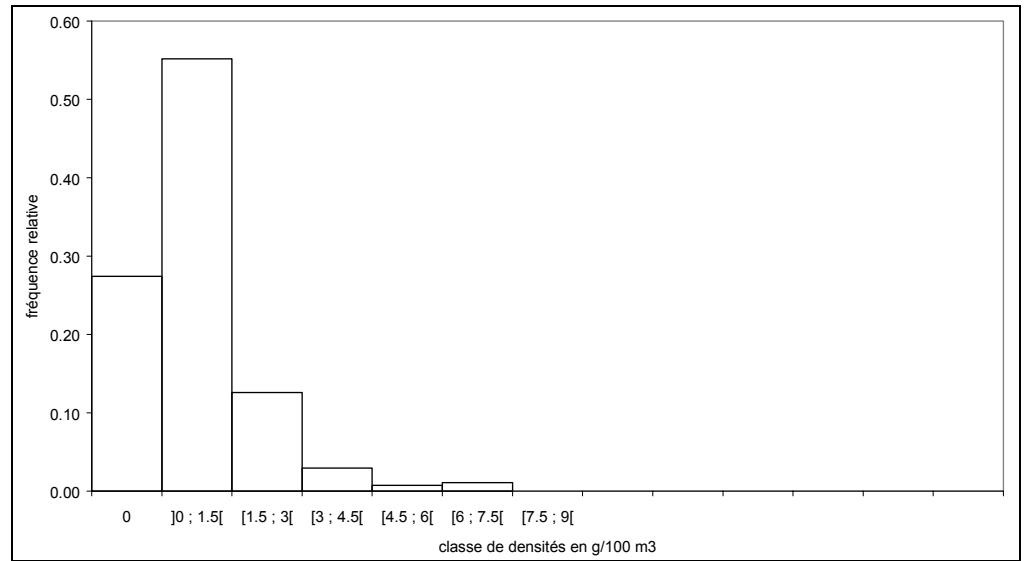


Figure 53 : histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en profondeur.

Étude de la répartition spatiale des densités

En janvier, les civelles sont réparties de façon homogène sur la largeur de l'estuaire avec une légère préférence sur la rive gauche (figure 54). 39% des densités maximales sont situés en RG contre 36% en RD et 25% au milieu (figure 55).

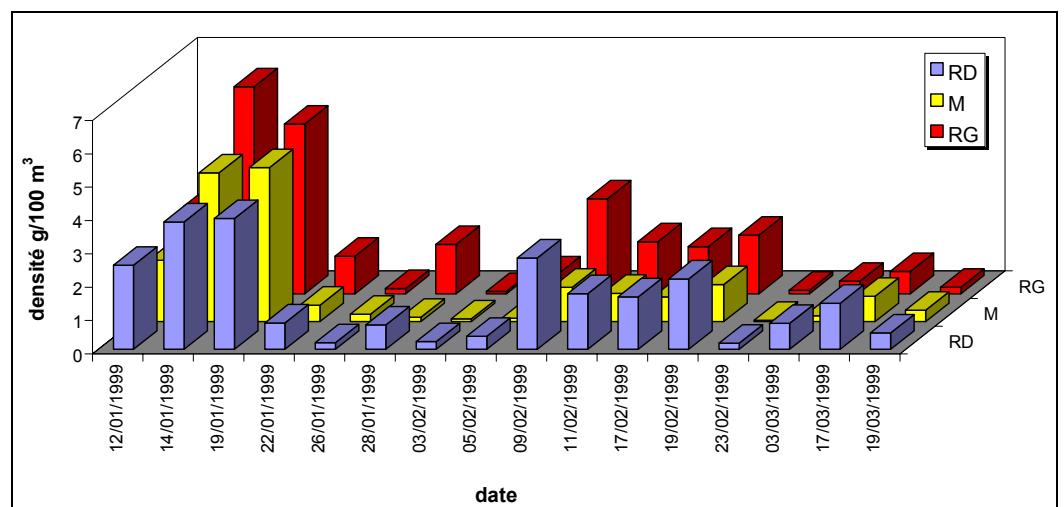


Figure 54 : Répartition des densités moyennes de civelles dans la section transversale du fleuve.

Entre le 9 et 19 février, les densités de civelles semblent plus élevées au niveau des rives. En fin de saison, les densités de civelles sont faibles et sont réparties sur l'ensemble de la section.

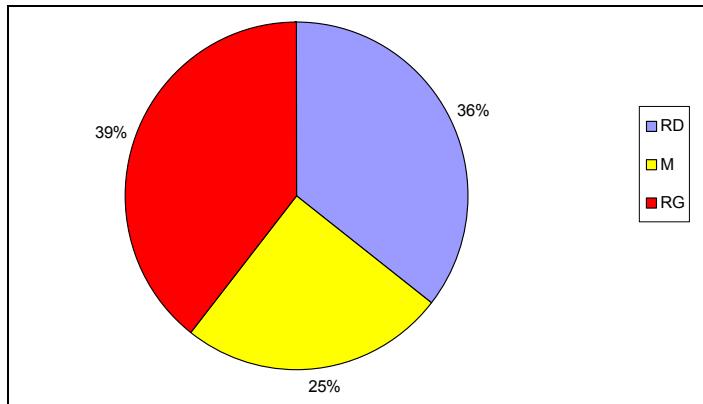


Figure 55 : Répartition des densités de civelles selon la localisation.

Pour vérifier si les densités de civelles sont significativement différentes sur les rives et au milieu, un test du χ^2 est effectué.

Les densités de surface et de fond (exprimées en g.100 m⁻³) sont réparties selon trois classes : densité faible : [0 ; 0,5[; densité moyenne : [0,5 ; 1,5[; densité forte : \geq à 1,5 .

Tableau 27 : Tableau de contingence des fréquences observées et théoriques en surface.

	Fréquence	RDS*	MS*	RGS*	Total
Densité faible	F.observées	34	46	32	112
	F.théoriques	37,33	37,33	37,33	
Densité moyenne	F.observées	19	16	21	56
	F.théoriques	18,66	18,66	18,66	
Densité forte	F.observées	37	28	37	102
	F.théoriques	34	34	34	
Total		90	90	90	270

* RDS : Rive Droite Surface ; MS : Milieu Surface ; RGS : Rive Gauche Surface.

Tableau 28 : Tableau de contingence des fréquences observées et théoriques en profondeur.

	Fréquence	RDF*	MF*	RGF*	Total
Densité faible	F.observées	33	61	42	136
	F.théoriques	45,33	45,33	37,33	
Densité moyenne	F.observées	35	23	29	87
	F.théoriques	29	29	18,66	
Densité forte	F.observées	22	6	19	47
	F.théoriques	15,66	15,66	34	
Total		90	90	90	270

* RDF : Rive Droite Fond ; MF : Milieu Fond ; RGF : Rive Gauche Fond.

Le χ^2 calculé pour les densités en surface est inférieur au χ^2 théorique (χ^2 observé = 5,32 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49) ; c'est le contraire pour les densités de fond (χ^2 observé = 32,71 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49). Cela permet de montrer que la densité de civelles en surface n'est pas significativement différente sur la section transversale alors que la densité au fond l'est significativement selon les rives et le milieu du cours d'eau.

Ainsi, l'analyse exploratoire des données recueillies pour la campagne 1998/1999 a permis d'aboutir aux constatations suivantes :

- Les densités de civelles sont réparties préférentiellement au niveau des rives durant les campagnes d'échantillonnage ;
- Les densités les plus faibles sont observées au milieu du chenal ;
- Les densités de civelles les plus fortes sont observées en surface ;
- Les plus fortes captures sont effectuées au mois de janvier.

4.1.2. Campagne 1999/2000

La campagne 1999/2000 s'est déroulée à poste fixe à 18 km de l'embouchure au niveau de l'île de Berenx (cf. chapitre 2). Cette station a été prospectée 12 fois entre décembre et mars.

Durant la saison de pêche 1999/2000, on observe une petite crue autour de $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ entre le 15 et le 17 décembre ; une crue plus importante, autour de $1070 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ est noté entre le 27 décembre et le début du mois de janvier. Lors des campagnes expérimentales, les conditions hydrologiques semblent favorables à la migration des civelles (faible débit, température de l'eau autour de 8°C).

Tableau 29 : Conditions hydrologiques durant la campagne 1999/2000.

Date	débit $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	coefficient de marée	T en $^\circ\text{C}$ estuaire
09/12/1999	142,3	78	7,38
22/12/1999	440,6	100	7,33
05/01/2000	288,8	71	8,26
07/01/2000	234,3	78	7,76
08/01/2000	220,01	79	7,75
09/01/2000	206,82	78	7,86
12/01/2000	191,97	65	7,10
19/01/2000	160,07	83	5,86
01/02/2000	119,27	48	7,06
08/02/2000	156,8	87	9,40

Évolution des densités de civelles en surface au cours de la campagne

Les densités moyennes de civelles en surface les plus élevées sont enregistrées fin décembre – début janvier ($10 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$). Elles chutent à partir de cette période (autour de 4 à 6 $\text{g.}100 \text{ m}^{-3}$). La variabilité des données est forte. La sortie du 22/12/99 illustre cette caractéristique : minimum autour de zéro et maximum supérieur à $50 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ (figure 56).

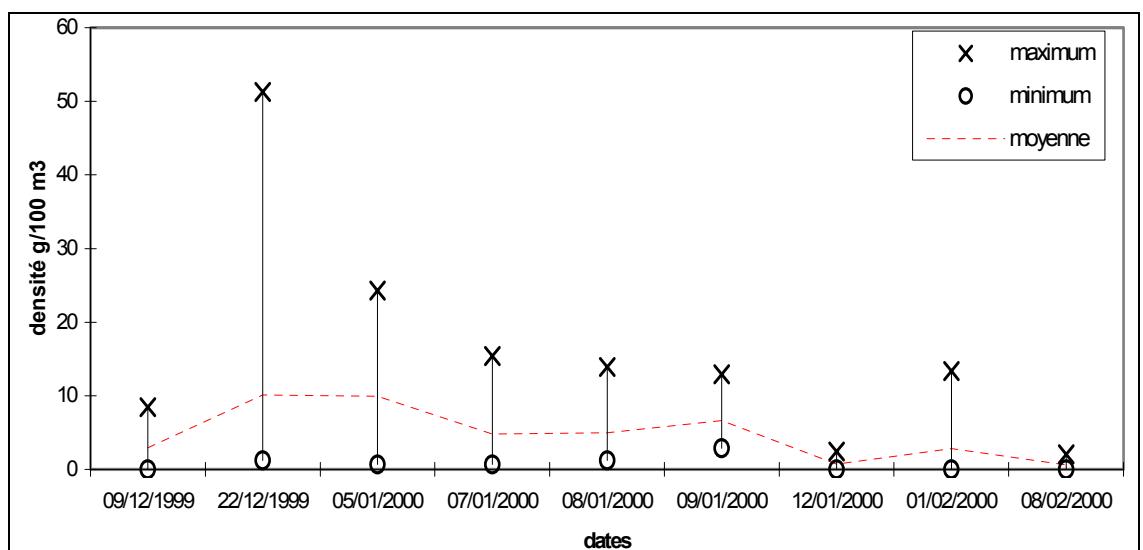


Figure 56 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en surface (en $\text{g.}100 \text{ m}^{-3}$).

Évolution des densités de civelles en profondeur au cours de la campagne

Les densités moyennes de civelles en profondeur avoisinent les $3\text{-}4 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ au cours de la saison avec 2 pics enregistrés début décembre ($7,48 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$) et début février ($6,49 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$). On remarque que plus la moyenne est élevée, plus la variabilité des valeurs est grande². Les densités maximales de civelles atteignent $19 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ début décembre et début février.

² Ceci pourrait dénoter une fragmentation du flux de civelles en « chapelet ». Ce type de distribution dans l'estuaire à partir d'un groupe homogène est bien mis en évidence par le simulateur comportemental (cf § 5.4)

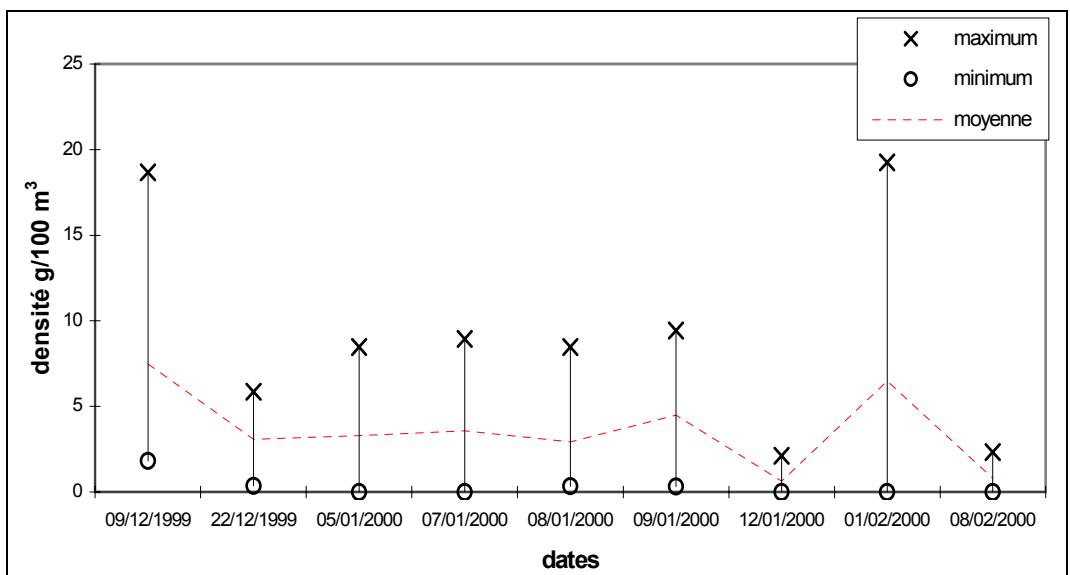


Figure 57 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en profondeur (en $\text{g.}100 \text{ m}^{-3}$).

Étude de la distribution des valeurs de densités

Étude des densités en surface

Nous avons défini 12 classes d'amplitude égale (tableau 30) auxquelles nous avons rajouté celle qui ne contient que des densités nulles. L'amplitude de chaque classe est de $1,5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$.

71 % des densités sont inférieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ (figure 59). On observe une proportion de valeurs nulles assez faible (6 %).

Tableau 30 : Distributions des effectifs et des fréquences relatives de la densité-surface

Classe des densités surf	distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	11	0,06
] $0 ; 1,5[$	50	0,25
] $1,5 ; 3[$	34	0,17
] $3 ; 4,5[$	20	0,10
] $4,5 ; 6[$	25	0,13
] $6 ; 7,5[$	16	0,08
] $7,5 ; 9[$	10	0,05
] $9 ; 10,5[$	7	0,04
] $10,5 ; 12[$	10	0,05
] $12 ; 13,5[$	5	0,03
] $13,5 ; 15[$	1	0,01
] $15 ; 16,5[$	2	0,01
] $16,5 \text{ ou plus}[$	7	0,04

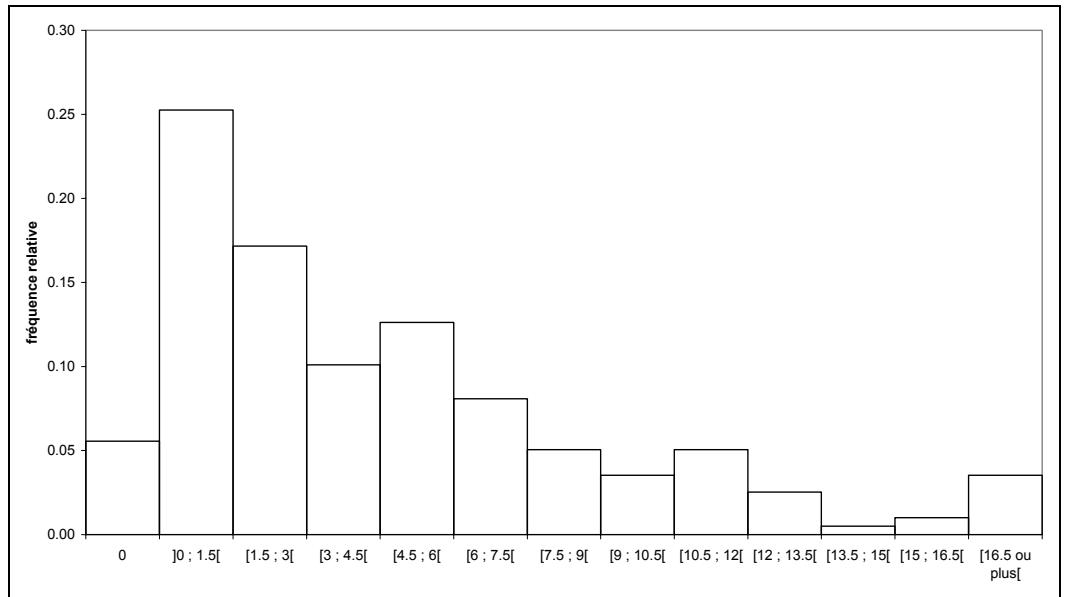


Figure 59 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en surface.

Étude des densités en profondeur

Nous avons défini 12 classes d'amplitude égale à $1,5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ plus celle qui ne contient que des valeurs nulles (tableau 31).

78 % des densités sont inférieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ (figure 60). Les densités comprises entre 3 et $6 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ représentent 55 % des densités totales.

Les densités supérieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ représentent seulement 20 % des densités au fond. On observe une proportion de valeurs nulles assez faible (6 %).

Tableau 31 : Distributions des effectifs et des fréquences relatives de la densité-fond.

Classe des densités fond	distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	11	0,06
]0 ; 1,5[	46	0,23
[1,5 ; 3[	48	0,24
[3 ; 4,5[	41	0,21
[4,5 ; 6[	19	0,10
[6 ; 7,5[	11	0,06
[7,5 ; 9[	7	0,04
[9 ; 10,5[	5	0,03
[10,5 ; 12[	1	0,01
[12 ; 13,5[	3	0,02
[13,5 ; 15[	1	0,01
[15 ; 16,5[	1	0,01
[16,5 ou plus[	4	0,02

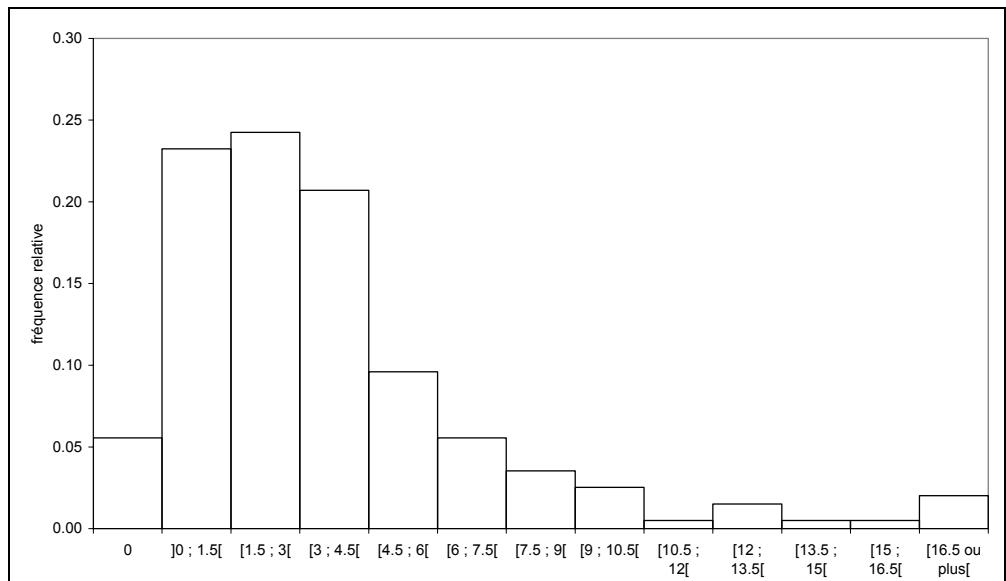


Figure 60 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en profondeur

Étude de la répartition spatiale des densités de civelles

Les civelles sont réparties de façon homogène au niveau des berges et semblent plus denses au milieu du chenal (figure 61). Les densités les plus faibles sont observées le 12/01 et le 08/02 (entre 0,4 et 1,07 g.100 m⁻³) quel que soit l'endroit. Les densités les plus élevées sont observées au milieu le 22/12 et le 05/01. Sur l'ensemble de la saison, 46 % des densités les plus fortes sont situées au milieu contre 26 % sur chaque rive (figure 62).

L'utilisation du test du ξ^2 montre que la répartition des densités de civelles en surface (χ^2 observé = 13,67 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49) et au fond (χ^2 observé = 14,62 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49) est significativement différente selon les rives et le milieu du fleuve durant les campagnes d'échantillonnage.

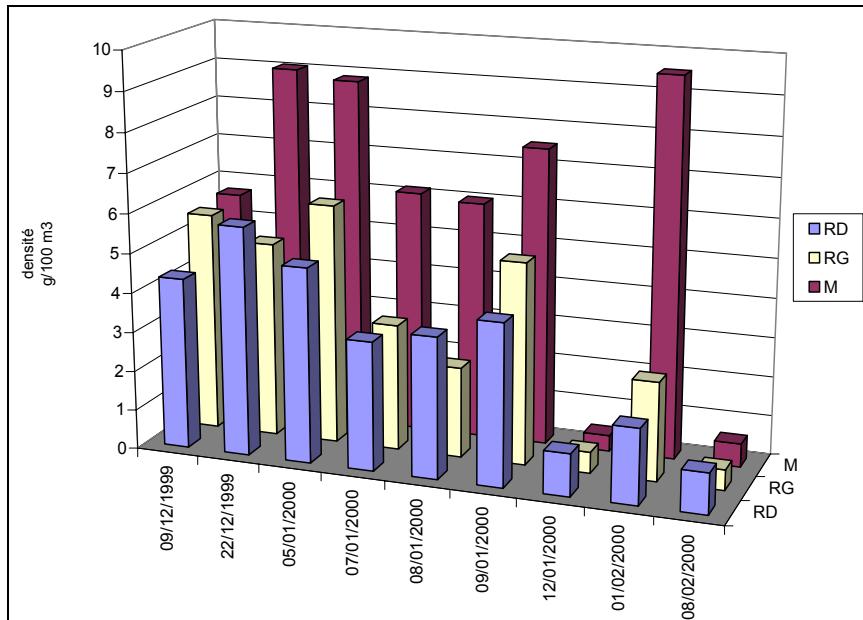


Figure 61 : Répartition des densités moyennes de civelles dans la section transversale.

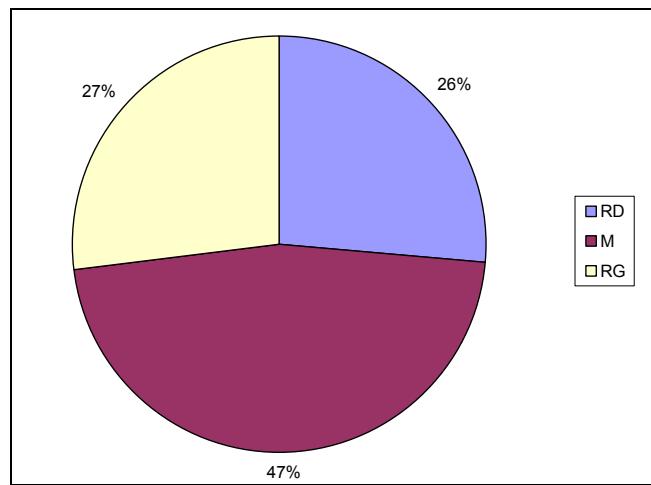


Figure 62 : Répartition en % des densités moyennes maximales de civelles selon la section transversale.

L'analyse exploratoire des données recueillies pour la campagne 1999/2000 a permis d'aboutir aux constatations suivantes :

- Les densités de civelles sont plus importantes en surface qu'en profondeur ;
- Les civelles ne sont pas réparties de façon homogène dans la section transversale ;
- Les densités les plus élevées sont observées au milieu du chenal. La répartition des densités selon leur classe d'abondance est équivalente au niveau des rives.

4.1.3. Campagne 2000/2001

La campagne 2000/2001 s'est déroulée à la hauteur de l'île de Berenx, au même endroit que la campagne précédente. 11 sorties ont été effectuées entre décembre et février.

Les données hydrologiques sont répertoriées au tableau 32. La saison est caractérisée par des épisodes de crues (fin décembre, début et fin janvier). La température de l'eau est relativement douce pour l'hiver (entre 8 et 10°C).

Tableau 32 : Données hydrologiques durant la campagne 2000/2001

Date	Débit $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	coefficient marée	T°C estuaire
14/12/2000	231,1	92	10,30
21/12/2000	230	61	9,10
03/01/2001	424,3	59	9,00
10/01/2001	674,5	75	8,30
12/01/2001	511,1	65	9,20
17/01/2001	378,6	59	8,80
24/01/2001	473,9	96	9,70
26/01/2001	500,5	72	10,00
31/01/2001	761,1	40	8,80
06/02/2001	370,5	86	10,00
20/02/2001	227,58	106	8,90

Évolution des densités de civelles en surface et en profondeur durant la campagne d'échantillonnage

Les densités de civelles observées en surface et en profondeur pour la saison 2000/2001 sont généralement faibles (figures 63 et 64).

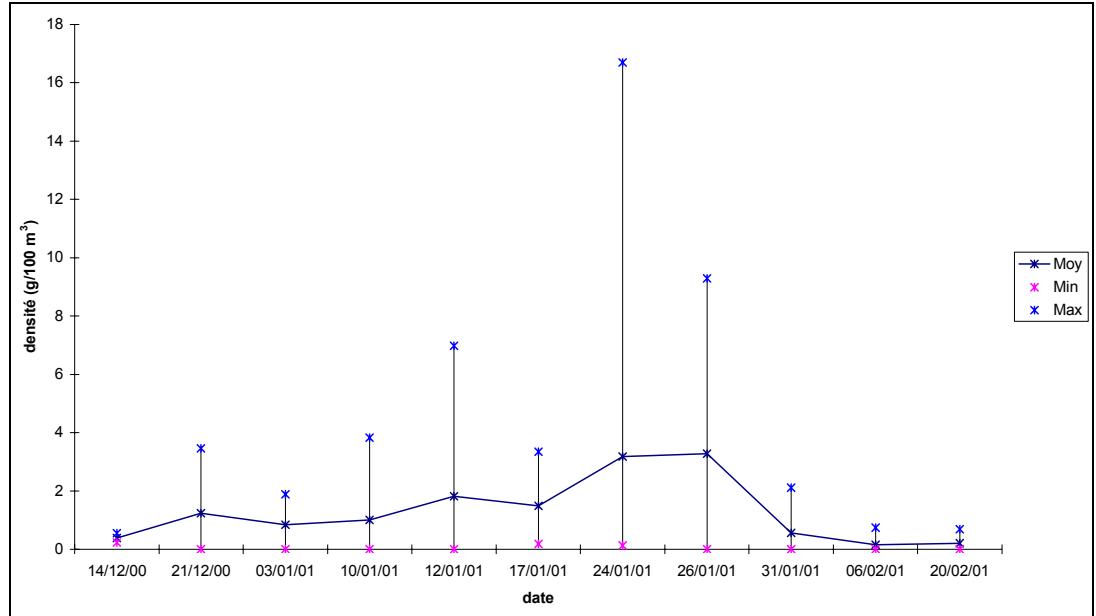


Figure 63 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en surface (en g.100 m⁻³).

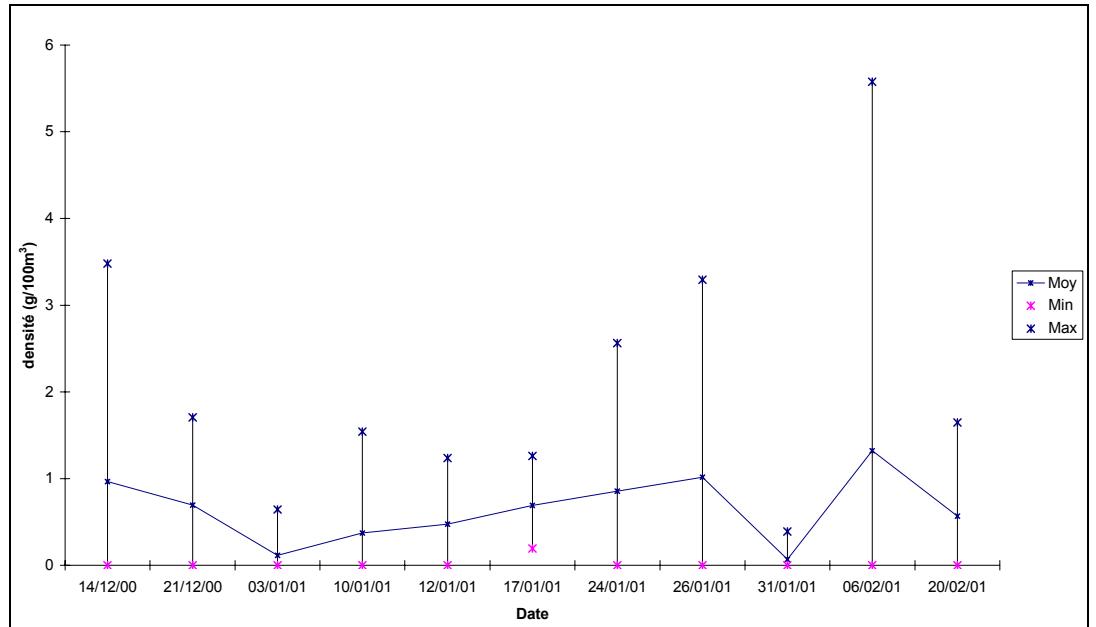


Figure 64 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en profondeur (en g.100 m⁻³).

Les densités moyennes en surface sont comprises entre 0,5 et 3,3 g.100 m⁻³ avec un pic maximal de 16,7 g.100 m⁻³ observé le 24 janvier (figure 63). Les densités moyennes en profondeur varient entre 0,1 et 1,3 g.100 m⁻³ (figure 64) avec un pic maximal de 5,6 g.100 m⁻³ observé le 06 février.

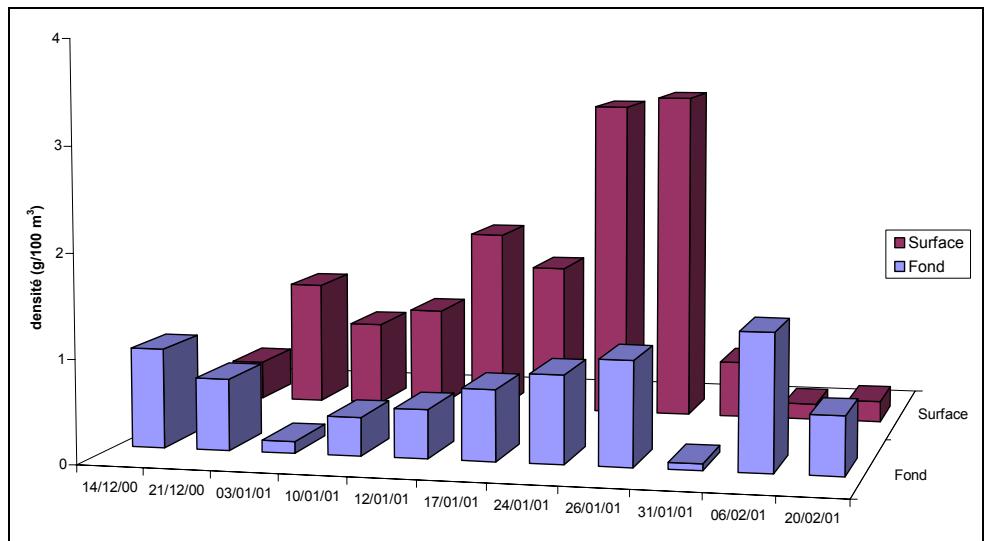


Figure 65 : Densités moyennes de civelles en surface et en profondeur pour la saison de pêche 2000/2001.

Sur l'ensemble de la saison de prélèvement, les densités en surface sont plus élevées que les densités de fond (figure 65). Les densités de fond sont supérieures en début et fin de saison (décembre et février). Cette saison de pêche est caractérisée par des densités faibles par rapport à la saison 1999/2000 où les densités moyennes en surface avoisinaient les 10 g.100 m⁻³ en surface et 6-7 g.100 m⁻³ en profondeur.

Étude de la distribution des valeurs de densités

Nous avons défini 12 classes d'amplitude égale à 1,5 g.100 m⁻³ pour les densités de surface (figure 66) et 7 classes pour les densités en profondeur (figure 67) auxquelles nous avons rajouté celle ne contenant que des valeurs nulles.

Les densités supérieures à 5 g.100 m⁻³ représentent seulement 3,9 % des densités en surface. Celles qui sont inférieures à 5 g.100 m⁻³ représentent 94 % de la totalité de l'effectif des observations. On observe une forte proportion de valeurs nulles (19 %).

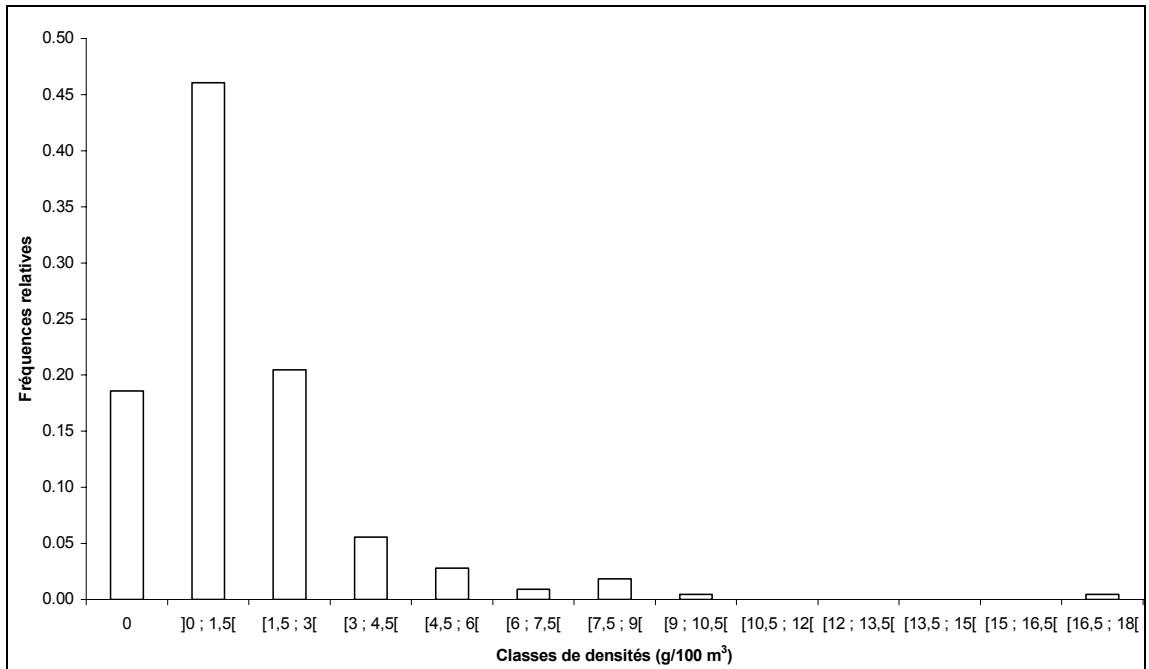


Figure 66 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en surface.

Les densités de civelles en profondeur sont très faibles. Les densités nulles représentent 29 % de la totalité des densités au fond. La totalité des densités est inférieure à 5 g.100 m⁻³.

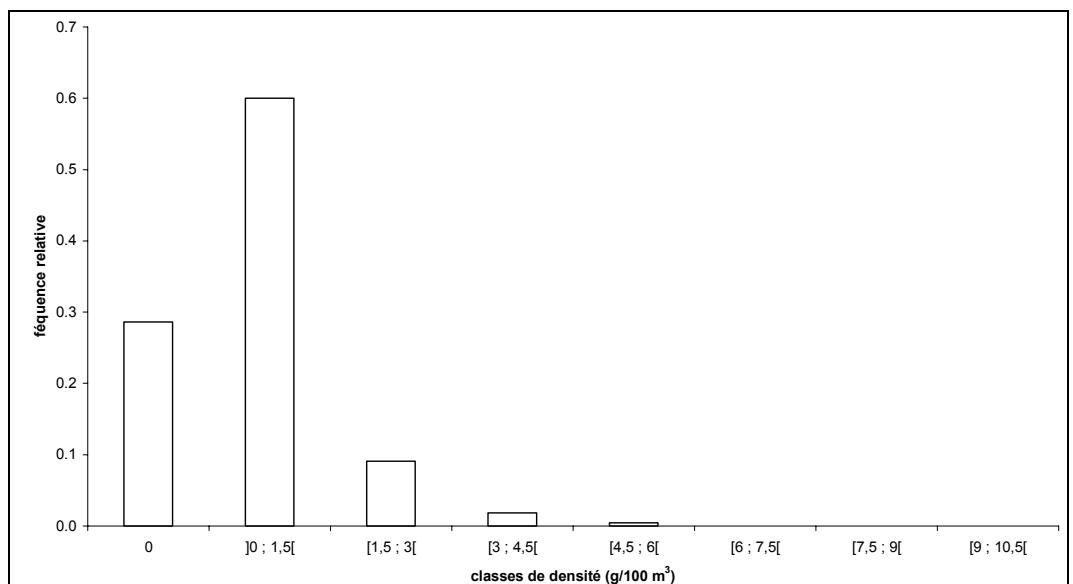


Figure 67 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en profondeur.

Étude de la répartition spatiale des densités

Les densités de civelles sont réparties de façon homogène selon la section transversale (figure 68). Il n'y a pas d'effet de concentration sur une des deux rives ou au milieu de la zone d'étude. L'utilisation du test du χ^2 vient confirmer statistiquement cette constatation : surface (χ^2 observé = 7,25 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49) ; fond (χ^2 observé = 1,21 pour un $\chi^2_{(3-1)(3-1)}$ théorique = 9,49).

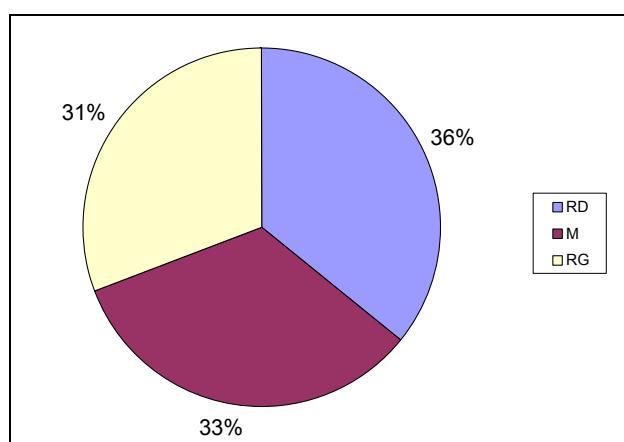


Figure 68 : Répartition des densités moyennes de civelles au cours de la saison de pêche.

Si l'on regarde les densités moyennes de civelles (figure 69) en fonction de la localisation, on constate qu'en décembre, les densités les plus élevées sont au milieu du fleuve alors que la répartition au niveau des berges semble homogène. En janvier, les densités les plus fortes sont observées en rive droite. Début février, les densités les plus fortes sont observées au milieu avec une répartition identique au niveau des berges. La dernière sortie est caractérisée par une répartition uniforme dans l'ensemble de la section.

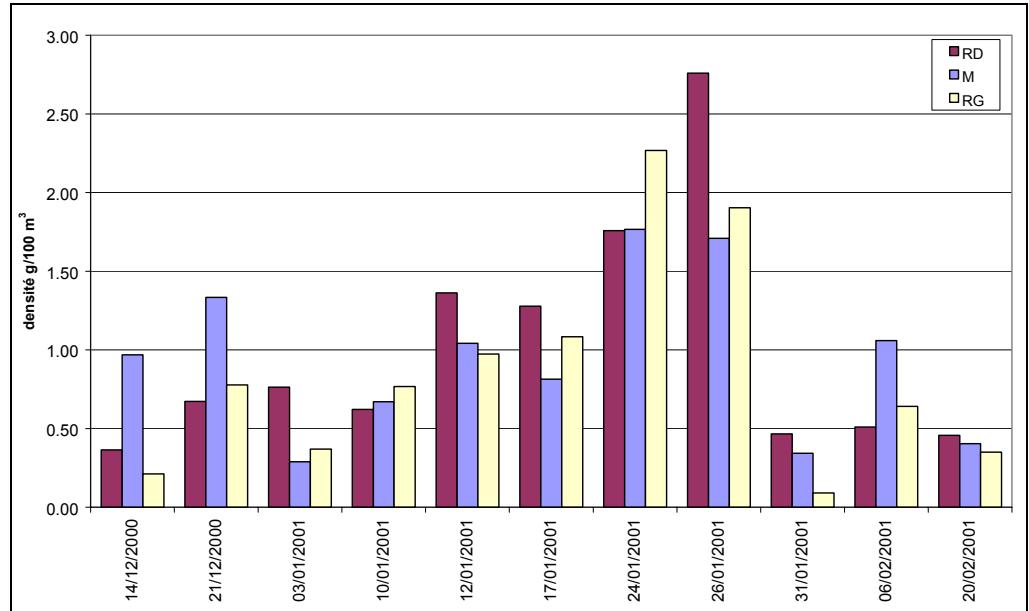


Figure 69 : Répartition des densités moyennes de civelles dans la section transversale.

La campagne 2000/2001 est caractérisée par des densités de civelles très faibles. Les valeurs sont comprises entre 0 et 3,5 g.100 m⁻³ avec des pics maximums observés en surface compris entre 7 et 16 g.100 m⁻³.

Le traitement préliminaire des données montre que les civelles se répartissent de façon homogène dans la section transversale du site d'étude avec des densités plus élevées en surface qu'en profondeur à l'exception des sorties effectuées en début décembre et en fin février.

4.1.4. Campagne 2001/2002

La campagne de collecte 2001/2002 a lieu sur 4 stations localisées de l'aval vers l'amont entre l'île de Broc et en amont du Pont d'Urt (cf chapitre 2). Au total, 10 sorties ont été réalisées. Le protocole mis en place a pour objectif principal d'étudier la répartition transversale des civelles en fonction des hétérogénéités de courant.

Évolution des densités de civelles en surface

Le tableau 33 présente l'évolution des densités moyennes de civelles en surface. Le graphique présenté en figure 70 permet de mettre en évidence la variabilité des valeurs.

Tableau 33 : Paramètres statistiques descriptifs de la densité de civelles en surface (exprimée en g.100 m⁻³) en fonction des sorties pour la campagne 2001/2002.

Densité surface	maximum	minimum	moyenne	erreur standard	coef.de variation (en %)	Écart-type	nbre transects
21/11/2001	0,261	0	0,074	0,04	148,65	0,11	8
05/12/2001	0	0	0	0	0		8
11/12/2001	0,206	0	0,07	0,03	140	0,098	8
18/12/2001	0,229	0	0,059	0,03	164,41	0,097	8
03/01/2002	3,708	0	1,224	0,41	95,42	1,168	8
09/01/2002	1,844	0	0,857	0,21	70,71	0,606	8
16/01/2002	4,025	1,584	2,861	0,33	33,07	0,946	8
22/01/2002	0,168	0	0,049	0,03	157,14	0,077	6
05/02/2002	1,307	0,106	0,474	0,13	78,06	0,37	8
21/02/2002	0,702	0	0,326	0,13	95,09	0,31	6

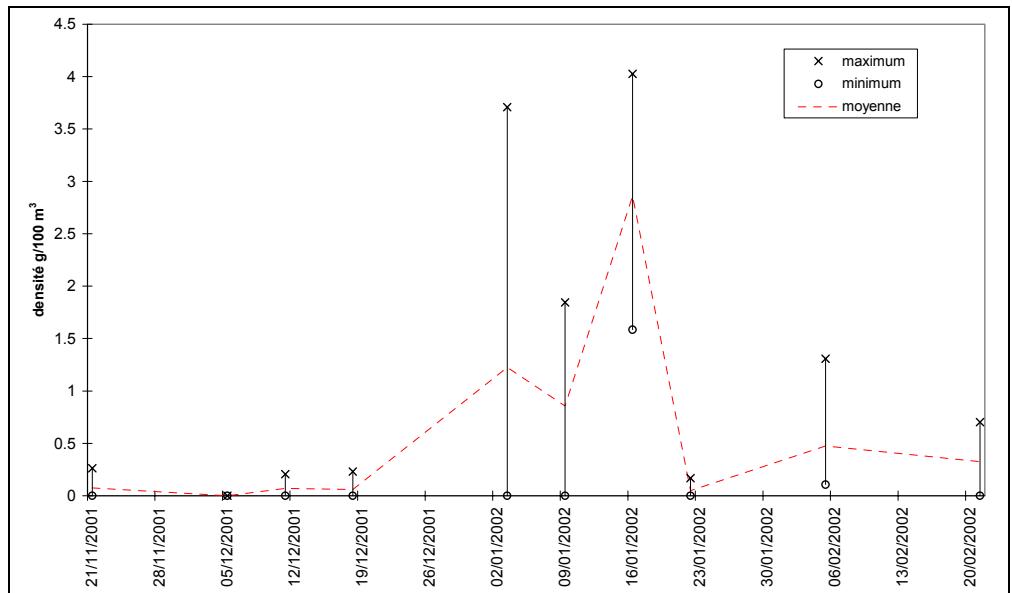


Figure 70 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en surface (en g.100 m⁻³)

Pour la majorité des sorties, la densité de civelles observée en surface la plus faible correspond à 0 (figure 70). La densité moyenne la plus élevée est observée le 16 janvier (2,8 g.100m⁻³) avec un maximum de 4 g.100 m⁻³ et un minimum de 1,5 g.100m⁻³. Les densités de civelles restent en moyenne faibles sur la saison (entre 0 et 1,8 g.100 m⁻³).

Évolution des densités de civelles en profondeur

Les densités moyennes de civelles en profondeur sont présentées dans le tableau 34 et la figure 71.

Tableau 34 : Paramètres statistiques descriptifs de la densité de civelles en surface (exprimée en g.100 m⁻³) en fonction des sorties pour la campagne 2001/2002.

Densité fond	maximum	minimum	moyenne	erreur standard	coeff. de variation (en %)	Écart-type	nbre transects
21/11/2001	2,562	0,05	0,672	0,29	120,54	0,81	8
05/12/2001	1,187	0	0,489	0,17	96,32	0,471	8
11/12/2001	5,122	0,468	1,533	0,55	101,57	1,557	8
18/12/2001	0	0	0	0	0	0	8
03/01/2002	4,099	0,326	1,891	0,42	62,93	1,19	8
09/01/2002	5,515	0,281	1,949	0,64	93,38	1,82	8
16/01/2002	7,53	1,55	3,336	0,65	55,04	1,836	8
22/01/2002	0,25	0	0,112	0,05	110,71	0,124	6
05/02/2002	1,58	0	0,534	0,18	94,57	0,505	8
21/02/2002	0,426	0	0,177	0,08	111,30	0,197	6

Les densités moyennes au fond sont supérieures aux densités en surface. Elles sont comprises entre 0,1 et 3,3 g.100 m⁻³. Les valeurs minimales fluctuent entre 0 et 0,2 g.100 m⁻³ et les valeurs maximales entre 0,2 et 7,5 g.100 m⁻³. La densité la plus élevée est observée le 16 janvier (tableau 34).

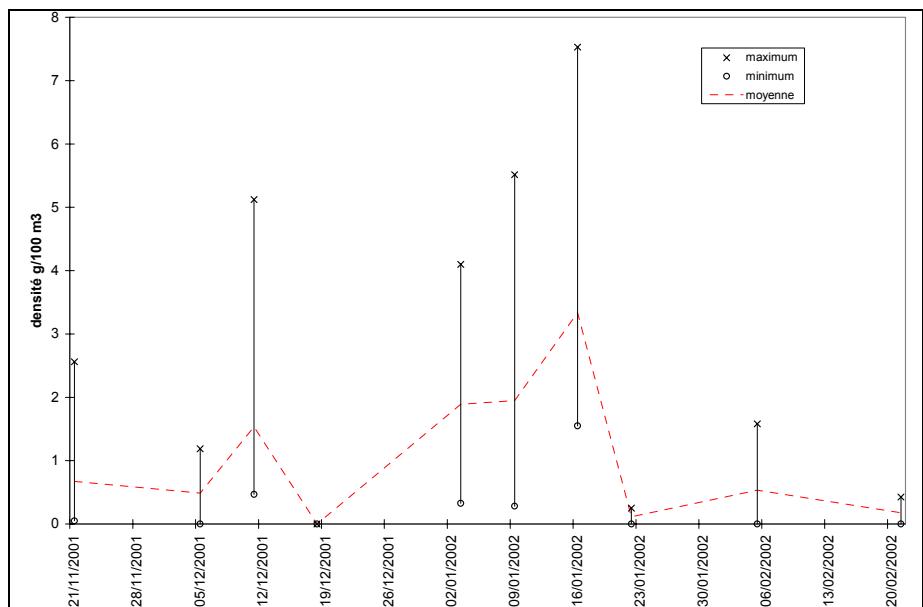


Figure 71 : Densités moyenne, maximale et minimale de civelles en profondeur (en g.100 m⁻³)

Etude de la distribution des valeurs de densités

Le nombre de valeurs nulles étant élevé, nous les avons regroupées dans une classe. Ainsi, nous avons défini 7 classes d'amplitude égale à $1,5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ pour les densités de surface et pour les densités en profondeur (tableaux 35 et 36) auxquelles nous avons rajouté celle qui ne contient que des valeurs nulles.

Tableau 35 : Distributions des effectifs et des fréquences relatives de la densité-surface

Classe des densités surf	distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	30	0,41
]0 ; 1,5[	32	0,43
[1,5 ; 3[	8	0,11
[3 ; 4,5[	4	0,05
[4,5 ; 6[	0	0,00
[6 ; 7,5[	0	0,00
[7,5 ; 9[	0	0,00
[9 ; 10,5[	0	0,00

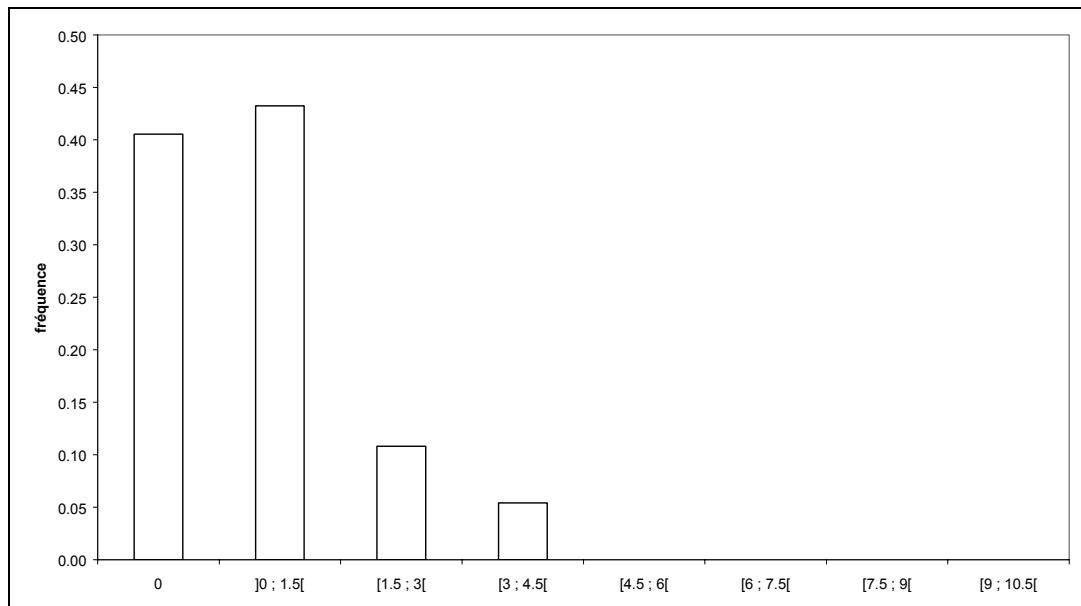


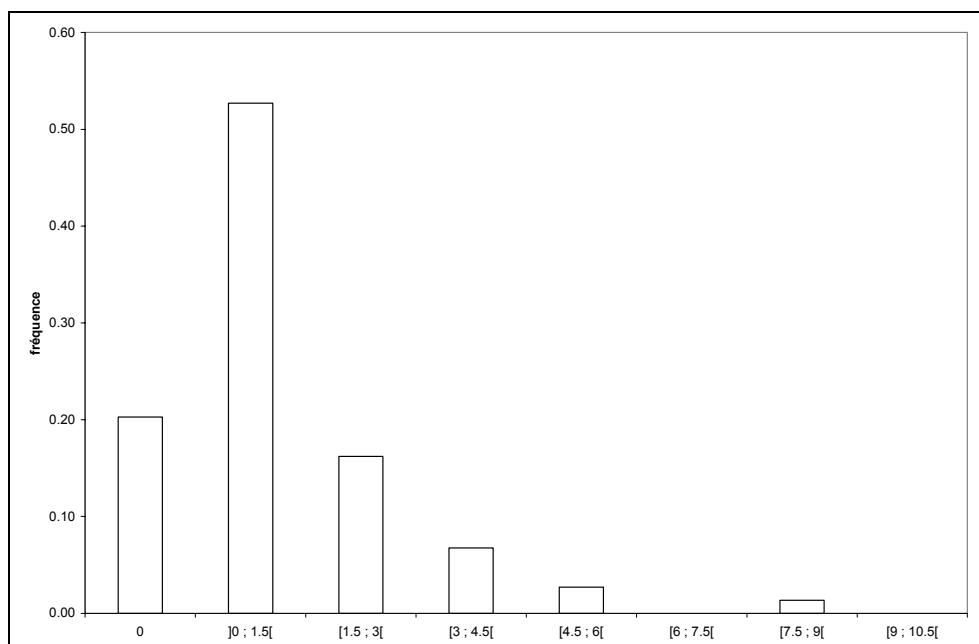
Figure 72 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en surface.

Tableau 36 : Distribution des effectifs et des fréquences relatives de la densité-fond

Classe des densités fond	Distribution des effectifs	Distribution des fréquences
0	15	0,20
]0 ; 1,5[	39	0,53
[1,5 ; 3[	12	0,16
[3 ; 4,5[	5	0,07
[4,5 ; 6[	2	0,03
[6 ; 7,5[	0	0,00
[7,5 ; 9[	1	0,01
[9 ; 10,5[	0	0,00

Les densités en surface sont toutes inférieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$. Plus de la moitié de l'effectif des observations est inférieure à $1,5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ (figure 72). On observe une forte proportion de valeurs nulles (30 %).

Il en est quasiment de même pour les densités observées en profondeur. Les valeurs inférieures à $5 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ représentent 99 % de la totalité des données. La classe $]0 ; 1,5[$ représente à elle seule 53 % de l'ensemble. La proportion de valeurs nulles est de 20 %.

**Figure 73 : Histogramme de répartition des valeurs de densités de civelles en profondeur.**

Évolution des densités de civelles en fonction des stations de l'aval vers l'amont

L'évolution des densités par station est reportée dans les tableaux 37 et 38.

Tableau 37 : Densités moyennes de civelles par station pour la campagne 2001/2002.

Densité moy	Le Sablot	Aval Urt	Amont Urt	Bruch
21/11/01	0,393	0,114	0,301	0,684
05/12/01	0	0,287	0,382	0,31
11/12/01	0,557	0,346	0,855	1,449
18/12/01	0	0	0	0,089
03/01/02	0,419	2,063	1,285	2,463
moyenne	0,2738	0,562	0,5646	0,999
écartype	0,26	0,85	0,51	0,97
médiane	0,393	0,287	0,382	0,684
1er quartile	0	0,114	0,301	0,31
3ème quartile	0,419	0,346	0,855	1,449

Tableau 38 : Densités moyennes de civelles par station pour la campagne 2001/2002.

Densité moy	amont Broc	aval Berenx	Berenx	Le Sablot
09/01/02	0,954	0,62	2,087	1,952
16/01/02	3,076	2,606	4,27	2,44
22/01/02	0,049	0,094	0,099	
05/02/02	0,198	0,233	1,036	0,546
21/02/02	0,353	0,254	0,148	
moyenne	0,926	0,7614	1,528	1,646
écartype	1,25	1,05	1,73	0,98
médiane	0,353	0,254	1,036	1,952
1er quartile	0,198	0,233	0,148	1,249
3ème quartile	0,954	0,62	2,087	2,196

Les densités moyennes de civelles sur les stations échantillonnées du 21 novembre au 03 janvier fluctuent de l'aval vers l'amont entre 0,3 et 1 g.100 m⁻³ (tableau 37). Les densités les plus fortes sont observées le 03 janvier.

La figure 74 illustre l'évolution des densités en fonction des stations échantillonnées. On constate un accroissement des densités au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'amont.

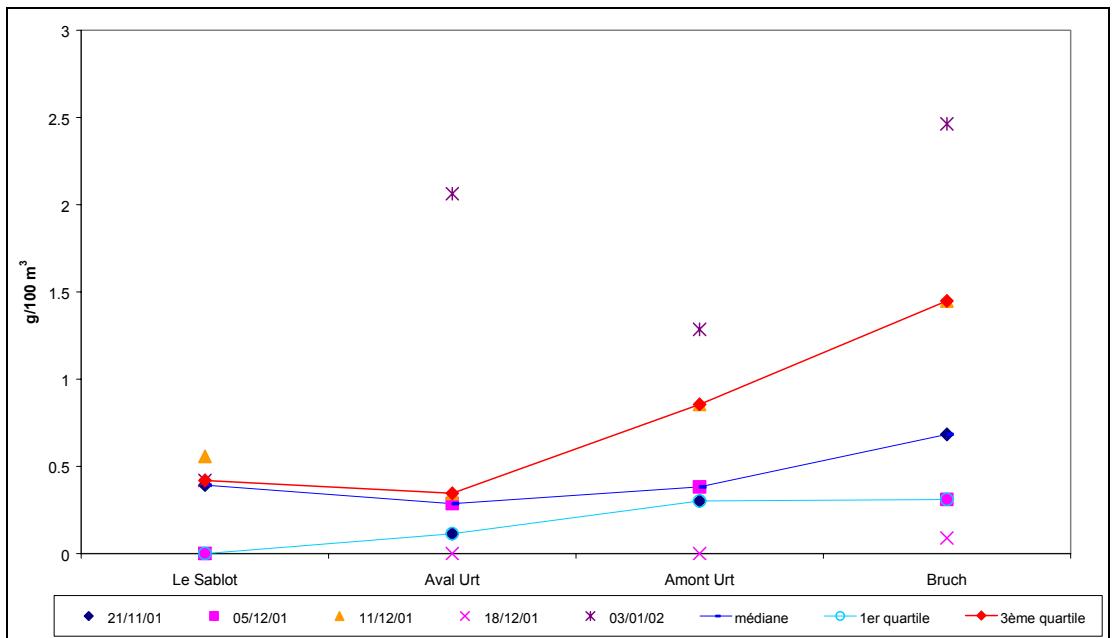


Figure 74 : Évolution des densités de l'aval vers l'amont pour la première période.

Sur la deuxième période, du 09 janvier au 21 février, les densités moyennes de civelles fluctuent entre 0,9 et 1,6 g.100 m⁻³ (tableau 38). Les densités les plus fortes sont observées au mois de janvier (entre 0,9 et 4,2 g.100 m⁻³). On constate également un accroissement des densités vers l'amont (figure 75).

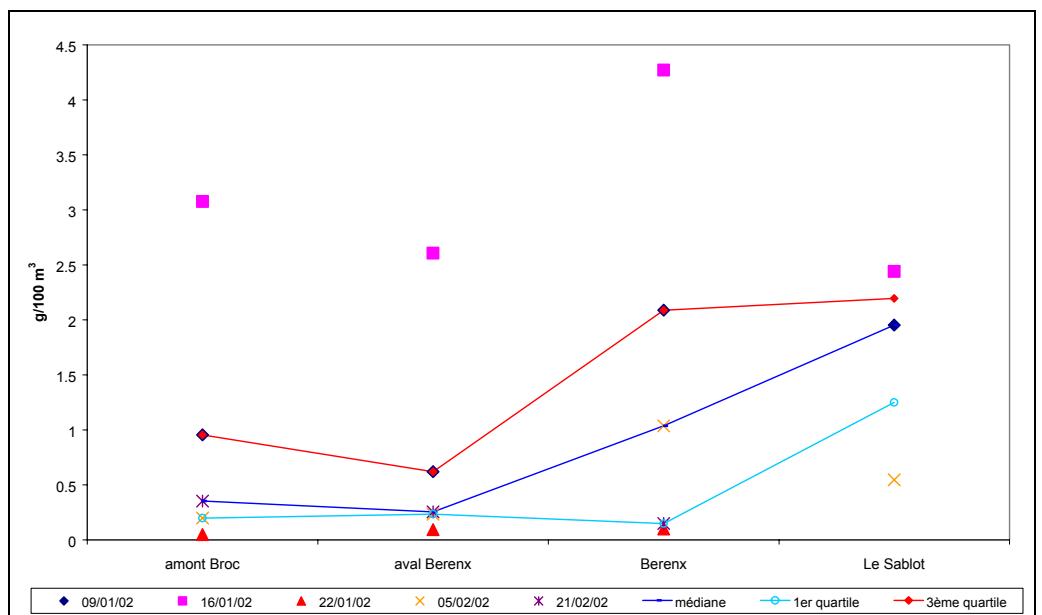


Figure 75 : Évolution des densités de l'aval vers l'amont pour la 2^{ème} période.

Répartition des densités sur la section transversale du fleuve

Sur la première période, les densités moyennes de civelles sont plus importantes sur la rive droite pour les 3 premières stations. La répartition est équivalente sur la station la plus en amont (figure 76).

Sur la deuxième période, les stations échantillonnées sont proches des îles. En amont de l'île de Broc, les densités moyennes sont légèrement plus importantes en rive gauche. En aval de l'île de Berenx, les civelles se répartissent plutôt en rive droite. Au niveau de l'île de Berenx, les densités sont plus importantes au niveau du bras gauche ($1,9 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$ contre $1,1 \text{ g.}100 \text{ m}^{-3}$). Sur la dernière station, les densités sont sensiblement équivalentes (figure 77).

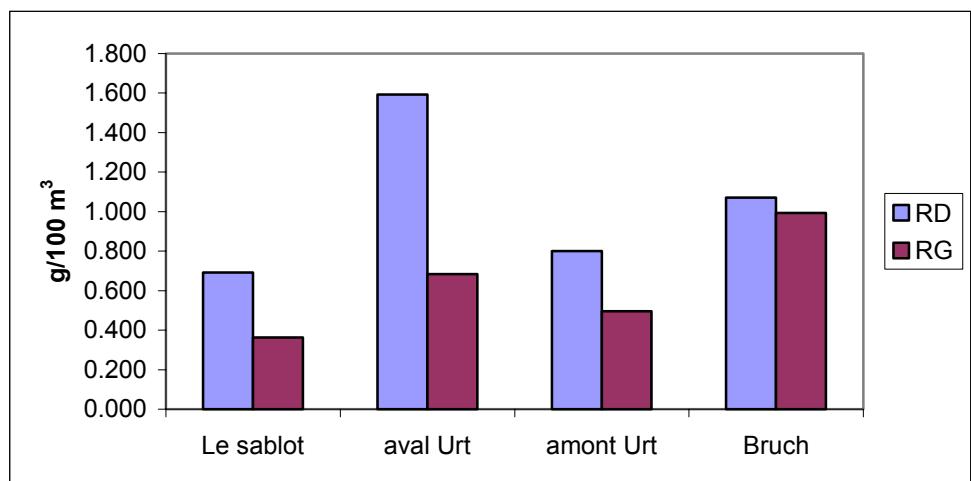


Figure 76 : Répartition des densités moyennes selon la section transversale durant la première période du 21 novembre 2001 au 03 janvier 2002.

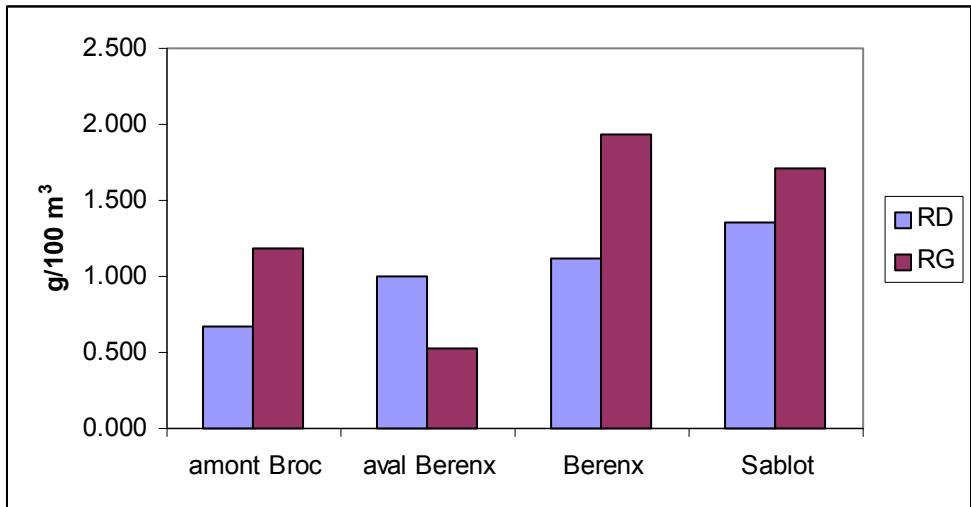


Figure 77 : Répartition des densités moyennes de civelles selon la section transversale durant la deuxième période du 09 janvier au 21 février 2002.

En résumé, un certain nombre de points ressortent de cette analyse exploratoire des données de campagnes scientifiques sur la civelle :

- La variabilité des valeurs des densités de civelles est généralement très élevée et hétérogène dans la section transversale du fleuve. Cela renforce l'idée d'un fractionnement très fort du flux dans la section longitudinale de l'estuaire (cf. chapitre 5,4) ;
- Il n'y a pas, dans les zones que nous avons inventoriées, de rives préférentielles de migration, tout au moins le protocole d'échantillonnage mis en place ne permet pas de le constater, même si les professionnels ont tendance à privilégier une rive plutôt qu'une autre ;
- Il n'y a pas de tendance à une migration préférentielle au fond ou en surface. En fait, les travaux antérieurs sur le comportement du flux de civelles (de Casamajor 1998, Bru 1998, de Casamajor et al 1999) montre que la dispersion verticale des civelles dans la colonne d'eau dépend de la diffusion de l'intensité lumineuse au sein de celle-ci ;
- L'accroissement des densités de civelles lors d'une campagne donnée, lorsqu'on se déplace de l'aval vers l'amont dans l'estuaire moyen, confirme les résultats obtenus lors de précédentes investigations effectuées durant les saisons 1996/1997 et 1997/1998 (de Casamajor 1998). Il témoigne du recrutement successif de groupes disséminés dans l'estuaire.

4.2. Caractéristiques biologiques des civelles remontant l'estuaire de l'Adour.

4.2.1. Variations des caractéristiques biométriques des civelles (cf Annexe 2 ; de Casamajor et al., 2003)

Ce travail a pour objet d'étudier les variations des caractéristiques biométriques des civelles dans l'estuaire de l'Adour depuis le début des années 1980. Les données ont été récoltées au cours de huit saisons de migration (5 mois, de novembre à mars) réparties sur les 25 dernières années : deux saisons à la fin des années 1970 (1978/1979 et 1979/1980) une saison intermédiaire au début des années 1990 (1991/1992) et cinq saisons à la fin des années 1990 (de 1996/1997 à 2000/2001).

La longueur, le poids et le stade de pigmentation des civelles ont été étudiés. Uniquement les individus aux stades 5_A et 5_B ont été pris en compte, correspondant à des civelles transparentes ayant séjourné peu de temps en estuaire. Une analyse de variance à deux facteurs (mois et année) a été effectuée pour étudier les variabilités saisonnières et inter annuelle des longueurs et des poids des civelles récoltées.

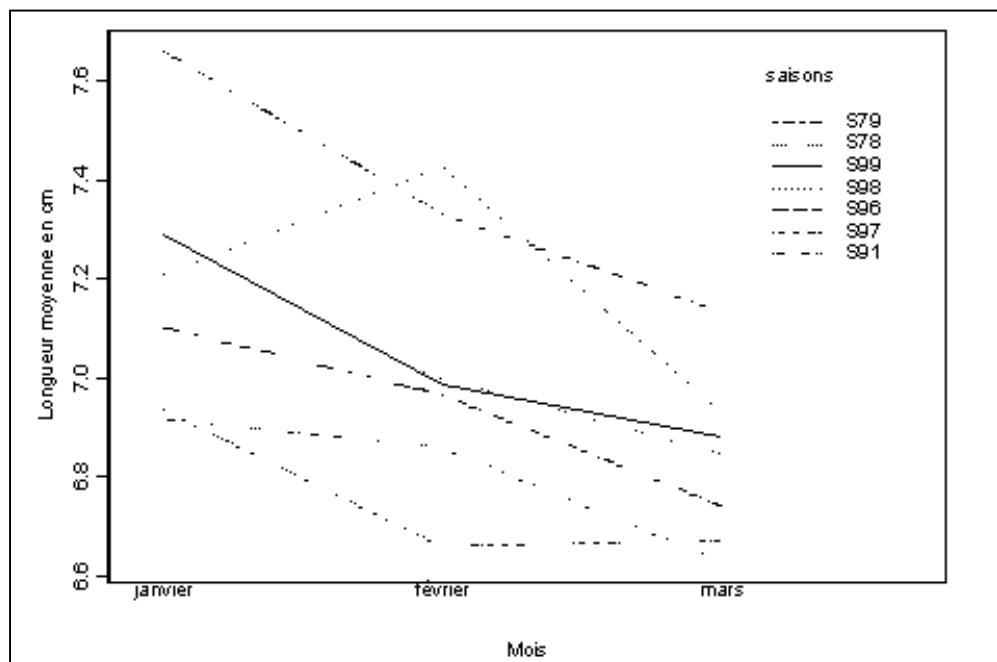


Figure 78 a : Diagramme d'interaction entre les facteurs « saison » et « mois » pour la longueur des civelles.

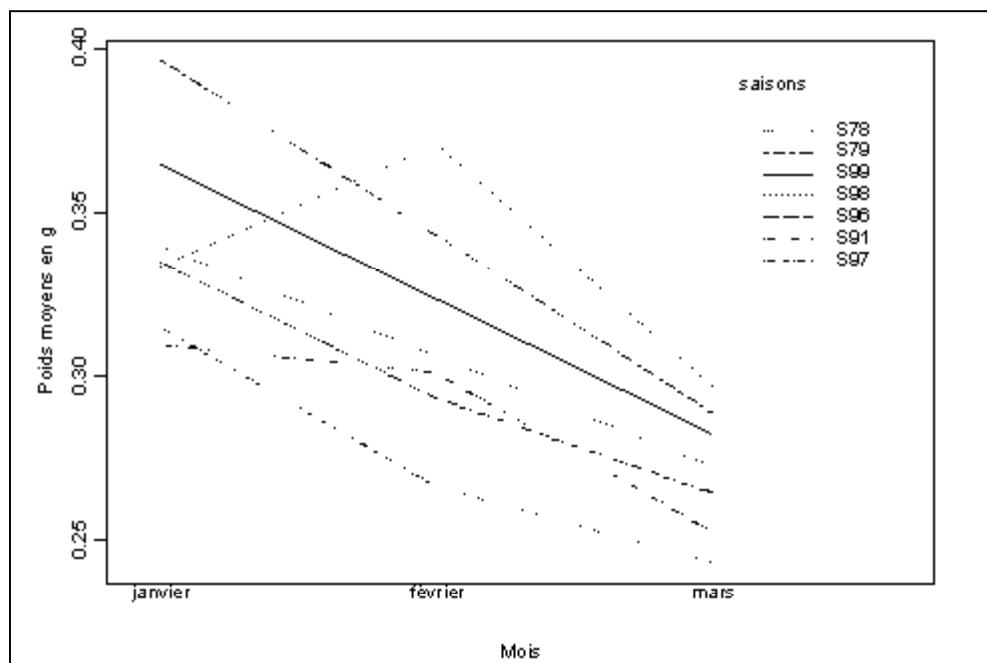


Figure 78 b : Diagramme d'interaction entre les facteurs « saison » et « mois » et mois * saisons pour les longueurs et les poids.

L'analyse confirme la diminution des longueurs et des poids au cours de la saison et surtout montre qu'il existe bien une variabilité inter annuelle significative. Les figures 78 a et b montrent les diagrammes d'interaction entre les facteurs « saisons » et « mois » pour la longueur et pour le poids.

On voit que se surimpose à la diminution progressive des longueurs et des poids au cours de la saison de pêche, une variation des tailles des civelles selon les saisons. Deux groupes semblent se distinguer : les saisons 1978/1979 ; 1979/1980 et 1999/2000 d'une part et les saisons ; 1991/1992 ; 1996/1997 ; 1997/1998 ; 1998/1999 d'autre part.

Le coefficient d'allométrie¹ est pris en compte pour caractériser les modifications relatives des deux variables biologiques après leur transformation logarithmique. Depuis le début des années 1980, le coefficient d'allométrie présente une forte variabilité (figure 79). Aucun lien entre cette variation et l'abondance des civelles ne peut être mis, pour le moment, en évidence.

¹ pente de la droite de régression entre le poids et la taille après transformation logarithmique. Lorsque le coefficient est égal à 3 on parle d'isométrie entre la longueur et le poids. Le poids de l'animal s'accroît au même rythme que le cube de sa longueur. Quand, il est inférieur à 3, on parle d'allométrie minorante : l'animal est maigre ; inversement quand il est supérieur à 3 on parle d'allométrie majorante : l'animal est gros.

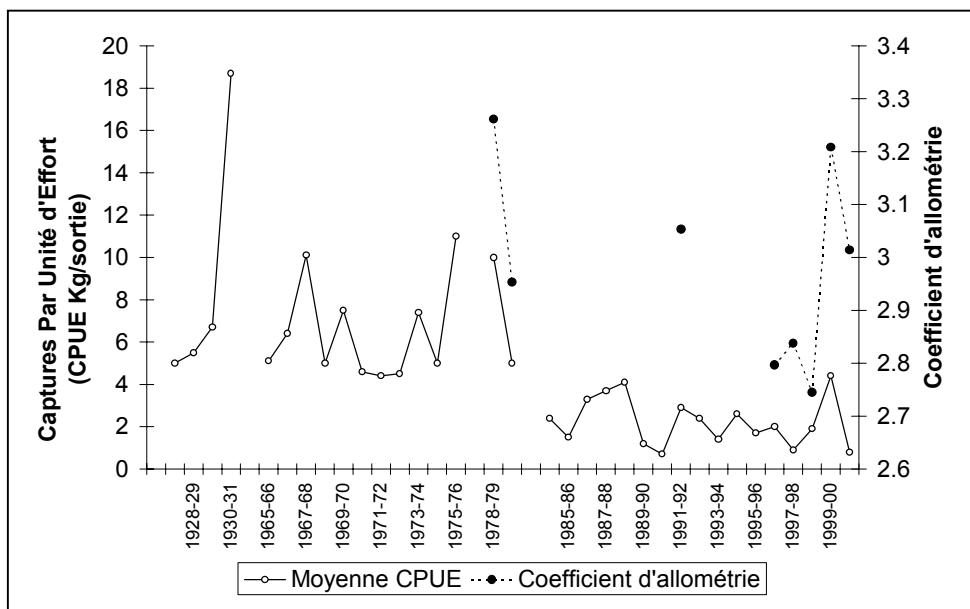


Figure 79 : Variation de la moyenne des CPUE de civelles (kg.sortie^{-1}) au cours de différentes campagnes de pêche sur l'Adour depuis 1928 et variations du coefficient d'allométrie.

Les captures de civelles enregistrées sur l'Adour comme sur l'ensemble des côtes européennes pour la même période restent à un niveau très bas. Les facteurs d'origine océanique, tels que des modifications du *Gulf Stream* ou de la productivité planctonique pourraient être à l'origine des modifications des caractéristiques des civelles.

4.2.2. Caractérisations biochimique et otolithométrique de la civelle sur le bassin de l'Adour.

4.2.2.1. Caractérisation biochimique et état d'amaigrissement à partir du rapport ADN/Poids sec (cf. Annexe 3 ; de Casamajor et al., 2001)

Les caractères biochimiques sont peu étudiés, les japonais ont été les premiers à s'y intéresser. Ce travail présente les fluctuations spatiales et temporelles de l'indice ADN/poids sec et des teneurs en eau de civelles d'*Anguilla anguilla* à partir d'un échantillonnage réalisé entre novembre et mars 1999/2000. Les échantillons sont prélevés, dans le sud du golfe de Gascogne, par pêche expérimentale ou auprès de la pêcherie professionnelle, au rythme d'un par mois au moment de la nouvelle lune.

Pour caractériser les pertes énergétiques pouvant survenir au cours de la traversée de l'estuaire ces échantillons sont comparés à deux lots de civelles capturés en zone marine. Une analyse statistique descriptive permet l'interprétation des résultats obtenus.

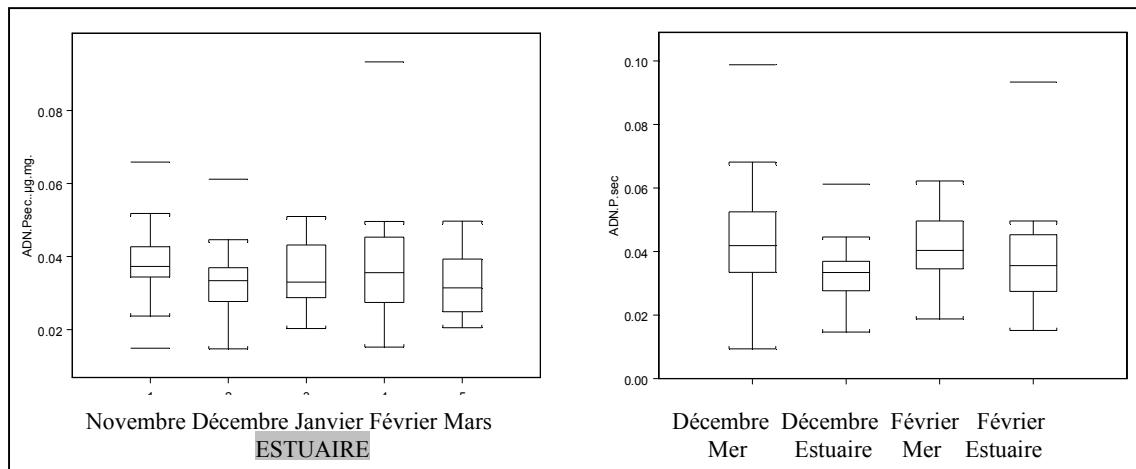


Figure 80 : Variations du rapport ADN/Poids sec au cours de la saison.

Comme cela est signalé dans de nombreux travaux, les civelles de l'estuaire de l'Adour diminuent en longueur et en masse au cours de la saison (cf. § 4.2.1). En parallèle, on constate une évolution de la pigmentation. Les variations du rapport ADN/ Poids sec et des teneurs en eau fluctuent mensuellement. Ces fluctuations sont liées à la pigmentation des individus en fin de saison. Cependant, pour un même stade pigmentaire (stade VB qui reste majoritaire sur l'ensemble de la saison) ce rapport reste stable quel que soit le mois de prélèvement. L'origine géographique et/ou la date d'éclosion des larves dans la mer des Sargasses produirait des civelles aux caractéristiques biométriques différentes qui arriveraient sur les côtes européennes échelonnées dans le temps mais dans le même état physiologique.

Quand on compare les civelles capturées en mer et en estuaire pour les mois de décembre et février, on constate que les différences sont significatives seulement pour le mois de décembre. Les travaux antérieurs à partir de la lecture des otolithes n'excluent pas un retour en mer après un passage en estuaire. Cette hypothèse est plausible car on retrouve de nombreux stades estuariens VB dans les échantillonnages marins. Le changement de milieu n'apparaît pas comme un événement mobilisateur de beaucoup d'énergie à partir de l'échantillonnage réalisé. Ces résultats confirment les fortes capacités osmotiques de la civelle.

Ces résultats doivent être complétés afin de confirmer la pertinence de l'indice biochimique utilisé. La civelle d'anguille européenne présente la particularité, par rapport aux autres larves de poissons, de jeûner sur une longue période. Une étude otolithométrique et une meilleure connaissance des voies de migration permettraient de définir les conditions environnementales de migration des civelles pendant la traversée océanique.

4.2.2.2. Caractérisation otolithométrique (cf. Annexe 4 de Casamajor et al., 2001)

Nous présentons ici les résultats concernant l'interprétation des microstructures des otolithes prélevés sur les individus analysés au § 4.2.2.1. Cette technique est largement utilisée pour connaître l'histoire des larves de poissons. Les informations sur le passé larvaire des civelles au cours de leurs traversées transocéanique et estuarienne, à partir de la lecture des microstructures des otolithes, permettront de préciser et confirmer les hypothèses émises à partir de l'état d'amaigrissement observé sur ces mêmes civelles (cf. § précédent).

Chaque otolithe est extrait, puis inclus dans de la résine. Il est poncé et décalcifié pour mettre en évidence les microstructures inscrites dans l'otolithe. Les photos sont réalisées au microscope électronique à balayage avec un grossissement de 600 fois après métallisation à l'or. Les otolithes sont classés en trois catégories en fonction de la présence ou de l'absence de marque de transition en estuaire inscrite en périphérie d'otolithe et de la poursuite de croissance en estuaire (figure 81). Les proportions de ces différents types diffèrent entre le début et la fin de saison entre les individus capturés en mer et en estuaire. Les proportions des types d'otolithes suivent les mêmes tendances que le développement de la pigmentation. Ces résultats traduisent une augmentation du temps de résidence dans la zone littorale et estuarienne en fin de saison. L'hypothèse d'un mélange des flux en fin de saison évoquée à partir de l'étude de l'amaigrissement des civelles est confirmée à partir de la classification des otolithes en fonction de leur type. Cette classification des otolithes est plus précise et plus fiable que celle de la pigmentation qui varie en fonction de la température de l'eau.

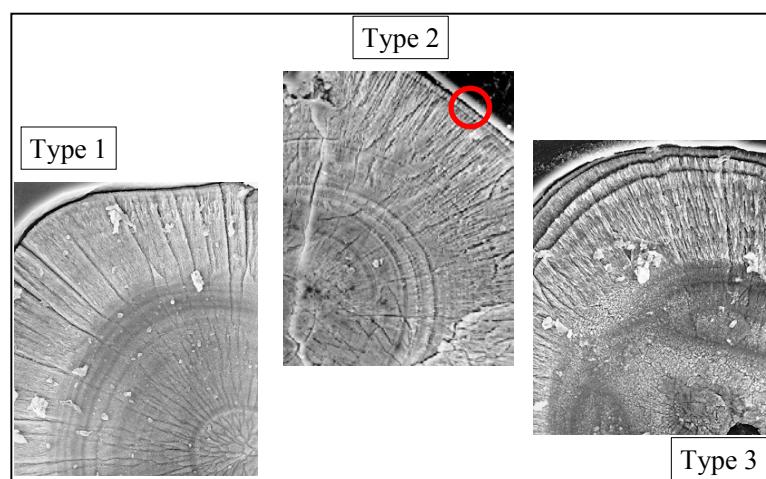


Figure 81 : Classification des otolithes en fonction des microstructures (photo MEB - X600)
Zone de croissance en bordure d'otolithe permettant de différencier les types

- Type 1 : pas de double marque en bordure d'otolithe
- Type 2 : apparition de la double marque
- Type 3 : croissance de l'otolithe après l'inscription de la double marque

Les mesures des différentes zones de croissances inscrites sur les otolithes montrent des différences saisonnières au niveau de la croissance de l'otolithe. Cependant les variations observées ne sont pas statistiquement différentes. Globalement le rayon moyen des otolithes augmente au cours de la saison. La proportion des otolithes du type le plus développé s'accroît également (type 3). La reprise de croissance de l'otolithe après la zone de transition en estuaire est plus fréquemment observée en fin de saison alors que la croissance de l'otolithe dans la zone de transition en bordure d'otolithe est constante autour de $5\mu\text{m}$ (figure 82).

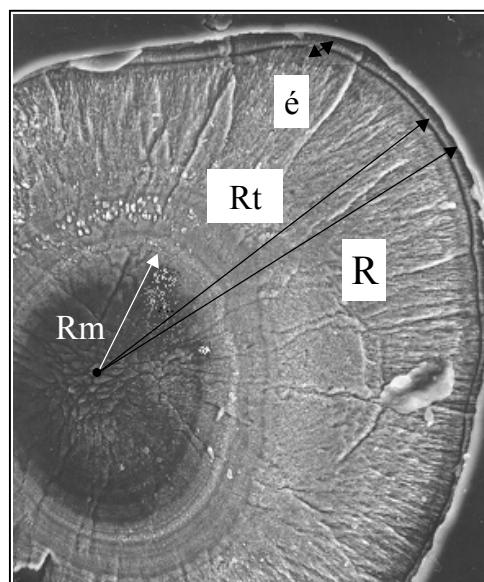


Figure 82 : Paramètres mesurés dans les différentes zones de croissances inscrites sur les otolithes.

R_m : distance entre le nucleus et la zone de métamorphose leptocéphale-civelle - Rt : distance entre le nucleus et la double marque - \bar{R} : rayon total de l'otolithe - \bar{e} : épaisseur de la zone de transition en estuaire - R_p : distance entre la métamorphose leptocéphale-civelle et la double marque.

Si les civelles arrivant dans le sud du golfe de Gascogne empruntent la même voie de migration, elles pourraient être soumises à des conditions environnementales différentes en fonction de la saison. Cependant, les variations du développement des zones de croissance de l'otolithe au cours de la traversée océanique ne semblent pas influencer leur état d'amaigrissement. Leurs dépenses énergétiques à partir du rapport ADN/Poids sec sont constantes sur la saison traduisant des conditions de migration similaires. Ces résultats établissent le fait que les flux de civelles en migration au cours de la période d'étude sont issus soit de pontes étalées dans le temps, soit de pontes provenant de zones géographiquement distinctes au niveau de la mer des Sargasses. Ainsi des analyses micro-chimiques des otolithes permettraient de préciser les paramètres physico-chimiques rencontrés par les civelles au cours de leur passé larvaire (cf. § suivant).

4.2.3. Étude du passé larvaire transatlantique de la civelle dans le golfe de Gascogne et à l'échelle européenne

D'après les travaux de Lecomte-Finiger et Yahyaoui, (1989), les civelles *d'Anguilla anguilla* sont âgées de 7 à 9 mois au moment de leurs captures sur les côtes européennes. Elles ont alors parcouru 6000 km à travers l'Océan Atlantique. Au cours de cette traversée, les *Sagittae* se développent progressivement par dépôt de carbonate de calcium sous la forme d'aragonite inclus dans une trame protéique (Lecomte-Finiger, 1999).

Les principaux flux de civelles arrivent sur les côtes européennes plus ou moins tôt dans la saison en fonction de la latitude. Les premiers flux arrivent d'abord dans la partie méridionale de l'aire de répartition. La convergence des connaissances actuelles à partir des caractéristiques biologiques des civelles d'anguilles européennes et de données physiques dans l'Atlantique Nord tendrait à montrer qu'elles empruntent 3 voies principales de migration pour rejoindre le continent européen. Cette hypothèse a été testée à l'échelle européenne à partir de dosages isotopiques du ^{13}C et de l' ^{18}O d'otolithes d'individus provenant de différents estuaires.

Au cours de la saison de migration 2000/2001 un échantillonnage de 20 otolithes de civelles (*Sagitta* + *Lapilli*) a été effectué par estuaire sur la période centrale de migration située entre janvier et février à l'échelle européenne. Au total, 9 sites ont été analysés entre la Suède et le Maroc : Suède, Belgique, Aulne, Vilaine, Adour, Camargue, Leucate, Portugal, Maroc (tableau 39).

Tableau 39 : Nombre total de mesures réalisées en fonction de la latitude et de la température de l'eau. - N = nombre de mesures réalisées.

ORIGINE	N	T°mer	Latitude	Longitude
SUEDE	5	5.34	57°15N	12°06E
BELGIQUE	5	7.96	51°26N	3°35E
AULNE	4	11.45	48°12N	4°05W
VILAINE	4	10.49	47°23N	2°27W
ADOUR	8	12.39	43°32N	1°27W
CAMARGUE	4	13.52	43°24N	4°27E
LEUCATE	5	13.11	42°47N	3°02E
PORTUGAL	6		39°36N	9°04W
MAROC	5	16.17	34°02N	6°51W

Les résultats de ces analyses montrent une diminution des concentrations en ^{13}C et en ^{18}O en fonction de la latitude.

Les résultats obtenus à partir des dosages de la composition isotopique des otolithes montrent une diminution des teneurs des rapports en ^{18}O ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et ^{13}C ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en fonction de la latitude.

La variabilité est plus importante pour les dosages du carbone que pour l'oxygène. Les figures 83 et 84 représentent la tendance à la diminution observée en fonction de la latitude.

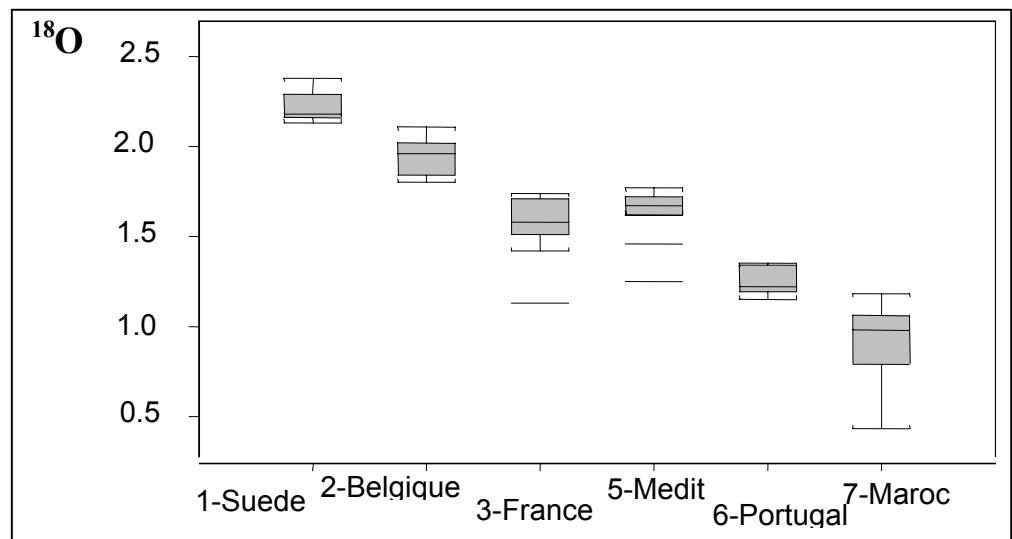


Figure 83 : Fluctuations des dosages de ^{18}O dans les *Sagittae* de civelles européennes.

La figure 84 ci-dessous montre une diminution des teneurs en ^{13}C en fonction de la latitude, mais de plus faible amplitude que dans le cas du ^{18}O .

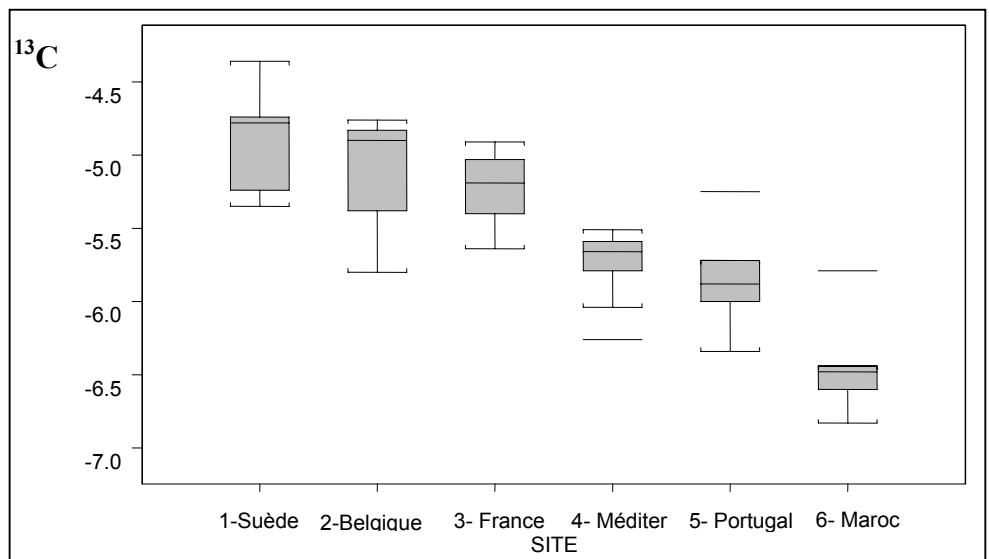


Figure 84 : Fluctuations des dosages de ^{13}C dans les *Sagittae* de civelles européennes.

Les travaux antérieurs sur l'intégration de ces isotopes dans les otolithes de poissons montrent qu'il y aurait équilibre avec la composition isotopique du milieu ambiant (Iacumin et al., 1992 ; Radtke et al., 1996 ; Blamart et al., 2002). D'où l'idée d'utiliser comme traceurs des masses d'eau traversées la concentration de ces 2 composants dans l'otolithe. Notons cependant que la signature isotopique du ^{13}C est plus variable en fonction de la température de l'eau de mer traversée, mais également du régime alimentaire des individus (Gauldie, 1996). Ces premiers résultats préliminaires conforteraient l'hypothèse des 3 voies de migration dans l'Atlantique Nord. Ils seront précisés lors d'analyses complémentaires.

Ces éléments sur la connaissance de la migration océanique des civelles d'anguilles européennes sont primordiaux pour la gestion de l'espèce. Ils pourraient notamment apporter des informations concernant les tendances actuelles à la diminution du recrutement dans le Nord de l'Europe. Le couplage entre les données biologiques et océanographiques est indispensable pour comprendre les mécanismes de la migration.

4.3. Diversité génétique des civelles en migration dans l'estuaire de l'Adour et effets des stress environnementaux.

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) est en constante diminution dans les rivières et les estuaires européens. Cette diminution est très probablement la conséquence de changements environnementaux notamment anthropiques, en particulier des pollutions chimiques, plutôt que des seuls prélèvements par pêche. Ce travail a pour objectifs de déterminer sur les anguilles des estuaires du sud du golfe de Gascogne et en particulier de l'estuaire de l'Adour :

- la variabilité génétique des populations, connaissance importante pour la biologie et la gestion de cette espèce ;
- les effets des pollutions chimiques sur ces populations, un facteur de déclin fréquemment soupçonné.

Les travaux réalisés ont porté principalement sur la mise au point de marqueurs génétiques neutres permettant de définir la structure et la diversité des populations. Ils nous ont également permis de mettre en route un programme à plus long terme de caractérisation de marqueurs moléculaires des effets des stress chimiques.

4.3.1. Diversité génétique des civelles en migration dans l'estuaire de l'Adour

Dans le cadre d'une étude dont l'objectif est de mieux cerner les paramètres démographiques, physiologiques et comportementaux des communautés d'anguilles dans les rivières, il est également nécessaire de s'interroger sur le niveau de diversité génétique au sein de ces communautés.

En effet, pour envisager des mesures de préservation d'une espèce, il est indispensable de connaître et de maintenir la biodiversité naturelle. Cette précaution garantit une meilleure résistance à des facteurs défavorables comme peuvent l'être, par exemple, des maladies ou des pollutions. De même, il est important, dans un contexte environnemental plus général, lors de campagnes de repeuplements, de s'attacher à réintroduire des spécimens dont la biodiversité reflète celle des populations naturelles. Dans le cas contraire, on peut s'exposer à une efficacité faible due à une réintroduction d'individus inadaptés au milieu, ou, *a contrario*, à une disparition des populations d'origine qui peut alors entraîner un déséquilibre populationnel.

Une étude de la biodiversité de l'anguille peut s'envisager à plusieurs niveaux, du fait du cycle de vie particulier de cette espèce. Des flux de juvéniles remontent les estuaires chaque année durant plusieurs mois. Ces anguilles se transforment alors en anguilles jaunes et se sédentarisent durant de nombreuses années dans les rivières du bassin. Elles les redescendent plus tard pour quitter définitivement les eaux douces et se reproduire.

Ainsi, nous nous sommes attachés, dans un premier temps, à déterminer le niveau de polymorphisme au sein des populations de juvéniles remontant l'estuaire du bassin de l'Adour. Cette étude doit nous permettre de déterminer si les flux de civelles migrants sont génétiquement identiques, d'une part, d'une saison à l'autre, et, d'autre part, d'un flux à l'autre au cours d'une même saison.

4.3.1.1. Choix des marqueurs moléculaires

Chez l'anguille, la comparaison de séquences mitochondrielles a permis de revoir les liens phylogénétiques entre les 18 espèces et sous espèces mondiales (Aoyama et al., 1997 ; Lin et al., 2001 ; Aoyama et al., 2001). En ce qui concerne l'espèce *Anguilla anguilla* aucune différenciabilité en fonction de la localisation géographique n'a pu être démontrée avec ce type de marqueur génétique (Avise et al., 1986 ; William et al., 1984 ; Lintas et al., 1998 ; Daemen et al., 2001). L'hypothèse d'une panmixie a donc été avancée, c'est à dire que le stock de larves leptocéphales provenant de la mer des Sargasses est redistribué sur l'aire de répartition continentale de façon aléatoire².

Néanmoins des études très récentes, utilisant des microsatellites, marqueurs moléculaires neutres avec un haut niveau de polymorphisme, ont permis de remettre en question la théorie de panmixie (Daemen et al., 2001 ; Wirth et Bernatchez, 2001). En effet, ces marqueurs permettent de mettre en évidence une faible différenciation génétique liée aux différences géographiques.

Nous avons donc choisi de réaliser notre étude de la biodiversité des civelles entrant dans l'estuaire de l'Adour avec des marqueurs microsatellites.

4.3.1.1.1. Les marqueurs microsatellites

² Les paragraphes précédents sur les études physiologiques et biométriques laissent penser que ce n'est peut-être pas le cas.

Les microsatellites sont de courtes séquences d'ADN répétées (Hancock, 1999). Ce sont généralement des répétitions de di, tri ou téranucléotides (par exemple (cA)_n ou (cTT)_n). Ces séquences sont réparties de façon aléatoire sur le génome. Un marqueur microsatellite correspond à une séquence microsatellite positionnée à un locus déterminé sur le génome. Comme le locus est déterminé, il est aussi unique et chaque locus est parfaitement défini par les séquences conservées qui entourent la séquence répétée.

On peut alors étudier le génotype de l'individu pour un marqueur microsatellite donné : la taille du fragment amplifié par la technique de PCR³ variera selon le nombre de répétitions (figure 85). Ces zones de répétitions sont, en effet, très intéressantes car ce sont des zones de grande variabilité.

4.3.1.1.2. Les marqueurs microsatellites d'anguille

Jusqu'à présent, 41 marqueurs microsatellites ont été caractérisés chez trois espèces d'anguille : *Anguilla rostrata* (Anguille américaine), *Anguilla japonica* (Anguille japonaise) et *Anguilla anguilla* (Daemen *et al.*, 1997 ; Daemen *et al.*, 2001 ; Wirth et Bernatchez, 2001 ; Ishikawa *et al.*, 2001 ; Tseng *et al.*, 2001). Les travaux effectués montrent que les microsatellites d'*Anguilla rostrata* peuvent être utilisés pour analyser les populations d'*Anguilla anguilla* (Wirth et Bernatchez, 2001). Il est donc vraisemblable qu'il en soit de même pour ceux d'*Anguilla japonica*.

Une analyse préliminaire, avec certains de ces marqueurs, a été réalisée au LEM⁴ pour évaluer leur variabilité sur les civelles de l'Adour. Ceci avait pour but de sélectionner un nombre limité de ces marqueurs afin d'étudier la structure génétique des juvéniles d'anguilles en migration dans le bassin.

Cinq marqueurs microsatellites ont été retenus pour l'étude de la biodiversité : Ang 101, Ang 114, Aan 03, Aan 04 et Ang 151. Ces cinq microsatellites sont spécifiques d'*Anguilla anguilla* (Daemen *et al.*, 1997 ; Wirth et Bernatchez, 2001). Ils permettent l'amplification, par une réaction de PCR, d'une région répétée constituée de dinucléotides (AC ou TC par exemple). Les marqueurs microsatellites Ang 101, Aan 03, Aan 04 et Ang 151 sont composés de répétitions AC ; le marqueur Ang 114 est, lui, constitué de répétitions TC.

³ Polymerase Chain Reaction : réaction de polymérisation en chaîne.

⁴ Laboratoire d'Écologie Moléculaire. U.P.P.A. Montaury

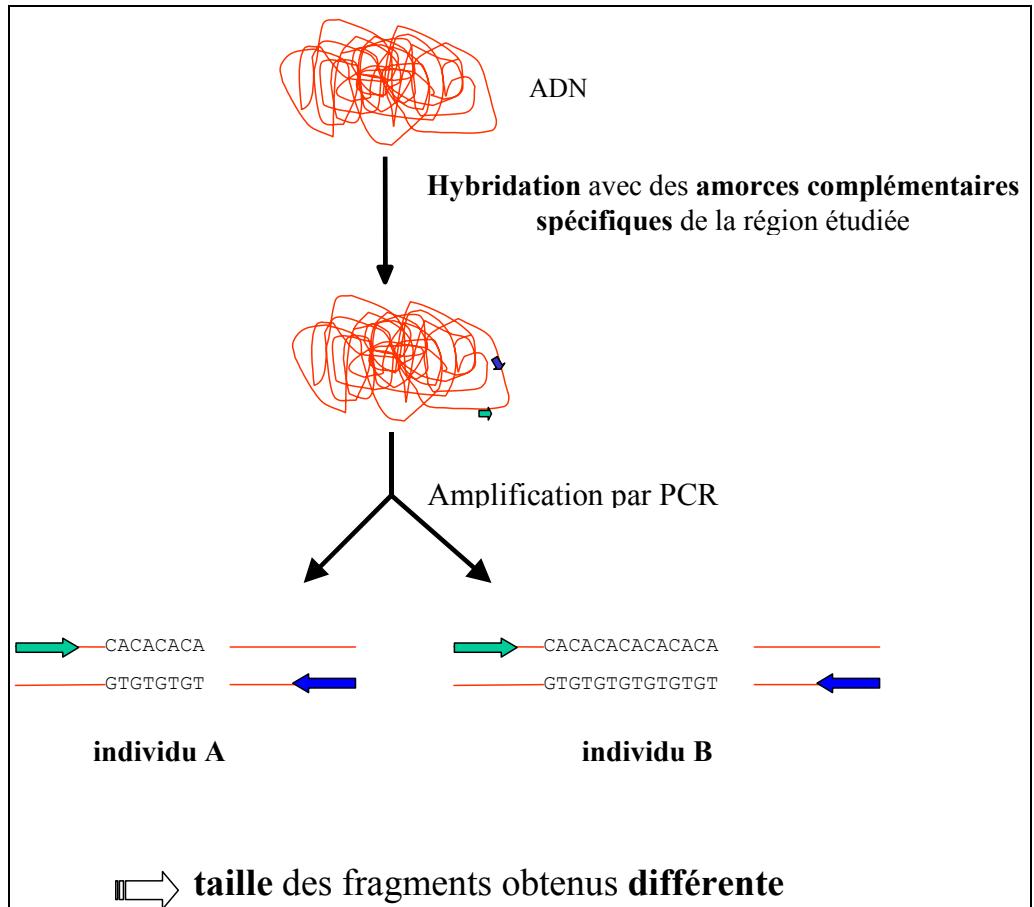


Figure 85 : Principe de l'étude par PCR de la taille des allèles d'un marqueur microsatellite.

4.3.1.2. Échantillons analysés

L'analyse porte sur des civelles pêchées dans l'estuaire de l'Adour, dans le secteur d'Urt, lors des campagnes menées par le Laboratoire Halieutique d'Aquitaine d'Ifremer depuis le début de la saison de migration 1999/2000. Cinq à dix individus ont été réservés et congelés à -80°C lors de chaque sortie, dans les cas où des civelles ont été pêchées. Notre étude porte aujourd'hui sur deux saisons de migration : 1999/2000 et 2000/2001. Les individus analysés sont représentatifs de chacune des saisons et sont au nombre de 46 civelles pêchées entre novembre 1999 et mars 2000 et 20 civelles pêchées de décembre 2000 à février 2001 (pas de pêche en novembre et mars pour cette saison).

4.3.1.3. Méthodes

4.3.1.3.1. Extraction de l'ADN total

Une extraction de l'ADN total de chaque civelle de l'étude a été réalisée individuellement à partir du quart de l'individu congelé. L'extraction suit un protocole classique. Les chairs sont incubées pendant 7h à 60°C en présence de détergent SDS⁵ et de protéinase K, puis laissées à température ambiante toute une nuit. Il est alors réalisé une extraction au phénol, puis une précipitation à l'isopropanol. Après traitement à la RNase, l'ADN total est à nouveau précipité puis resuspendu dans du tampon TE⁶.

4.3.1.3.2. Amplification par PCR des marqueurs microsatellites

Chaque marqueur microsatellite a été amplifié, séparément, pour chaque individu, à partir de l'ADN total extrait. Cette amplification est réalisée en utilisant une des deux amores d'amplification marquée par un fluorochrome détectable par fluorométrie lors de l'analyse de la taille des fragments. La réaction de PCR est suivie d'une purification sur colonne GFX™ (Amersham Biosciences) afin d'éliminer les amores en excès.

4.3.1.3.3. Analyse de la taille des fragments d'ADN par électrophorèse capillaire

Chaque produit de PCR est soumis à une électrophorèse capillaire sur ABI Prism™ 310 (Applied Biosystem), en co-migration avec un marqueur de taille standard. Les résultats, donnés sous forme d'électrophorégrammes, sont analysés par les logiciels Gene Scan Analysis et Genotyper, afin de déterminer la taille des fragments détectés.

L'anguille étant un organisme diploïde, chaque individu porte deux allèles pour un même locus. Nous obtenons donc deux fragments pour chaque amplification PCR. Un individu peut présenter soit une homozygotie pour ce locus, soit une hétérozygotie. Ainsi, nous pouvons obtenir différents types de profils électrophorétiques présentés sur la figure 86.

Le profil typique d'un individu homozygote pour le marqueur étudié est présenté figure 86 profil A. On remarque un pic principal qui correspond à la taille unique des fragments amplifiés, puisque les deux allèles sont identiques.

⁵ Sodium Dodécyl Sulfate.

⁶ Tris-EDTA.

Le profil typique d'un individu hétérozygote est présenté figure 86 profil B. Lorsque les tailles de chaque allèle pour le marqueur étudié sont suffisamment différentes on note la présence de deux pics bien distincts l'un de l'autre. Quand les deux allèles ont des tailles différentes, mais très proches, par exemple lorsqu'ils diffèrent d'une seule répétition (deux nucléotides), on obtient le profil présenté figure 86 profil C. Le pic de plus grande taille correspond à un premier allèle. Le second, généralement d'intensité plus importante correspond au second allèle. Si le second pic est d'intensité plus importante c'est qu'il correspond à l'addition de l'amplification réelle d'un allèle et d'un fragment issu de l'amplification du second allèle, du dérapage de la Taq Polymérase lors de l'amplification.

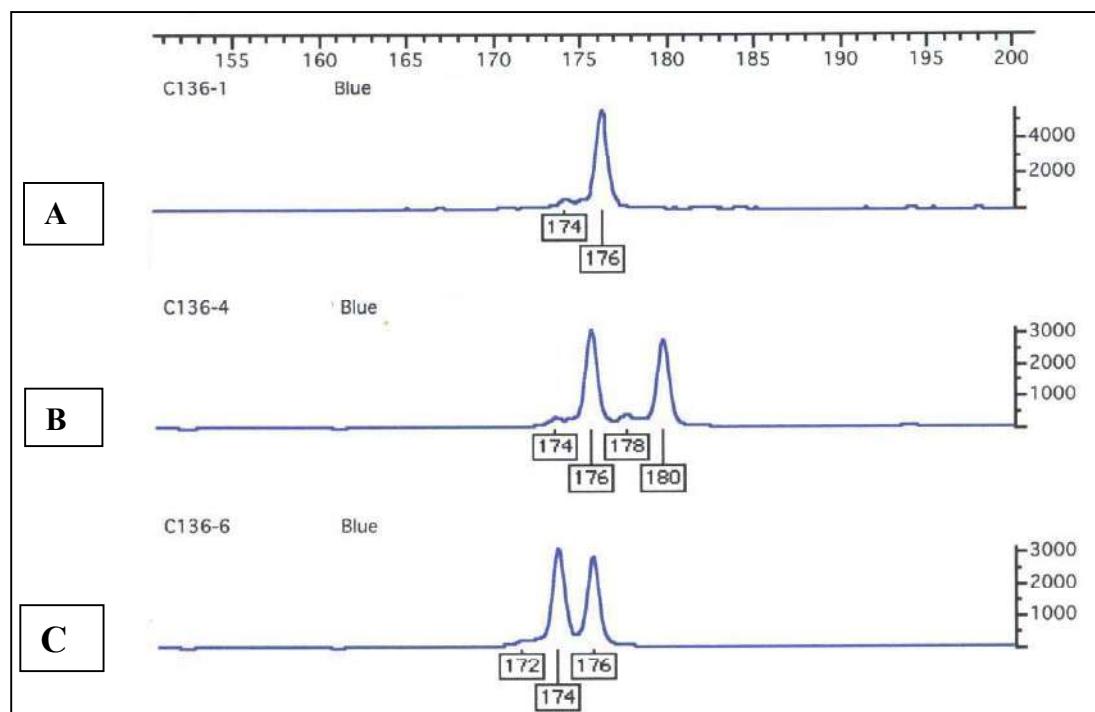


Figure 86 : Exemples de différents profils électrophorétiques après amplification d'allèles microsatellite.

A : Profil d'un individu homozygote pour le marqueur étudié (Aan 03).

B et C : Profils d'individus hétérozygotes pour le marqueur étudié (Aan 03).

4.3.1.4. Résultats et discussion

L'étude que nous avons menée a été réalisée sur 66 individus représentatifs de deux saisons de migration de civelles dans l'estuaire de l'Adour. Quatre marqueurs microsatellites ont été amplifiés et analysés pour cet échantillonnage. L'étude du cinquième marqueur est encore en cours.

Caractérisation des allèles pour chaque marqueur microsatellite

Marqueur Ang 101

Les tableaux 40 et 41 présentent les résultats de l'analyse de la taille des allèles du marqueur Ang 101 de l'échantillonnage étudié.

Vingt et un allèles de tailles différentes sont présents chez les 66 individus : 19 pour la saison 1999/2000 et 14 pour la saison 2000/2001. Ceci montre un fort polymorphisme pour ce marqueur au sein de la population étudiée. Les tailles des fragments sont comprises entre 162 et 196 bases.

Pour les individus de la saison 1999/2000, le taux d'hétérozygotie s'élève à 100 %. Seuls 3 allèles ne sont présents qu'une fois. Pour les individus de la saison 2000/2001, le taux d'hétérozygotie atteint 90 % avec un seul allèle unique. Douze allèles sur les 21 sont présents dans les deux populations.

On peut noter que les allèles les plus fréquemment retrouvés au cours de ces deux saisons de migration sont ceux à 164, 172, 176, 178 et 180 bases (pourcentage de présence supérieur à 10 %). Mais seuls les allèles à 172 et 176 bases ont une fréquence équivalente au cours des deux saisons étudiées.

Marqueur Ang 114

Le tableau 42 présente le bilan de l'analyse de la taille des allèles pour le marqueur Ang 114. On remarque que ce marqueur microsatellite est également très polymorphe. Le nombre total d'allèles trouvés est de 28 : 26 pour la première saison et 15 pour la seconde. Le nombre d'allèles communs aux deux saisons de migration est de 13. Le nombre d'allèles uniques est relativement important, au nombre de 9. La taille des allèles est comprise entre 191 et 243 bases. Le taux d'hétérozygotie est de 87 % pour la saison 1999/2000 et de 65 % pour la saison 2000/2001.

Les allèles les plus fréquents sur l'échantillonnage total sont les allèles 194, 213, 216, 219 et 225, mais leurs fréquences varient nettement d'une saison à l'autre. Seuls les allèles 213 et 219 ont des fréquences à peu près équivalentes pour les deux saisons.

Marqueur Aan 03

Le tableau 43 présente le bilan de l'analyse de la taille des allèles pour le marqueur Aan 03. On peut noter que ce marqueur est très peu polymorphe, il ne présente que six allèles différents pour la première saison (46 individus) et 5 pour la seconde saison (20 individus). Les différents allèles sont compris entre 152 et 180 bases. Le taux d'homozygotie est très élevé : de 80 à 85 % selon la saison. Un seul allèle (176) est majoritaire, fréquent à près de 90 % sur la totalité de l'échantillonnage. Les autres allèles sont quasiment des allèles uniques.

Marqueur Aan 04

L'analyse de ce marqueur microsatellite est encore en cours. Les résultats présentés dans le tableau 44 portent donc sur 43 individus de 1999/2000 et 17 de 2000/2001.

Seize allèles sont présents chez les 60 individus : 13 pour la saison 1999/2000 et 9 pour la saison 2000/2001. Les tailles des fragments sont comprises entre 208 et 234 bases. Le taux d'hétérozygotie s'élève à 70 % pour la saison 1999/2000 et 75 % pour la saison 2000/2001. Dix allèles sur les seize ne sont présents qu'une fois. Parmi les 6 allèles restants, les plus fréquents sont 226, 227, 228 et 229. On peut noter leurs tailles extrêmement proches, avec des variations d'un seul nucléotide de l'un à l'autre. On note que leurs fréquences diffèrent entre les saisons. Cependant les allèles 227 et 228 sont majoritaires pour les deux saisons.

Tableau 40 : Taille des fragments correspondants aux allèles du marqueur microsatellite Ang 101 pour les individus de la saison 1999/2000.

date	individu	allèles																					
		162	163	164	166	167	168	169	170	172	173	174	175	176	177	178	179	180	182	184	190	196	
10 nov.	55-1							1													1		
10 nov.	C130-5										1												
10 nov.	C130-15											1											
10 nov.	C130-16									1												1	
9 dec.	55-3a						1																
9 dec.	C130-6																			1		1	
9 dec.	C130-17										1												
9 dec.	C130-18											1								1			
9 dec.	C130-19										1	1										1	
9 dec.	55-4a						1				1												
9 dec.	C130-7										1												
9 dec.	C130-20											1											
9 dec.	C130-21												1						1	1			
9 dec.	C130-22										1								1				
22 dec.	55-5											1											
22 dec.	C130-1										1										1		
22 dec.	55-6a												1									1	
22 dec.	C130-8											1							1				
22 dec.	55-7										1										1		
22 dec.	55-8										1	1											
22 dec.	C130-2												1						1				
22 dec.	55-9										1												
22 dec.	C130-9											1								1			
22 dec.	55-10																		1			1	
7 janv.	55-11a																				1		
7 janv.	C130-3																			1			
7 janv.	55-12											1										1	
7 janv.	C130-10										1								1				
9 janv.	55-13a																		1				
9 janv.	C130-4										1												
9 janv.	55-14a												1						1				
9 janv.	55-15											1								1			
9 janv.	C130-11																		1	1			
12 janv.	55-22																	1	1				
2 fev.	55-17											1								1			
2 fev.	C130-12										1										1		
2 fev.	C130-23										1												
2 fev.	55-18										1												
2 fev.	C130-24																				1		
8 fev.	55-19a											1								1			
8 fev.	C130-13										1										1		
8 fev.	C130-25	1										1											
8 fev.	55-20																	1		1			
8 mar.	C130-26										1									1			
8 mar.	55-23																			1			
8 mar.	C130-14																	1			1		
total		92	1	0	5	6	3	3	2	7	10	0	6	3	11	3	14	2	9	3	1	2	1
pourcentage		100	1,09	0,00	5,43	6,52	3,26	3,26	2,17	7,61	10,87	0,00	6,52	3,26	11,96	3,26	15,22	2,17	9,78	3,26	1,09	2,17	1,09

Tableau 41 : Taille des fragments correspondants aux allèles du marqueur microsatellite Ang 101 pour les individus de la saison 2000/2001.

date	individu	allèles																					
		162	163	164	166	167	168	169	170	172	173	174	175	176	177	178	179	180	182	184	190	196	
13 dec.	C135-1				1																		
13 dec.	C135-2															1	1						
13 dec.	C135-3															1					1		
13 dec.	C135-11					1																	
13 dec.	C135-12	1	1																				
21 dec.	C135-4																		2				
21 dec.	C135-5									1										1			
21 dec.	C135-13														1			1					
21 dec.	C135-14														1					1			
21 dec.	C135-15							1		1													
12 janv.	C135-6			1													1						
12 janv.	C135-7	1				1																	
12 janv.	C135-8		1																		1		
12 janv.	C135-16																		1	1			
12 janv.	C135-17														2								
6 fevr.	C135-9		1													1							
6 fevr.	C135-10																			1			
6 fevr.	C135-18																	1	1				
6 fevr.	C135-19		1																	1			
6 fevr.	C135-20					1									1								
total		40	0	2	5	3	0	2	0	2	4	2	3	0	5	0	2	2	5	1	2	0	0
pourcentage		100	0	5	12,5	7,5	0	5	0	5	10	5	7,5	0	12,5	0	5	5	12,5	2,5	5	0	0

Tableau 42 : Analyse du marqueur microsatellite Ang 114 pour deux saisons de migration.

Saison	Allèles	Total	191	192	193	194	203	207	211	212	213	214	215	216	217	219	220	221	222	224	225	227	228	229	230	231	233	235	241
1999/2000	nombre	92	1	1	1	4	4	5	3	1	14	5	3	5	3	12	0	2	1	2	8	5	1	1	4	1	3	1	1
	pourcentage	100	1,09	1,09	1,09	4,35	4,35	543	3,26	1,09	15,22	543	3,26	543	3,26	13,04	0	2,17	1,09	2,17	8,70	543	1,09	1,09	4,35	1,09	3,26	1,09	1,09
2000/2001	nombre	40	1	0	0	5	0	0	0	0	4	2	1	6	2	5	1	1	0	0	5	0	1	0	2	0	0	0	1
	pourcentage	100	25	0	0	125	0	0	0	0	10	5	25	15	5	125	25	25	0	0	125	0	25	0	5	0	0	0	25

Tableau 43 : Analyse du marqueur microsatellite Aan 03 pour deux saisons de migration.

Saison	Allèles	Total	152	167	174	176	178	180
1999/2000	nombre	92	1	1	5	83	1	1
	pourcentage	100	1,09	1,09	5,43	90,22	1,09	1,09
2000/2001	nombre	40	0	1	2	35	1	1
	pourcentage	100	0	2,5	5	87,5	2,5	2,5

Tableau 44 : Analyse du marqueur microsatellite Aan 04 pour deux saisons de migration.

Saison	Allèles	Total	208	218	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	234
1999/2000	nombre	86	0	1	0	1	1	1	1	5	13	20	30	4	5	1	0	1
	pourcentage	100	0	1,16	0	1,16	1,16	1,16	1,16	5,81	15,1	23,3	34,9	4,65	5,81	1,16	0	1,16
2000/2001	nombre	34	1	0	1	0	0	0	0	2	3	8	11	5	1	0	1	0
	pourcentage	100	2,94	0	2,94	0	0	0	0	5,88	8,82	23,5	32,4	14,7	2,94	0	2,94	0

Tableau 45 : Comparaison des différents microsatellites sur l'échantillonnage analysé.

Marqueur	Saison	Nombre d'individus analysés	Taille des allèles	Hétérozygotie observée	Nombre total d'allèles	Nombre d'allèles uniques	Nombre d'allèles/Nombre d'individus
Ang 101	1999/2000	46	162-196	1,00	19	3	0,41
	2000/2001	20	163-184	0,90	14	1	0,70
Ang 114	1999/2000	46	191-241	0,87	26	10	0,57
	2000/2001	20	191-261	0,65	17	7	0,85
Aan 03	1999/2000	46	152-180	0,20	6	4	0,13
	2000/2001	20	167-180	0,15	5	3	0,15
Aan 04	1999/2000	43	218-234	0,70	13	7	0,30
	2000/2001	16	208-232	0,75	9	4	0,56

Biodiversité des civelles de l'Adour

Comparaison des différents marqueurs microsatellites

Pour déterminer la diversité génétique des populations, l'analyse des cinq marqueurs microsatellites doit être effectuée conjointement. Ainsi, le tableau 45 (ci-dessus) présente un récapitulatif des caractéristiques de chacun des quatre marqueurs déjà analysés pour l'échantillonnage étudié.

Les taux d'hétérozygotie varient selon le marqueur. Ils sont moyennement à très élevés pour Ang 101, Ang 114 et Aan 04. En revanche, Aan 03 présente un taux d'homozygotes extrêmement important.

Le nombre d'allèles totaux pour ces quatre marqueurs est également très variable. Etant donné que le nombre d'échantillons pour l'étude de la première saison est supérieur à celui de la seconde, le nombre total d'allèles est toujours supérieur pour la saison 1999/2000. Le marqueur Ang 114 présente le nombre d'allèles le plus important, suivi de près par Ang 101. Le marqueur Aan 03 ne présente que peu d'allèles. Aan 04 se trouve en position intermédiaire. Ces résultats sont confirmés par le rapport du nombre d'allèles sur le nombre d'individus analysés. Ils montrent que Aan 03 est le marqueur le moins polymorphe. Ang 114 et Ang 101 présentent en revanche un polymorphisme important.

La différence de polymorphisme des différents marqueurs étudiés montre bien qu'une analyse de biodiversité ne peut pas être envisagée avec un seul marqueur. Une telle étude est généralement menée en analysant 5 à 8 loci microsatellites (Wirth et Bernachez, 2001 ; Wirth et Bernachez, 2003 ; Ellegren *et al.*, 1995 ; Takahashi *et al.*, 1998).

Comparaison des populations de civelles d'une saison à une autre

Pour étudier la biodiversité au sein des populations, il est donc nécessaire d'analyser les résultats obtenus pour chaque individu, et pour tous les marqueurs de l'étude. L'analyse n'a donc pas été réalisée pour l'instant dans la mesure où l'étude est encore en cours, notamment pour le marqueur Ang 151.

Néanmoins, nous avons vu que pour 3 marqueurs les allèles les plus fréquents n'étaient pas forcément retrouvés dans les mêmes proportions d'une saison à l'autre. Les populations migrant dans l'estuaire de l'Adour d'une année à l'autre seraient-elles génétiquement différentes ?

Comparaison des individus au cours d'une saison

De la même manière, une analyse de la biodiversité au sein d'une même saison de migration n'a pu être encore finalisée.

Cependant, nous pouvons d'ores et déjà remarquer que certains allèles pour un marqueur donné sont plus fréquents en début de saison qu'en fin de saison, ou inversement. Ceci peut être visualisé sur les graphes des figures 87 et 88. Chaque saison de migration a été séparée en deux périodes : le début de saison étant considéré de novembre à décembre et la fin de saison de janvier à mars.

Ainsi, pour le marqueur Ang 101 (figure 87) on remarque que certains allèles sont retrouvés dans les mêmes proportions au cours d'une même saison : 164 et 174 pour la saison 1999/2000 par exemple. D'autres sont plus fréquents en début de saison : 166, 172 pour la saison 1999/2000, et 170 et 174 pour la saison 2000/2001.

Enfin certains sont plus fréquemment retrouvés en fin de saison : 170, 176 et 180 pour la saison 1999/2000, et 164 et 172 pour la saison 2000/2001.

De même, pour le marqueur Ang 114 (figure 88), les allèles 213 et 216, pour la première saison, et 214 et 216, pour la seconde, ont des proportions équivalentes au cours d'une même saison. Les allèles 214 et 225 pour la première saison, et 213, 219 et 225 pour la seconde, sont plus fréquents en début de saison, alors que les allèles 194, 207, 219 et 227 pour la première saison, et l'allèle 194 pour la seconde saison, apparaissent plus en fin de saison.

Il semble donc que les flux remontant l'estuaire en début de saison soient différents de ceux migrants en fin de saison. Il est donc légitime de se demander si les civelles remontant l'Adour de novembre à mars présentent une diversité génétique d'un flux à un autre.

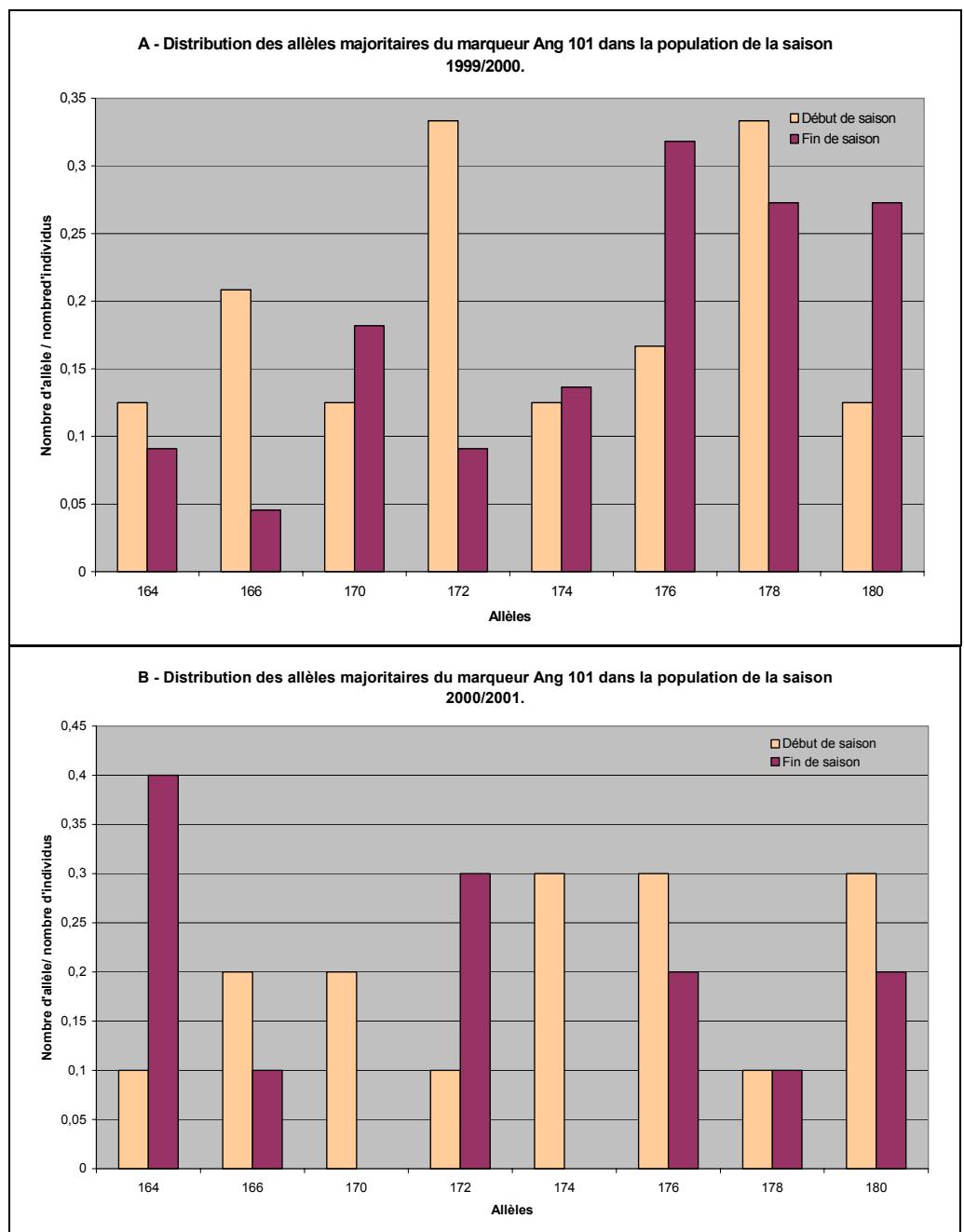


Figure 87 : Distribution allélique du marqueur Ang 101 au cours de deux saisons de migration.

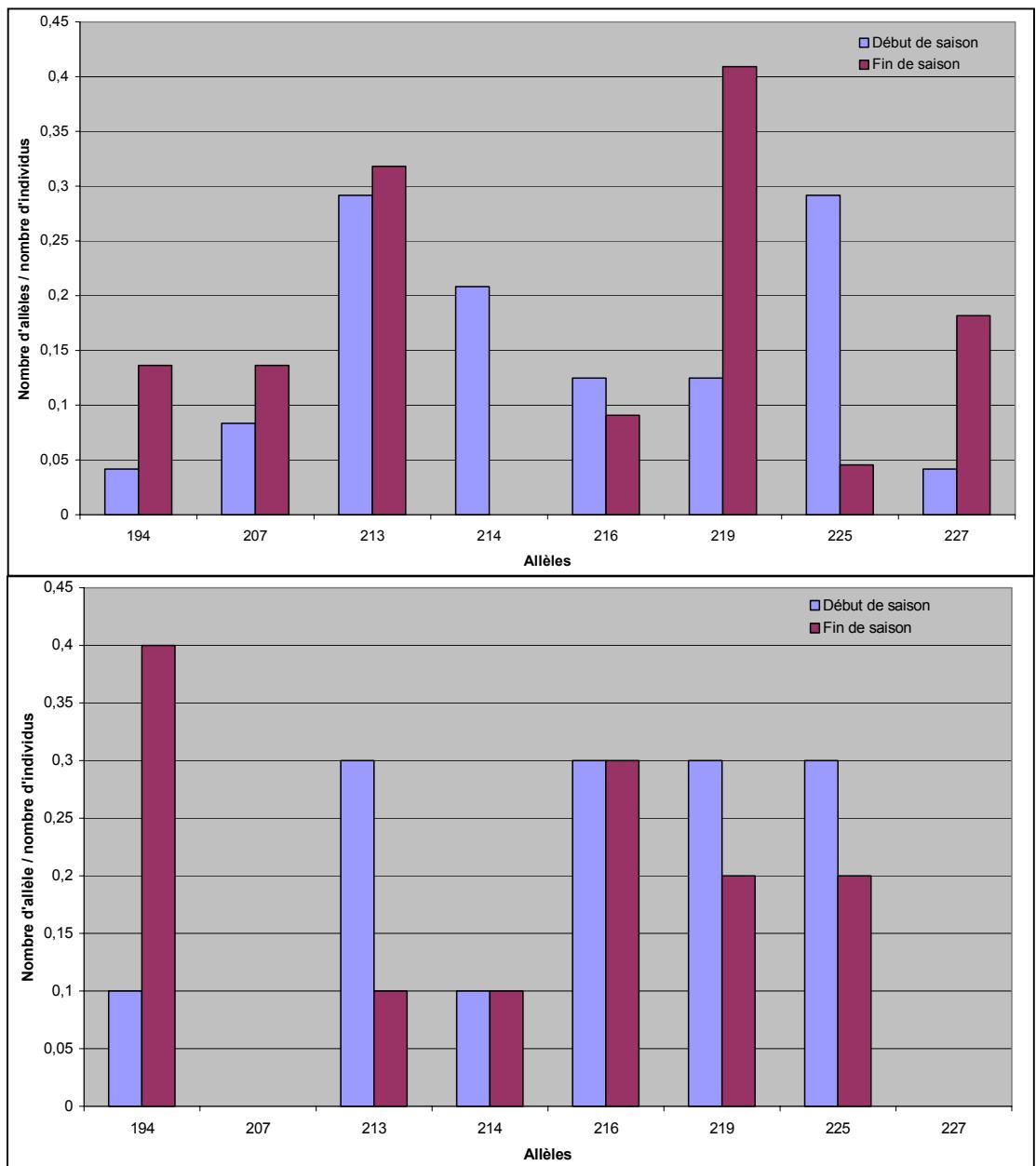


Figure 88 : Distribution allélique du marqueur Ang 114 pour deux saisons de migration.

Conclusion

L'analyse de cinq marqueurs microsatellites, sur un échantillon de la population d'anguilles remontant l'estuaire du bassin de l'Adour, a été effectuée afin de mieux connaître les phénomènes de migration de cette espèce. Bien que l'analyse des cinq marqueurs ne soit pas encore complètement terminée sur l'échantillon, nous pouvons d'ores et déjà en tirer les conclusions suivantes.

Nous remarquons que certains marqueurs microsatellites présentent un polymorphisme plus important que d'autres.

L'analyse partielle des deux premières saisons de migration suggère que les populations migrantes sont différentes d'une saison à l'autre.

Enfin, au sein d'une même saison les flux semblent également différents.

Cette étude doit être maintenant confortée et généralisée sur un échantillonnage réparti sur plusieurs années. Les résultats obtenus pourront alors être intégrés dans les outils de décision mis en œuvre pour conduire des stratégies de gestion cohérentes d'*A. anguilla*, et en particulier sauvegarder au mieux la diversité génétique de l'espèce dans le bassin de l'Adour.

Cette étude s'inscrit dans un projet plus large du Laboratoire d'Ecologie Moléculaire cherchant à étudier l'impact des contaminants dans les eaux sur la structure génétique des anguilles (cf. § 4.3.2).

Ainsi, l'étude doit être poursuivie sur les populations d'anguilles jaunes de tout le bassin de l'Adour. Il sera possible de comparer la structure génétique des flux de civelles entrant dans le bassin avec celle des différentes populations d'anguilles sédentarisées en rivière.

4.3.2. Réponses d'*A. anguilla* aux contaminants des différents habitats

Les pollutions chimiques peuvent exercer des effets néfastes sur la physiologie des organismes et sur la diversité génétique des populations. Ce programme a pour objectifs d'étudier les réponses d'*A. anguilla* aux contaminants des différents habitats aux niveaux physiologique et populationnel, en mettant en œuvre des essais rapides et fiables, applicables à grande échelle. L'effet des toxiques et la qualité du matériel biologique selon les habitats seront évalués en utilisant les marqueurs moléculaires de stress chimiques et à deux niveaux :

- celui de la physiologie des individus par l'analyse des effets des contaminants sur la transcription de gènes de détoxication des xénobiotiques,
- celui de la structure génétique des populations, afin de déterminer si les stress chimiques ont exercé des pressions de sélection favorisant certains allèles de résistance aux xénobiotiques.

Deux marqueurs biochimiques et génétiques ont été développés, un gène *MDR* [multidrug-resistance] codant une glycoprotéine P [*MDR/Pgp*] et un gène d'oxydase à fonctions multiples à cytochrome P-450 de foie [*MFO/Cyp1A1*]. Des sondes moléculaires spécifiques de ces gènes ont été obtenues et des essais applicables à grande échelle sur un échantillonnage important ont été mis au point. Ils permettront une évaluation rapide de la qualité des populations d'anguilles vis à vis des pressions des contaminants.

4.3.3. Perspectives de recherches

Nos travaux permettront de connaître la structure et la variabilité génétique des populations d'*A. anguilla* du sud du golfe de Gascogne et de mieux comprendre les effets des contaminants xénobiotiques sur ces populations. Ils devraient conduire en particulier à :

- une meilleure connaissance des ressources génétiques de ces populations dans le bassin de l'Adour,
- disposer de bio-marqueurs d'exposition des populations aux polluants et donc de qualité de la ressource,
- la mise en évidence des effets de certains contaminants sur la physiologie (court terme) et les ressources génétiques (long terme) et de comparer les effets des contaminants selon les habitats.

5. Principaux modèles élaborés

Ce chapitre traite de l'élaboration d'outils permettant soit la précision de mesures physiques comme la température de l'eau, la turbidité, la courantologie ou la hauteur d'eau soit, l'estimation d'indicateurs populationnels comme l'évaluation de la biomasse d'un flux d'individus et de sa précision (cf. § 6) ou bien encore de la simulation d'un comportement de civelles dans l'axe longitudinal du fleuve ou dans la colonne d'eau.

Ils permettent de mieux mesurer l'impact des effets environnementaux sur le déplacement d'un flux de civelles et sont pour certains, suffisamment génériques pour être adaptés à d'autres estuaires moyennant l'acquisition de données de bases qui les nourrissent et la mise en œuvre de plans d'échantillonnage adaptés.

5.1. Modèle estimant la température de l'eau

L'influence de la température de l'air sur l'intensité des captures de civelles dans l'estuaire de l'Adour a été mise en évidence au mois de janvier période où l'accessibilité est maximale, pour les saisons de pêche de 1984 à 1993 (de Casamajor & al, 1995). Les données de température de l'eau n'ont jamais fait l'objet de relevés sur l'Adour durant la période 1984-1993. La mise en place d'une sonde pour la saison 1996/1997 a permis de relever en continu les températures de l'eau. A partir des données de températures de l'eau et de l'air (octobre, novembre 96 et janvier, février, mars, avril 97), un modèle linéaire a été élaboré. Il a permis de montrer un effet de la température de l'air sur la température de l'eau avec un décalage dans le temps qui peut varier de 1 à 2 jours. Par ailleurs, il a été montré qu'une augmentation de la température de l'air suivie d'une stabilisation sur plusieurs jours ou encore une variation brutale (baisse ou augmentation importante) était nécessaire pour induire des variations de la température de l'eau. L'estimation de la température de l'eau à partir de celle de l'air suivant le modèle linéaire a montré que la liaison entre ces deux variables était complexe. La variation de la température de l'eau dépendait, en effet, d'autres facteurs environnementaux. D'où l'élaboration d'un modèle linéaire généralisé en intégrant les débits de chaque affluent de l'Adour (Gaves de Pau et d'Oloron, le Luy). Les résultats sont fournis dans les tableaux et les figures ci-après.

Tableau 46 : Meilleur modèle pour le mois d'octobre 96.

octobre 96	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	TpEau(t)= 2,768+0,159*DbA(t+1)+2,5*DbGO(t-1)+0,122*TpAir(t-2)	0,98
Température de l'air lissée	TpEau(t)= 0,031+0,334*DbA(t+1)+1,1*DbGP(t-1)+0,68*TpAirlis(t-2)	0,99

Avec : DbA : débit Adour ; DbGP : débit Gave de Pau ; DbGO : débit Gave d'Oloron ; DbL : débit Luy ; TpAir : température de l'air ; TpAirlis : température de l'air lissée

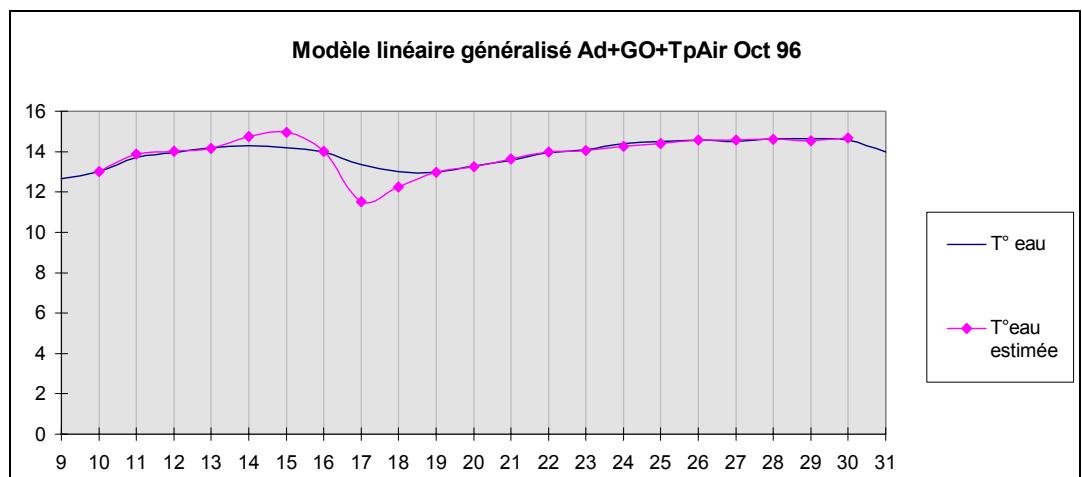


Figure 89 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en octobre 96 (modèle $TpEau=DbA+DbGO+TpAir$)

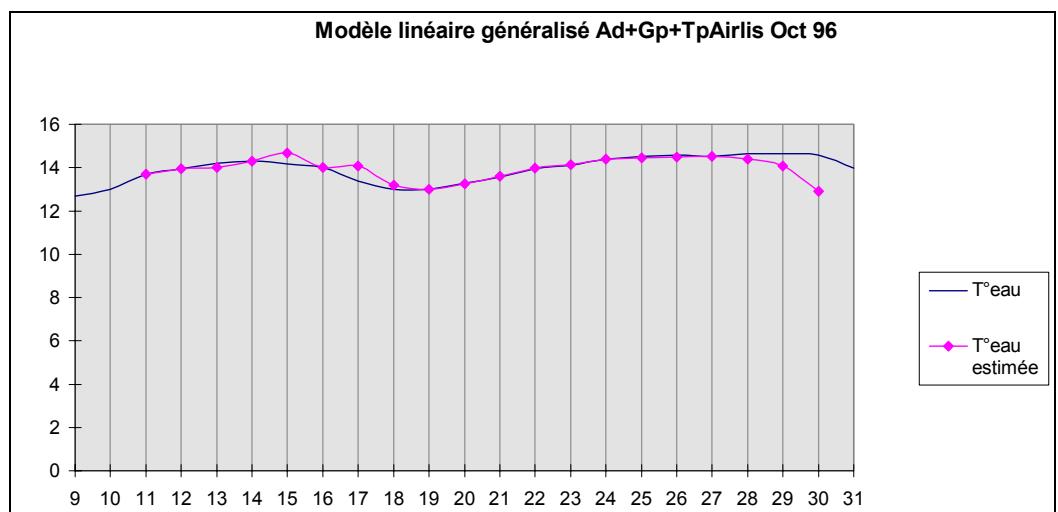


Figure 90 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en octobre 96 (modèle $TpEau=DbA+DbGP+TpAir$)

Tableau 47 : meilleur modèle pour le mois de novembre 96

novembre 96	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	$TpEau(t)=370,718+12,746*DbA(t)+8.96*DbL(t)$	0,98
Température de l'air lissée	$TpEau(t)=19,232+13,43*DbA(t)+15,308*TpAirlis(t)$	0,9

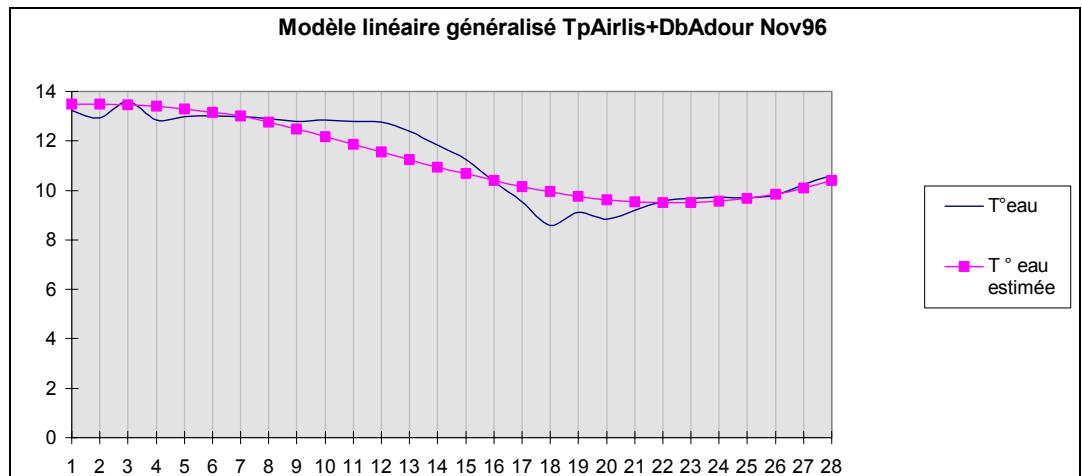


Figure 91 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en novembre 96 (modèle TpEau=DbA+TpAirlis)

Tableau 48 : Meilleur modèle pour le mois de janvier 97

janvier 97	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	TpEau(t)= 9,382*DbA(t)+-0.064*DbGP(t-2)+0.049*DbGO(t-2)	0,825
Température de l'air lissée	TpEau(t)= 7,965-0,101*DbGP(t-2)+0,073*DbGO(t-2)	0,631

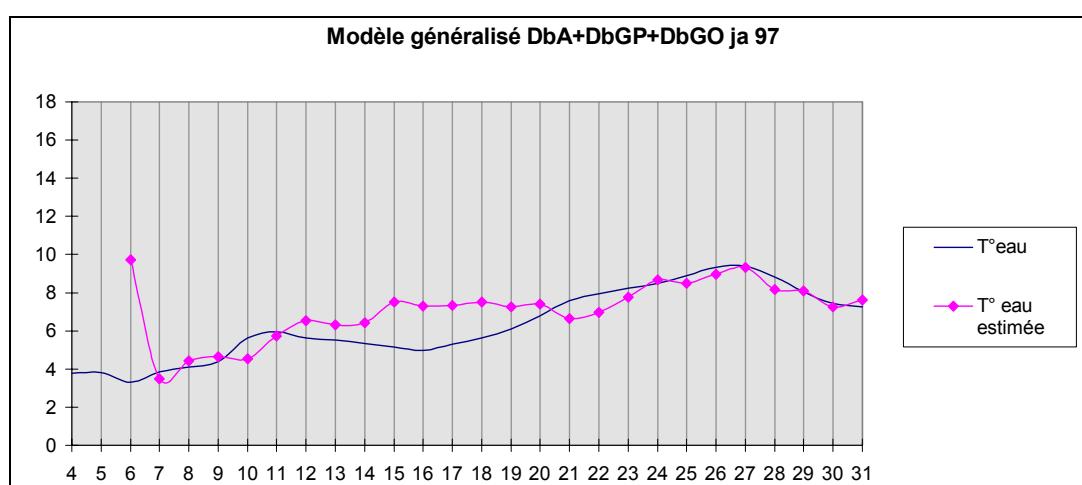
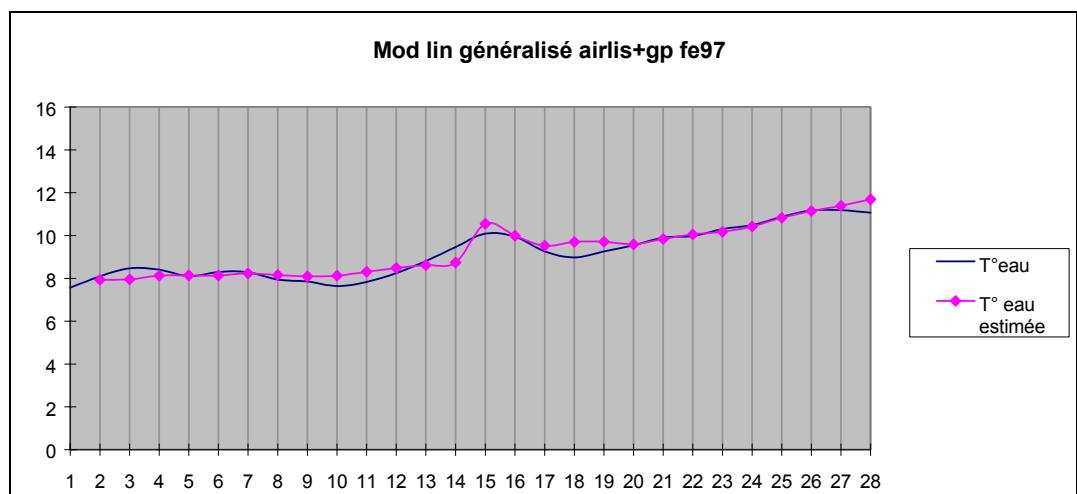


Figure 92 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en janvier 97 (modèle TpEau=DbA+DbGP+DbGO)

Tableau 49 : meilleur modèle pour le mois de février 97

février 97	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	TpEau(t)=6,6+6,2*DbA(t+1)+13,97*TpAir(t-1)	0,593
Température de l'air lissée	TpEau(t)=-3,7+0,027*DbGP(t)+0,98*TpAirlis(t-1)	0,975

**Figure 93 :** Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en février 97 (modèle TpEau=DbGP+TpAirlis)**Tableau 50 :** meilleur modèle pour le mois de mars 97.

mars 97	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	TpEau(t)= 14,95-0,96*DbL(t)+0,16*DbGP(t)-0,13*DbGO(t)	0,874
Température de l'air lissée	TpEau(t)=20,095-0,62*DbL(t)+-0,09*DbGO(t)	0,710

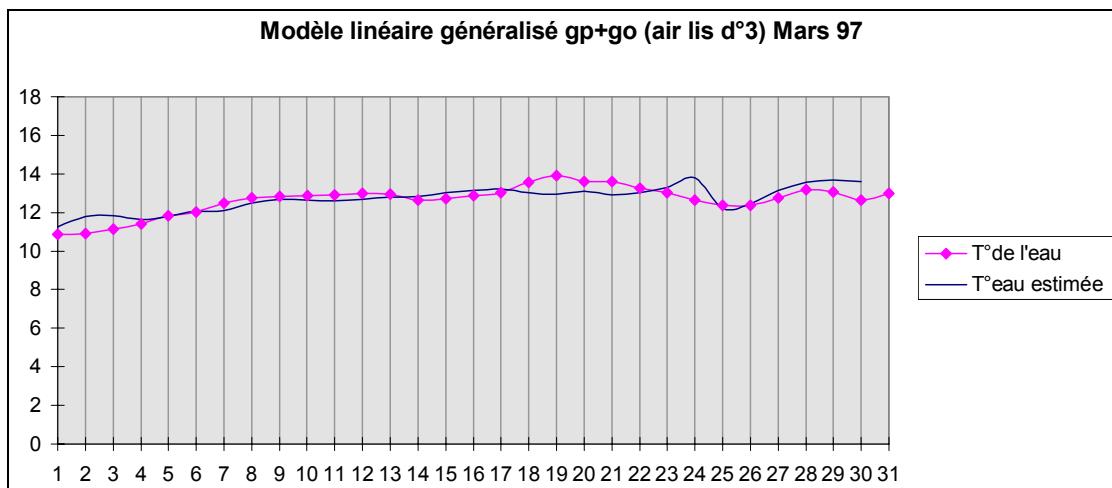


Figure 94 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en mars 97 (modèle $T_pEau=DbGP+DbGO$)

Tableau 51 : Meilleur modèle pour le mois d'avril

avril 97	Meilleur modèle	R ² ajusté
Température de l'air non lissée	$T_pEau(t)=56,32+11*DbL(t)+1,87*TpAir(t)$	0,975
Température de l'air lissée	$T_pEau(t)=0,18*DbA(t)+0,314*DbGP(t)+24,7*TpAirlis(t)$ sans constante $T_pEau(t)=0,2*DbL(t)+0,321*DbGP(t)+24,23*TpAirlis(t)$ sans constante	1

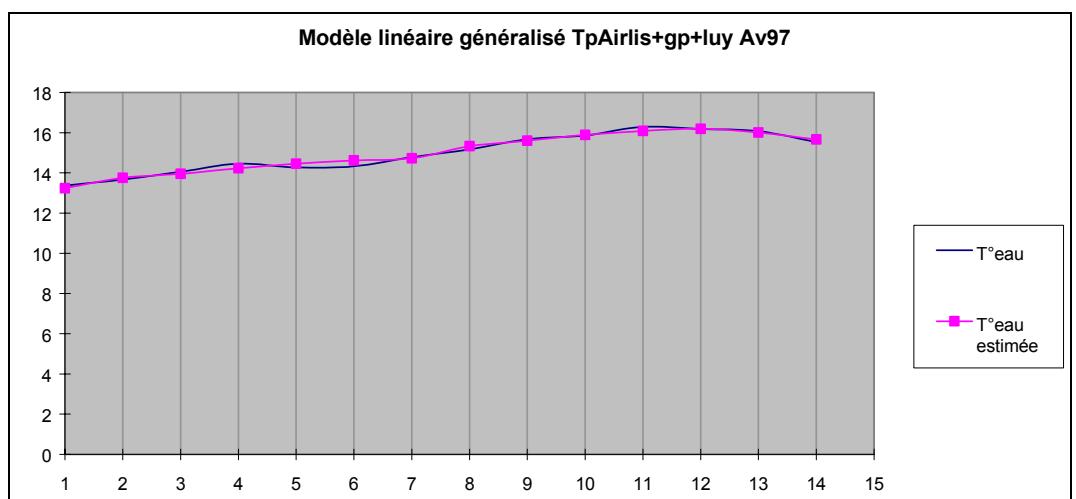


Figure 95 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en avril 97 (modèle $T_pEau=DbL+DbGP+TpAirlis$)

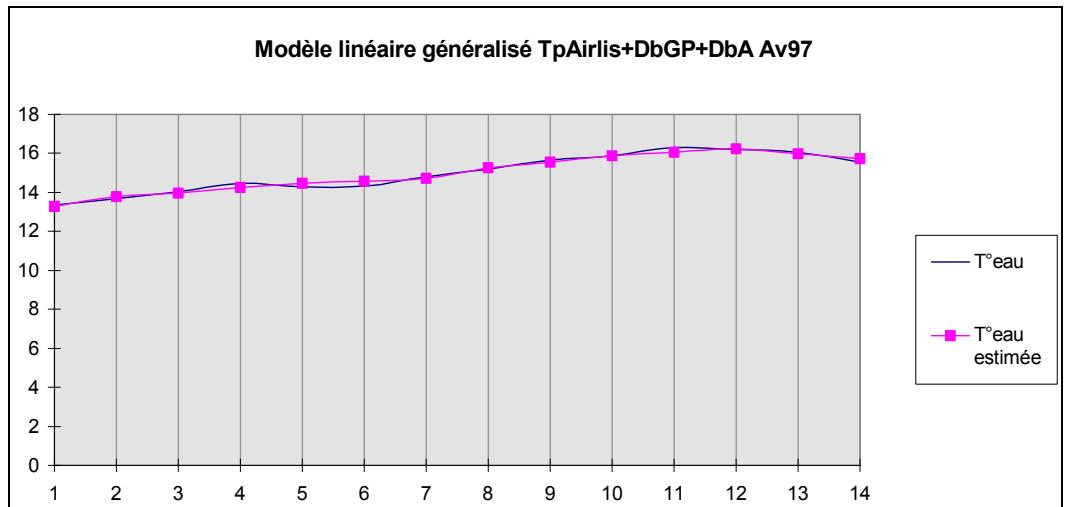


Figure 96 : Représentations graphiques des températures de l'eau réelle et estimée en avril 97 (modèle $T_pEau=DbA+DbGP+TpAirlis$)

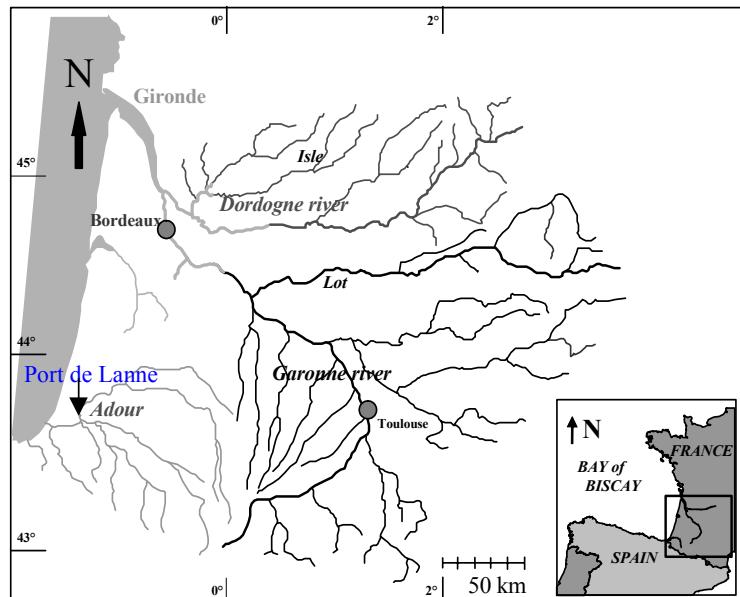
Les résultats précédents montrent que le modèle linéaire généralisé semble adapté au phénomène. Les modèles choisis mettent en évidence l'influence de la température de l'air et des débits sur la température de l'eau (décalage des données dans le temps, influence due aux variations des débits et à l'effet moyen de l'air).

Néanmoins, pour certains mois, le modèle n'explique pas une part importante de la variabilité de la température de l'eau. Celle-ci pourrait être influencée par d'autres variables climatiques comme la pluviométrie par exemple.

5.2. Modèle estimant la turbidité

L'influence de la turbidité, assimilée à la teneur en Matières En Suspension (MES), sur le comportement de la civelle a été mise en évidence sur l'Adour (De Casamajor & al., 1999 et 2000). Depuis 1999 sur cet axe fluvial, les données de turbidité font l'objet d'un suivi régulier par l'équipe TGM de l'université de Bordeaux 1. Il sera alors possible de retracer l'évolution des concentrations en MES à partir des données de débits depuis 50 ans. En effet, des corrélations entre les concentrations en MES et les fluctuations du débit fluvial ont déjà été observées sur l'Adour (Brunet, 1999 ; Maneux, 1998).

Les données de MES proviennent d'échantillons d'eau prélevés à 1 m sous la surface depuis un ponton situé à Port de Lanne (carte 12) à l'aide d'un préleur automatique SIGMA 900P (photo 12) et conservés dans des bouteilles en plastique.



Carte 12 : Localisation du site de prélèvement.

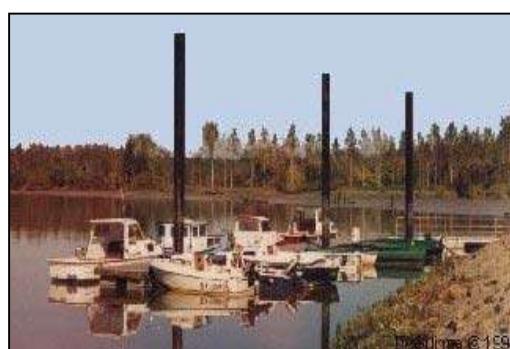


Photo 12 : Site d'étude et préleveur (Source : DGO Université de Bordeaux 1).

Les échantillons d'eau sont ensuite filtrés sous vide sur un filtre Whatmann GF/F en fibre de verre de porosité $0,70 \mu\text{m}$ afin d'isoler la fraction particulaire. Après séchage à l'étuve à 60°C pendant 4 heures environ, le filtre est pesé sur une balance Sartorius précise à $1/100$ de mg. La différence entre le poids du filtre avant et après filtration nous permet de connaître le poids de MES. Le poids est alors amené au volume filtré pour obtenir la concentration en MES de l'échantillon (mg.l^{-1}).

Les données présentées concernent la saison de pêche 1999/2000 (figure 97).

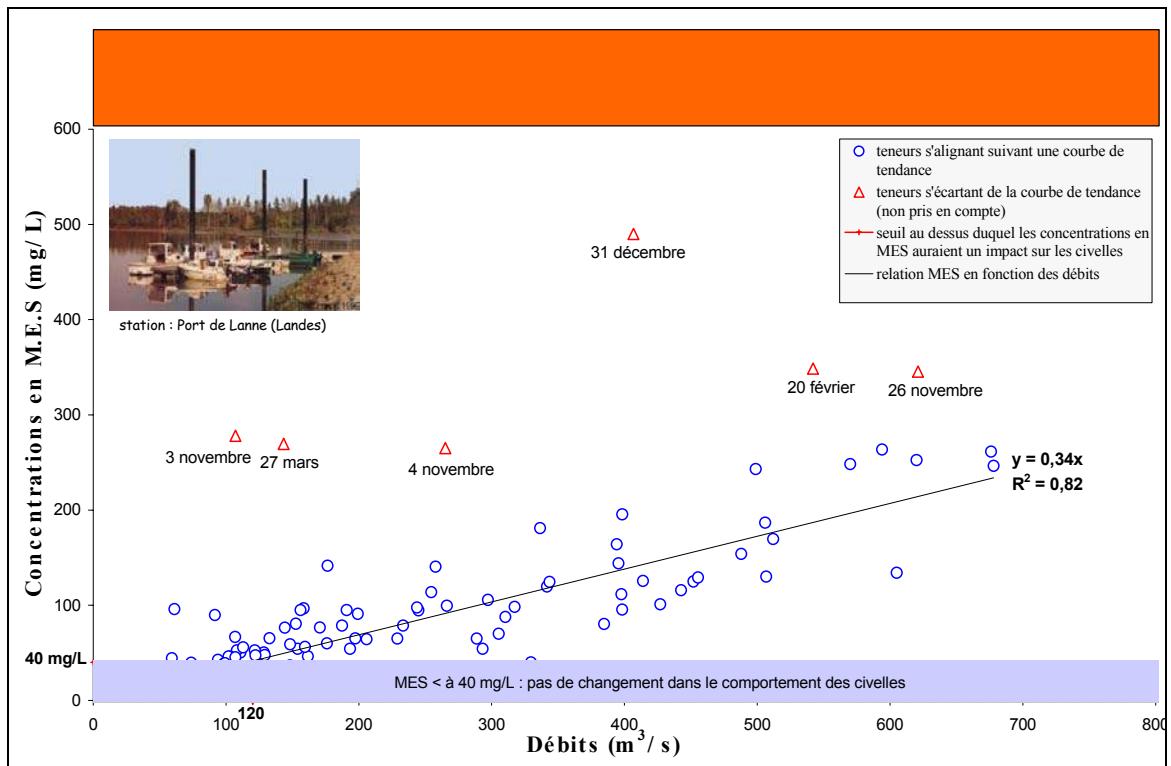


Figure 97 : Équation de corrélation entre les concentrations en MES et les débits durant la période de pêche 1999/2000 (Source : DGO Université de Bordeaux 1).

L'équation linéaire présentée dans la figure 97 représente le comportement de l'année 2000. Elle diffère si on l'applique à l'année entière. Ce travail préliminaire semble montrer que pour des débits inférieurs à $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les teneurs en MES sont inférieures à 40 mg.l^{-1} .

En effet, pour 79 valeurs de débits inférieurs ou égaux à $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les concentrations de MES se répartissent de la manière suivante :

Tableau 52 : Répartition des concentrations de MES pour des débits inférieurs à $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Gammes des MES	Nb. valeurs	% exprimés
$\text{MES} < 40 \text{ mg.L}^{-1}$	67	84.8
$40 < \text{MES} < 45 \text{ mg.L}^{-1}$	2	2.5
$45 < \text{MES} < 50$	3	3.8
$50 < \text{MES} < 55$	2	2.5
$55 < \text{MES} < 60$	1	1.3
$\text{MES} > 60 \text{ mg.L}^{-1}$	4	5.1

Pour les débits supérieurs à $120 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (nombre de valeurs = 70), les concentrations se répartissent de la manière suivante :

Tableau 53 : Répartition des concentrations de MES pour des débits supérieurs à $120 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Gammes des MES	Nb. valeurs	% exprimés
$\text{MES} > 40 \text{ mg.L}^{-1}$	5	7,1
$40 < \text{MES} < 50 \text{ mg.L}^{-1}$	3	4,3
$50 < \text{MES} < 60$	8	11,4
$60 < \text{MES} < 100$	22	31,4
$\text{MES} > 100 \text{ mg.L}^{-1}$	32	45,7

Il serait intéressant de poursuivre le suivi des MES sur plusieurs années afin d'échantillonner plusieurs conditions hydrologiques (année sèche, année humide, année intermédiaire). Nous serons ainsi en mesure de cerner précisément la dynamique des flux de MES de l'Adour et leur variabilité pluri-annuelle.

5.3. Modélisation hydrodynamique de l'estuaire de l'Adour

La migration d'un flux de civelles ne peut se comprendre que par la schématisation de la dynamique de circulation des masses d'eau dans l'estuaire. C'est pourquoi, des efforts importants ont été consentis pour mettre au point un modèle bidimensionnel (couplage de deux modèles : 2D horizontal et 1D curvilinear) dans l'estuaire de l'Adour. Ce modèle permet de générer les dissymétries du courant dans la section transversale ainsi que les variations de la hauteur d'eau. Il traite le problème des îles et des confluences. Sa finesse de résolution permet de l'utiliser pour mieux comprendre le comportement des poissons amphihalins (dont l'anguille). Elle permettra *a fortiori* d'utiliser les résultats de ce modèle pour estimer les vitesses de courant et ultérieurement les risques d'inondations du lit majeur de l'Adour.

5.3.1. Modèle bidimensionnel : principe de fonctionnement

La réalisation d'un modèle bidimensionnel, se base sur un raisonnement en trois dimensions avec des hypothèses simplificatrices. L'écoulement est décrit par les équations de Navier Stokes en prenant en compte la conservation de la masse de sel et les aspects thermiques.

5.3.1.1. Généralités.

En général, les modèles sont issus du système de Navier-Stokes incompressible. Le système d'équations aux dérivées partielles est le suivant :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad \text{sur } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \Delta \mathbf{u} = \mathbf{g} \quad \text{sur } \Omega \quad (2)$$

avec Ω domaine d'étude tridimensionnel;

\mathbf{u} = vecteur vitesse ;
 ρ = pression ;
 \mathbf{g} = gravité ;
 ρ = densité fluide.

L'équation (1) décrit la propriété d'incompressibilité du fluide tandis que l'équation (2) présente la loi de conservation de la quantité de mouvement. A ces deux équations sont ajoutées les conditions limites en amont, en aval et sur le fond (imperméabilité et frottement) et les conditions initiales.

Pour obtenir les équations de Saint-Venant, il faut à partir de ce système d'équations, faire l'hypothèse que la pression est hydrostatique c'est à dire qu'elle varie linéairement en fonction de la profondeur. L'inconnue en pression est alors remplacée par la hauteur d'eau. Pour se ramener à un problème en une ou deux dimensions, il suffit d'intégrer les équations de Navier-Stokes sur une section (1D) et sur une hauteur d'eau (2D). Pour remplacer complètement les composantes de la vitesse par leur moyenne dans l'équation (2), il faut pouvoir écrire que :

$$\underline{\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}} = \underline{\mathbf{u}} \cdot \underline{\nabla \mathbf{u}}$$

Ce qui signifie que la moyenne du produit des vitesses est égale au produit des moyennes. Or, sauf cas particulier, c'est faux. Pour compenser cette erreur, un terme de friction, également appelé tension de Reynolds, est introduit.

Il est estimé de manière expérimentale en fonction des caractéristiques du fleuve. En une dimension, les équations de Saint Venant sont obtenues uniquement dans le cas d'un canal sans prendre en compte les courbures du fleuve ou ses variations bathymétriques.

5.3.1.2. Dans le cadre de l'étude

La démarche est quelque peu différente. Elle est basée sur la formulation variationnelle du système de Navier-Stokes, c'est à dire que chacune des équations (1 et 2) est multipliée par une fonction puis intégrée sur le domaine. On obtient à l'instant $(n+1)\Delta t$ le système suivant :

trouver u^{n+1}, p^{n+1} tels que
 pour tout v , $A(u^{n+1}, v) + B(p^{n+1}, v) = F(v)$
 et tout q , $B(q, u^{n+1}) = 0$

Avec A et B des intégrales.

Pour obtenir le modèle bidimensionnel, le champ vitesse est défini tel que :

$$u = \begin{pmatrix} u1(x, y) \\ u2(x, y) \\ u3(x, y) \end{pmatrix} \quad \text{et } u3 = (u1, u2) \cdot \nabla ZB$$

Avec ZB la fonction décrivant les variations du fond.

On émet l'hypothèse que le vecteur vitesse ne dépend que des coordonnées x, y. La troisième composante de la vitesse peut alors être calculée en fonction des composantes 1 et 2 en tenant compte de la condition d'imperméabilité du fond.

Contrairement aux équations de Saint Venant, on conserve la pression comme inconnue ainsi que les trois composantes de la vitesse. Ce modèle permet donc de prendre en compte les variations du domaine de résolution provoquées par les élévations ou les diminutions du niveau d'eau. Le domaine global ainsi considéré correspond à l'ensemble du lit majeur du fleuve qui, sauf en situation de crue, n'est recouvert que partiellement par les eaux. Les fluctuations du domaine occupé par les eaux sont alors décrites par l'équation suivante :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \cdot \nabla \alpha = \frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad \text{dans } \Omega$$

Avec α le paramètre indiquant si chaque point est ou non dans l'eau.

5.3.2. Mise en œuvre

La condition limite aval est une hauteur d'eau sinusoïdale calculée à partir des coefficients de marée. Elle permet de simuler l'entrée de la marée dans l'estuaire. La condition limite amont est la somme des débits de l'Adour, des Gaves et du Luy. Les conditions initiales de vitesse de courant sont fournies par le modèle unidimensionnel.

Le domaine de résolution est recouvert par un ensemble de triangles qui forme un maillage (figure 98). Le modèle calcule pour chaque triangle :

- La pression et la hauteur d'eau à chaque sommet ;
- La vitesse aux sommets et au barycentre de chaque triangle.

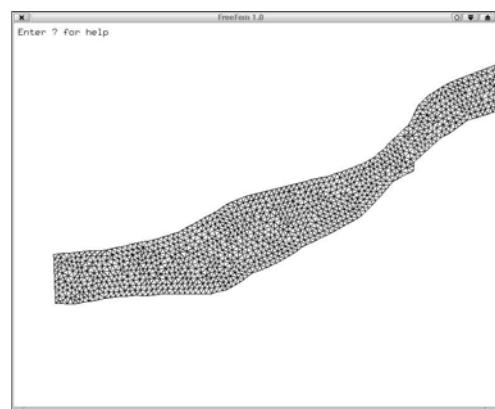


Figure 98 : Exemple de maillage du modèle 2D.

Une interface graphique nommée "Erreka" a été développée et regroupe toutes les étapes de calcul pour faire des simulations de manière conviviale (figure 99).



Figure 99 : Interface "Erreka"

5.3.3. Etalonnage

Une fois les équations de propagation de la marée résolues, il reste à faire varier certains paramètres. En effet, pour caler le modèle, il est nécessaire de modifier entre autre les coefficients de frottement afin de faire coïncider la marée réelle avec la simulation. Par exemple, une augmentation de la résistance retardé et atténue la marée en amont tandis qu'une diminution réduit le marnage en aval et l'amplifie en amont.

Pour connaître les coefficients de frottement, il suffit de résoudre l'équation de mouvement à l'envers (Salomon, 1976) c'est à dire qu'on déduit les forces de frottement à partir des données de vitesse de courant obtenues sur le terrain.

L'objectif des campagnes de mesure est de vérifier si les simulations du modèle 2D sont comparables aux observations de terrain. Le modèle calculant une moyenne des vitesses de courant dans la colonne d'eau, un maximum de mesures sont réalisées à différentes profondeurs (Gadet, 2002).

5.3.3.1. Protocole utilisé

Les mesures sont réalisées dans des conditions variables. Les trois facteurs influençant le courant sont : le débit, l'amplitude de la marée représentée par le coefficient de marée et la distance par rapport à l'embouchure.

En ce qui concerne les coefficients de marée, les mesures ont été réalisées les jours suivants :

- Le 16 avril 2002 : coefficient de marée de 76 et basse mer à 13:27 (jusant) ;
- Le 19 avril 2002 : coefficient de marée de 46 et basse mer à 15:33 (jusant) ;
- Le 22 avril 2002 : coefficient de marée de 42 et basse mer à 7:17 (fLOT) ;
- Le 24 avril 2002 : coefficient de marée de 72 et basse mer à 9:17 (fLOT) ;
- Le 25 avril 2002 : coefficient de marée de 89 et basse mer à 10:02 (fLOT) ;
- Le 29 avril 2002 : coefficient de marée de 101 et basse mer à 12:54. (fLOT).

Le choix des lieux de mesure est fonction de la morphologie : méandres, amont / aval d'une île, zone rectiligne et la profondeur (figure 100). Il faut savoir que le modèle bidimensionnel est basé entre autre sur l'hypothèse que la profondeur de l'Adour est faible par rapport à la largeur. Les différentes stations de mesures ont été classées en fonction de leur géographie dans le tableau 54.

Tableau 54: Différents types de zone utilisés lors de la calibration.

Type de Zone	Zone d'étude
Amont/Aval pont	Pont autoroute Pont d'Urt
Zone curviligne	Moulin de Bacheforêt Aval + Broc
Zone rectiligne	Produits chimiques Muraille Île de Lahonce Sablot
Amont/Aval d'île	Île de Broc Île de Berenx

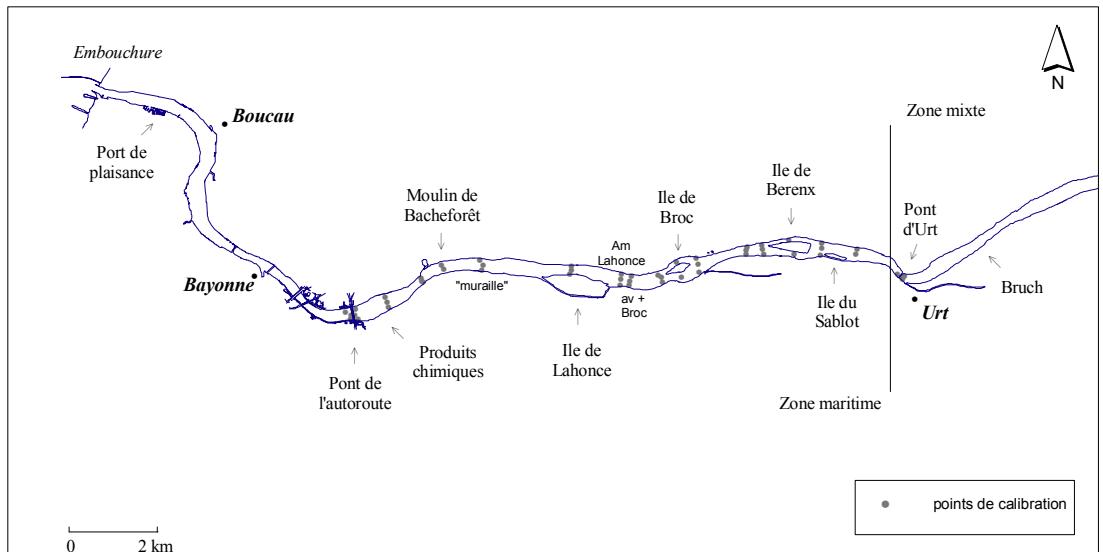


Figure 100 : Localisation des stations de mesures de vitesse de courant.

Pour chaque sortie, les mesures sont effectuées de l'aval vers l'amont. Pour une même station, trois mesures sont réalisées : en rive droite, au milieu et en rive gauche. Ceci permet de caractériser la géométrie du front de marée et de mettre en évidence les dissymétries éventuelles de courant entre les rives. Afin que ces mesures soient les plus représentatives possible, il est nécessaire que l'intervalle entre deux mesures soit le plus court possible.

5.3.3.2. Matériels utilisés

Positionnement :

GPS Aquarius 5000 de DSNP relié à un PC utilisant le logiciel associé DsetPack ©.

Mesures du courant :

Courantomètre doppler (photo 13);
Flo mate 2000 mesure la vitesse d'écoulement d'un fluide conducteur à l'aide d'un capteur électromagnétique directionnel (photo 14);
Fluxmètre (photo 14).



Photo 13 : courantomètre doppler.



Photo 14 : fluxmètre et Flo mate.

Données climatiques : Anémomètre permettant de calculer une vitesse moyenne du vent ;
Fil plombé pour connaître la hauteur d'eau.

Le dispositif permet de collecter pour chaque point de mesure :

- Heure, latitude, longitude (en degré minute décimal) ;
- Vitesse et direction du courant à 2 mètres (en m.s^{-1}) ;
- Vitesse du courant à 1 mètre (en m.s^{-1}) ;
- Vitesse du courant à 70 cm (en m.s^{-1}) ;
- Turbidité (en NTU) et température (en °C) de l'eau à 2 mètres ;
- Vitesse du vent (en km.h^{-1}) ;
- Hauteur d'eau (en m) ;

5.3.4. Résultats

5.3.4.1. Mesures de vitesses de courant

Les résultats des mesures pour chaque sortie sont présentés dans les tableaux suivants

Tableau 55 : Le 16 avril 2002 : coefficient 76, marée basse au Boucau 13 : 27

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m3.s ⁻¹
Av+ Broc RD	300287.53	139661.84	12:25:00	12:34:45	0.548		0.604	267.216	11.3783	9.30238	3	195.98
Av+ Broc M	300248.84	139574.99	12:40:25	12:47:00	0.929		0.876	267.919	11.4738	9.88082	4	195.98
Av+ Broc RG	300235.08	139469.76	12:53:47	12:59:30	0.948		1.116	276.709	11.5694	10.1718		195.98
Av Broc RD	300937.61	139744.38	13:09:00	13:15:00	0.543		0.937	244.01	11.235	8.72862	2.8	195.98
Av Broc M	300985.76	139648.94	13:19:28	13:26:11	0.792		0.610	247.526	11.235	8.72862	4.5	195.98
Av Broc RG	300997.8	139531.13	13:29:30	13:44:50	0.582		0.884	77.0004	11.426	368.648	4.8	195.98
Broc RD	301241.15	139943.02	13:45:36	13:52:40	0.494		0.931	97.7448	11.7606	2.20806	4.6	195.98
Broc RG	301364.12	139682.47	13:59:35	14:05:48	0.958		1.006	227.134	11.2828	8.15953	3.9	195.98
Broc/Berenx RD	302913.64	140326.53	14:18:35	14:24:45	0.929		1.089	255.262	11.3783	8.72862	5.5	195.98
Broc/Berenx M	302899.02	140250.86	14:31:35	14:38:24	0.846		0.912	261.59	11.5694	8.44349	5.3	195.98
Broc/Berenx RG	302910.2	140167.45	14:42:50	14:49:37	0.714		0.763	258.426	11.5694	9.30238	3.95	195.98
Berenx RD	303867.37	140483.46	15:01:10	15:05:46	0.680		0.544	264.755	11.665	8.44349	2.85	195.98
Berenx RG	303932.72	140162.72	15:14:40	15:19:36	0.621		0.638	264.403	12.1914	10.1718	9.8	195.98
Sablot RD	305652.5	140217.75	15:32:08	15:38:57	0.518		0.611	284.093	12.0956	8.15953	5.1	195.98
Sablot M	305624.99	140103.39	15:46:31	15:52:44	0.479		0.494	280.225	11.9998	6.48033	2.1	195.98
Urt Av RD	306389.43	139773.19	16:00:20	16:07:09	0.313		0.249	316.792	12.2393	8.15953	6.6	195.98
Urt Av RG	306334.4	139720.71	16:11:30	16:16:41	0.416		0.390	317.143	12.0956	5.38423	6.7	195.98
Urt Amt RD	306490.04	139683.76	16:22:19	16:27:08	0.186		0.190	281.983	12.5269	8.72862	3.5	195.98
Urt Amt RG	306445.32	139596.91	16:31:26	16:38:05	0.064			272.138	11.9998	4.57442	7.8	195.98

Tableau 56 : Le 19 avril 2002 : coefficient 46, marée basse au Boucau 15 : 33.

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m ³ .s ⁻¹
Av pt aut RD	293798.34	138862.34	11:49:30	11:56:56	0.670		0.709	266.161	13.1993	2.20806	7.6	176.91
Av pt auto M	293796.81	138764.44	12:02:27	12:09:20	0.743		1.027	258.778	13.1512	1.69505	7.5	176.91
Av pt auto RG	293801.1	138664.23	12:15:10	12:20:56	0.909		1.105	273.193	13.2954	2.98633	8.7	176.91
Amt pt auto RD	294009.46	138925	12:27:26	12:33:20	0.337		0.783	248.23	13.2954	2.72574	6.2	176.91
Amt pt auto M	294000.73	138774.02	12:39:15	12:44:12	0.680		1.248	259.832	13.1031	2.20806	5	176.91
Amt pt auto RG	294033.17	138671.71	12:48:16	12:56:14	0.802		1.027	276.358	13.1031	3.24809	7.1	176.91
Pdt chim RD	294676.98	139208.22	13:02:52	13:10:54	0.435		0.877	266.864	12.9589	2.46631	3.85	176.91
Pdt chim M	294676.98	139038.53	13:18:48	13:25:25	0.841		1.211	257.371	12.9589	4.30681	5	176.91
Pdt chim RG	294735.62	138916.26	13:29:20	13:35:47	0.953		1.117	246.12	12.9589	6.75727	7.05	176.91
Moulin Bacheforêt RD	295502.95	139638.67	13:47:08	14:12:14	0.900		0.849	228.892	12.9109	5.38423	7.9	176.91
Moulin Bacheforêt RG	295551.61	139527.63	14:26:04	14:34:28	0.836		0.914	236.275	13.2473	5.38423	8.05	176.91
Amt moulin Bacheforêt RD	295841.07	139871.99	14:39:52	14:46:00	0.738		0.698	250.339	13.2473	5.6565	9.9	176.91
Amt moulin Bacheforêt M	295823.61	139785.9	14:49:51	14:56:58	0.675		0.785	244.714	13.2473	7.59512	7.75	176.91
Amt moulin Bacheforêt RG	295818.61	139713.54	15:00:55	15:08:20	0.772		0.898	252.8	13.2954	6.20455	5.35	176.91
Lahonce RD	298880.45	139879.48	15:19:35	15:26:06	0.645		0.642	270.029	13.7769	5.11312	8.25	176.91
Lahonce M	298860.48	139812.1	15:29:42	15:36:31	0.797		0.750	271.435	13.6324	5.92994	6.75	176.91
Lahonce RG	298867.97	139722.27	15:40:53	15:48:22	0.469		0.494	273.545	13.6806	5.92994	5.5	176.91

Tableau 57 : le 22 avril 2002 : coefficient 42, marée basse au Boucau 7 : 17

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m ³ .s ⁻¹
Av Pt Aut RD	293882.53	138872.82	10:14:58	10:21:48	0.367		0.282	82.2744	14.3076	3.24809	7.1	163.17
Av Pt Aut M	293915.27	138783.72	10:26:00	10:33:04	0.332		0.367	87.9	14.3076	4.30681	5.2	163.17
Av Pt Aut RG	293907.08	138685.52	10:36:41	10:42:29	0.416		0.379	87.1968	14.3559	4.57442	5.7	163.17
Amt Pt Aut RD	294043.47	138907.38	10:47:24	10:54:00	0.494		0.542	77.7036	14.4525	4.84318	6.2	163.17
Amt Pt Aut M	294063.48	138820.09	10:57:15	11:02:41	0.450		0.520	86.8452	14.4042	5.11312	4.85	163.17
Amt Pt Aut RG	294087.12	138687.33	11:06:26	11:13:47	0.425		0.554	95.6352	14.4525	4.30681	5.5	163.17
Pdt chim RD	294683.59	139198.34	11:19:02	11:25:44	0.406		0.471	79.4616	14.5491	6.75727	3.85	163.17
Pdt chim M	294742.7	139078.32	11:29:05	11:35:52	0.494		0.444	67.1556	14.5491	5.6565	4.2	163.17
Pdt chim RG	294775.43	138962.84	11:39:43	11:45:50	0.636		0.649	59.0688	14.5491	6.20455	7	163.17
Av moulin Bacheforêt RD	295371	139469.3	11:50:22	11:56:35	0.616		0.554	59.0688	14.5491	71.3369	10.02	163.17
Av moulin Bacheforêt RG	295434.65	139422.93	12:00:20	12:07:32	0.631		0.753	56.6076	14.5491	6.48033	9.3	163.17
Amt moulin Bacheforêt RD	295815.63	139841.19	12:13:55	12:19:53	0.455		0.430	75.9456	14.6458	6.75727	9.55	163.17
Amt moulin BacheforêtM	295866.55	139807.55	12:23:37	12:29:22	0.528		0.485	78.4068	14.6458	7.31467	8.1	163.17
Amt moulin Bacheforêt RG	295911.1	139736.63	12:33:05	12:39:15	0.724		0.690	77.0004	14.8876	3.24809	6	163.17
Muraille RD	296842.19	140032.14	12:45:45	12:53:05	0.450		0.408	158.572	14.6941	7.03539	4.8	163.17
Muraille M	296912.2	139915.75	12:58:50	13:05:30	0.552		0.580	103.37	14.6941	7.87675	5.6	163.17
Muraille RG	296888.56	139811.19	13:09:40	13:15:30	0.469		0.499	93.174	14.7909	4.84318	6.8	163.17
Lahonce RD	298932.59	139892.11	13:35:40	13:42:35	0.342		0.367	97.3932	15.0813	4.84318	9.05	163.17
Lahonce M	298924.4	139804.82	13:45:45	13:51:55	0.508		0.516	98.448	14.8876	4.30681	8.4	163.17
Lahonce RG	298887.12	139728.44	13:55:50	14:01:42	0.376		0.277	91.0644	14.8392	5.38423	5.5	163.17
Amt Lahonce RD	300058.25	139710.26	14:08:05	14:14:05	0.269		0.326	123.412	14.8392	3.24809	4.05	163.17
Amt Lahonce M	300040.07	139595.69	14:17:55	14:24:30	0.313		0.328	90.0096	14.7425	4.57442	4.9	163.17
Amt Lahonce RG	300030.98	139467.48	14:28:26	14:35:20	0.279		0.184	83.6808	14.8392	3.77512	7.4	163.17
Av Broc RD	300818.22	139695.71	14:41:17	14:47:45	0.127		0.163	87.9	14.8876	3.24809	3.4	163.17
Av Broc M	300807.49	139549.32	14:51:15	14:57:17	0.156		0.217	81.9228	14.7909	3.24809	6.4	163.17
Av Broc RG	300842.04	139427.48	15:01:36	15:07:30	0.078		0.054	48.8724	14.8876	2.46631	4.9	163.17

Tableau 58 : le 24 avril 2002 : coefficient 72, marée basse au Boucau 9 : 17.

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m ³ .s ⁻¹	Anémomètre en km.h ⁻¹
Av Broc RD	300890.27	139696.64	12:24:47	12:31:47	0.186	0.2	0.177	65.046	15.5175	4.30681	2.7	185.46	1.4
Av Broc M	300861.72	139560.35	12:36:37	12:42:47	0.274	0.22	0.251	85.0872	15.566	3.77512	5.3	185.46	1.9
Av Broc RG	300876.89	139451.38	12:45:30	12:51:48	0.342	0.345	0.373	58.014	15.7116	6.48033	4.05	185.46	0.7
Broc RD	301318.3	139983.77	12:56:33	13:03:20	0.494	0.45	0.450	61.53	15.8087	5.92994	3.9	185.46	3.9
Broc RG	301420.09	139652.26	13:09:37	13:15:44	0.518	0.58	0.563	78.7584	15.7601	6.20455	4.15	185.46	2.6
Amt Broc RD	301765.11	140082.86	13:20:50	13:28:32	0.548	0.55	0.525	93.8772	15.8087	8.44349	3.85	185.46	2.3
Amt Broc M	301807.17	139951.36	13:31:50	13:37:50	0.474	0.51	0.570	71.3748	15.7601	7.31467	4	185.46	1
Amt Broc RG	301832.15	139763.05	13:42:10	13:49:07	0.342	0.38	0.401	45.708	15.8087	6.75727	3.7	185.46	2.1

Tableau 59 : le 25 avril 2002 : coefficient 89, marée basse au Boucau 10 : 02.

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m ³ .s ⁻¹	Anémomètre en km.h ⁻¹
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	11:44:16		0.826	0.74	0.795	305.892	15.8087	7.31467	10	197.82	6.9
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	12:05:10		0.724	0.69		299.212	15.7601	7.59512	10	197.82	7.6
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	12:20:00		0.719	0.66	0.726	299.212	15.7601	7.31467	10	197.82	7.9
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	12:33:00		0.601	0.56	0.653	297.454	15.8087	7.87675	10	197.82	6.2
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	12:53:00		0.484	0.4	0.447	296.047	15.8572	6.48033	10	197.82	6.9
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	13:04:00		0.298	0.21	0.242	222.914	15.8572	6.20455	10	197.82	17.7
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	13:13:00		0.215	0.16	0.153	299.563	15.9058	6.48033	10	197.82	10.8
Amt Urt fixe	306442.14	139613.94	13:26:07	13:30:33	0.127	0.03	0.069	143.101	15.9058	6.48033	10	197.82	11
Av Berenx RD	303253.1	140384.58	13:42:35	13:48:43	0.396	0.35	0.424	147.672	16.003	7.59512	3.7	197.82	11.9
Av Berenx M	303268.39	140275.04	13:52:29	13:58:12	0.508	0.5	0.504	84.384	15.9544	8.15953	4.4	197.82	13.1
Av Berenx RG	303298.96	140160.41	14:02:20	14:08:32	0.528	0.4	0.512	85.4388	16.0516	8.44349	4	197.82	14.4
Berenx RD	303862.78	140489.03	14:14:05	14:21:35	0.562	0.57	0.605	80.5164	16.003	9.88082	3.6	197.82	13.9
Berenx RG	303999.5	140171.45	14:28:27	14:34:45	0.777	0.74	0.779	94.2288	16.003	9.88082	6.2	197.82	14.9
Amt Berenx RD	304614.27	140424.49	14:41:57	14:47:56	0.670	0.6	0.680	96.69	16.003	9.59101	4	197.82	8.6
Amt Berenx M	304627.86	140312.41	14:51:51	14:57:50	0.724	0.65	0.740	89.3064	16.003	11.0517	4.7	197.82	7.8
Amt Berenx RG	304583.7	140151.92	15:02:06	15:08:35	0.645	0.75	0.809	91.7676	16.003	11.3474	4.3	197.82	12.5
Sablot RD	305420.41	140286.07	15:14:05	15:20:32	0.821	0.75	0.953	93.174	16.003	10.4639	7.3	197.82	12.6
Sablot M	305395.84	140182.76	15:25:38	15:31:28	0.665	0.65	0.642	93.174	15.9544	10.4639	5.15	197.82	14.6
Sablot RG	305388.28	140060.56	15:35:31	15:41:25	0.552	0.58	0.635	90.0096	16.003	10.1718	3.8	197.82	10.5

Tableau 60 : le 29 avril 2002 : coefficient 101, marée basse au Boucau 12 : 54.

Localisation	Latitude	Longitude	Heure début	Heure fin	Vitesse courant 2m en m.s ⁻¹	Vitesse courant 1m en m.s ⁻¹	Vitesse courant à 70 cm en m.s ⁻¹	Direction courant en °	Température	Turbidité en NTU	Hauteur d'eau en m	Débit en m ³ .s ⁻¹	Anémomètre en km.h ⁻¹
Av pt Auto RD	293864.16	138854.39	15:59:21	16:07:09	0.460	0.47	0.517	84.384	15.2266	20.7607	7.4	203.71	7.8
Av pt Auto M	293881.81	138766.16	16:12:52	16:18:14	0.655	0.48	0.591	80.5164	15.1781	9.01492	6.5	203.71	7.6
Av pt Auto RG	293872.56	138672.06	16:23:05	16:28:12	0.655	0.59	0.716	88.9548	15.1781	7.31467	5.8	203.71	6.1
Amt pt Auto RD	294096.06	138918.24	16:32:05	16:38:57	0.582	0.56	0.696	79.11	15.1781	10.1718	6.8	203.71	6.9
Amt pt Auto M	294101.1	138918.24	16:42:49	16:48:46	0.670	0.62	0.625	80.868	15.1781	12.8431	5	203.71	6.5
Amt pt Auto RG	294101.1	138810.69	16:52:17	17:05:00	0.738	0.77	0.803	86.142	15.1781	10.7572	5.8	203.71	6.6
Av Moulin RD	294083.46	138679.62	17:07:13	17:13:20	1.061	0.94	1.080	47.8176	15.3235	13.4496	8.5	203.71	1.3
Av Moulin M	295489.96	139589.58	17:19:02	17:25:10	1.056	0.96	1.066	42.192	15.2266	10.7572	10.8	203.71	2.6
Av Moulin RG	295526.96	139571.09	17:31:06	17:37:11	1.266	1.19	1.022	52.74	15.2751	9.88082	9	203.71	4.4
Amt moulin RD	295590.81	139544.21	17:43:13	17:49:40	0.816	0.71	0.786	78.0552	15.2266	13.7546	8.8	203.71	4.8
Amt moulin M	295978.99	139915.58	17:54:30	18:00:47	1.232	1.13	1.066	76.2972	15.372	190.526	7.9	203.71	5
Amt moulin RG	296013.44	139836.6	18:05:15	18:11:30	2.044	0.81	0.830	227.837	15.4205	-11.71	6.3	203.71	5.5

Les lignes grisées dans les tableaux correspondent aux stations pour lesquelles la vitesse de courant est la plus importante. Au niveau de Lahonce ainsi qu'en aval de l'île de Broc, il semblerait que le courant soit plus important au milieu du chenal tandis que dans les secteurs Amont Broc, Broc-Berenx et le Sablot, le courant est plus fort en rive droite.

5.3.4.2. Calibration du modèle 2D

On présente les résultats numériques obtenus avec le code de calcul "Erreka". Ce code permet de définir à partir du fichier bathymétrique des zones de fleuve sur lesquelles la résolution est faite dans un plan horizontal. Le reste du domaine est alors traité comme un objet unidimensionnel. Les informations concernant les vitesses et la hauteur d'eau sont transmises d'un domaine à l'autre au cours de la simulation.

Pour ce qui concerne les conditions initiales, une simulation unidimensionnelle permet de remonter quelques heures en arrière avant le début de la simulation et fournit une estimation des conditions initiales. Bien sûr, à partir de cette estimation, une condition initiale bidimensionnelle est reconstruite sur la partie traitée en deux dimensions.

Nous comparons les mesures effectuées lors des campagnes sur l'Adour avec la réponse fournie par le simulateur sur différentes parties du fleuve. Nous sommes amenés à faire plusieurs simulations sur une même zone en modifiant le coefficient de frottement de manière à obtenir une réponse la plus proche possible des observations. De plus, la vitesse calculée par le code n'est qu'une approximation de la moyenne sur la colonne d'eau de la vitesse réelle. Or les mesures sont effectuées essentiellement proche de la surface. Pour pouvoir effectuer une comparaison, nous reconstruisons la vitesse en supposant qu'elle présente un profil logarithmique sur la hauteur d'eau¹.

L'île de Broc

Le premier test que nous présentons concerne une zone comprenant l'île de Broc et sa partie aval. La bathymétrie de la zone est illustrée dans les figures 101 et 102.

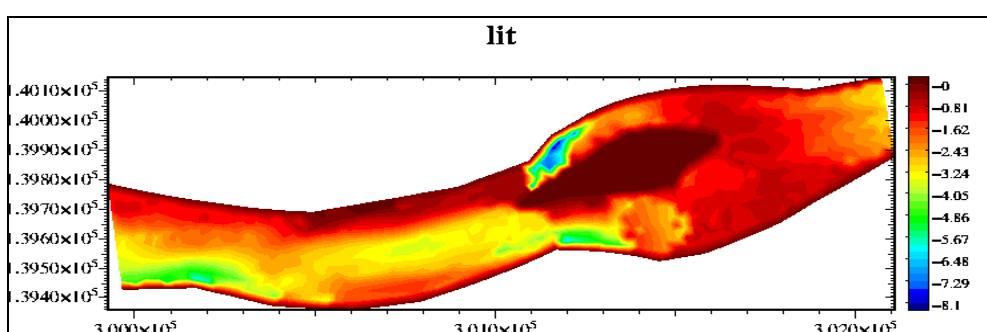


Figure 101 : Bathymétrie au niveau de l'île de Broc.

¹ Ce profil restera à confirmer par des mesures en station fixe.

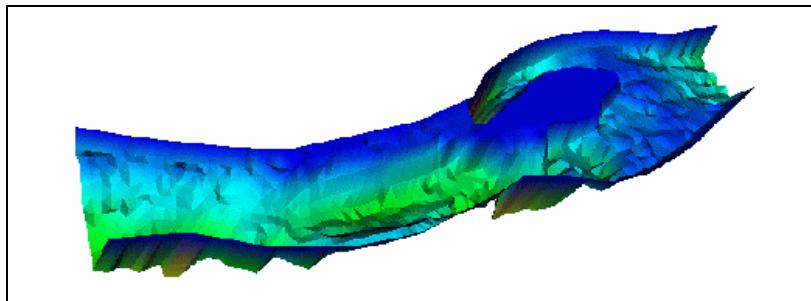


Figure 102 : Bathymétrie en 3D au niveau de l'île de Broc.

Le champ de vitesse obtenu à un instant donné est représenté dans la figure 103 et l'intensité du courant dans la figure 104.

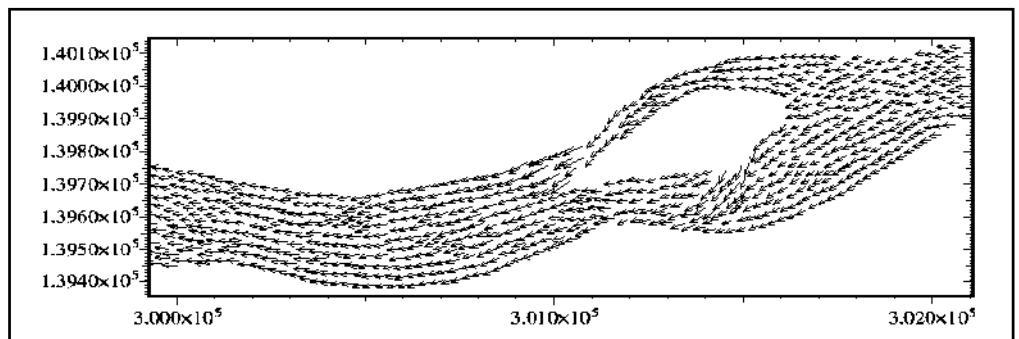


Figure 103 : Vitesses calculées au niveau de broc à un instant donné.

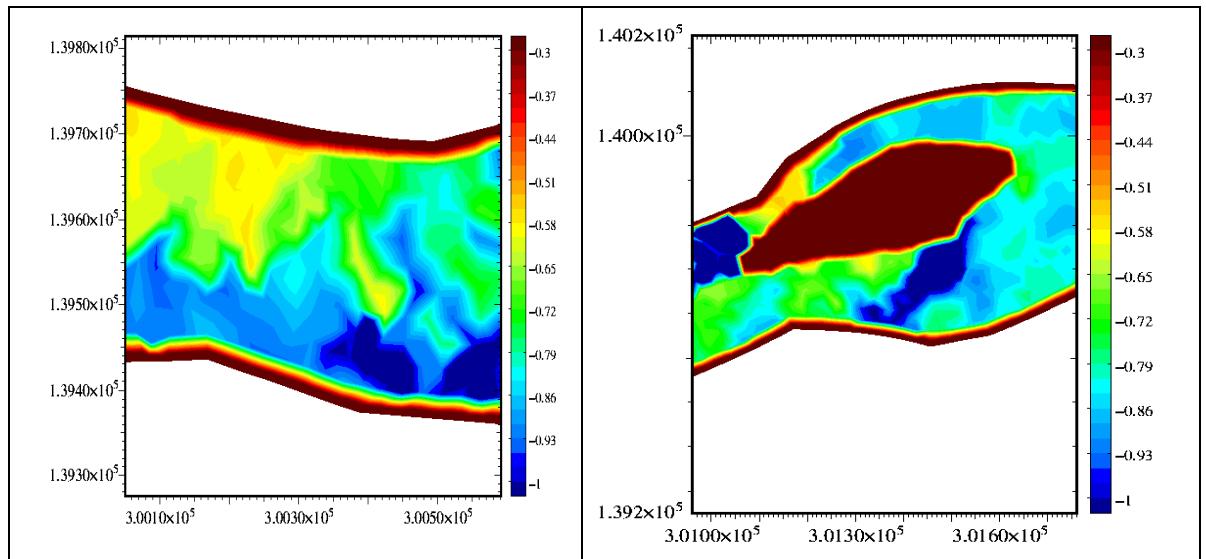


Figure 104 : Intensité du courant au niveau de l'île de Broc.

La représentation des intensités de courants dans la figure 103 permet de révéler une certaine dissymétrie rive gauche - rive droite sur la partie la plus en aval du domaine. On constate que les vitesses sont plus importantes sur la rive gauche que sur la rive droite. De même, la géométrie de l'île et la bathymétrie autour de celle-ci engendrent des vitesses dont l'intensité et la direction sont très variables.

Nous comparons dans les graphiques ci-dessous les vitesses calculées à celles mesurées en des points fixes donnés (figures 105 et 106). Ces mesures ont été effectuées le 16 avril 2002 entre 12h15 et 14h05 (cf. tableau 55).

Les courbes représentent la vitesse calculée à ces points fixes et les traits horizontaux sont les mesures effectuées en ces points (vitesses en ordonnées, heures en abscisses). Les courbes et les segments de la même couleur correspondent au même point. Notons qu'on a représenté les valeurs minimales et maximales mesurées, ce qui explique la présence de deux traits horizontaux de la même couleur.

Les premières mesures se situent à environ 700 mètres en aval de l'île de Broc entre 12h25 et 12h53 (figure 105). Les traits horizontaux bleu, vert et rouge représentent respectivement les mesures de vitesse effectuées en rive droite, milieu et rive gauche.

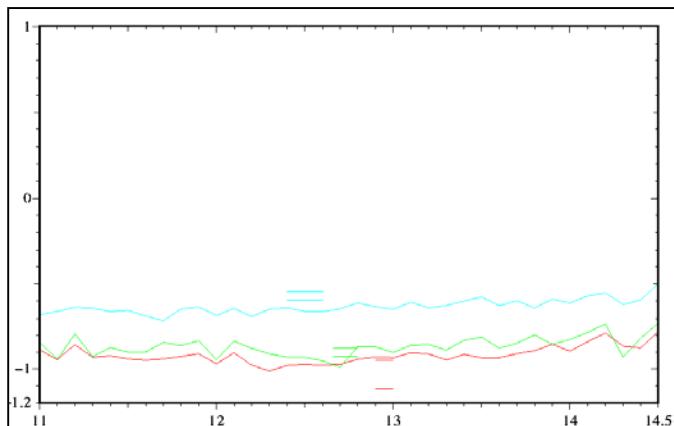


Figure 105 : Vitesses calculées et mesurées le 16/04/2002 dans la partie aval de l'île de Broc.

Les vitesses calculées se rapprochent des mesures. Les vitesses mesurées en rive droite varient entre $-0,5$ et $-0,6 \text{ m.s}^{-1}$ et le modèle estime une vitesse à $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$. De même, pour le milieu et la rive gauche, le modèle reproduit correctement le courant (tableau 61).

Tableau 61 : Vitesses calculées et mesurées en aval de l'île de Broc le 16/04/2002.

Aval Ile de Broc	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
RD (12h25)	-0,5 ; -0,6	-0,7
M (12h40)	-0,87 ; -0,93	-0,9
RG (12h53)	-0,95 ; -1,1	-0,92

La figure 106 représente les mesures et les valeurs calculées de la vitesse au niveau de l'île de Broc, sur le bras droit (13h45) du fleuve et sur le bras gauche (13h59). Les mesures ont été effectuées au milieu du chenal.

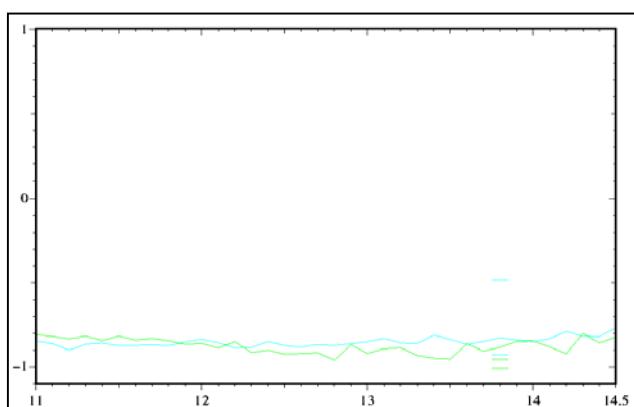


Figure 106 : Vitesses calculées et vitesses mesurées au niveau de l'île de Broc.

Les valeurs mesurées sur le bras droit de l'île varient entre $-0,5$ et $-0,9 \text{ m.s}^{-1}$. Le modèle prévoit une valeur de $-0,85 \text{ m.s}^{-1}$. Sur le bras gauche, les mesures oscillent entre $-0,9$ et -1 m.s^{-1} et la vitesse calculée est de $-0,9 \text{ m.s}^{-1}$ (tableau 62).

Tableau 62 : Vitesses calculées et mesurées au niveau de l'île de Broc le 16/04/2002.

Ile de Broc	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
Bras droit (13h45)	$-0,5 ; -0,9$	$-0,85$
Bras gauche (13h59)	$-0,9 ; -1,00$	$-0,9$

Nous effectuons une autre comparaison sur la même zone le 24 avril 2002 entre 12h25 et 13h50.

Le champ de vitesse obtenu vers 13h est représenté dans la figure 107.

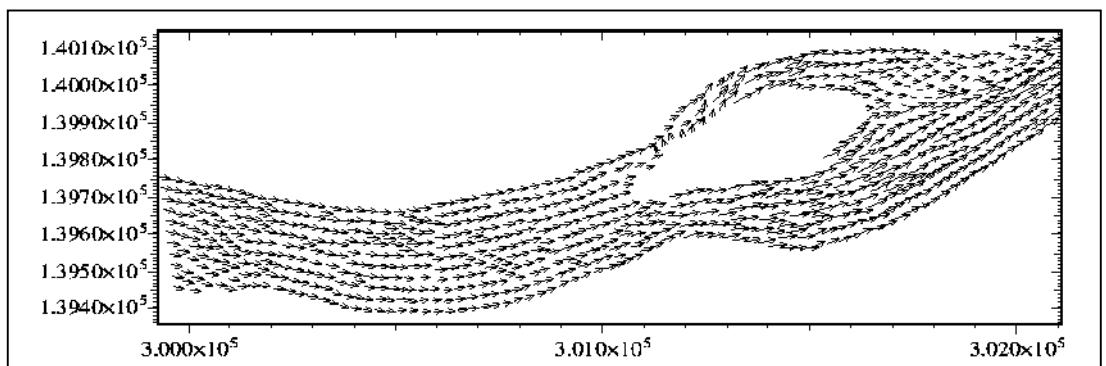


Figure 107: Vitesses calculées au niveau de l'île de Broc le 24/04/2002.

La figure 108 représente la réponse du code à 600 m en aval de l'île de Broc et les mesures effectuées en rive droite (trait bleu), milieu (trait vert) et rive gauche (trait rouge).

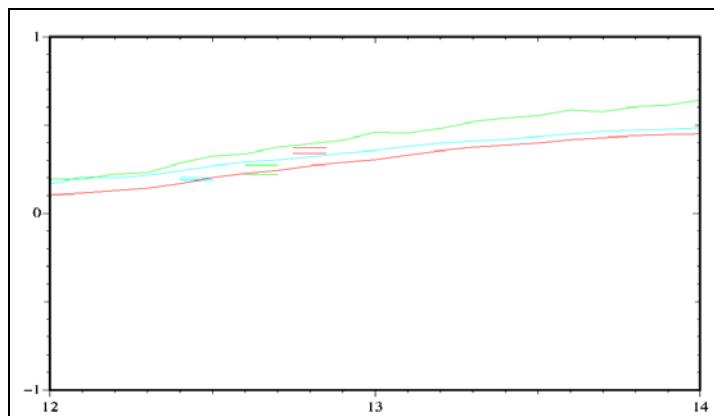


Figure 108 : Vitesses calculées par le modèle et vitesses mesurées le 24/04/02 en aval de l'île de Broc.

Le modèle reproduit fidèlement les observations. Les valeurs mesurées varient entre 0,2 et 0,37 m.s⁻¹ et les valeurs calculées sont comprises entre 0,2 et 0,38 m.s⁻¹ (tableau 63).

Tableau 63 : Vitesses calculées et mesurées en aval de l'île de Broc le 24/04/2002.

Aval Ile de Broc	Vitesses mesurées (m.s ⁻¹)	Vitesses calculées (m.s ⁻¹)
RD (12h24)	0,18 ; 0,2	0,2
M (12h36)	0,22 ; 0,27	0,25
RG (12h45)	0,34 ; 0,37	0,38

La figure 109 présente les résultats de part et d'autre de l'île de Broc le 24/04/2002. Les traits horizontaux bleus et verts représentent respectivement les mesures sur le bras droit et sur le bras gauche.

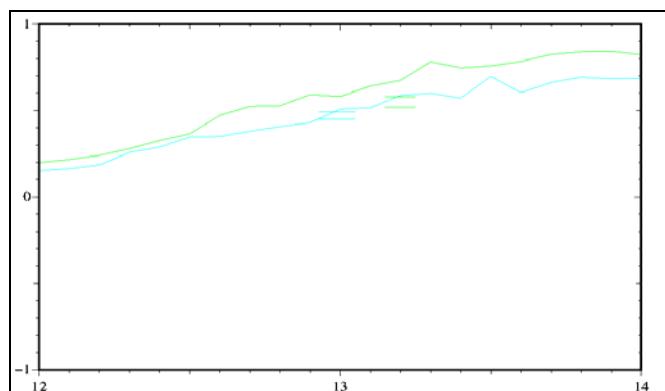


Figure 109 : Vitesses calculées par le code et vitesses mesurées le 24/04/02 de part et d'autre de l'île de Broc.

Les vitesses calculées sont proches des observations (tableau 63). Les valeurs mesurées varient entre $0,45$ et $0,58 \text{ m.s}^{-1}$ et les valeurs calculées fluctuent entre $0,49$ et $0,6 \text{ m.s}^{-1}$.

Tableau 63 : Vitesses calculées et mesurées de part et d'autre de l'île de Broc le 24/04/02.

Ile de Broc	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
Bras droit (12h56)	$0,45 ; 0,49$	$0,49$
Bras gauche (13h09)	$0,51 ; 0,58$	$0,6$

Les résultats et les mesures sur une section en amont de l'île sont présentés dans les figures 110 et 111.

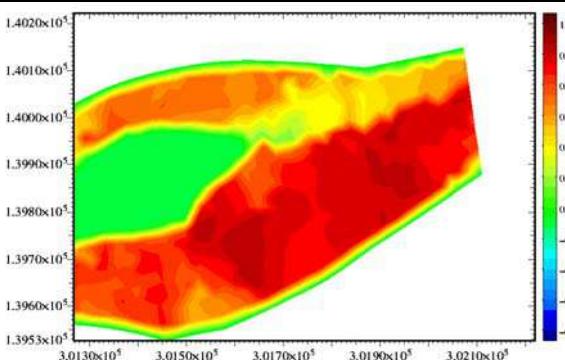


Figure 110 : Intensité du courant en amont de l'île de Broc le 24/04/02 entre 13h20 et 13h42

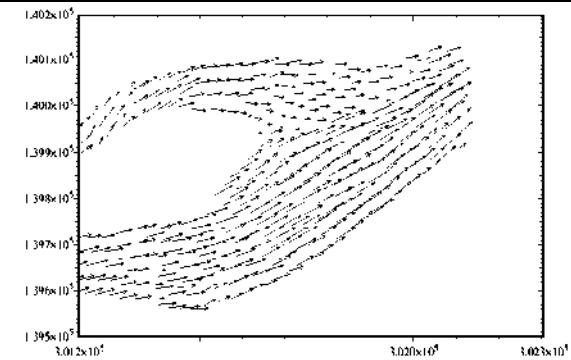


Figure 111 : champ de vitesse calculé en amont de l'île de Broc le 24/02/02 entre 13h20 et 13h42

Les différents graphiques montrent que les vitesses calculées par le modèle sont proches des mesures. Ce n'est pas toujours le cas (figures 110 et 111). Si les résultats semblent correspondre aux mesures sur la partie droite (avec des valeurs mesurées de l'ordre de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$), les valeurs sur la partie gauche diffèrent sensiblement (de l'ordre de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ pour le code et de l'ordre de $0,35 \text{ m.s}^{-1}$ près de la berge pour les mesures).

L'île de Berenx

L'île de Berenx est située à 16 km de l'embouchure. La bathymétrie est illustrée dans les figures 15 et 16. Les zones les plus profondes sont localisées en aval de l'île sur la rive droite et sur le bras gauche de l'île.

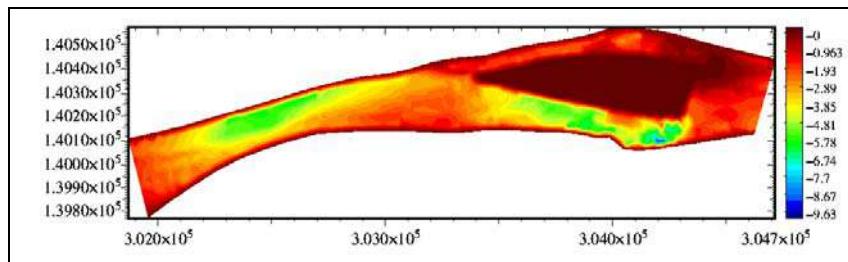


Figure 112 : Bathymétrie au niveau de l'île de Berenx

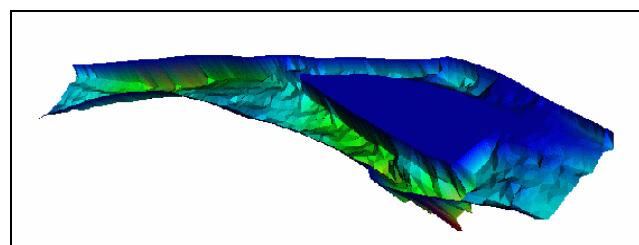


Figure 113 : Bathymétrie en 3D au niveau de l'île de Berenx

Nous allons comparer les résultats de la simulation avec des mesures effectuées le 16 avril 2002 entre 14h20 et 15h20. Le profil des vitesses calculées à 14h30 est le suivant (figure 114) :

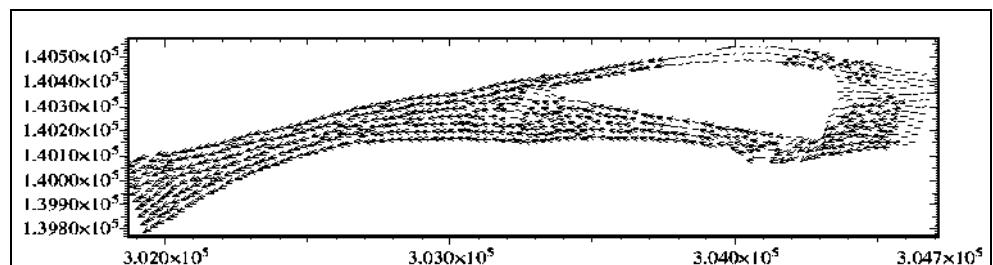


Figure 114 : Profil des vitesses calculées au niveau de l'île de Berenx à 14h30 le 16/04/2002.

Nous présentons les résultats du modèle avec les mesures sur une section située à 200 m en aval de l'île (figure 115) et de part et d'autre de l'île (figure 116).

Dans la figure 115, les traits horizontaux bleus, verts et rouges représentent respectivement les mesures en rive droite, au milieu et en rive gauche. Dans la figure 116, les traits horizontaux bleus et verts représentent respectivement les mesures de vitesses sur le bras droit et sur le bras gauche.

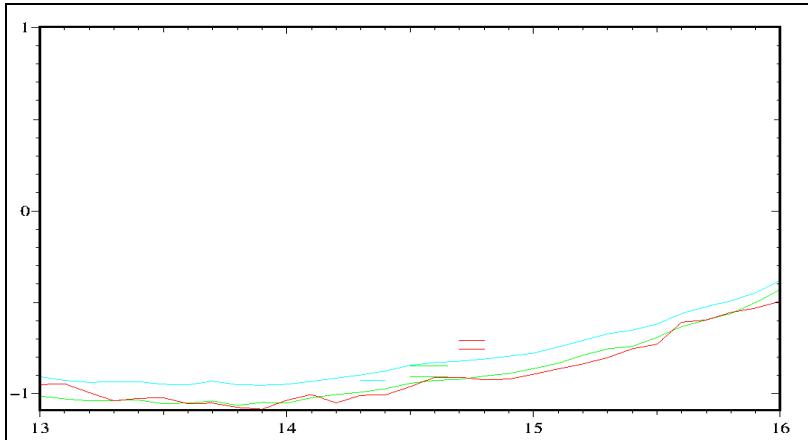


Figure 115 : Vitesses calculées et vitesses mesurées en aval de l'île de Berenx le 16/04/2002 entre 14h24 et 14h49.

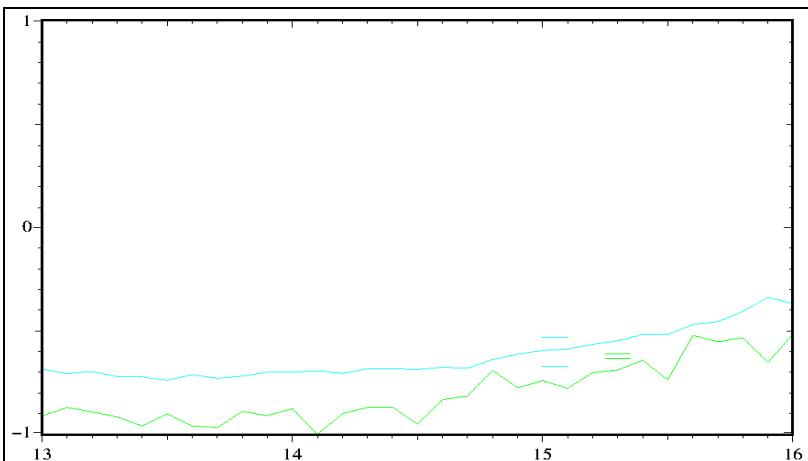


Figure 116 : Vitesses calculées et vitesses mesurées de part et d'autre de l'île de Berenx le 16/04/2002 entre 15h et 15h30.

Les résultats de la simulation sont reportés dans le tableau 64. En aval de l'île, la simulation s'ajuste bien aux données pour la rive droite et le milieu. Pour la rive gauche, l'écart entre les valeurs mesurées et calculées est de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ (tableau 64). De part et d'autre de l'île, la vitesse calculée se situe entre les valeurs minimale et maximale mesurées en rive droite (entre $-0,5$ et $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$). Le modèle surestime légèrement en rive gauche ($-0,7 \text{ m.s}^{-1}$) par rapport à la valeur mesurée ($-0,6 \text{ m.s}^{-1}$).

Tableau 64 : Vitesses calculées et mesurées au niveau de l'île de Berenx le 16/04/2002.

Ile de Berenx	Vitesses mesurées ($m.s^{-1}$)	Vitesses calculées ($m.s^{-1}$)
Aval Berenx RD (14h18)	-0,93 ; -1,09	-0,9
Aval Berenx M (14h31)	-0,85 ; -0,91	-0,95
Aval Berenx RG (14h42)	-0,71 ; -0,76	-0,9
Bras droit Berenx (15h00)	-0,54 ; -0,68	-0,65
Bras gauche Berenx (15h14)	-0,62 ; -0,64	-0,7

Urt

Des mesures de vitesses de courant ont été effectuées à 22 km de l'embouchure au niveau du Sablot et au niveau du méandre en aval et en amont du Pont d'Urt entre 15h30 et 16h40.

La bathymétrie dans cette portion de l'Adour est illustrée dans les figures 117 et 118.

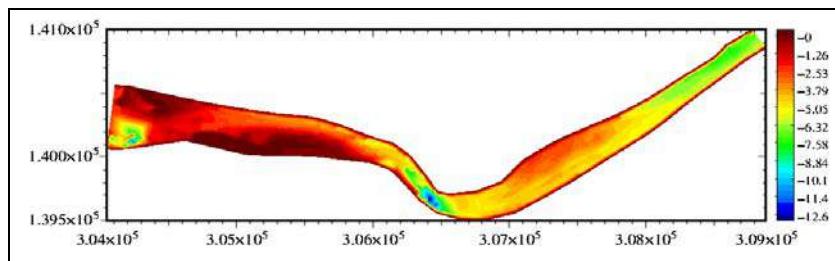


Figure 117 : Bathymétrie au niveau d'Urt

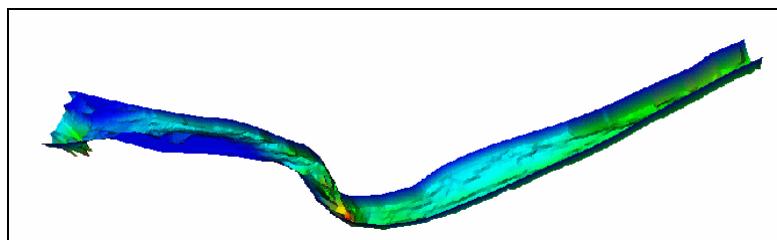


Figure 118 : Bathymétrie en 3D au niveau d'Urt

La zone la plus profonde est localisée au niveau du méandre où est situé le pont d'Urt (entre 8 et 10 m de profondeur).

Nous nous intéressons pour commencer à la vitesse au voisinage de l'île du sablot mesurée entre 15h30 et 15h52. On ne dispose que des mesures en rive droite et au milieu.

Les résultats de la simulation et des mesures sont illustrés dans la figure 119 et sont reportés dans le tableau 65.

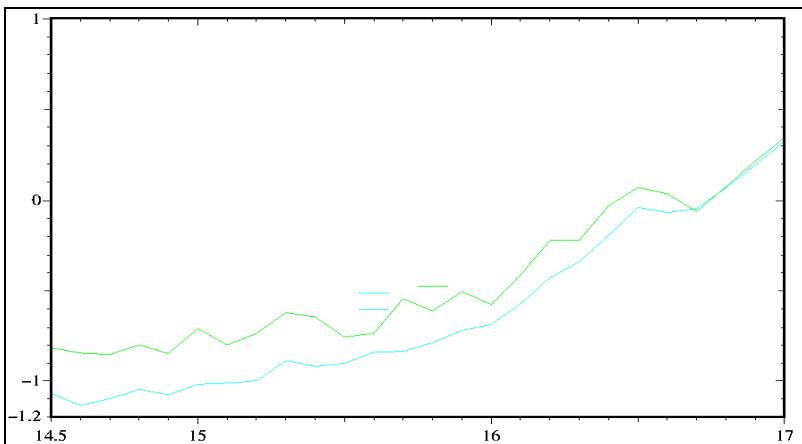


Figure 119 : Vitesses calculées et mesurées au niveau du Sablot le 16/04/02 entre 15h30 et 15h46.

Tableau 65 : Vitesses calculées et mesurées au niveau du Sablot le 16/04/02.

Le Sablot	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
RD (15h32)	-0,52 ; -0,6	-0,86
M (15h46)	-0,48 ; -0,49	-0,65

On constate que le modèle surestime par rapport aux mesures. Le modèle prévoit en rive droite $-0,86 \text{ m.s}^{-1}$ alors que la valeur mesurée est de l'ordre de $-0,5$ à $-0,6 \text{ m.s}^{-1}$. Au milieu du chenal, l'écart entre la valeur calculée et celle mesurée est de $0,17 \text{ m.s}^{-1}$.

De la même manière nous comparons les résultats avec les mesures effectuées juste en aval du Pont d'Urt (figure 120) et en amont du Pont (figure 121). Les résultats sont reportés dans le tableau 66.

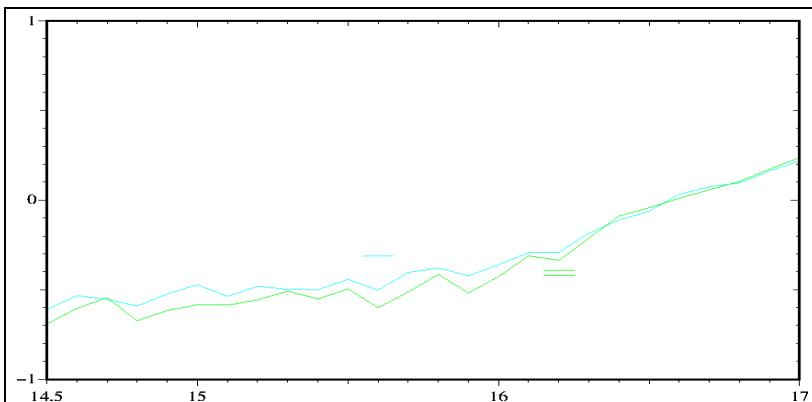


Figure 120 : Vitesses calculées et vitesses mesurées en aval du Pont d'Urt le 16/04/02 entre 15h45 et 16h10.

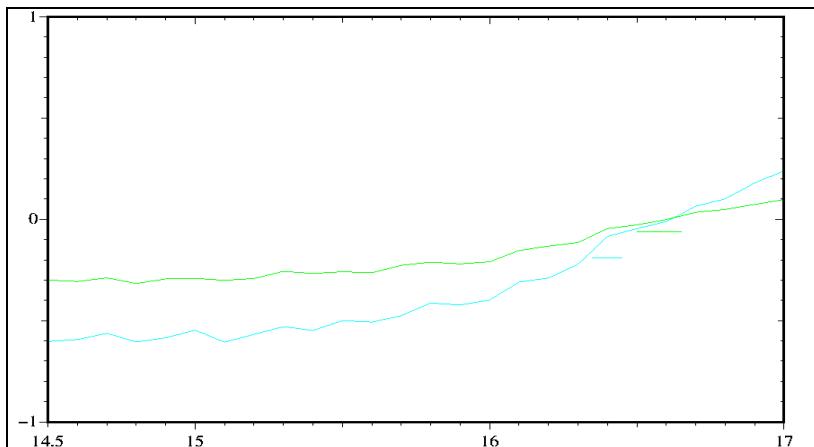


Figure 121 : Vitesses calculées et vitesses mesurées en amont du Pont d'Urt le 16/04/02 entre 16h20 et 16h30.

Tableau 66 : Vitesses calculées et vitesses mesurées au niveau du Pont d'Urt le 16/04/02.

Pont d'Urt	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
Aval Pont RD (16h)	-0,25 ; -0,31	-0,5
Aval Pont RG (16h11)	-0,39 ; -0,42	-0,4
Amont Pont RD (16h22)	-0,19	-0,1
Amont Pont RG (16h30)	-0,06	0

Le modèle prévoit en rive droite une vitesse de courant de $-0,5 \text{ m.s}^{-1}$ alors que la valeur mesurée est de $-0,3 \text{ m.s}^{-1}$ (tableau 66). En rive gauche, les valeurs mesurées sont très proches des résultats du modèle (entre $-0,3$ et $-0,4 \text{ m.s}^{-1}$).

En amont du pont d'Urt, les simulations sont proches des mesures. En rive droite, le courant est à $-0,19 \text{ m.s}^{-1}$ et la valeur calculée par le modèle est de $-0,1 \text{ m.s}^{-1}$. En rive gauche, le modèle prévoit 0 m.s^{-1} alors que la vitesse mesurée est de $-0,064 \text{ m.s}^{-1}$.

Urt (point fixe)

Les mesures ont été réalisées en amont du pont d'Urt au niveau du méandre entre 11h45 et 13h30. La figure 122 montre la variation des vitesses de courant mesurées et calculées au cours du temps. En bleu et vert, nous avons représenté les valeurs minimales et maximales mesurées (les mesures étant faites à chaque instant à plusieurs profondeurs). Les vitesses calculées sont représentées en rouge.

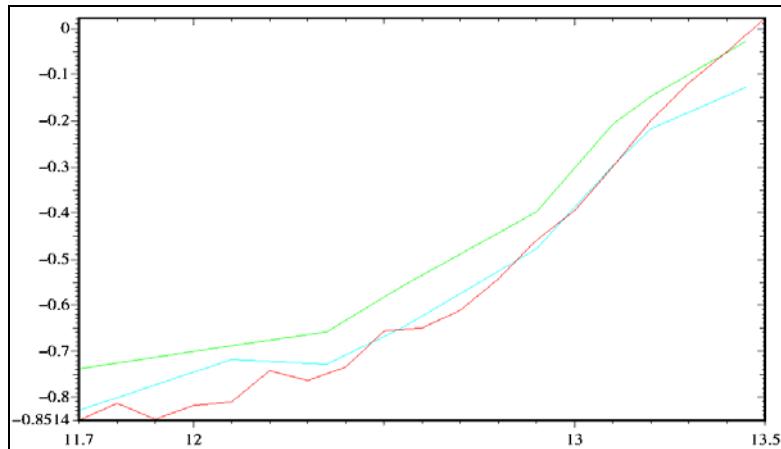


Figure 122 : Variation des vitesses calculées et mesurées en point fixe le 25/04/02 entre 11h45 et 13h30.

Au départ de la simulation, le modèle surestime la vitesse de courant par rapport aux mesures pour s'en rapprocher ensuite. A 12h30, la valeur calculée est de $-0,54 \text{ m.s}^{-1}$ alors que la vitesse mesurée est comprise entre $-0,56$ et $-0,65 \text{ m.s}^{-1}$.

Si l'on regarde le profil des vitesses au niveau de ce méandre au jusant (figure 123), on s'aperçoit que les vitesses sont plus importantes en rive gauche.

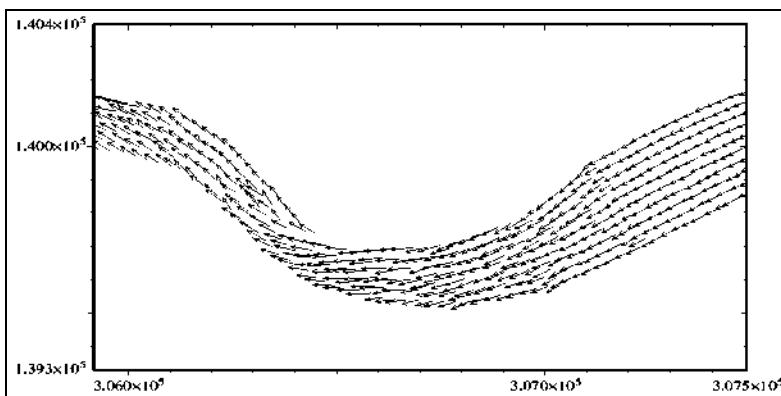


Figure 123 : Profil des vitesses à un instant donné de la simulation.

Pont de l'Autoroute

Les mesures ont été réalisées le 19/04/02 au niveau du Pont de l'Autoroute situé à 9 km de l'embouchure, sur une section en aval et en amont du Pont.

La bathymétrie sur cette zone est illustrée dans les figures 124 et 125.

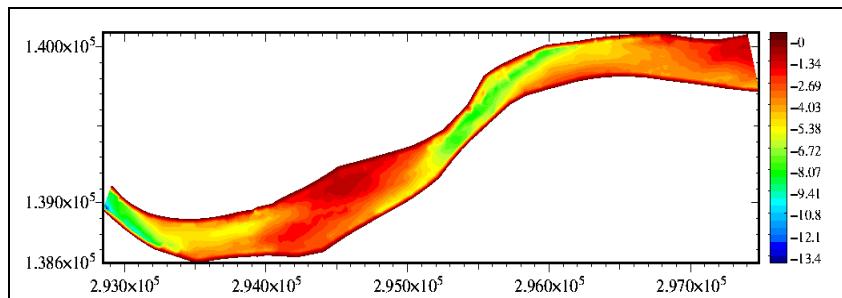


Figure 124 : Bathymétrie au niveau du pont de l'Autoroute.

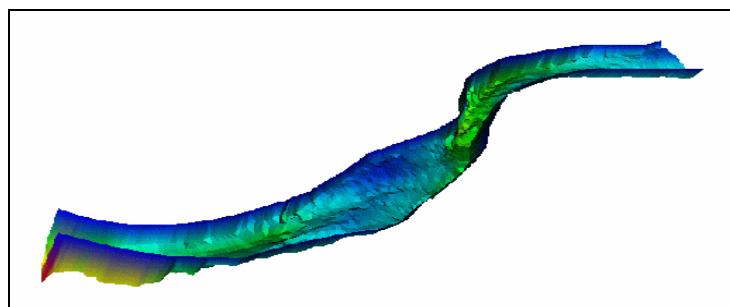


Figure 125 : Bathymétrie en 3D au niveau du Pont de l'Autoroute.

La comparaison des mesures avec les résultats du modèle est présentée dans les figures 126 et 127 et reportée dans le tableau 67. Les traits horizontaux bleu, vert et rouge représentent respectivement les mesures en rive droite, milieu et rive gauche.

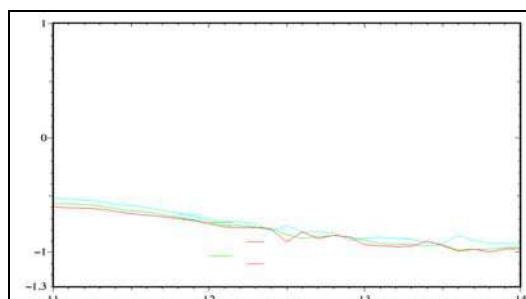


Figure 126 : Vitesses calculées et mesurées en aval du pont entre 11h49 et 12h15

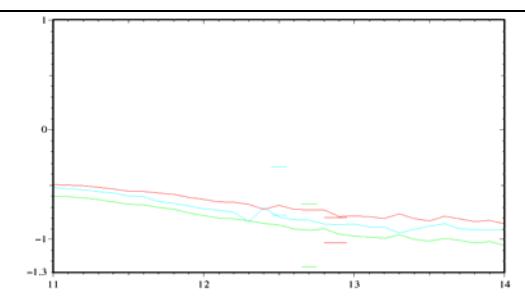


Figure 127 : Vitesses calculées et mesurées en amont du Pont entre 12h30 et 12h50.

Tableau 67 : Vitesses calculées et mesurées au niveau du Pont de l'Autoroute le 19/04/02.

Pont de l'Autoroute	Vitesses mesurées ($m.s^{-1}$)	Vitesses calculées ($m.s^{-1}$)
Aval Pont RD (11h49)	-0,67 ; -0,71	-0,69
Aval Pont M (12h02)	-0,74 ; -1,03	-0,75
Aval Pont RG (12h15)	-0,91 ; -1,1	-0,7
Amont Pont RD (12h27)	-0,34 ; -0,78	-0,79
Amont Pont M (12h39)	-0,68 ; -1,23	-0,9
Amont Pont RG (12h48)	-0,80 ; -1,03	-0,8

Le modèle se cale bien par rapport aux données mesurées à l'exception de la rive gauche en aval du pont où le modèle prévoit $-0,7 \text{ m.s}^{-1}$ alors que la vitesse mesurée est comprise entre $-0,9$ et $-1,1 \text{ m.s}^{-1}$.

Enfin, des mesures ont été réalisées sur une section située à 600 mètres en amont du pont entre 13h00 et 13h30. La comparaison avec les résultats du modèle est présentée dans la figure 128.

Les traits horizontaux bleu, vert et rouge représentent respectivement les mesures de vitesses en rive droite, milieu et en rive gauche.

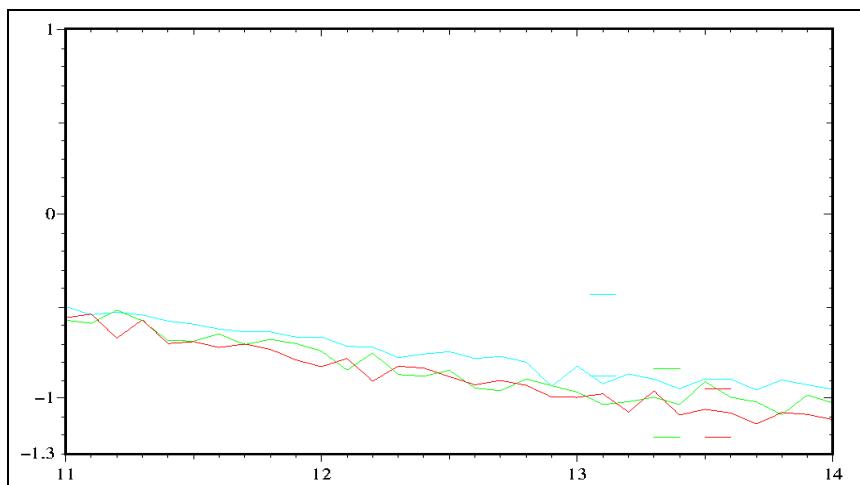


Figure 128 : Vitesses calculées et vitesses mesurées le 19/04/02 entre 13h et 13h30 à 600 mètres en amont du pont de l'Autoroute.

Tableau 68 : Vitesses calculées et mesurées en amont du Pont de l'Autoroute le 19/04/02.

Amont Pont Autoroute	Vitesses mesurées (m.s^{-1})	Vitesses calculées (m.s^{-1})
RD (13h02)	-0,43 ; -0,88	-0,9
M(13h18)	-0,84 ; -1,2	-1
RG (13h30)	-0,95 ; -1,2	-1,1

Les résultats du modèle sont compris entre les valeurs minimales et maximales mesurées. En rive gauche, le modèle prévoit une vitesse de $-1,1 \text{ m.s}^{-1}$ et les valeurs mesurées sont comprises entre $-0,95$ et $-1,2 \text{ m.s}^{-1}$.

Le modèle 2D fournit une bonne estimation de la vitesse de courant. L'ordre de grandeur est la même malgré quelques différences sur les berges. Notons toutefois que la bathymétrie au voisinage des berges n'est pas bien connue et des effets de bord peuvent être à l'origine de ces différences.

5.4. Simulation des déplacements de civelles en estuaire à l'aide d'un modèle comportemental

Les premières analyses effectuées (de Casamajor 1998, Bru 1998, de Casamajor, & *al.*, 1999) montrent un effet très marqué des phases lunaires et de la turbidité sur le comportement des civelles dans la colonne d'eau. L'intensité du coefficient de marée n'a pas un effet simple sur la variabilité des captures de civelles (de Casamajor & *al.*, 1999, Prouzet & *al.*, 2002). Les travaux réalisés ont montré qu'il s'agit d'un effet combiné du coefficient de marée et de l'intensité du débit fluvial. C'est pourquoi, un modèle hydrodynamique calculant la vitesse moyenne d'avancée du front de marée dynamique (lieu d'inversion du sens du courant) est utilisé comme base pour simuler la dispersion des flux de civelles. Ces analyses indiquent que les blocages hydrologiques provoquent des fortes concentrations dans l'estuaire.

Si les fortes concentrations de civelles dans la colonne d'eau sont conditionnées par le blocage de la marée en aval suivi d'une nouvelle propagation de la marée dans l'estuaire, l'accessibilité des civelles aux engins de pêche est contrôlée en partie par la pénétration de la lumière dans l'eau. Compte-tenu des travaux effectués, les biologistes ont proposé aux mathématiciens un schéma comportemental illustré en figure 129.

Dans la composante horizontale : L'action du coefficient de marée et du débit fluvial sur le comportement des civelles ne peut pas être considérée séparément. Le modèle hydrodynamique 1D de Lazure (1998) appliqué à l'Adour montre bien les conditions hydrologiques provoquant le blocage de la marée dynamique dans la zone prospectée pendant le flot. L'intensité du courant se traduit par des conditions plus ou moins favorables à la migration des civelles. Celles-ci ne migrent plus quand la vitesse maximale pendant le flot est supérieure à $-0,3 \text{ m.s}^{-1}$. Quand le débit fluvial diminue et les coefficients de marée augmentent, la marée se propage à nouveau dans l'estuaire et le flux de civelles pénètre dans la zone étudiée.

C'est au cours de ces épisodes hydrologiques qui succèdent aux fortes crues que l'on observe les plus fortes densités de civelles. En l'absence de crues, celles-ci pénètrent en faible densité dans l'estuaire au rythme des marées et le traverse rapidement (2 à 3 jours). Rien n'indique pour le moment qu'elles le font de manière active. Au contraire, les observations les plus récentes faites sur l'accumulation des civelles au voisinage du front de la marée dynamique, laissent supposer qu'elles se déplacent plutôt passivement dans l'estuaire.

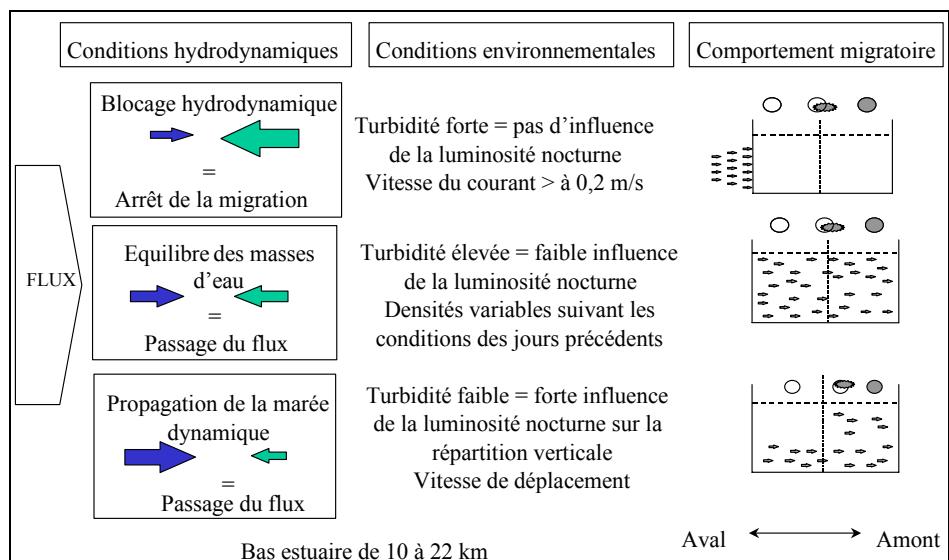


Figure 129 : Schéma explicatif du comportement migratoire de la civelle dans la partie maritime de l'estuaire de l'Adour (de Casamajor, 1998).

Dans la composante verticale : Le comportement vertical des civelles est analysé à partir des densités observées en surface et au fond. Les modalités de passage des flux sont très variables en fonction des conditions environnementales et plus particulièrement de la lumière.

La localisation verticale des civelles résulte principalement de l'action des facteurs turbidité et phase lunaire. L'eau trouble favorise les déplacements sur toute la colonne d'eau, quelle que soit la phase du cycle lunaire. Les eaux claires favorisent plutôt les passages en profondeur surtout pendant la pleine lune.

La nébulosité intervient comme un facteur modulateur de la luminosité nocturne qui peut atténuer la pénétration de la clarté lunaire durant les premiers et derniers quartiers. Les mouvements verticaux dans la colonne d'eau sont plutôt actifs et résultent d'un comportement lucifuge.

5.4.1. Description du modèle comportemental

5.4.1.1. Domaine d'étude

La portion de l'Adour retenue pour notre étude se situe entre l'embouchure et 30 km en amont de celle-ci. Cette distance arbitraire correspond au jeu de données que nous possédons (source DDE 64) sur la bathymétrie réelle de l'Adour. Le modèle est établi en deux dimensions spatiales : horizontales et verticales.

- Pour la variable longitudinale x , nous choisissons le sens positif de l'aval vers l'amont. Le domaine sera délimité par x_0 pouvant représenter l'embouchure et par $x_1 > x_0$.
- Pour la variable verticale z , l'orientation positive retenue est du fond vers la surface. Le zéro correspond à celui des cartes marines et le fond sera de profondeur variable. On note par $z_{fond}(x)$ la profondeur du fleuve et par $\zeta(t, x)$ la surface au point x .
- On note par Ω le domaine d'étude :

$$\Omega := [x_0, x_1] \times \bigcup_{x \in [x_0, x_1]} [z_{fond}(x), \zeta(t, x)]$$

5.4.1.2. Le modèle

Le modèle décrit la variation instantanée de la densité de civelles présentes en un point donné de la rivière sous l'influence des facteurs suivants : courants, luminosité, turbidité, et comportement de la civelle. Il est constitué de trois groupes d'équations :

- Les équations de courant : l'équation d'Euler et l'équation de continuité. Ces deux équations forment un modèle de circulation unidimensionnel, qui décrit en fait l'évolution couplée de l'aire de la section mouillée et de sa position dans la longueur (ou celle de son centre de gravité). Le modèle de circulation est celui élaboré par l'IFREMER (Lazure, 1998) ;
- L'équation de la turbidité, décrite comme une propriété qui varie sous l'action du transport par le courant et de la turbulence horizontale, alimentée par les dépôts des berges et l'apport en amont. De la turbidité et de la fonction d'éclairement, on déduit une fonction que l'on appelle l'indice d'éclairement, qui détermine l'action combinée des deux sur le déplacement de la civelle ;

- L'équation dite "de la civelle", qui décrit la variation au cours du temps de la densité des civelles, variation qui est la résultante de trois facteurs :

- i) L'entraînement des civelles par le courant : transport et diffusion turbulente horizontale, température ;
- ii) Le mouvement propre de la civelle, par transport et diffusion dans la colonne d'eau.
- iii) La mortalité naturelle et la mortalité par pêche.

Le système est présenté sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}[u(t,x)H(u(t,x)-\hat{u})C] \\
 & + \frac{\partial}{\partial z}\left[V_C[H(\hat{u}-u(t,x))+H(u(t,x)-\hat{u})H(E(t,x,z)-\hat{E})]\left(\frac{z-z_{fond}(x)}{\zeta(t,x)-z_{fond}(x)}\right)^{\alpha}C\right] \\
 & + \frac{\partial}{\partial z}\left[H(u(t,x)-\hat{u})H(\hat{E}-E(t,x,z))k_v(z)\frac{\partial C}{\partial z}\right] \\
 & + \frac{\partial}{\partial x}\left[H(u(t,x)-\hat{u})k_h(x)\frac{\partial C}{\partial x}\right] \\
 & - (\mu_n(t,x,z) + \mu_p(t,x,z,C))C
 \end{aligned} \tag{P}$$

Notations

C	Densité de la civelle
u	Vitesse des courants
H	Fonction de Heaviside
V_C	Vitesse propre des civelles
E	Fonction de luminosité
k_v, k_h	Coefficient de diffusion
μ	Coefficient de mortalité

Pour alléger l'écriture on note par :

$$\begin{aligned}
 a(t, x) &= u(t, x)H(u(t, x) - \hat{u}) \\
 b(t, x, z) &= V_C [H(\hat{u} - u(t, x)) + H(u(t, x) - \hat{u})H(E(t, x, z) - \hat{E})] \left(\frac{z - z_{fond}(x)}{\zeta(t, x) - z_{fond}(x)} \right)^\alpha \\
 d(t, x, z) &= H(u(t, x) - \hat{u})H(\hat{E} - E(t, x, z))k_v(z) \\
 e(t, x) &= H(u(t, x) - \hat{u})k_h(x) \\
 \mu(t, x, z) &= \mu_n(t, x, z) + \mu_p(t, x, z, C)
 \end{aligned}$$

Condition initiale :

En $t = t_0$, instant initial, on suppose que la densité est connue, c'est une fonction C_0 et on a donc

$$C(t_0, x, z) = C_0(x, z)$$

Conditions aux bords :

Bords horizontaux :

Sur les frontières horizontales, on impose qu'il n'y a pas de flux sortant à travers la couche de surface $\zeta(t, x)$ et la couche du fond $z_{fond}(x)$ et ceci pour toutes les abscisses x et pour tout temps t . Si on considère le vecteur de la normale extérieure à la couche de surface ou du fond noté indifféremment $\vec{\eta}(\eta_x, \eta_z)$. Il vient la condition suivante de "non transfert" :

$$\begin{aligned}
 &\eta_x \left[uH(u - \hat{u})C - H(u - \hat{u})k_h \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \\
 &\eta_z \left[V_C [H(\hat{u} - u) + H(u - \hat{u})H(E - \hat{E})] \left(\frac{z - z_{fond}}{\zeta - z_{fond}} \right)^\alpha C + H(u - \hat{u})H(\hat{E} - E)k_v \frac{\partial C}{\partial z} \right] = 0
 \end{aligned}$$

Bords verticaux :

À la frontière vertical aval, $x = x_0$, on suppose qu'il existe un flux entrant de civelles, $F(t, x_0, z) \geq 0$, connu (quand les conditions hydrodynamiques sont réalisées). Ainsi la condition de bord devient :

$$uH(u - \hat{u})C - H(u - \hat{u})k_h \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = F(t, x_0, z)$$

Pour alléger l'écriture on note par :

$$\begin{aligned} a(t, x) &= u(t, x)H(u(t, x) - \hat{u}) \\ b(t, x, z) &= V_C [H(\hat{u} - u(t, x)) + H(u(t, x) - \hat{u})H(E(t, x, z) - \hat{E})] \left(\frac{z - z_{fond}(x)}{\zeta(t, x) - z_{fond}(x)} \right)^\alpha \\ d(t, x, z) &= H(u(t, x) - \hat{u})H(\hat{E} - E(t, x, z))k_v(z) \\ e(t, x) &= H(u(t, x) - \hat{u})k_h(x) \\ \mu(t, x, z) &= \mu_n(t, x, z) + \mu_p(t, x, z, C) \end{aligned}$$

Alors on peut écrire l'équation (P) sous la forme suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[aC] - \frac{\partial}{\partial z}[bC] - \frac{\partial}{\partial z}\left[d \frac{\partial C}{\partial z}\right] - \frac{\partial}{\partial x}\left[e \frac{\partial C}{\partial x}\right] = -\mu C$$

que l'on peut écrire aussi :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(V(t, x, z)C) - \operatorname{div}(D(t, x, z)\nabla C) = -\mu C$$

où

$$V := (a(t, x), -b(t, x, z))$$

et

$$D := \begin{bmatrix} e(t, x) & 0 \\ 0 & d(t, x, z) \end{bmatrix}$$

avec les conditions aux bords

$$[VC - D\nabla C]\eta = 0 \text{ sur le fond et la surface}$$

et

$$[VC - D\nabla C]\eta = -F \text{ sur l'aval.}$$

et la condition initiale C

$$C(0, x, z) = C_0(x, z).$$



Pour discréteriser cette équation, un schéma de type volume fini est utilisé. Le principe des schémas "volumes finis" est le suivant :

Soit un ensemble de mailles (ou volumes de contrôle). A chaque maille est associée une inconnue, on obtient alors autant d'équations que d'inconnues en intégrant l'équation à discréteriser sur chaque volume de contrôle. Cette intégration fait apparaître des termes d'échanges entre volume de contrôle.

Discréterisation de l'équation

Pour diminuer le nombre d'approximations des données, on essaie d'adapter le maillage de telle manière que le centre des faces coïncide avec les points où nous avons des données de vitesses de courant.

Les mailles (ou volumes de contrôle) sont des trapèzes notés par Ω_{ik} centrés au point (x_i, z_k) . La maille Ω_{ik} a quatre cotés que l'on note par :

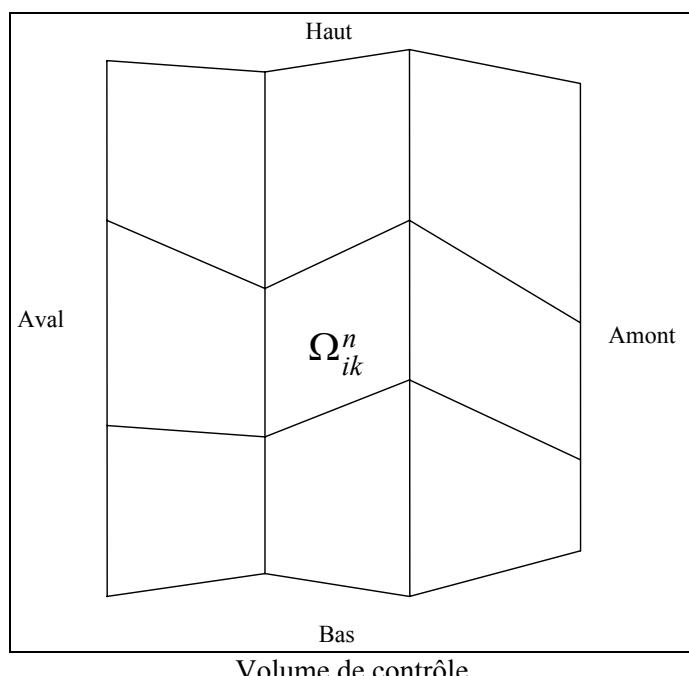
$$\partial\Omega_{i-\frac{1}{2}k}, \partial\Omega_{i+\frac{1}{2}k}, \partial\Omega_{ik-\frac{1}{2}}, \partial\Omega_{ik+\frac{1}{2}}$$

Avant de discréteriser l'équation, on va donner quelques notations utilisées. On note par :

Δt_n le pas de temps avec $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$, pour $n = 1, \dots, N_T$ où T est le temps final.

On approche alors C sur Ω_{ik}^n par une constante :

$$C(t, x, z) = C_{ik}^n, \forall (x, z) \in \Omega_{ik}^n, \forall t \in [t_n, t_{n+1}]$$



On intègre l'équation (P) sur $[t_n, t_{n+1}] \times \Omega_{ik}^n$

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_{ik}^n} \left[\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} [aC]}_II - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} [bC]}_III - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[e \frac{\partial C}{\partial x} \right]}_IV - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left[d \frac{\partial C}{\partial z} \right]}_V \right] dt d\tau = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_{ik}^n} \mu C dt d\tau$$

Pour alléger les calculs on a divisé en plusieurs parties l'expression sous l'intégrale.

Discrétisation de I

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_{ik}^n} \frac{\partial C}{\partial t} dt d\tau &= \int_{\Omega_{ik}^n} (C^{n+1} - C^n) d\tau \\ &= |\Omega_{ik}^n| (C_{ik}^{n+1} - C_{ik}^n) \end{aligned}$$

Discrétisation de II et III

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_{ik}^n} \operatorname{div}(VC) dt d\tau &= \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\partial\Omega_{ik}^n} (V \cdot \eta) C dt d\sigma \\ &= \Delta t \int_{\partial\Omega_{ik}^n} (V^n \cdot \eta) C^n d\sigma \end{aligned}$$

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_{ik}^n} \operatorname{div}(VC) dt d\tau = \Delta t_n \left[[\Phi^C]_{i-\frac{1}{2},k}^n + [\Phi^C]_{i+\frac{1}{2},k}^n + [\Phi^C]_{ik-\frac{1}{2}}^n + [\Phi^C]_{ik+\frac{1}{2}}^n \right]$$

où Φ^C est le flux de convection à travers les côtés de la maille.

De la même manière on discrétise les autres termes IV et V.

Description du code

1) Lecture des paramètres :

Cette étape consiste en une lecture sur fichier : date de début et le temps maximal de la simulation, date lunaire, nébulosité, débit.

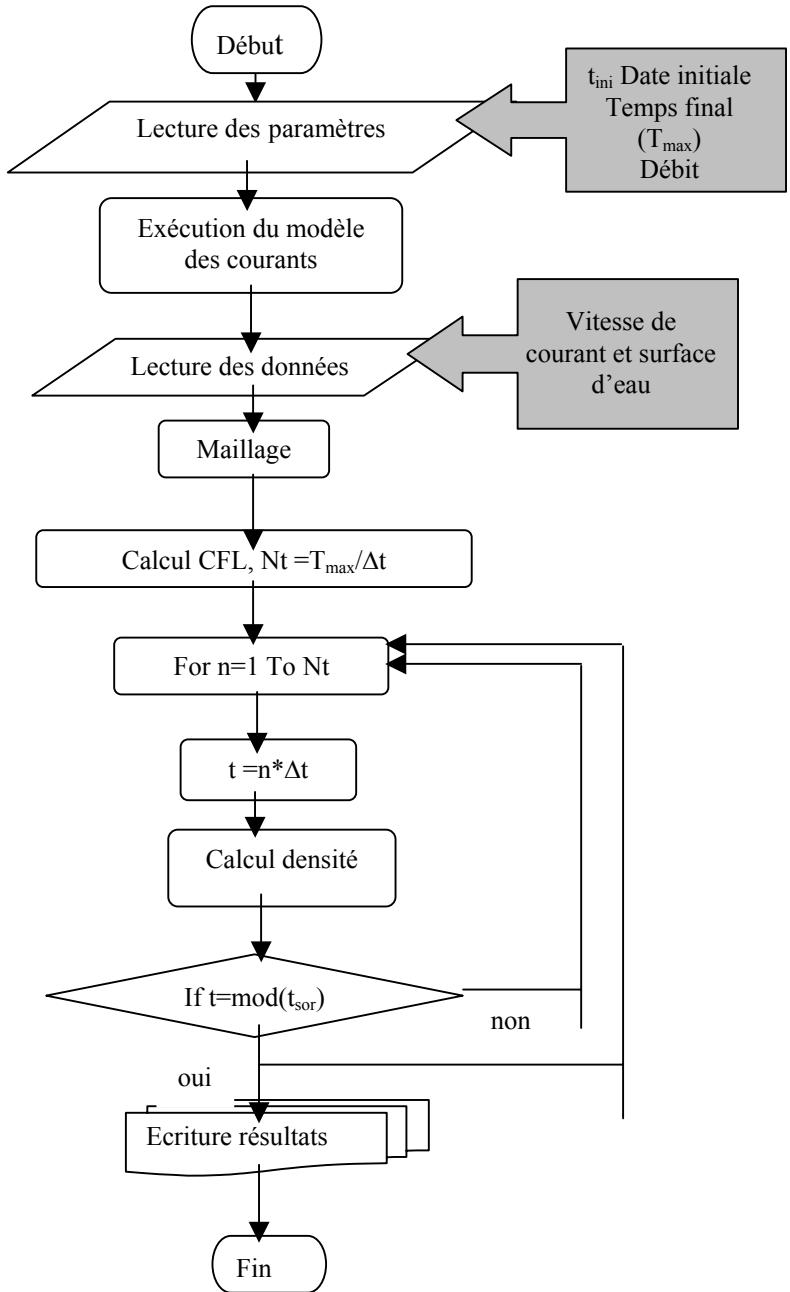
2) Exécution du programme des courants (selon modèle Ifremer, Prouzet, 2000)

3) Construction du maillage à partir des résultats du modèle des courants.

4) Calcul du pas de temps à partir de la condition C.F.L.

5) Résolution de l'équation : Cette résolution est faite en prenant en considération les conditions aux limites et la condition initiale.

6) Résultats : Pour un pas de temps donné, un fichier de sortie est créé qu'on peut visualiser avec le logiciel Plotmtv.



5.4.2. Simulation comportementale en estuaire

Le modèle comportemental utilise les résultats du modèle hydrodynamique unidimensionnel pour le transport horizontal permettant de simuler la trajectoire d'une particule soumise à une contrainte majeure : la particule assimilée à une civelle se plaque au fond dès que le courant est dirigé vers l'aval avec une vitesse supérieure à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$.

Dans le modèle, la possibilité d'une migration diurne est envisagée. Ainsi, si le flot se poursuit le jour, le modèle simulera deux cas de figure : la civelle migrera très près du fond ou restera enfouie dans le sédiment.

Le modèle prend en compte les facteurs de turbidité et des phases lunaires qui jouent un rôle dans la dispersion verticale des civelles dans la colonne d'eau. Pour l'utilisation du modèle, il faut renseigner les débits de l'Adour fleuve et des différents affluents, la nébulosité nocturne (faible ou forte) et les jours de lune (codés de 1 à 29 jours selon le cycle lunaire).

Au départ de la simulation, on injecte une densité de civelle de 50 g.100 m^{-3} à l'embouchure (ce qui semble cohérent avec les observations effectuées plus en amont lors des campagnes de prélèvement). Il est possible de réinjecter toutes les 6 heures cette quantité pour générer un déplacement de plusieurs groupes en attente du flot à l'embouchure. L'injection se fait dans une maille du modèle (200 m d'épaisseur) pour une largeur de 200 m et une hauteur d'eau correspondant à celle donnée par le modèle hydrodynamique le jour de l'injection du groupe de civelles.

5.4.2.1. Présentation de la visualisation des résultats

Les simulations du déplacement des civelles sont présentées comme suit :

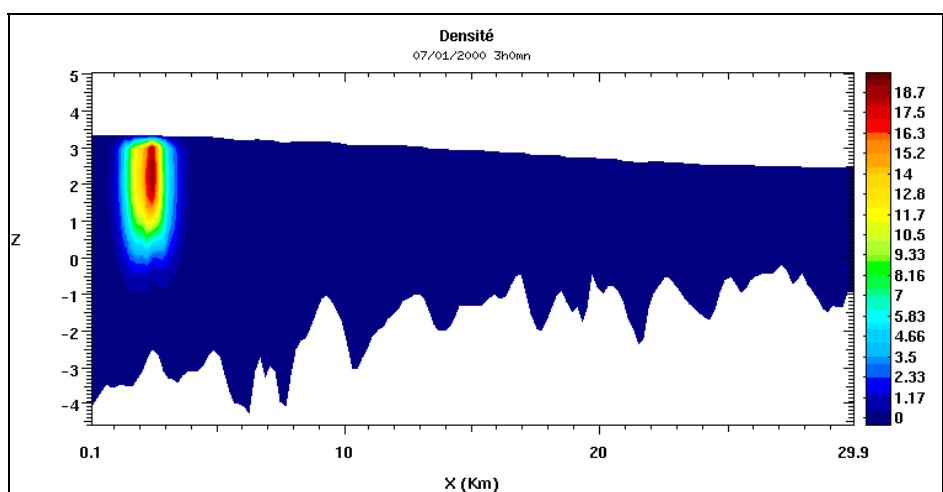


Figure 130 : Simulation de l'évolution d'une concentration de civelles dans l'estuaire de l'Adour en fonction du temps.

Les distances à la mer sont indiquées en abscisses (schématisation de l'estuaire) et en ordonnées le profil en long du fond (frontière blanche) et la hauteur d'eau (en bleu). Ces simulations se présentent sous la forme de "nuages de densités" représentant l'évolution d'une concentration de civelles dans l'estuaire (figure 130).

5.4.2.2. Estimation du temps de remontée des civelles en estuaire à partir des données de captures : l'exemple de la saison 1999/2000

Pour estimer une vitesse de migration de la civelle dans l'estuaire, nous avons regardé la correspondance des pics de captures aux tamis poussés en zone maritime et ceux en zone fluviale au tamis à main pour la saison 1999/2000 (figure 131).

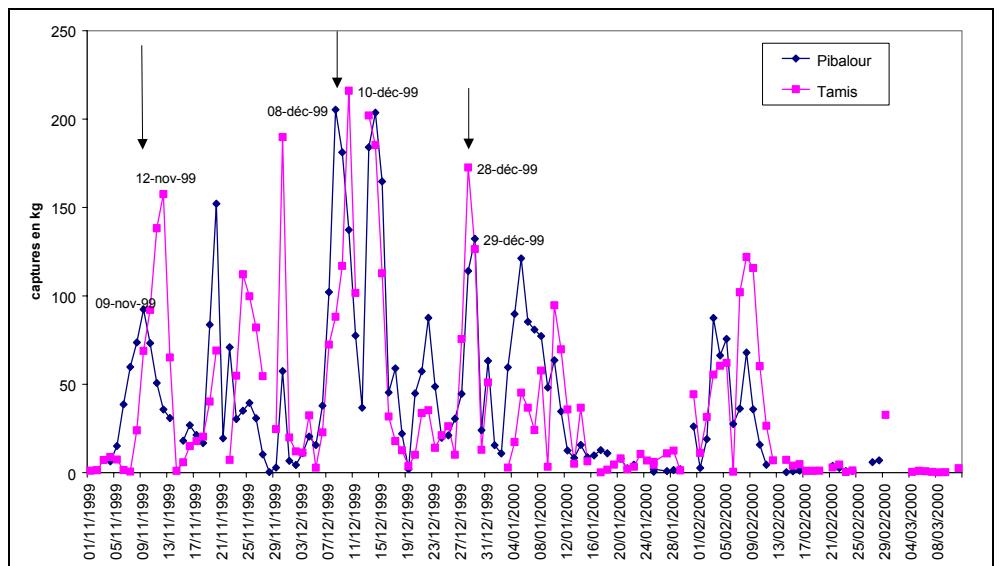


Figure 131 : Captures totales journalières au tamis poussé et au tamis à main pour la saison 1999/2000 (Source : IFREMER).

A la figure 131, nous observons plusieurs pics de captures dont 3 sont bien isolés :

- un pic au tamis poussé le 09/11/1999 et un pic au tamis à main le 12/11/1999
- un pic au tamis poussé le 08/12 et un pic au tamis à main le 10/12
- un pic au tamis à main le 28/12 et un pic au tamis poussé le 29/12.

Les conditions environnementales pour ces jours de pêche sont reportées dans le tableau 69.

Tableau 69 : Pics de captures et données hydrologiques

Date	captures pibalour (kg)	captures tamis (kg)	coefficient	Débit ($m^3.s^{-1}$)	lune	T° eau (°C)
09/11/99	92.37	68.86	85	139.83	NL-PQ	11.62
10/11/99	73.29	92.04	80	145.43	NL-PQ	11.28
11/11/99	50.74	138.25	74	137.55	NL-PQ	10.92
12/11/99	35.76	157.54	66	128.95	NL-PQ	10.62
08/12/99	205.32	88.16	79	138.77	NL-PQ	7.66
09/12/99	181.22	116.97	78	142.33	NL-PQ	7.38
10/12/99	137.3	216.01	75	322.3	NL-PQ	7.33
28/12/99	114.08	172.64	65	859.1	PL-DQ	10.18
29/12/99	132.32	126.45	54	1070	DQ	9.33

Entre le 09/11 et le 12/11, les conditions hydrodynamiques sont stables et favorables à la propagation des flux de civelles dans l'estuaire. La vitesse moyenne de propagation du flot est de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ le long de l'estuaire (figure 132).

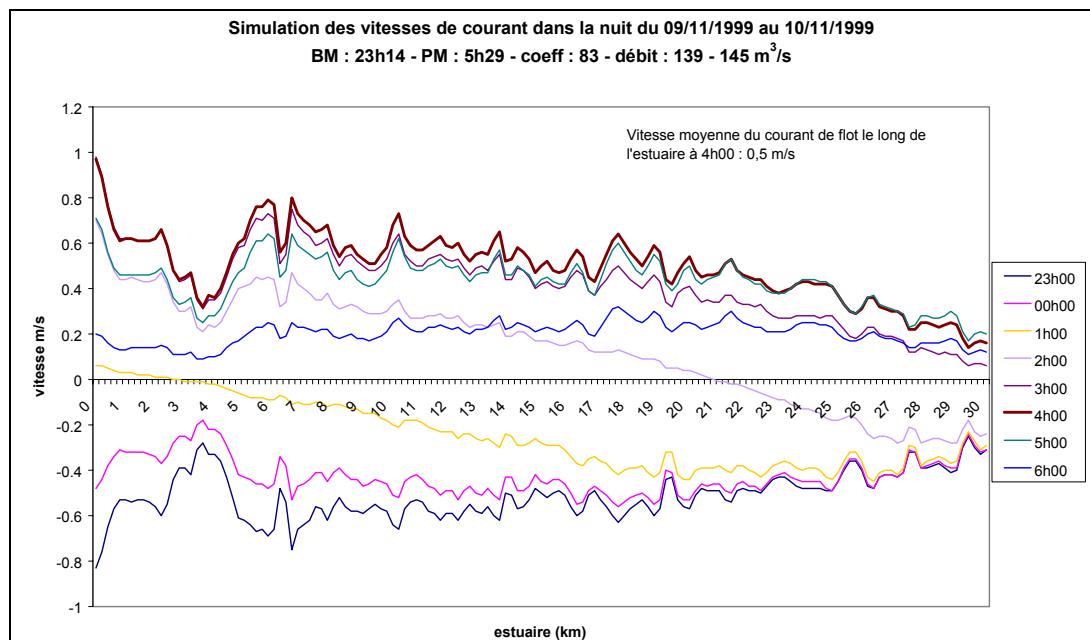


Figure 132 : Simulation des vitesses de courant le long de l'estuaire par le modèle 1D pour le 10/11/1999.

Entre le 09/12 et le 10/12, les conditions hydrologiques sont similaires (faible débit ; coefficient de marée moyen). La simulation, par le modèle 1D, de la propagation de la marée dans l'estuaire pour le 09/12 donne une vitesse moyenne du courant de flot à 3h de $0,46 \text{ m.s}^{-1}$ (figure 133).

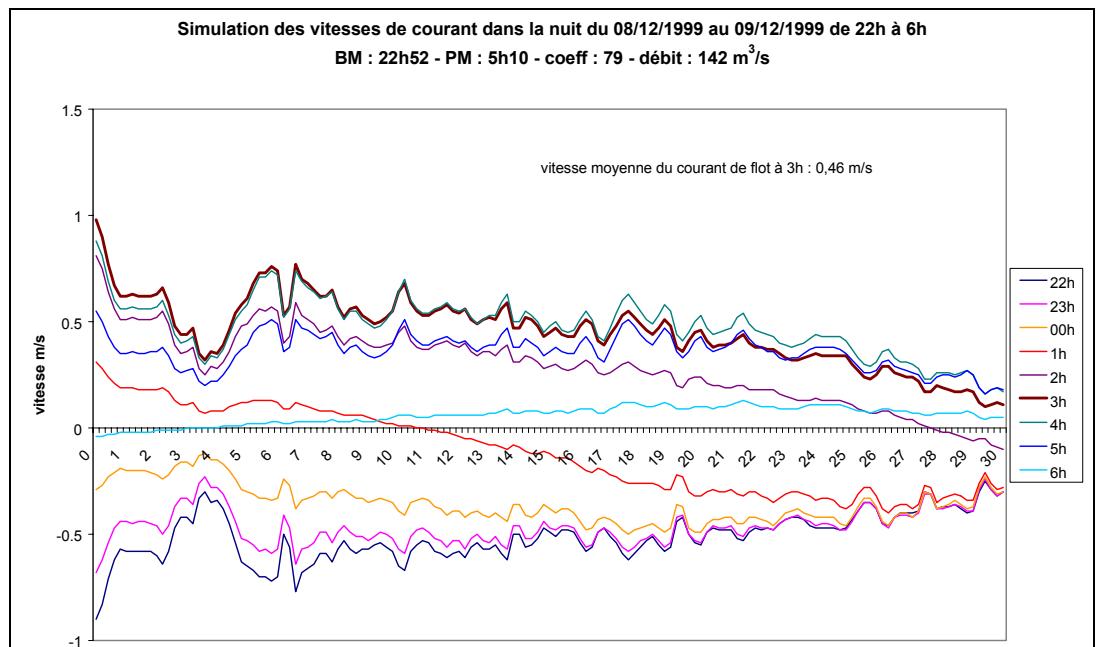


Figure 133 : Simulation des vitesses de courant par le modèle 1D pour le 09/12/1999.

Les conditions hydrologiques entre le 28/12 et le 29/12 sont celles d'une crue combinée à un faible coefficient de marée. La simulation de la propagation de la marée par le modèle 1D pour le 28/12 (figure 134) montre que le courant est toujours dirigé vers l'aval le long de l'estuaire. La renverse de courant ne se produit pas sauf dans la partie basse de l'estuaire (secteur Bayonne). Pour le 29/12, la simulation montre que la propagation de la marée dans l'estuaire n'est pas possible en raison d'un fort débit du fleuve de $1070 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ associé à un coefficient de marée de 54 (figure 135). La vitesse moyenne du courant à 21h est de $-0,43 \text{ m.s}^{-1}$.

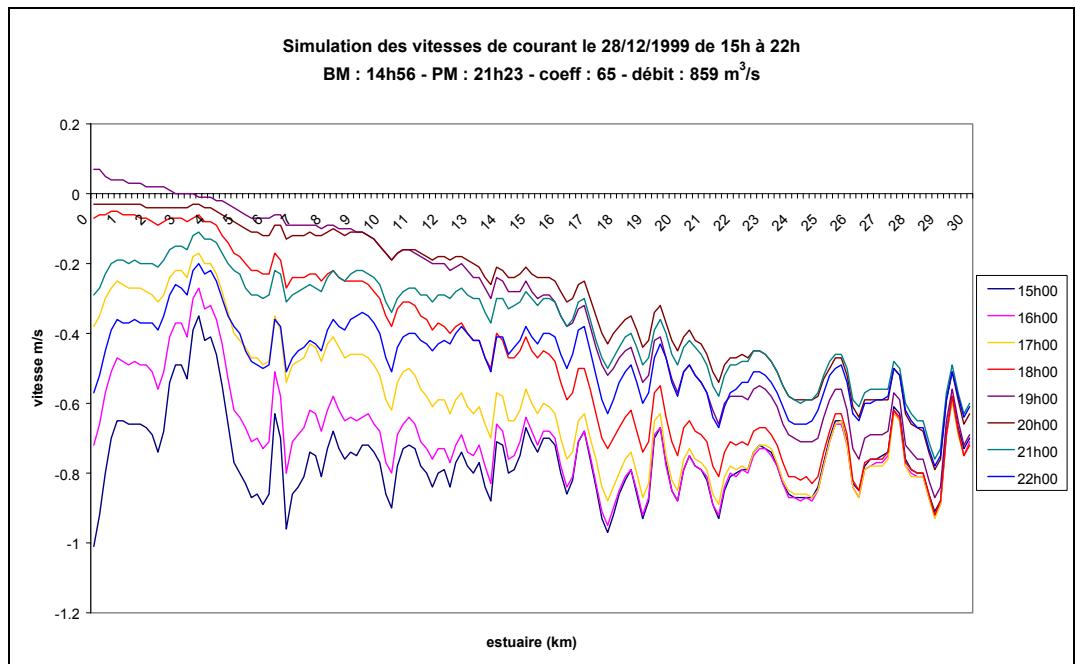


Figure 134 : Simulation des vitesses de courant le long de l'estuaire par le modèle 1D le 28/12/1999.

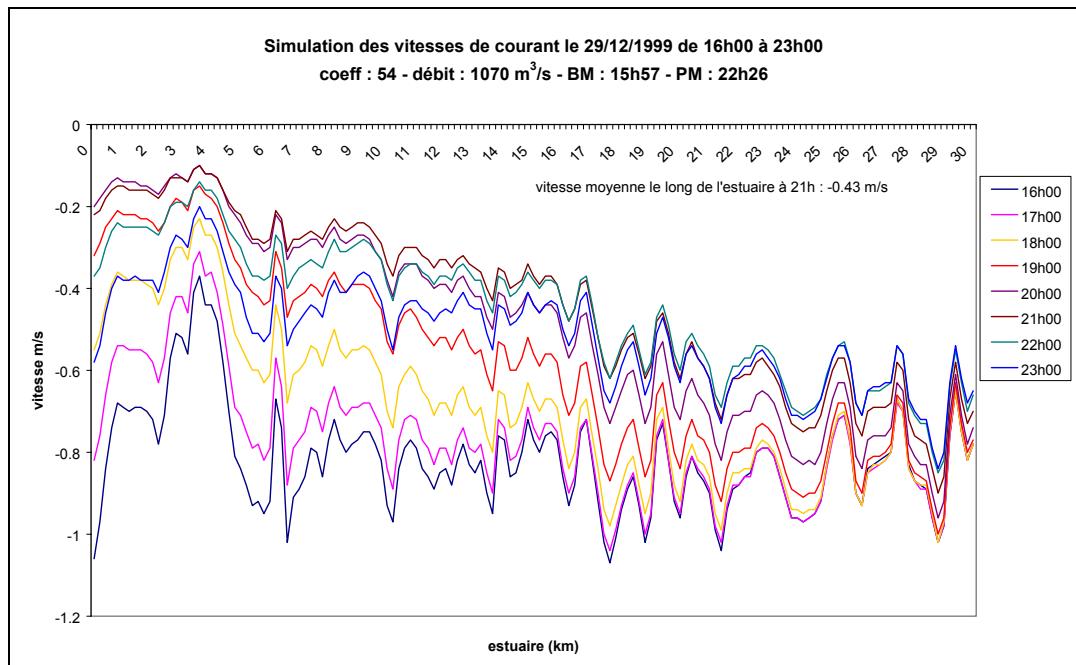


Figure 135 : Simulation des vitesses de courant le long de l'estuaire par le modèle 1D pour le 29/12/1999.

Si l'on part de l'hypothèse que le pic observé en zone fluviale appartient au même flux capturé en zone maritime pour les dates mentionnées dans le tableau 69 (entre le 09/11 et 12/11 ; entre le 08/12 et le 10/12), le temps de remontée des civelles pour atteindre la zone fluviale (distance parcourue de 20 km environ) est de 2 ou 3 jours. Pour la situation de crue (entre le 28 et le 29 décembre), les pics de captures aux tamis poussés s'expliquent par une pêche localisée très près des rives et située très bas dans l'estuaire (secteur Bayonne). Les conditions de crue favorisent les concentrations de civelles au niveau des berges, ce qui expliquent les fortes captures que cela soit en zone maritime ou en zone fluviale. Il est alors difficile de dire que les pics observés dans les deux zones de pêche appartiennent très vraisemblablement à des flux de civelles différents.

5.4.2.3. Application du modèle comportemental : Simulation de l'avancée d'un flux de civelles dans l'estuaire pour les périodes du 08/11/1999 au 12/11/1999 et du 08/12/1999 au 12/12/1999.

Nous avons choisi de simuler le déplacement d'un flux de civelles pour la période du 09/11/1999 au 12/11/1999 et du 08/12/1999 au 12/12/1999. Ces dates correspondent à l'observation de deux pics de captures, un aux tamis poussés en zone maritime le 09/11 et le 08/12 et l'autre au tamis à main en zone fluviale le 12/11 et le 12/12.

La simulation envisage deux cas possibles de comportement de la civelle : migration au fond le jour pendant le flot ou enfouissement dans le substrat.

Simulation du 08/11/1999 au 12/11/1999

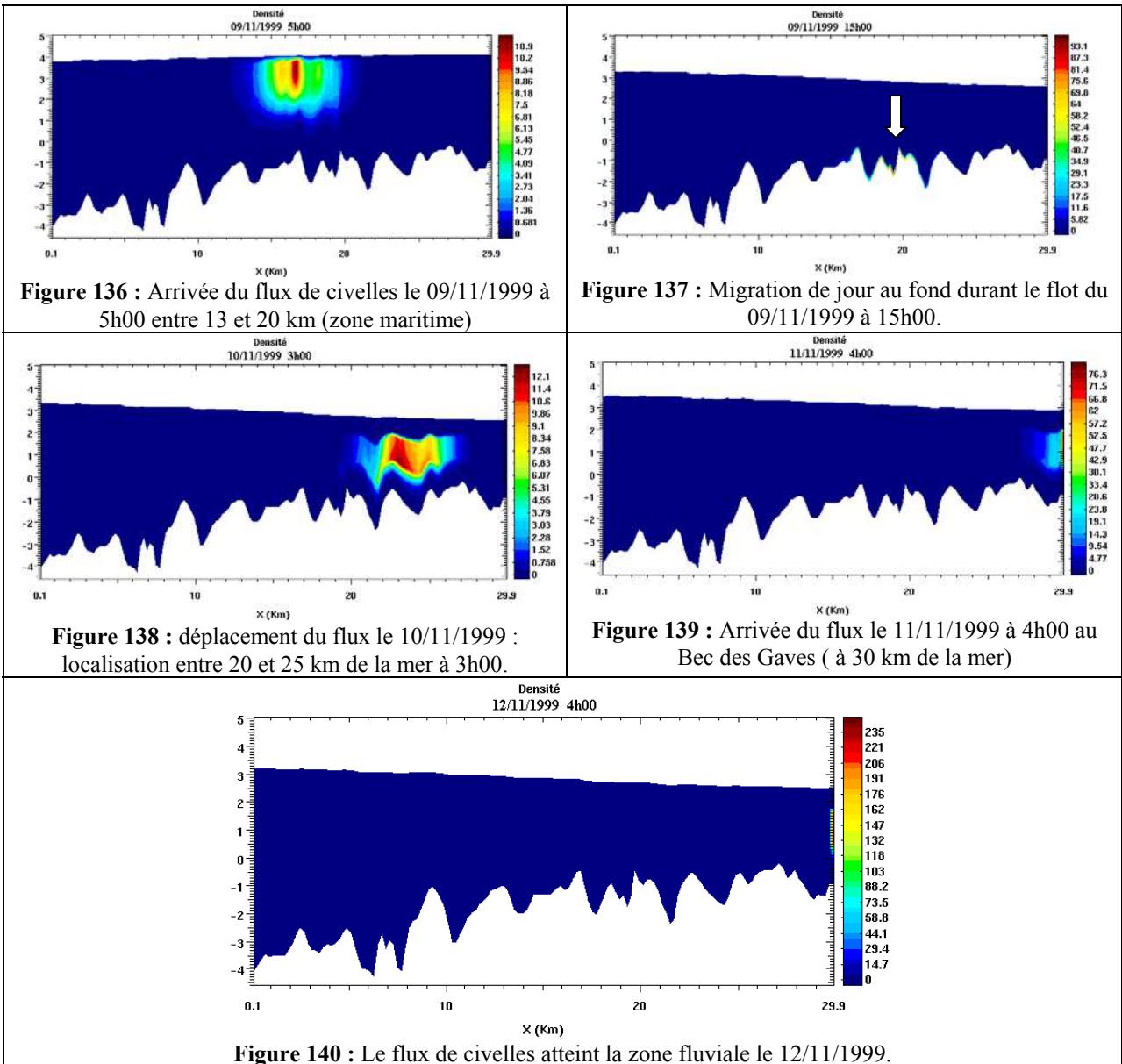
La date de départ a été fixée le 08/11/1999 pour faire coïncider l'arrivée du flux le 09/11/1999 en zone maritime avec le pic de captures observé aux tamis poussés.

Les conditions hydrologiques entre le 09/11 et le 12/11 sont reportées dans le tableau 70.

Tableau 70 : conditions hydrologiques entre le 09/11/1999 et le 12/11/1999.

date	Heure de flot	coefficient	Débit ($m^3.s^{-1}$)	Vitesse courant estimée ($m.s^{-1}$)
Du 08/11 au 09/11	BM : 22h43 - PM : 4h57	86	140	0,5
09/11	BM : 10h57 - PM : 17h15	85	140	
Du 09/11 au 10/11	BM : 23h14 - PM : 5h29	83	145	0,5
10/11	BM : 11h30 - PM : 17h46	80	145	
Du 10/11 au 11/11	BM : 23h44 - PM : 6h00	78	137	0,5
11/11	BM : 11h30 - PM : 18h17	74	137	
12/11	BM : 00h15 - PM : 6h33 BM : 12h36 - PM : 18h50	70 66	129 129	0,4

Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec migration près du fond durant le jour



En démarrant la simulation le 08/11/1999 et en imposant une migration diurne au fond durant le flot, le flux de civelles atteint la zone maritime le 09/11/1999. Il est situé en surface, entre 13 et 20 km de la mer à 5h00 (figure 136). Dans la figure 137, on visualise la migration près du fond lors du flot de jour le 09/11. Les civelles sont alors localisées entre 15 et 22 km. Il faut attendre le flot du 10/11 vers 3h00 pour que les civelles dépassent le pont d'Urt situé à 22 km (figure 138).

Les civelles sont situées en pleine eau. Le 11/11/1999 (figure 139) les civelles atteignent et dépassent le Bec des Gaves (distance de l'embouchure : plus de 30 km) lors de la marée du matin (vers 4h00). On peut supposer que les civelles arrivent en zone fluviale le 12/11/1999 (figure 140).

Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec enfouissement des civelles le jour

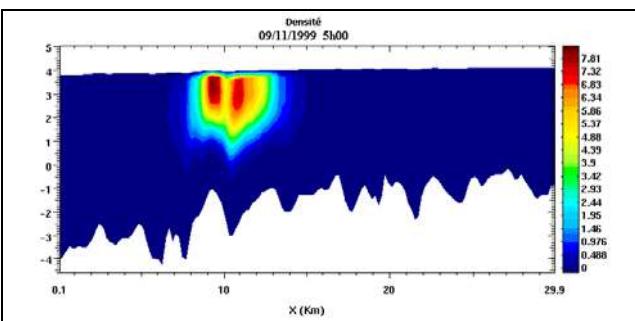


Figure 141 : Arrivée du flux de civelles le 09/11/1999 à 5h00 entre 8 et 13 km (zone maritime) ; localisation en surface.

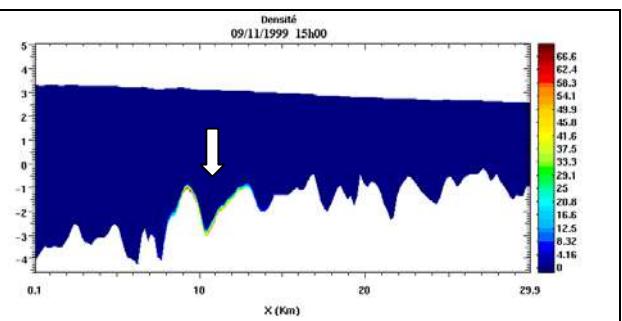


Figure 142 : Blocage des civelles sur le fond lors du flux du 09/11/1999 à 15h00

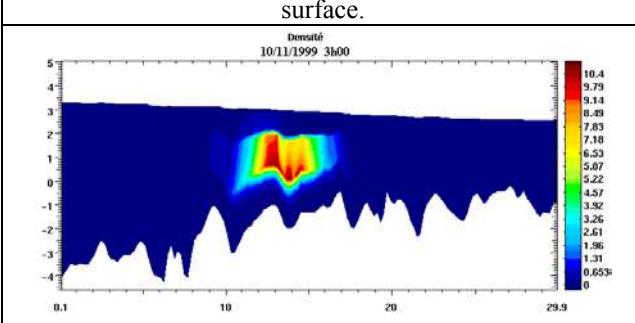


Figure 143 : Présence du flux de civelles le 10/11/1999 à 3h00 entre 10 et 15 km (zone maritime) en pleine eau

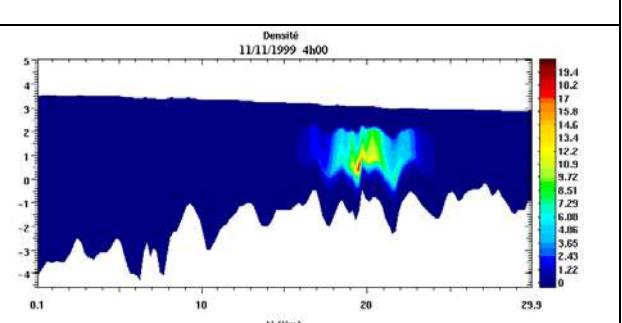


Figure 144 : localisation du flux de civelles dans la colonne d'eau entre 17 et 22 km (zone maritime) le 11/11/1999 à 4h00

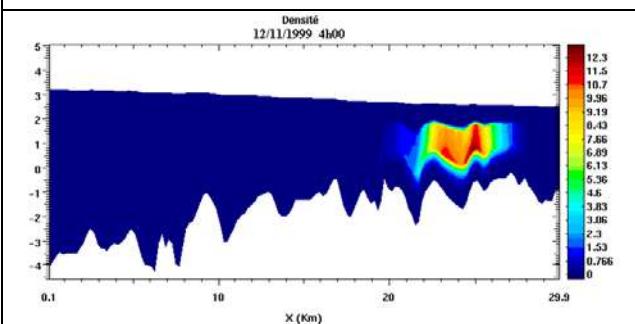


Figure 145 : Localisation du flux de civelles le 12/11/1999 à 4h00 entre 20 et 25 km

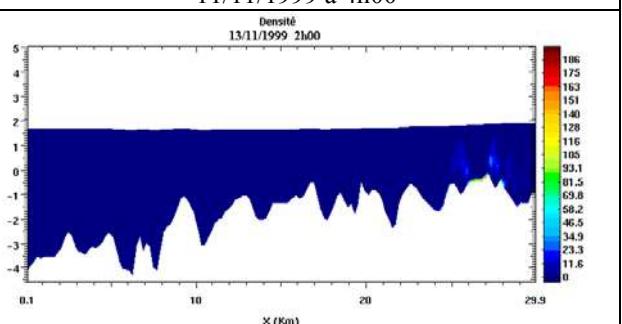


Figure 146 : Reprise de la migration lors du flux le 13/11/1999 à 2h00 - Le flux n'a pas encore atteint le Bec des Gaves situé à 30 km.

Si l'on envisage l'enfouissement des civelles le jour durant le flot, la remontée des civelles est forcément plus lente. Le flux de civelles arrive en zone maritime le 09/11/1999 entre 8 et 13 km à 5h00 (figure 141). Le flux est présent en surface. Lors du flot suivant (entre 11h et 17h) les civelles sont bloquées au fond entre 8 et 13 km (figure 142). Lors du flot du 10/11 (entre 23h15 et 5h30), le flux est situé entre 10 et 17 km et se trouve en pleine eau (figure 143). Le 12/11/1999 à 4h00, on retrouve le flux entre 20 et 26 km localisé en pleine eau (figure 145). Ce même flux n'atteint pas encore le Bec des Gaves lors de la marée du 13/11/1999 à 2h00, ce qui laisse supposer qu'il serait en zone fluviale entre le 14/11/1999 et le 15/11/1999 (figure 146).

Simulation du 08/12/1999 au 12/12/1999

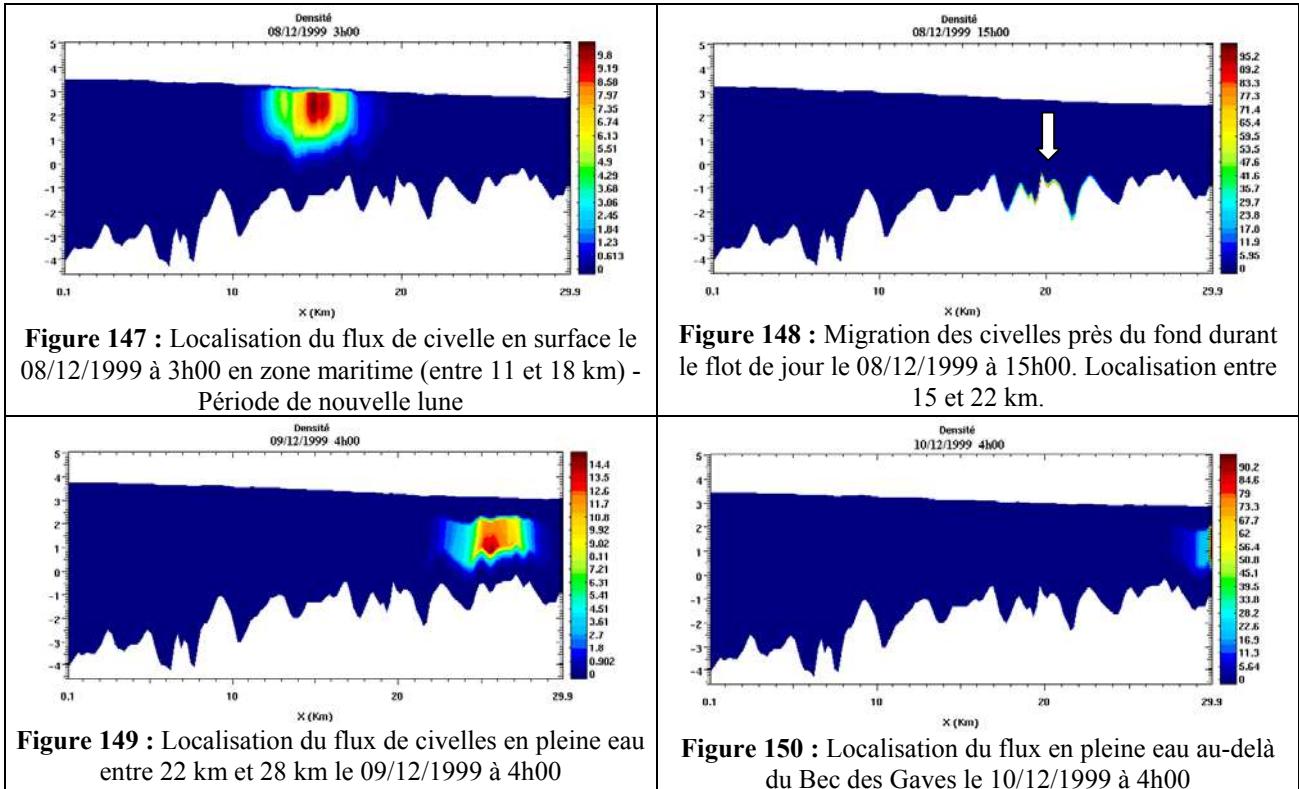
La date de départ de la simulation est le 07/12/1999 pour faire coïncider le flux de civelles avec l'observation du pic aux tamis poussés en zone maritime.

Les conditions hydrologiques durant cette période sont reportées dans le tableau 71. Nous sommes en période de nouvelle lune.

Tableau 71 : Conditions hydrodynamiques entre le 08/12/1999 et le 12/12/1999

date	Heure de flot	coefficient	Débit ($m^3.s^{-1}$)	Vitesse courant estimée ($m.s^{-1}$)
Du 07/12 au 08/12	BM : 22h20 - PM : 4h37	78	152 - 138,7	0,41
08/12	BM : 10h40 - PM : 16h57	79	138,7	
Du 08/12 au 09/12	BM : 22h52 - PM : 5h10	79	138,7 - 142,3	0,46
09/12	BM : 11h13 - PM : 17h29	78	142,3	
Du 09/12 au 10/12	BM : 23h23 - PM : 5h43	77	142,3 - 322,3	0,4
10/12	BM : 11h46 - PM : 18h00	75	322,3	
Du 10/12 au 11/12	BM : 23h55 - PM : 6h16	73	322,3 - 439	0,31
11/12	BM : 11h46 - PM : 18h33	71	439	

Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec migration près du fond durant le jour



En démarrant la simulation le 07/12 avec l'hypothèse d'une migration diurne près du fond, le flux de civelle se trouve en zone maritime entre 11 et 18 km le 8/12 à 3h00. La localisation du flux en surface s'explique par des conditions de lune (nouvelle lune) favorables à sa dispersion dans la colonne d'eau (figure 147). Dans la figure 148, on visualise la migration par le fond durant la marée montante de jour le 08/12 à 15h00. Le flux est situé entre 15 et 22 km. Lors de la marée montante le 09/12 à 4h00 (figure 149), le flux est situé en pleine eau et localisé entre 22 et 28 km. Il dépasse le Bec des Gaves le 10/12 à 4h00 (figure 150).

Simulation du déplacement d'un flux de civelles avec enfouissement des civelles le jour

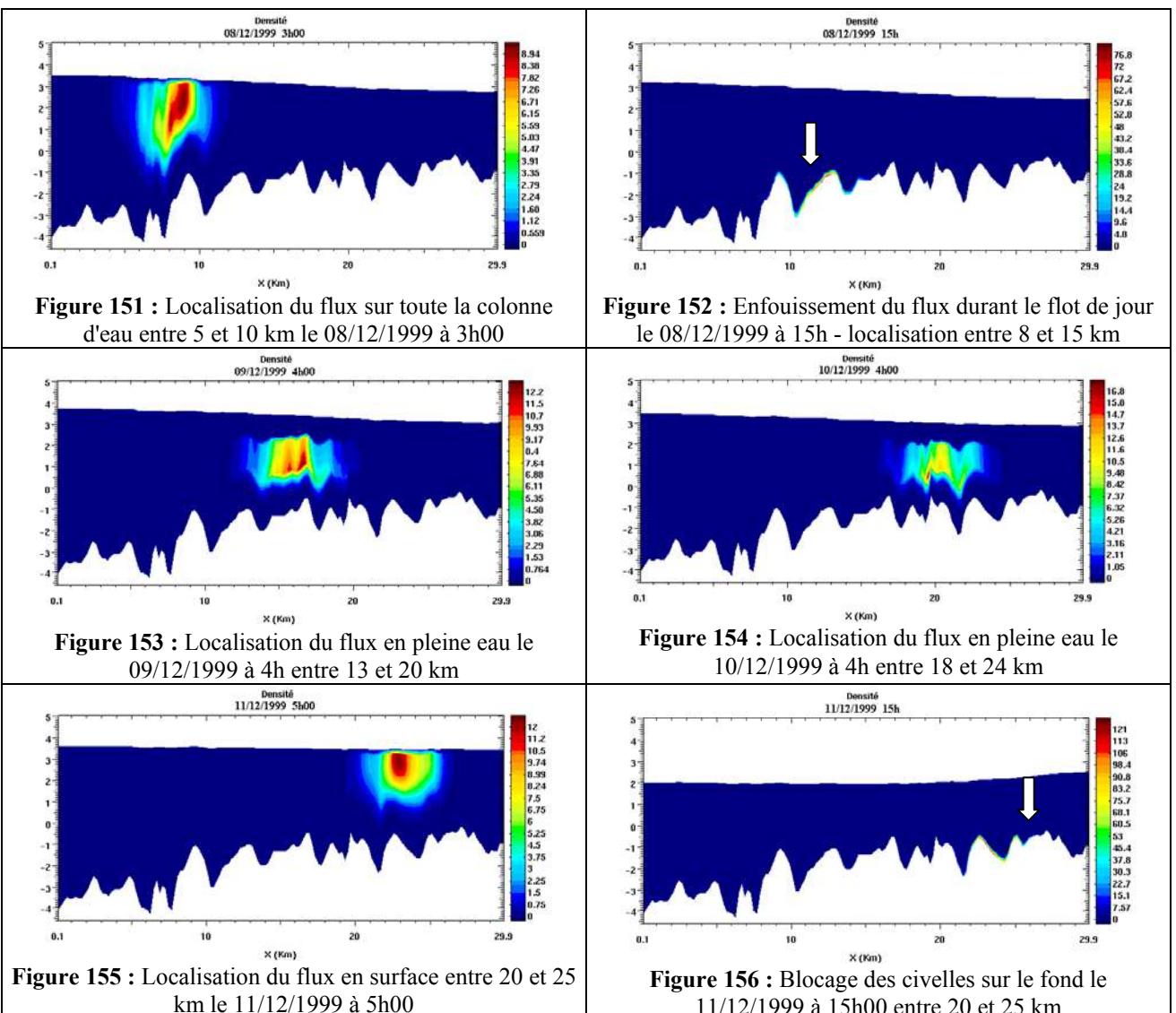


Figure 151 : Localisation du flux sur toute la colonne d'eau entre 5 et 10 km le 08/12/1999 à 3h00

Figure 152 : Enfouissement du flux durant le flot de jour le 08/12/1999 à 15h - localisation entre 8 et 15 km

Figure 153 : Localisation du flux en pleine eau le 09/12/1999 à 4h00 entre 13 et 20 km

Figure 154 : Localisation du flux en pleine eau le 10/12/1999 à 4h entre 18 et 24 km

Figure 155 : Localisation du flux en surface entre 20 et 25 km le 11/12/1999 à 5h00

Figure 156 : Blocage des civelles sur le fond le 11/12/1999 à 15h00 entre 20 et 25 km

Avec l'hypothèse d'un enfouissement des civelles au fond durant le flot de jour, le flux de civelles est situé entre 5 et 10 km le 08/12/1999 à 3h00 (figure 151). Il est présent en surface et dispersé dans la colonne d'eau. Lors du flot suivant à 15h00, le flux se trouve bloqué au fond (figure 152). Lors du flot de nuit le 09/12/1999 à 4h00, les civelles sont localisées entre 13 et 20 km et situées en pleine eau. Elles ne sont pas accessibles en surface (figure 153). Le 10/12/1999 à 4h00, le flux arrive à 20 km et se trouve en pleine eau (figure 154). Lors du flot du 11/12/1999 à 5h00, le flux de civelles est situé entre 20 et 25 km et présent en surface (figure 155).

On visualise lors du flot de jour le 11/12/1999 à 15h00, le blocage des civelles près du fond (figure 156). Les civelles n'ont toujours pas atteint le Bec des Gaves.

5.4.3. Conclusion

Vitesse de migration de la civelle en estuaire

Pour la période du 09/11/1999 au 12/11/1999, en partant de l'hypothèse que les civelles migrent près du fond le jour durant le flot (figures 136 à 140), le modèle estime, pour des conditions hydrodynamiques moyennes (vitesse moyenne de courant estimé à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$) que les civelles pourraient remonter l'estuaire (distance de 20 km environ) en 2 ou 3 jours. Le modèle prévoit un temps de remontée identique à celui estimé par l'analyse des captures de la pêche professionnelle. Si les civelles adoptent un comportement d'enfouissement le jour durant le flot, la montée s'effectue à un rythme plus lent (figures 141 à 146). Le temps de remontée par le modèle est estimé à 5 voire 6 jours pour atteindre la zone fluviale ce qui ne semble pas cohérent avec les observations effectuées à partir de l'analyse du déplacement des pics de captures.

Pour la période du 08/12/1999 au 10/12/1999, avec l'hypothèse d'une migration de jour près du fond, le modèle prévoit, pour des vitesses de courant estimées à $0,4 \text{ m.s}^{-1}$, un temps de remontée de 2 voire 3 jours pour atteindre la zone fluviale (figures 147 à 150). Avec l'hypothèse d'un comportement d'enfouissement le jour, les civelles n'ont toujours pas atteint le Bec des Gaves le 11/12/1999. Elles dépasseraient le Bec des Gaves le 12/12 et arriveraient en zone fluviale le 13/12. Le temps de remontée par le modèle est estimé à 5 jours (figures 151 à 156). Si l'on considère que le pic de capture observé le 10/12 en zone fluviale provient du même flux capturé en zone maritime le 08/12, les civelles remonteraient l'estuaire en 2 jours à un rythme qui ne peut pas être obtenu avec un enfouissement diurne.

De nombreux travaux ont étudié le comportement migratoire de la civelle en estuaire (Creutzberg, 1961 ; McCleave & Kleckner, 1982 ; Sheldon & McCleave, 1985). Ce comportement est de se maintenir dans la colonne d'eau à marée montante puis de garder la position par la nage près du fond ou de s'enfoncer dans le substrat à marée descendante. D'autres études montrent que ce schéma comportemental pourrait être contrôlé par d'autres facteurs comme l'odorat qui intervient dans le mécanisme du "Homing" des salmonidés migrants (Saglio 1993), les champs électriques ou une horloge biologique (McCleave & Kleckner, 1982 ; Creutzberg 1961). La variation de salinité est également avancée par certains auteurs comme un attractant possible (Fontaine et Callamand 1941), mais mis en doute par d'autres (Creutzberg, 1961). L'anguille possède des capacités d'adaptation très rapides à ces variations de salinité et réagit par des modifications de son activité enzymatique et donc par des modifications importantes de son métabolisme (Boeuf, 1987).

McCleave et Kleckner (1982) ont estimé que les civelles pourraient remonter l'estuaire sur une distance de 0,8 à 4,2 km par nuit à l'aide du transport de la marée.

Les travaux de Creutzberg (1961) en Hollande dans l'estuaire du Wadden Sea montrent que les civelles continuent leur migration durant le jour. Les captures de civelles durant le flot de jour sont importantes en profondeur (profondeur 8 m sur des fonds de 10 à 20 m) et aucune ou peu de civelles sont capturées en surface. Sur

l'Adour, la migration diurne des civelles reste à valider par des pêches expérimentales de jour près du fond.

Barbin & Krueger (1994) ont mesuré, en chambre expérimentale, les capacités natatoires des civelles d'*A. rostrata*, récoltées en estuaire, face à des vitesses de courant et à la présence d'un substrat. Pour progresser vers l'amont, un plus grand nombre de civelles ont utilisé la couche de fond, adjacente au substrat, plutôt que la colonne d'eau. Creutzberg (1961) a montré en laboratoire que les civelles manifestaient une rhéotaxie positive pour des courants de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, mais pour des courants de jusant supérieurs à $0,36 \text{ m.s}^{-1}$, elles nagent près du fond ou bien s'enfouissent. La nage près du fond est observée lorsque le fond est constitué de sable. L'enfouissement est préféré si le substrat est composé de graviers.

Limites du modèle comportemental

Le modèle comportemental simule sur une zone qui s'étend de l'embouchure jusqu'au Bec des Gaves situé à 30 km. Pour pouvoir suivre l'évolution des flux de civelles dans la zone fluviale, il reste à introduire la confluence Adour - Gaves réunis et à intégrer la bathymétrie.

Le modèle utilise le modèle hydrodynamique 1D pour simuler la propagation de la marée dynamique. Il ne prend donc pas en compte la géométrie du fleuve, ni la présence des îles.

La modélisation présentée dans cette étude intègre uniquement des facteurs physiques de l'environnement et part de l'hypothèse que ces facteurs jouent un rôle prépondérant dans la migration des individus vers l'amont. Il n'intègre pas les paramètres biologiques propres à l'animal.

Intérêt pratique du modèle

Sous ces hypothèses réductrices, mais plausibles, le modèle permet de tester si la civelle migre dans ce type d'estuaire peu turbide de jour lorsque la marée dynamique progresse vers l'amont. En effet, l'estimation de la vitesse de migration des civelles par le modèle coïncide avec celle des captures si l'on suppose une migration près du fond durant le flot de jour (traversée de l'estuaire en 2 ou 3 jours). Elle ne l'est plus si l'on considère l'enfouissement (traversée de l'estuaire en 5 ou 6 jours). L'hypothèse d'une migration de jour est confortée par des messages convergents issus de l'analyse des carnets de pêche et des résultats de la simulation du modèle comportemental. Toutefois, les simulations appliquées à la civelle restent à valider par des expériences *in situ* de jour en profondeur. Les premiers éléments que nous possédons sur les captures aux tamis ancrés montrent que, sous certaines conditions, des civelles peuvent être capturées près du fond avant la tombée de la nuit.

6. Estimation des biomasses journalières et modélisation stochastique des densités

6.1. Estimations journalières de la biomasse de civelles dans l'estuaire de l'Adour

Le but est d'estimer la quantité de civelles migrant dans la veine d'eau pendant un cycle de marée montante nocturne uniquement. L'extrapolation journalière est fondée sur l'hypothèse que la migration diurne est inexiste ou résiduelle. Le § 5.4 sur la simulation comportementale montre que cela n'est pas forcément le cas. Dans ces conditions, les estimations que nous fournissons sur l'abondance d'un flux en zone maritime et qui transite par une station fixe d'échantillonnage seront des estimations "à minima".

Une échelle de variation des estimations sera proposée, par le calcul d'intervalles de confiance de ces estimations.

La démarche présentée ci-dessous se fonde sur différentes hypothèses simplificatrices de travail que nous sommes contraints de poser au vu de l'état des connaissances comportementales à l'échelle locale. La plus grosse difficulté de cette étude est de gérer l'aspect spatio-temporel du phénomène. En effet, les civelles se déplacent vers l'amont en occupant toute la largeur du fleuve durant une certaine période de temps. Ces deux paramètres sont difficiles à contrôler simultanément et posent séparément :

- La gestion du temps : le fait de se déplacer d'un transect à un autre en interrompant le chalutage génère des "périodes d'ombre" durant lesquelles la migration se poursuit, mais sans aucune idée sur ses modalités. Nous sommes donc contraints de faire des hypothèses de travail, autrement dit des "extrapolations" pour pouvoir combler ces vides temporels.
- La gestion du spatial : l'allure même des prélèvements contraints par les moyens techniques ne nous permet pas de savoir ce qui se passe en dehors des coups de tamis. Une infime partie du fleuve est échantillonnée et nous devons là aussi faire des hypothèses de travail sur la répartition des individus dans l'espace de migration.

Description de la méthode d'estimation :

La première étape est l'identification des paramètres entrant dans la variabilité de la biomasse et de ceux liés à la méthode de calcul des estimations. Nous avons identifié deux catégories de paramètres :

- Paramètres liés à la technique d'échantillonnage et à des facteurs extérieurs en un point d'échantillonnage comme : le courant de flot qui conditionne le transport des civelles de l'aval vers l'amont ; la biomasse récoltée qui est fonction de l'efficacité du tamis et la densité de civelles capturées calculée à partir du courant et de cette biomasse.
- Paramètres liés à la méthode de calcul choisie comme : les hypothèses d'extrapolation spatiale dans la section du fleuve et d'extrapolation temporelle du début à la fin du flot.

Ainsi, d'éventuelles erreurs de mesure sur les valeurs de courant *in situ* se répercutent sur le calcul des densités de civelles et donc sur la biomasse. Tous les modèles de répartition spatiale et d'extrapolation temporelle établis *a priori* influent de même sur son calcul. D'où la nécessité d'évaluer et de quantifier la variabilité de ces paramètres pour ensuite en cerner l'impact sur les estimations de biomasse.

Une première approche a été effectuée¹. Suite à ce travail, des remarques ont été formulées :

Concernant le modèle densité / courant :

- La vitesse du courant contient un aléa (cf. modèle sinusoïdal de courant) qui n'est pas pris en compte directement dans les calculs, mais qui se retrouve dans le terme d'erreur du modèle log-log.
- La variance du terme d'erreur est supposée la même ($= 0,58^2$) quelle que soit la journée, la position (et même la campagne) afin de stabiliser son estimation. En fait, les estimations de cette variance étaient la plupart du temps assez concentrées autour de la valeur adoptée bien que le terme d'erreur ait été estimé distinctement en chaque point, pour chaque jour et sur chaque campagne.
- La forte variabilité de la densité mesurée occulte le lien densité / vitesse du courant, vu le peu d'observations. Ce modèle log-log était peu, voire pas, explicatif. Par conservatisme, nous l'avons utilisé, même lorsqu'il n'était pas significatif, ce qui ne réduit pas marginalement la variance estimée du terme d'erreur par rapport au modèle d'ignorance totale ($\log(\text{densité}) = \text{constante}$). Ceci a donc peu d'incidence sur l'estimation des termes d'erreur dans le cas où il n'y a pas d'hétéroscédasticité flagrante pour ce terme.

¹ Les résultats des estimations sont présentés dans le rapport DGXIV "Historique des captures de civelles, intensité actuelle de leur exploitation, variation de leur capturabilité par la pêche professionnelle maritime et indices de colonisation sur le bassin versant de l'Adour" : Modélisation stochastique et estimation des flux de civelles, 54-70. Prouzet (coord.) 2002.

Concernant le modèle spatial :

- Ce modèle n'intervient que de façon agrégée sur l'ensemble du flot et n'est pas un modèle de répartition de la densité instantanée. Les différents gradients considérés sont assez contrastés, mais aboutissent à des estimations de biomasse relativement robustes. Une limite à cette étude tient au fait que pratiquement la moitié inférieure de la tranche d'eau doit faire l'objet d'une extrapolation et que la couche de fond est occultée des calculs. Ceci entraîne très certainement un biais dans les résultats qui correspond en fait à une sous-estimation de la quantité de civelles calculées.
- Nous avons également négligé les variations de hauteurs d'eau durant le flot et d'une journée à l'autre pour ne conserver qu'une allure moyenne de la tranche d'eau.

Concernant le calcul de la biomasse :

- La densité variable au cours du flot a été remplacée par sa moyenne. On peut penser que cette approximation est secondaire par rapport aux termes d'incertitude utilisés.
- Pour ce qui est du calcul de la variance, nous avons négligé la covariance entre la densité et la vitesse du courant (plus précisément son amplitude et la durée du flot). Ici encore, le faible lien entre la densité et la vitesse conforte cette hypothèse (d'autant plus que nous fondons les estimations sur la densité moyenne au cours du flot).

D'où une reprise des calculs des estimations de biomasse en tenant compte des remarques précédentes, en utilisant :

- La variance du terme d'erreur en chaque point, pour chaque jour et sur chaque campagne (point 2).
- Les valeurs de densité variables au cours du flot (point 6) et nous avons intégré la covariance entre densité et vitesse du courant (point 7) ;

Les informations fournies par le modèle hydrodynamique et notamment sur les hauteurs d'eau (points 4 et 5) seront prises en compte mais dans une étude ultérieure.

6.1.1. Méthode d'estimation utilisée et étude de la variabilité de ces estimations

Etude du courant : évaluation de l'erreur de mesure de la vitesse du flot

Ici, l'objectif est double :

- D'une part évaluer et combler le manque d'information dû à une durée de présence sur le site d'échantillonnage en général moins longue que la période de marée montante, favorable à la migration des civelles ;
- D'autre part, corriger les erreurs de mesure de la vitesse du courant qui se répercutent dans les calculs de biomasse.

D'où l'élaboration d'un modèle stochastique de variation de la vitesse du flot en supposant que :

- Le courant est le même dans toute la colonne d'eau en un transect fixé ;
- Le courant en ce point évolue de façon sinusoïdale au cours du temps ;
- Sur les 3 transects (RD, M et RG), le début et la fin du flot coïncident, la différence dans les modèles d'évolution du courant n'étant qu'une question d'intensité de la vitesse liée par exemple à des frottements différents ;
- Le courant est de signe positif au moment du flot, c'est-à-dire qu'il est un vecteur du déplacement des civelles.

Pour un jour donné, la vitesse du courant de flot v_i au niveau du i-ème transect au point t_{ik} est modélisée par une équation de la forme :

$$v_i(t_{ik}) = c_i \sin\left(\frac{\pi}{a}(t_{ik} + b)\right) + \varepsilon_{ik}^*,$$

où, i est un indice qui désigne la position en largeur ($i=1=RD$, $i=2=M$ et $i=3=RG$) et k est l'indice de passage sur les 3 positions en largeur un jour donnée ($k=1, \dots, n$ avec n en général identique pour les 3 positions et égal à 8). Les différents paramètres à estimer sont les suivants :

a représente la durée du flot,
 c_i représente l'intensité maximale de la vitesse de flot durant cette période (en m/s),
 b représente l'heure de début du flot par rapport au début de l'échantillonnage ($b>0$ signifiant que le début des pêches est survenu après le début de la marée montante d'où un manque d'information),
 ε^* est l'erreur de mesure entre les données de terrain et le modèle sinusoïdal supposée de moyenne nulle et de variance finie indépendante de i .

Un tel modèle permet de calculer, de façon continue, à chaque instant t la vitesse du courant, de déterminer le début et la fin de la marée montante et d'évaluer l'importance de l'erreur de mesure sur la vitesse du courant.

Etude de la variation de la densité de civelles au cours du flot : évaluation de l'incertitude sur cette grandeur

L'objectif est d'établir un modèle stochastique de variation de la densité (en g.100m⁻³) de civelles pour deux raisons :

- D'une part, nous avons besoin d'extrapoler les mesures de densités faites à certains instants sur un intervalle de temps continu correspondant à la période de flot ;
- D'autre part, il devrait permettre d'obtenir un terme de variance utile pour construire ensuite des intervalles de confiance des estimations de biomasse.

L'élaboration de ce modèle se fait en plusieurs étapes :

- **Etape 1 :** recalculer en chaque point d'espace et de temps les densités en utilisant les valeurs de vitesse de courant de flot corrigées des erreurs de mesure à l'aide du modèle de courant établi à l'étape précédente et la vitesse du bateau (dont on suppose l'erreur de mesure négligeable) de la façon suivante :

$$\text{densité} = \frac{\text{Poids}}{(\text{vitesse}_\text{bateau} + \text{vitesse}_\text{courant_corrigée}) * S * \text{temps}} * 100,$$

où S est la surface d'ouverture de l'engin de prélèvement ($S=0.33m^2$) et temps est la durée de chalutage ($\text{temps}=300 \text{ sec}$)

- **Etape 2 :** établir un modèle de variation des densités en fonction du courant de flot modélisé permettant de voir la relation entre ces deux variables. Les problèmes d'hétérosécédasticité entre ces deux variables amènent à considérer leur transformation logarithmique. Pour modéliser la dépendance entre ces deux variables (densités fond et surface recalculées d_{ij} et vitesse du courant modélisée v_i), nous utilisons ensuite le modèle linéaire suivant :

$$\ln[d_{sk}] = \alpha_s \ln[v_{sk}] + \beta_s + \varepsilon_{sk}^{**},$$

s est un indice qui désigne la position en largeur ($s=1=\text{RD}$, $s=2=\text{M}$, $s=3=\text{RG}$)
 k est un indice qui désigne la position dans la colonne d'eau ($k=1=\text{surface}$, $k=2=\text{profondeur}$)
 t représente le temps
 ε_{sk}^{**} est l'erreur de modèle

Estimations journalières de la biomasse et évaluation de la variabilité de ces estimations

- Estimation de la biomasse à une position donnée :

Sous les hypothèses de travail précédentes, la formule utilisée permettant de calculer la biomasse de civelles passées à une position s donnée, $s=1,\dots,6$, lors du flot est la suivante :

$$B_s = \int_{t_{\text{début}}}^{t_{\text{fin}}} d_s(t) v_s(t) dt,$$

ce qui se traduit en termes d'estimation :

$$\hat{B}_s = \int_{-\hat{b}}^{\hat{a}-\hat{b}} \hat{d}_s(t) \hat{v}_s(t) dt,$$

où, \hat{a} , \hat{b} et \hat{v}_s sont des estimations obtenues à l'aide du modèle de courant et \hat{d}_s à l'aide du modèle de densité établis aux étapes précédentes. Un rapide calcul nous permet d'arriver finalement à la formule suivante :

$$\hat{B}_s = \int_{-\hat{b}}^{\hat{a}-\hat{b}} \hat{d}_s(t) \hat{v}_s(t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot e^{\hat{\beta}_s} \cdot \hat{c}_s^{\hat{\alpha}_s+1} \cdot \hat{a} \cdot \int_0^\pi (\sin u)^{\hat{\alpha}_s+1} du,$$

où, les paramètres $\hat{\cdot}$ sont les estimations des paramètres des différents modèles élaborés aux étapes précédentes. On obtient ainsi une estimation de la biomasse durant le flot par unité de surface.

Les qualités de cet estimateur sont évaluées à travers l'étude de son espérance et de sa variance et permettent ainsi d'en déduire facilement les qualités de l'estimateur de la biomasse totale \hat{B} de B .

On montre notamment que :

$$\begin{cases} E(\hat{B}_s) \approx B_s \\ V(\hat{B}_s) \approx V(\hat{\beta}_s) I_1^2 + V(\hat{c}_s) I_2^2 + V(\hat{a}) I_3^2 + V(\hat{\alpha}_s) I_4^2 + 2 \text{cov}(\hat{\alpha}_s, \hat{\beta}_s) I_1 I_4 + 2 \text{cov}(\hat{a}, \hat{c}_s) I_2 I_3 \end{cases}$$

Avec,



$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{1}{\pi} e^{\hat{\beta}_s} \hat{c}_s^{\hat{\alpha}_s+1} \hat{a} \int_0^\pi \sin^{\hat{\alpha}_s+1}(t) dt & = \hat{B}_s \\
 I_2 &= \frac{\hat{\alpha}_s+1}{\hat{c}_s} \hat{B}_s \\
 I_3 &= \frac{1}{\hat{a}} \hat{B}_s \\
 I_4 &= \hat{B}_s \log(\hat{c}_s) + \frac{1}{\pi} e^{\hat{\beta}_s} \hat{c}_s^{\hat{\alpha}_s+1} \hat{a} \int_0^\pi \log(\sin(t)) \sin^{\hat{\alpha}_s+1}(t) dt
 \end{aligned}$$

Les intégrales présentées ci-dessus ont été calculées numériquement.

- Estimation de biomasse sur l'ensemble de la tranche d'eau :

La tranche d'eau a été découpée en 6 parts variables suivant différents découpages (figure 157). Nous avons considéré, pour simplifier les calculs, une allure moyenne de la tranche d'eau au cours d'une sortie et nous n'avons pas pris en compte les variations de hauteur d'eau au cours du temps.

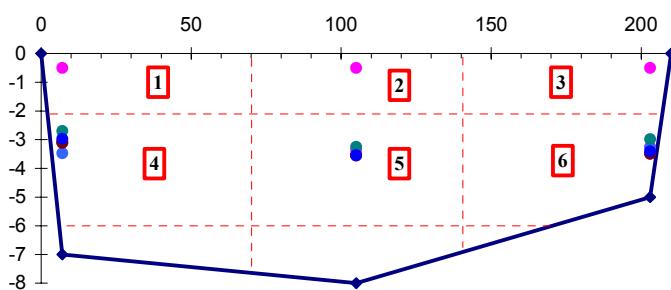


Figure 157 : Découpage (----) de la tranche d'eau en 6 zones de calcul et points de prélèvements ●.

De plus, nous nous plaçons toujours dans la situation où la couche de fond non numérotée est occultée des calculs.

Dans les applications numériques qui vont suivre 12 différents découpages de la tranche d'eau ont été envisagés qui correspondent chacun à un modèle de dispersion des civelles dans la tranche d'eau et à des gradients de civelles particuliers en largeur comme en profondeur.

Chaque estimation \hat{B}_s obtenue à l'étape précédente, a été étendue à sa zone respective en multipliant par la surface de la zone correspondante. Pour un découpage donné j , nous obtenons ainsi :

$$\begin{aligned}\hat{B}_j &= \sum_{s=1}^6 \hat{B}_s S_{sj} \\ s^2(\hat{B}_j) &= \sum_{s=1}^6 s^2(\hat{B}_s) S_{sj}^2\end{aligned}$$

Finalement, pour un jour donné, la formule permettant d'obtenir la biomasse totale passée durant un cycle de flot et sa variabilité est la suivante :

$$\begin{aligned}\hat{B} &= \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \hat{B}_j \\ s^2(\hat{B}) &= \frac{1}{12} \sum_{s=1}^{12} s^2(\hat{B}_s) + \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} (\hat{B}_j - \hat{B})^2.\end{aligned}$$

Un intervalle de confiance à 95% pour la biomasse journalière B est donc obtenu par le calcul :

$$IC_{95\%}(B) = [\hat{B} - 2s(\hat{B}); \hat{B} + 2s(\hat{B})].$$

6.1.2. Résultats numériques : estimation de la quantité de civelles présentes et variabilité de ces estimations

Les résultats présentés ci-dessous font état des quantités de civelles estimées dans l'estuaire de l'Adour lors de différentes saisons de pêche ainsi que les intervalles de confiance à 95% des estimations proposées.

- **Estimations journalières pour la saison 1998/1999.**

Les estimations de biomasse de civelles sont exprimées en kg. Elles sont calculées uniquement pour les sorties expérimentales (tableau 72).

Tableau 72 : Estimations de biomasse de civelles (en kg) au cours de la saison 1998/1999 et bornes de l'intervalle de confiance à 95%.

Date	Estimation de biomasse	Min	Max
12-janv-99	135	0	385
14-janv-99	228	35	422
22-janv-99	124	61	187
26-janv-99	34	9	58
28-janv-99	35	0	75
03-févr-99	19	14	25
05-févr-99	49	30	68
09-févr-99	11	1	21
11-févr-99	60	30	91
17-févr-99	187	96	277
19-févr-99	256	178	333
03-mars-99	153	0	320
17-mars-99	209	98	320
19-mars-99	78	36	119

Pour la saison 1998/1999, les estimations fluctuent en moyenne entre 11 kg et 256 kg avec des valeurs maximales pouvant atteindre 400 kg.

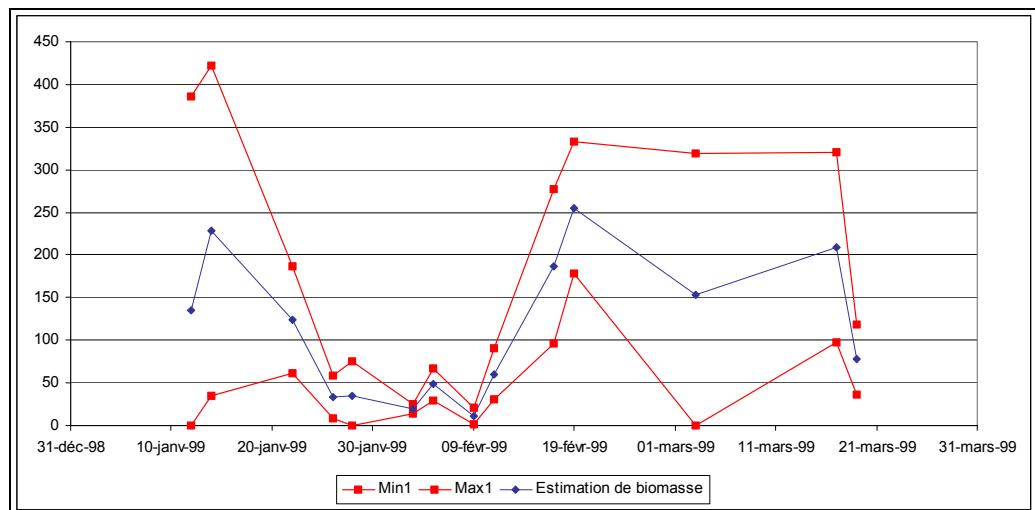


Figure 158 : Évolution des estimations de biomasse de civelles dans l'estuaire de l'Adour lors de la saison de migration 1998/1999.

Estimations journalières pour la saison 1999/2000.

Pour la saison 1999/2000, les biomasses estimées varient entre 89 kg et 1951 kg. Les plus fortes valeurs sont calculées pour les sorties du 9 décembre et du 1^{er} février (tableau 73).

Tableau 73 : Estimations de biomasse de civelles (en kg) au cours de la saison 1999/2000 et bornes de l'intervalle de confiance à 95%.

Date	Estimation de biomasse	Min	Max
09-déc-99	1421	782	2059
22-déc-99	645	264	1026
05-janv-00	387	182	592
07-janv-00	766	496	1035
08-janv-00	714	471	956
09-janv-00	921	638	1205
12-janv-00	89	36	142
01-févr-00	1951	775	3127
08-févr-00	421	161	682

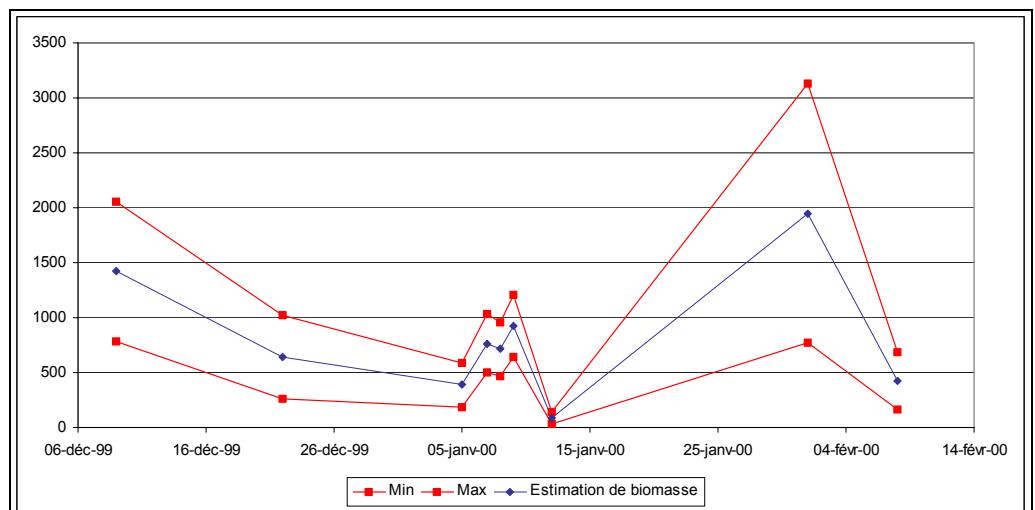


Figure 159 : Évolution des estimations de biomasse de civelles dans l'estuaire de l'Adour lors de la saison de migration 1999/2000.

Estimations journalières pour la saison 2000/2001.

Pour la saison 2000/2001, les biomasses estimées fluctuent entre 12 kg et 379 kg. Cette saison est caractérisée par des quantités faibles de civelles (tableau 74).

Tableau 74 : Estimations de biomasse de civelles (en kg) au cours de la saison 2000/2001 et bornes de l'intervalle de confiance à 95 %

Date	Estimation de biomasse	Min	Max
14/12/2000	36	6	66
21/12/2000	129	62	196
03/01/2001	27	14	40
10/01/2001	379	0	1409
12/01/2001	40	20	59
17/01/2001	29	17	40
24/01/2001	89	0	194
26/01/2001	74	20	128
06/02/2001	88	0	407
20/02/2001	12	2	22

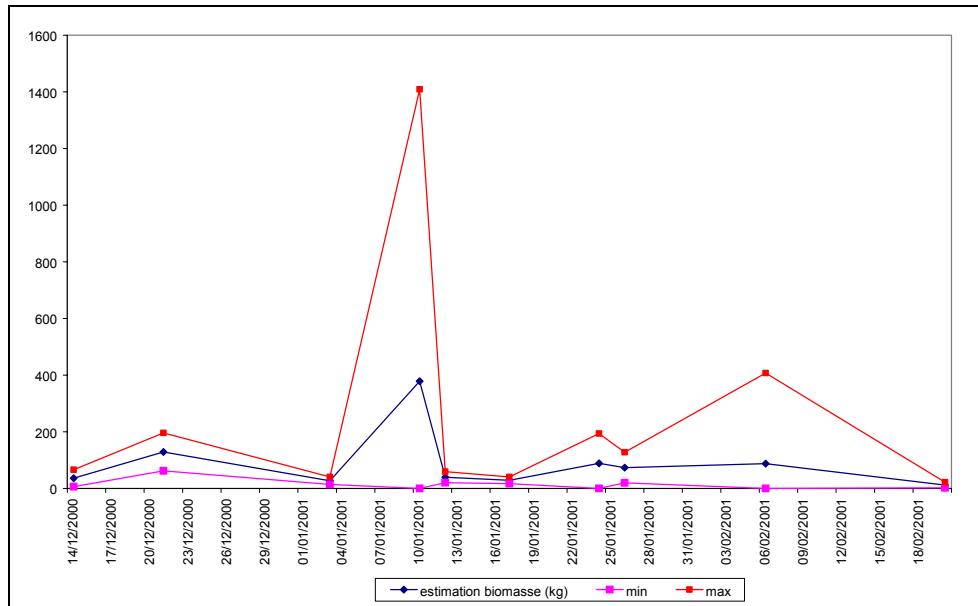


Figure 160 : Évolution des estimations de biomasse de civelles dans l'estuaire de l'Adour lors de la saison de migration 2000/2001.

6.2. Deuxième méthode d'estimation de la biomasse de civelles transitant dans l'estuaire de l'Adour durant le flot de marée – Modélisation stochastique du flux de civelles

La deuxième méthode proposée par l'INSAT (annexe 5) relie les mesures de concentrations en civelle (= densités) observées à la concentration locale initiale, *via* un modèle statistique obtenu par agrégation des concentrations locales, afin d'exprimer la biomasse d'un flux montant de civelles en fonction de cette concentration initiale.

Cette concentration locale initiale constitue la condition de bord du modèle de transport hydrodynamique d'un flux de civelles se présentant à l'estuaire. Dans ce cadre, elle peut être alors définie par un faible nombre de paramètres dont les estimateurs permettent de déduire ceux de la biomasse dont la variance est ensuite approchée par la "méthode Delta" à partir des covariances des estimateurs des paramètres de la concentration initiale locale.

Les estimations fournies par cette seconde méthode sont généralement du même ordre de grandeur que ceux fournis par la première méthode. L'écart type asymptotique n'excède généralement pas la biomasse estimée. Ceci constitue l'apport essentiel de la "méthode Delta".

Cette méthode est particulièrement sensible à la distribution initiale de la concentration qui est assumée de type gaussien.

L'exemple de la saison de pêche 1999/2000 et les calculs qui s'y réfèrent sont donnés en annexe 6.

6.3. Comparaison des estimations de biomasses obtenues par les deux méthodes proposées.

Nous prendrons comme exemple les estimations effectuées durant la saison de pêche 1999/2000. Pour ce qui concerne l'estimation de la biomasse fournie par la deuxième méthode nous prendrons comme valeur la biomasse totale qui est la somme des biomasses estimées en surface et au fond et qui sont répertoriées au tableau 1 de l'annexe 6.

Le tableau 74 donne les résultats du comparatif. De manière générale, nous pouvons voir que les ordres de grandeurs donnés par les 2 méthodes sont analogues. Un problème existe pour le 5 janvier en ce qui concerne l'estimation fournie par la seconde méthode et semble principalement dû à un mauvais ajustement des concentrations observées à un modèle de concentration initiale de type gaussien. Celle-ci est particulièrement sensible à la distribution initiale de cette concentration ainsi qu'il l'est mentionné au § 1.3. de l'annexe 5 (modélisation du problème posé) : "*la concentration $c(t,x,y,z)$ en tout instant t et en tout point (x,y,z) de l'estuaire est parfaitement déterminée par l'équation de transport et la donnée du flux entrant*

$\phi(x,y,z)=c(0,x,y,z)$ (condition initiale à $t = 0$ de l'équation de transport), les seuls paramètres du problème sont la fonction inconnue ϕ et les paramètres de diffusion".

Tableau 74 : Comparatif des estimations de biomasse données par les 2 méthodes.

Date	Biomasse (1 ^{ère} méthode) en kg			Biomasse (2 ^{ème} méthode) en kg		
	biomasse	Min	Max		biomasse	
9 décembre	1421 (199)*	782	2059		694	
22 décembre	645 (147)	264	1026		1249	
5 janvier	387 (190)	182	592		502	
7 janvier	766 (170)	496	1035		795	
8 janvier	714 (148)	471	956		132	
12 janvier	89 (26)	36	142		378	
1 février	1951 (501)	775	3127	91 (uniquement fond)		
8 février	421 (72)	161	682	81 (uniquement surface)		

*(écart-type) ; pour la deuxième méthode il n'existe pas de calcul global de l'écart type.

Tableau 75 : Détail des estimations de biomasses pour la deuxième méthode.

	Biomasses en profondeur				Biomasses en surface			
	Poids (kg)	Écart type	Max	Min	Poids (kg)	Écart type	Max	Min
09/12/99	660.6	91.8	752.4	568.9	32.9	31.4	64.3	1.5
22/12/99	249.2	24.7	273.9	224.5	999.5	171.3	1170.7	828.2
05/01/00	50.7	94.9	145.7	0.0	450.9	51.9	502.8	398.9
07/01/00	397.6	50.3	447.9	347.3	397.6	50.3	447.9	347.3
09/01/00	65.2	50.2	115.4	15.0	66.9	373.0	439.8	0.0
12/01/00	66.9	373.0	439.8	0.0	311.2	0.3	311.4	310.9
01/02/00	91.1	10.4	101.5	80.7				
08/02/00					80.8	22.4	103.2	58.4

La première méthode est très sensible au lien qui lie le modèle sinusoïdal de la vitesse (approximation du modèle hydrodynamique 1D) à la variation des densités. De cette adéquation découle la précision de l'estimateur. Les observations montrent que dans certains cas la variabilité des densités ne suivent pas celles des vitesses, en particulier, lorsque le flux global de civelles (formé de plusieurs groupes arrivés à des moments décalés à l'embouchure) est fractionné dans l'estuaire.

7. Extrapolation saisonnière de la biomasse à partir des données de captures des pêcheurs professionnels

7.1. Principe de l'approche analytique

L'objectif est de proposer une première approche qui vise à pouvoir "reconstruire" la courbe d'abondance sur l'ensemble d'une saison de pêche à partir des captures des pêcheurs professionnels et des variables environnementales.

L'hypothèse sous-jacente à cette démarche est que les captures sont un indicateur de la biomasse soumis à une certaine variabilité liée à la fluctuation des variables hydroclimatiques. Nous avons déjà vu que la courbe de captures totales effectuées par les pêcheurs professionnels maritimes et les estimations de biomasse proposées avaient une évolution chronologique de même tendance. Nous nous intéresserons donc de plus près à la quantification de la relation entre ces deux variables (BIOMASSE et CAPTURES TOTALES) en intégrant l'influence de certains facteurs hydroclimatiques connus (Bru, 1998 ; De Casamajor & al., 2000, Prouzet & al., 2002).

Une étude du lien entre les variables "Biomasse" et "captures" sera appréhendée à l'aide d'une régression linéaire simple sur les données brutes et sur les données transformées par $\ln()$ (pour éviter d'éventuels problèmes d'hétéroscédasticité entre ces deux variables). La qualité du lien entre les différentes variables sera discutée en fonction du coefficient de corrélation linéaire et de sa significativité.

L'étude du lien entre la biomasse et les variables environnementales se fera non pas avec la biomasse estimée en surface mais avec le pourcentage de biomasse en surface qui se calcule comme suit :

$$\% \text{ de bio en surface} = \frac{\text{biomasse estimée en surface}}{\text{biomasse totale estimée}}$$

Les variables explicatives, à savoir le coefficient de marée, la turbidité, la température de l'eau et le débit fluvial seront mis en relation avec le % de biomasse estimée en surface à l'aide d'un modèle linéaire généralisé avec les variables explicatives citées ci-dessus regroupées en classes.

En combinant les deux approches ci-dessus "Biomasse/captures" et "Biomasse/variables environnementales", nous pensons proposer une méthodologie qui permette d'obtenir une estimation de la biomasse totale et la variabilité de cette estimation pour des jours où les campagnes *in situ* n'ont pas eu lieu par la seule connaissance des captures des professionnels et des valeurs de conditions environnementales.

7.2. Estimation de l'abondance des civelles durant la saison de pêche : cadre conceptuel.

L'objectif est d'estimer le plus précisément possible la biomasse saisonnière qui remonte un estuaire soumis à la marée dynamique à partir d'un minimum d'observations effectuées avec des moyens expérimentaux et à partir de la connaissance de la pêcherie et des indicateurs de production générés par l'exercice du métier du "tamis poussé".

La figure 161 schématise l'approche proposée et montre comment il peut être tiré partie des connaissances collectées sur le comportement, sur les facteurs hydroclimatiques et sur l'intensité des captures.

Le point de départ de l'estimation saisonnière repose sur la connaissance journalière des captures de civelles effectuées en partie maritime de l'Adour par les marins pêcheurs utilisant le tamis poussé.

Ces captures constituent un indicateur relatif de la variabilité de l'abondance sous la condition principale que la capturabilité des civelles ne fluctue pas.

Ceci n'étant pas le cas, les travaux (partie droite de la figure 161) ont porté en premier lieu sur l'impact des facteurs hydroclimatiques sur la fluctuation de la capturabilité des civelles en estuaire. Cette variation est sous la dépendance de l'hydrodynamisme (schématisé par un modèle unidimensionnel, cf. contrat EC/DG FISH 99/023²), de la transparence de la colonne d'eau (modélisée par la relation débit-turbidité, cf. contrat IFREMER-UPPA 005535907³) et de la température (variable observée ou déduite de la température de l'air avec un effet retard) (cf. contrat EC/DG FISH 99/023). L'action conjointe de ces facteurs est visualisée par un simulateur comportemental qui permet de qualifier la capturabilité par rejeux de l'effet de séries hydroclimatiques sur le comportement de groupes de civelles injectées dans une maille du modèle hydrodynamique à l'embouchure.

Parallèlement, des observations ont été effectuées pour quantifier la variabilité des densités de civelles dans la colonne d'eau et en déduire, par intégration sur l'ensemble du flot, l'estimateur de la biomasse et sa précision (partie gauche du poster).

Ces méthodes et outils ont été détaillés dans le rapport du contrat EC/DG FISH 99/023. Ils sont maintenant opérationnels et l'intégration de la chaîne de calcul

² Historique des captures de civelles, intensité actuelle de leur exploitation, variation de leur capturabilité par la pêche professionnelle maritime et indice de colonisation sur le bassin versant de l'Adour. Rapport final, contrat EC/DG FISH (DGXIV) N° 99/023. Coord. Prouzet P. 147 p.

³ Calibration du modèle hydrodynamique de circulation estuarienne et modélisation des flux de civelles. Contrat n° 005535907. IFREMER-UPPA. 102 p.

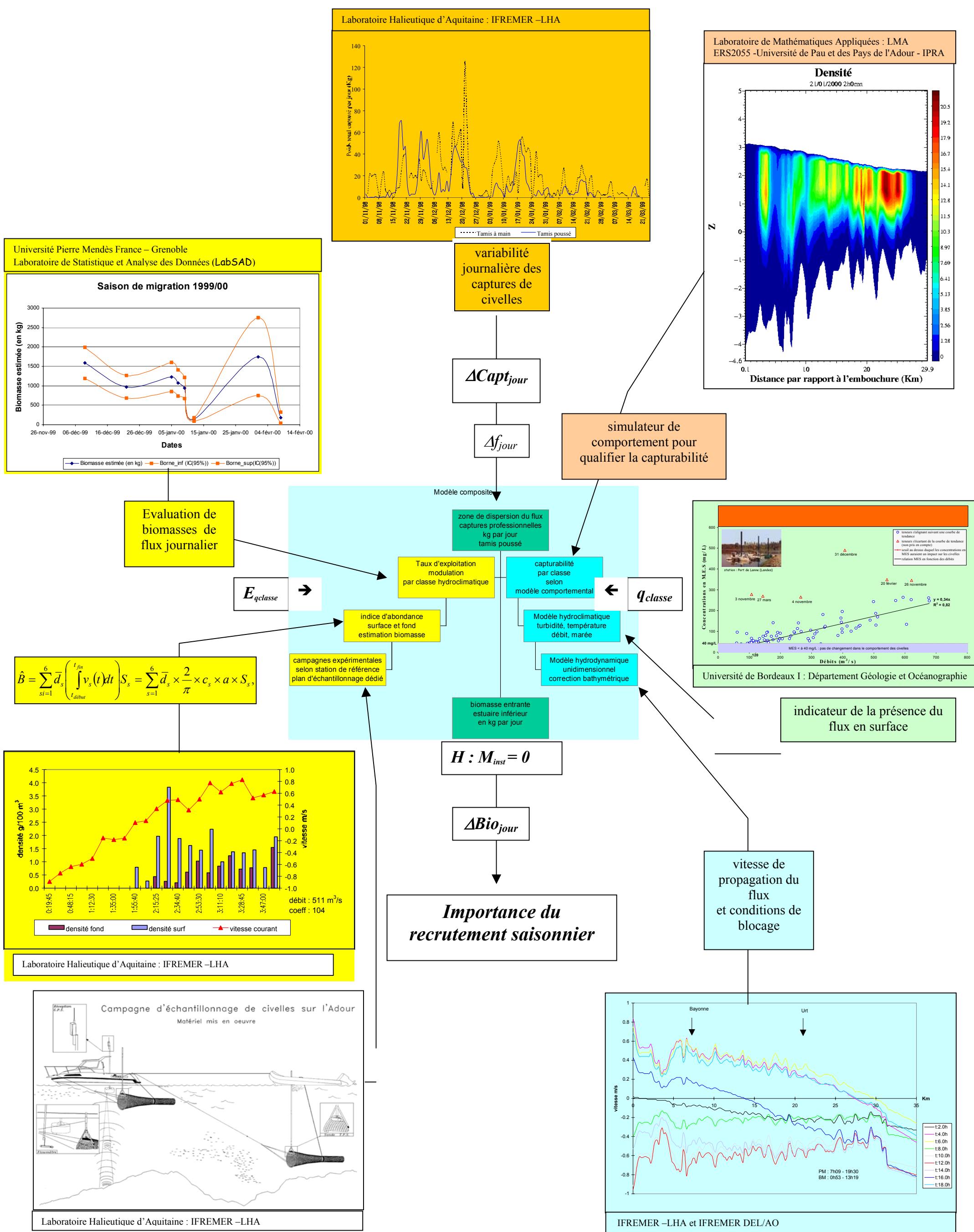
au moyen d'une interface dédiée et transparente pour l'utilisateur est actuellement à l'étude.

Le rapport entre la capture et l'estimation de la biomasse du flux un jour donné permet d'évaluer un taux d'exploitation journalier qui peut être ordonné selon des classes qualitatives de capturabilité définies par les conditions hydroclimatiques du jour de l'observation.

Les valeurs centrales de ces classes peuvent ensuite être utilisées en stratifiant la saison de pêche à partir des variables hydroclimatiques pertinentes (débit, turbidité, coefficient de marée, température, nébulosité) pour déduire de la variabilité des captures journalières, celle des biomasses de civelle.



FIGURE 161 : SCHÉMA CONCEPTUEL DE L'ESTIMATION D'UN FLUX DE CIVELLES À L'ÉCHELLE JOURNALIÈRE EN ESTUAIRE OUVERT ET PRINCIPE DE L'EXTRAPOLATION SUR LA SAISON DE PÊCHE



Bibliographie

- Anonyme 2002. Monitoring of glass eel recruitment. Contrat N° 98/076. Coord. Dekker W., 256 p.
- Anonyme, 1995.- Étude d'impact sur l'environnement de l'extension de la station d'épuration Saint Frédéric, District de Bayonne-Anglet-Biarritz, Saunier Eau et Environnement, Ingénieurs Conseils, 106 p.
- Amara M., Capatina-Papagachiuc & Trujillo D., 2002. Hydrodynamical modelling and multidimensional approximation of estuarine river flows., *comm.sous presse*, 7 p.
- Aoyama J, Nishida M, Tsukamoto, K., 1997. Molecular phylogenetic approach to the evolution of the freshwater eels, *Anguilla*. Dans *Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, 44, 2-10.
- Aoyama J, Nishida M, Tsukamoto K., 2001. Molecular phylogenetic and evolution of the freshwater eels, genus *Anguilla*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 20 : 450-459.
- Avise J C, Helfman G S, Saunders N C, Hales L., 1986. Mitochondrial DNA differentiation in North Atlantic eels : Population genetic consequences of an unusual life history pattern. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S*, 83 : 4351-4354.
- Barbin, G. P. and W. H. Krueger. 1994. Behaviour and swimming performance of elvers of the American eel, *Anguilla rostrata*, in an experimental flume. *Journal of Fish Biology*. 45 : 111-121.
- Blamart D., Escoubeyrou K., Juillet-Leclerc A., Ouahdi R. & R Lecomte-Finiger, 2002. Composition isotopique $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ des otolithes des populations de poissons récifaux de Taiaro (Tuamotu, Polynésie française) : implications isotopiques et biologiques.- *C.R. Biologies*, 325 :99-106
- Bœuf G., 1987.- Contribution à l'étude de l'adaptation à l'eau de mer chez les Poissons Salmonidés – Détermination de critères de smoltification par mesures de l'activité (Na^+/K^+)-ATPasique des microsomes de la branchie et des hormones thyroïdiennes plasmatiques. *Thèse de Doc. 3ème cycle*, Université de Bretagne Occidentale, 322 p.
- Bru N., 1998. Étude de quelques méthodes d'estimation non paramétriques de courbes. Application à l'évaluation de flux de civelles d'anguille. Thèse de doctorat, Université de Pau, 161p.
- Brunet 1999. Spatio-temporal variation in some physical and chemical parameters over a 25-years period in the catchment of the river Adour, *Journal of Hydrology*, 220; 209:221.

Caill-Milly N., Cuende F. X. & Prouzet P., 2002. – *Site Atelier Adour* – Édition Ifremer – 40 p.

Casamajor (De) M-N, 1995.- Mesures de salinité et température sur l'estuaire de l'Adour, 37 p.

Casamajor (De) M-N, 1998. Comportement migratoire de la civelle d'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans l'estuaire de l'Adour en fonction de la variabilité des conditions environnementales. Thèse n°98PAUU3017, 64p.

Casamajor (De) M.-N., Bru N. et P. Prouzet, 1999. Influence de la luminosité nocturne et de la turbidité sur le comportement vertical de migration de la civelle d'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans l'estuaire de l'Adour. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (355) : 327 – 347.

Casamajor (de) M.-N., Prouzet P. & P. Lazure, 2000.- Identification des flux de civelles d'Anguille (*Anguilla anguilla* L.) à partir des relations d'allométrie en fonction des conditions hydrodynamiques de l'estuaire de l'Adour.- *Aquat. Living Ressour* 13 : 411-420.

Casamajor (De) M.-N., Lecomte-Finiger R. & Prouzet P., 2001. Détermination de l'état d'amaigrissement des civelles (*Anguilla anguilla*) en migration en zone côtière et estuarienne. *C. R. Acad. Sc.* 324 : 345-353.

Casamajor (de) M.-N., Lecomte-Finiger R., & P. Prouzet, 2001. Passé larvaire des civelles, *Anguilla anguilla* (Linné, 1758) en migration en zones côtière et estuarienne (Adour, golfe de Gascogne) à partir de l'examen des otolithes. *C.R. Acad. Sci.* 324 : 1011–1019.

Casamajor (de) M.-N. , Prouzet P., Blanc J.-M. & N. Charlon, 2003. Variations à long terme des caractéristiques biométriques des civelles (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour (golfe de Gascogne, France). *Oceanologica Acta* (à paraître)

Cauvin G., Paquignon G., 2000.- Monographie sur la pêche maritime dans l'estuaire de la Gironde – Comité Local des Pêches maritimes et des élevages marins de Bordeaux et l'Institut des Milieux Aquatique – 61p.

Cuende F.X., 1994.- Contribution à l'étude de la pêche professionnelle du saumon (*Salmo salar*) dans le bassin de l'Adour (France). *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse*, 85 p.

Creutzberg, F. 1961. On the orientation of migrating elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.) in a tidal area. *Netherland Journal Sea Research*. 1 : 257-338.

Daemen E, Olckaert FAM, Cross T, Ollevier F., 1997. Four polymorphic microsatellite markers in the European eel. *Animal Genetics*, 28 : 58-71.

- Daemen E, Cross T, Ollevier F., 2001. Analysis of the genetic structure of European eel (*Anguilla anguilla*) using microsatellites DNA and mtDNA markers. *Marine Biology*, 139, 755-764.
- Desaunay Y., Guerault D. & Beillois P., 1987. Dynamique de la migration anadrome de la civelle (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de la Loire : rôle des facteurs climatiques vis à vis de la pêche et du recrutement. C.I.E.M., CM 1987/M : 18.
- Ellegren H, Lifjeld JT, Salgsvold T, Primmer CR., 1995. Handicapped males and extrapair paternity in pied flycatchers : a study using microsatellite markers. *Molecular Ecology*, 4, 739-744.
- Fontaine M. & Callamand O., 1941.- Sur l'hydrotropisme des civelles. *Bull. Inst. Ocean. Monaco*, 811, 1-6.
- Gadet A., 2002.- Rôle de l'hydrodynamisme estuaire sur le comportement migratoire des civelles d'*Anguilla anguilla* dans l'Adour. Rapport de stage ESA.,
- Gauldie R.W., 1996.- Biological factors controlling the carbon isotope record in fish otoliths : principles and evidence. *Comp. Biochem. Physiol.*, 115B(2) : 201-208.
- Gharbi S., 2002.- Interactions entre l'écosystème estuaire de l'Adour et son bassin versant. Espaces sous pression des différents usages anthropiques. Mémoire de DESS, Univ. de Montpellier, 144p.
- Hancock, JM., 1999. Microsatellites and other simple sequences : genomic context and mutational mechanisms. Dans *Microsatellites : evolution and application*, eds Goldstein, D.B. et Schlötterer, C., *Oxford University press*, 1-9.
- Iacumin P., Bianucci G. & A. Longinelli, 1992.- Oxygen and carbon isotopic composition of fish otoliths.- *Mar. Biol.*, 113 : 537-542.
- Ishikawa S, Tsukamoto K, Nishida M., 2001. Characterization of microsatellite loci from the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Molecular Ecology Notes*, 1, 140-142.
- Lazure P. 1998. Mise en oeuvre du modèle hydrodynamique 1D. Rapport interne, Ifremer Brest, 7 p.
- Lecomte-Finiger R. & A. Yahyaoui., 1989.- La microstructure de l'otolithe au service de la connaissance du développement larvaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*.- *C.R. Acad. Sci. Paris*, 308 (Serie III) : 1-7.
- Lecomte-Finiger R., 1999.- L'otolithe : la "boîte noire" des Téléostéens.- *Année Biol.*, 38 : 107-122.

- Lin YS, Poh YP, Tzeng CS., 2001. A phylogeny of freshwater eels inferred from mitochondrial genes. *Mol. Phyl. Evol.*, 20, 252-261.
- Lintas C, Hirano J, Archer S., 1998. Genetic variation of the european eel (*Anguilla anguilla*). *Mol. Mar. Biol. Biotechnol.*, 7, 263-269.
- Maneux 1998. Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension: application des systèmes d'Information géographique dans les bassins versants de l'Adour, de la Dordogne et de la Garonne. Thèse N° 1897.
- McCleave, J. D., R. C. Kleckner. 1982. Selective tidal stream transport in the estuarine migration of glass eels of the American eel (*Anguilla rostrata*). Journal du Conseil Permanent et International pour l'Exploration de la Mer. 40 : 262-271.
- McGovern P; & McCarthy T.K., 1992. Elvers migration in the River Corrib system, western Ireland. *Irish Fisheries Investigations Series A (Freshwater)*, 36 : 25-32.
- Observatoire de l'eau des Pays de l'Adour, 1998. Poissons migrateurs, 24 p.
- Prouzet P., Sanchez F. & Lazure P., 2000. Modèle hydrodynamique à une dimension de l'estuaire de l'Adour : Mise au point et calibration. Application à la modélisation de la migration de la civelle dans l'estuaire. Rapport interne Ifremer, 25 p + annexes.
- Prouzet P, Casamajor (de) M.-N., Lissardy M. & F. Sanchez, 2002. Estimation d'un flux journalier de civelles en estuaire ouvert et principe de l'extrapolation sur la saison de pêche. Colloque "Défi Golfe de Gascogne", 11-13 décembre 2002. (Poster).
- Prouzet P., (coord.) 2002. Historique des captures de civelles, intensité actuelle de leur exploitation, variation de leur capturabilité par la pêche professionnelle maritime et indice de colonisation sur le bassin versant de l'Adour. Rapport final, contrat EC/DG FISH (DGXIV) N° 99/023. 147 p.
- Radtke R.L., Showers W., Moksness E. & P. Lenz., 1996.- Environmental information stored in otoliths : insights from stable isotopes.- *Mar. Biol.*, 127 : 161-170.
- Saglio P., 1993.- Le retour jusqu'aux sites de frai ou "homing" : les mécanismes chimiosensoriels mis en jeu. In : Guégan J.C. and Prouzet P. (Editeurs), *Le saumon atlantique*. IFREMER, Centre de Brest, 87-100.
- Salomon J. C., 1976. Modèle mathématique de la propagation de la marée en estuaire et des transports sableux associés. Application aux estuaires de la Loire et de la Seine. Thèse de l'université de Bretagne occidentale.
- Sanchez F., 1997. Essai d'utilisation de l'acoustique pour évaluer les densités de civelles dans l'estuaire de l'Adour. Rapport interne IFREMER. St Péé sur Nivelle, 40 p + annexes.
-  Ifremer Étude sur la civelle (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour : Pêche, biologie, comportement, modélisation hydrodynamique et comportementale, estimation des flux

Sheldon, M. R. and J. D. McCleave. 1985. Abundance of glass eels of the American eel, *Anguilla rostrata*, in mid-channel and near shore during estuarine migration. *Naturaliste Canadien*. 112 : 425-430.

Soussi, 1988.- Nature, estimation et comparaison des flux de matière issus des bassins versants de l'Adour (France), du Sebou, de l'Oum-Rbia et du Souss (Maroc). Impact du climat sur les apports fluviaires à l'océan. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I*, 403 p.

Takahashi H, Nirasawa K, Nagamine Y, Tsuzuki M, Yamamoto Y., 1998. Genetic relationship among Japanese native breeds of chicken based on microsatellite DNA polymorphisms. *J Hered*, 89, 543-546.

Tseng MC, Chen CA, Kao HX, Tzeng WN, Lee SC., 2001. Polymorphisms of GA/GT microsatellite loci from *Anguilla japonica*. *Mar. Biotechnol.*, 3, 275-280.

Williams G.C, Koehn R.K., 1984. Population genetics of North Atlantic cadadromous eels (*Anguilla*). Dans : Evolutionary Genetics of Fishes, ed. Turner, B.j., Plenum, New York, 529-560.

Wirth T, Bernatchez L., 2001. Genetic evidence against panmixia in the European eel. *Nature*, 409, 1037-1040.

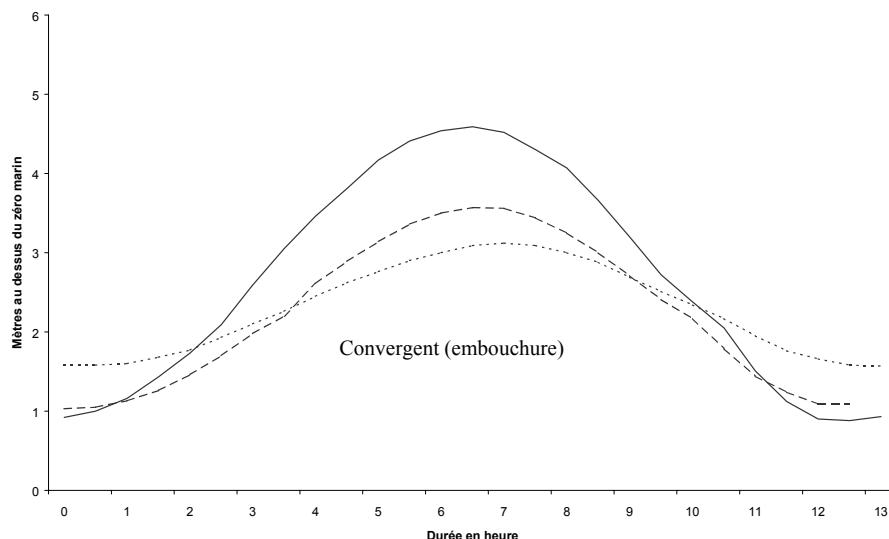
Wirth T, Bernatchez L., 2003. Decline of North Atlantic eels : a fatal synergy ? *Proc. R. Soc. Lond.*, 270, 681-688.

ANNEXE 1 :

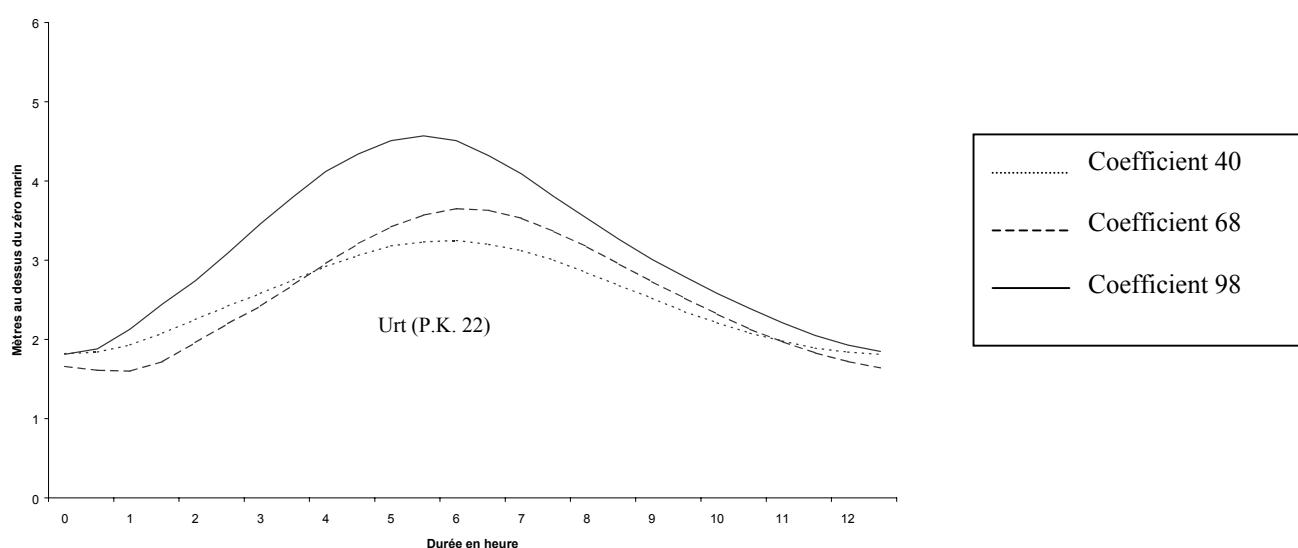
Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique pour différents coefficients de marées

Annexe 1 : Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique pour différents coefficients de marées

Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique pour un débit faible : 214 à 235 m³/s

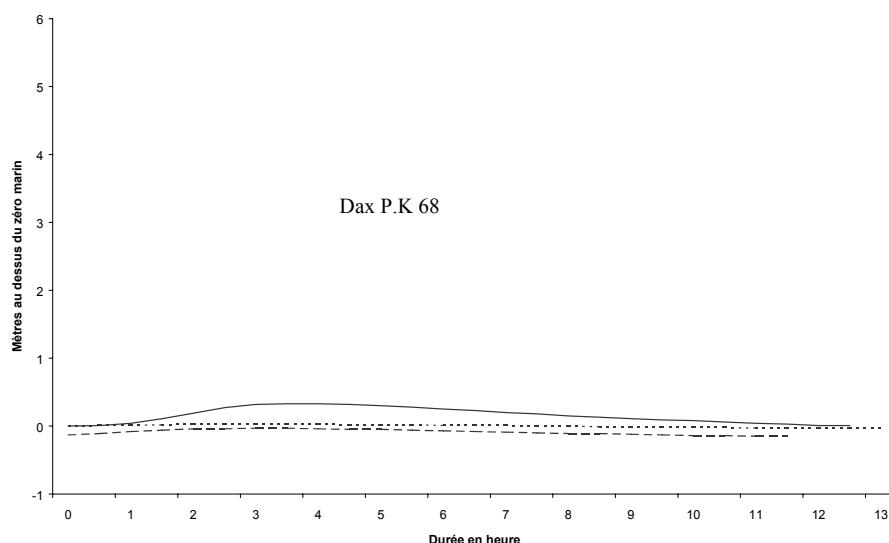


Convergent (embouchure)



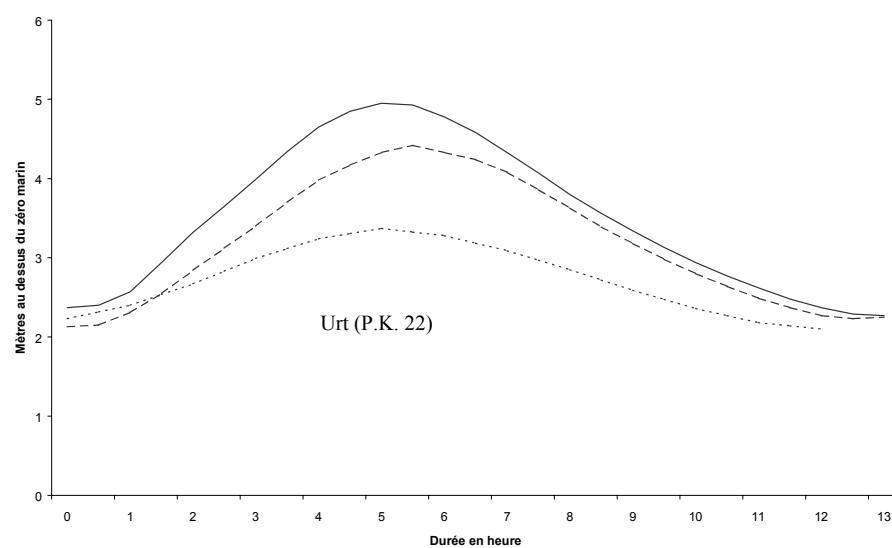
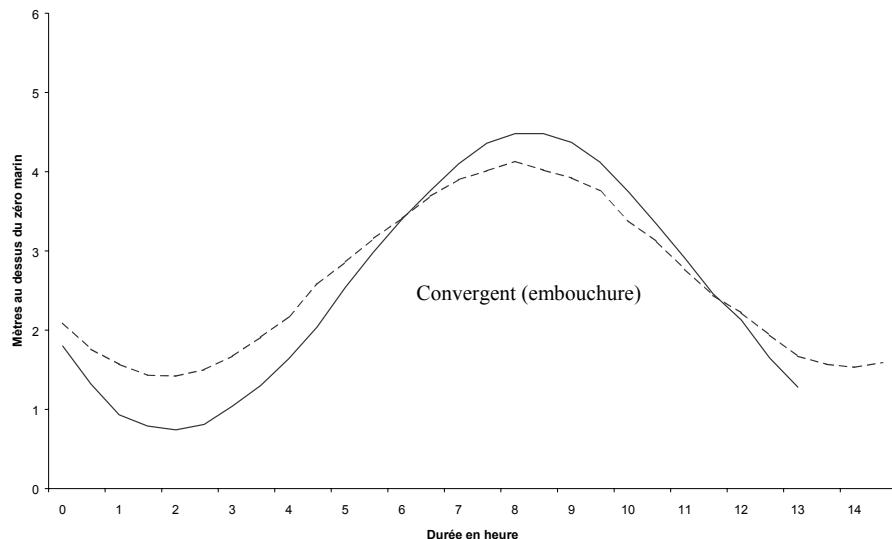
Urt (P.K. 22)

- Coefficient 40
- - - Coefficient 68
- Coefficient 98

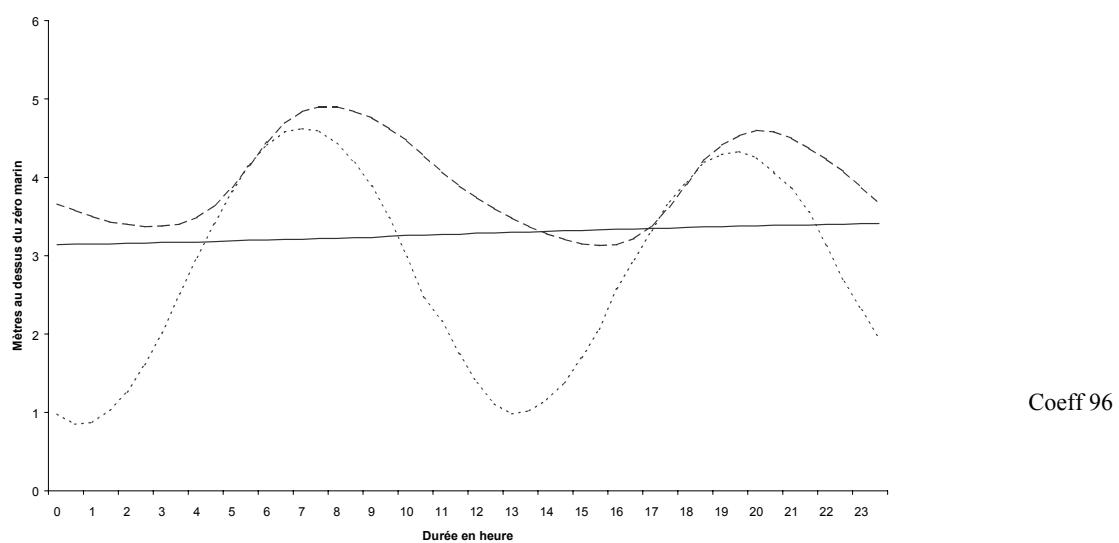
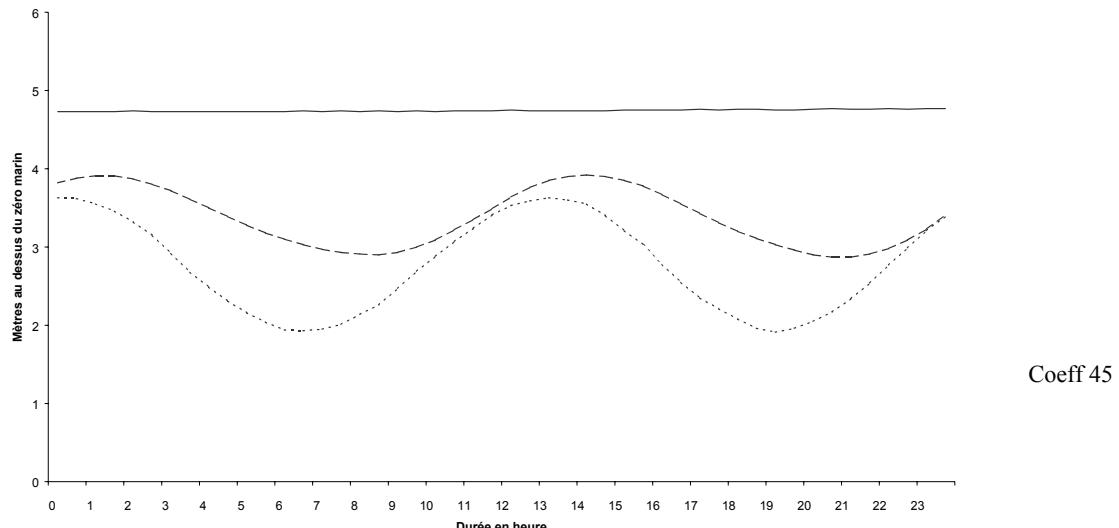


Dax P.K 68

**Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique
pour un débit moyen : 430 à 510 m³/s**



**Propagation de l'onde de marée et déformation de la courbe marégraphique
pour un débit fort : 910 à 1190 m³/s**



.....	Convergent (embouchure)
- - -	Urt (P.K 22)
—	Dax (P.K 68)

ANNEXE 2 :

**Variations à long terme des caractéristiques biométriques des civelles (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour (golfe de Gascogne, France).
Long term variations for glass eels (*Anguilla anguilla*) biometrics in Adour estuary (Bay of Biscay, France).**

M.-N. de Casamajor, P. Prouzet, J.-M. Blanc, N. Charlon

Variations à long terme des caractéristiques biométriques des civelles (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour (golfe de Gascogne, France).

Long term variations for glass eels (*Anguilla anguilla*) biometrics in Adour estuary (Bay of Biscay, France).

M.-N. DE CASAMAJOR⁽¹⁾, P. PROUZET⁽¹⁾, J.-M. BLANC⁽²⁾, N. CHARLON⁽²⁾

(1) Laboratoire Halieutique d'Aquitaine - Ifremer - Technopole Izarbel - Maison du Parc - 64210 Bidart - marie.noelle.de.casamajor@ifremer.fr

(2) Unité d'hydrobiologie - INRA - BP 3 - 64310 Saint-Pée-sur-Nivelle

RÉSUMÉ

Ce travail a pour objet d'étudier les variations des caractéristiques biométriques des civelles dans l'estuaire de l'Adour depuis le début des années 1980. Les données ont été récoltées au cours de huit saisons de migration (5 mois, de novembre à mars) réparties sur les 25 dernières années : deux saisons à la fin des années 1970 (1978/1979 et 1979/1980) une saison intermédiaire au début des années 1990 (1991/1992) et cinq saisons à la fin des années 1990 (de 1996/1997 à 2000/2001). La longueur, le poids et le stade de pigmentation des civelles ont été étudiés. Uniquement les individus aux stades 5_A et 5_B ont été pris en compte, correspondant à des civelles transparentes ayant séjourné peu de temps en estuaire. Une analyse de variance à deux facteurs (mois et année) a été effectuée pour étudier les variabilités saisonnières et inter annuelle des longueurs et des poids des civelles récoltées.

L'analyse confirme la diminution des longueurs et des poids au cours de la saison et surtout montre qu'il existe bien une variabilité inter annuelles significative. Le coefficient d'allométrie est pris en compte pour caractériser les modifications relatives des deux variables biologiques après leur transformation logarithmique. Depuis le début des années 1980, le coefficient d'allométrie présente une forte variabilité. Les captures de civelles enregistrées sur l'Adour comme sur l'ensemble des côtes européennes pour la même période restent à un niveau très bas. Les facteurs d'origine océanique, tels que des modifications du *Gulf Stream* ou de la productivité planctonique pourraient être à l'origine des modifications des caractéristiques des civelles.

Mots clés : civelle, biométrie, capture, golfe de Gascogne, variation historique

ABSTRACT

This study attempt to examine change in glass eel biometrics characteristics on the Adour estuary since the beginning of the 1980s. Data were collected during eight seasons of migration (5 months, from November to March) distributed over the 25 last years: two seasons at the end of the 1970s (1978/1979 and 1979/1980) one intermediate season at the beginning of the 1990s (1991/1992) and five seasons at the end of the 1990s (1996/1997 to 2000/2001). Length, weight and pigmentation stages were recorded. Only the 5_A and 5_B pigmentation stages were taken into account in this study, corresponding to transparent glass eels, which entered recently in the estuary.

A two factors analysis of variance (month and year) was carried out to study seasonal and interannual length and weight variability of glass eel. Analysis confirmed a reduction in length and weight during the season and showed that there was a significant interannual variability. The allometry coefficient was also used to characterise variation of the length-weight relationships during different periods. Since the beginning of the 1980s, the allometry coefficient present high variability and Catch Per Effort Unit a low level. Oceanic factors might be at the origin of variations of glass eel characteristics. Such factors induced modifications of the *Gulf Stream* or of planktonic productivity.

Key Words : glass eels, biometry, catching, Bay of Biscay, historical variation.

INTRODUCTION

Les caractéristiques morphométriques des civelles, à leur arrivée en estuaire, ont été largement étudiées à partir de la longueur, du poids et du stade de pigmentation, des deux espèces présentes dans l'Atlantique Nord, *Anguilla anguilla* (Heldt et Heldt, 1929 ; Boëtius et Boëtius, 1989 ; Désaunay et Guérault, 1997) et *Anguilla rostrata* (Haro et Krueger, 1987 ; Jessop, 1998). Ces auteurs montrent pour les deux espèces, une diminution de la longueur et du poids au cours de la saison principale de migration et une évolution de la pigmentation.

Dans l'estuaire de l'Adour, cette évolution saisonnière est également observée dans les années 1980 (Charlon et Blanc, 1982) et plus récemment (de Casamajor, 1998). Une relation d'allométrie est employée pour caractériser les différents flux de civelles pénétrant dans l'estuaire au cours des saisons

de migration 1996/1997 et 1997/1998 (de Casamajor et al., 2000a). Il semblerait, à partir de travaux sur l'otolithométrie et sur l'indice d'amaigrissement, que cette évolution saisonnière résulte principalement de l'origine des lots de civelles : des pontes distinctes, étalées dans le temps, qui donneraient naissance à des lots de larves aux caractéristiques biométriques différentes (Désaunay et al., 1996 ; de Casamajor et al., 2001b).

D'autre part, depuis une vingtaine d'années, on observe une diminution du recrutement à partir des captures de civelles sur les côtes européennes (Dekker, 1997) et à partir des captures d'anguilles jaunes sur les côtes américaines (Castonguay et al., 1994 ; Casselman et al., 1998). La diminution du recrutement est souvent mise en parallèle avec la diminution du poids des civelles pour *A. anguilla* (Désaunay et Guérault, 1997) et pour *A. rostrata* (Castonguay et al., 1994 ; Haro et Krueger, 1987). La migration de la civelle est largement étudiée à partir des données de captures de la pêcherie professionnelle et de campagnes expérimentales sur l'estuaire de l'Adour. Les flux en migration sont caractérisés d'un point de vue quantitatif et comportemental, les caractéristiques biologiques des civelles sont également prises en compte. Dans ce contexte, il est particulièrement intéressant de vérifier l'existence d'une variation inter annuelle de la longueur et du poids. Ces fluctuations pourraient conforter l'hypothèse d'une influence de modifications océanographiques sur le recrutement des civelles. La phase leptocéphale correspond à la phase d'alimentation et de croissance en milieu océanique. La longueur et le poids des civelles résultent en partie de cette phase d'alimentation alors qu'après la métamorphose en civelle, les larves ne s'alimentent plus et vivent sur leurs réserves (Lecomte-Finiger, 1983).

L'objectif de ce travail est d'étudier la variabilité des caractéristiques biométriques des civelles, au même stade de pigmentation, au cours de ces 20 dernières années à partir d'échantillons capturés dans l'estuaire de l'Adour. Ce travail est basé sur des séries de données mensuelles collectées lors des saisons principales de migration, de novembre à mars à la fin des années 1970 et des années 1990 avec un point d'observation lors de la saison de migration 1991/1992.

MATÉRIELS & MÉTHODES

Cadre d'étude - Les civelles proviennent de l'estuaire de l'Adour (embouchure : 43°30'N ; 1°32'W). Elles sont capturées en amont de la limite de salure des eaux, dans la zone de propagation de la marée dynamique entre 22 et 30km en amont de l'embouchure (figure 1). Ces civelles sont donc acclimatées à l'eau douce au moment de leurs captures. Elles proviennent soit de la pêcherie professionnelle, soit de pêches expérimentales (de Casamajor, 1998). Des travaux récents montrent que les civelles parviennent à ce niveau de l'estuaire en une journée, poussées par la marée derrière la zone de propagation du front de salinité (Prouzet et al., 2000).



Figure 1- Localisation des sites de captures des civelles étudiées.
Figure 1- Location of the sampling area and catch sampling of glass eel. ●

Données de captures- Une analyse descriptive de ces données est réalisée conjointement aux variations du coefficient d'allométrie. Comme sur les autres estuaires, les captures ont fortement diminué dans l'estuaire de l'Adour à partir du début des années 1980 (Prouzet et al., 1994 ; de Casamajor et al., 2000b). Des séries historiques de captures par sortie existent depuis 1928 de façon discontinue. La collecte des données de captures journalières s'effectue auprès des marins pêcheurs professionnels de l'Adour qui pêchent pendant le flot la nuit uniquement de novembre à mars. La CPUE, Capture Par Unité d'Effort, journalière est calculée à partir du rapport entre le poids total capturé par jour et le nombre de pêcheurs ayant participé à la pêche ce jour là. La moyenne de l'ensemble des données de CPUE journalières permet d'obtenir la moyenne annuelle des CPUE. L'effort est exprimé en nombre de sorties et la CPUE en kg.sortie⁻¹.

Échantillonnages biologiques - Les civelles étudiées proviennent de 8 campagnes d'échantillonnage réalisées entre 1978 et 2001 (tableau I). Toutes les civelles sont examinées fraîches, dès leur arrivée au laboratoire, ce qui permet d'éviter d'éventuels biais de mesures liés à une méthode de conservation.

Pour les campagnes 1978/1979 et 1979/1980, les civelles sont capturées au tamis à main au niveau des Gaves Réunis (Peyrehorade, 30km en amont de l'embouchure). Elles sont anesthésiées (MS222) juste avant d'être mesurées (+/- 0,1mm) et pesées (+/-0,01g). Les données de 1979/1980 sont celles publiées par Charlon et Blanc (1982). Pour les campagnes 1991/1992 et les campagnes de 1996/1997 à 1999/2000, les civelles sont capturées soit au tamis à main soit au tamis poussé en bateau. Toutes proviennent de l'Adour (Urt, 22km en amont de l'embouchure). Elles sont tuées à la nicotine juste avant d'être mesurées (+/- 0,1mm) et pesées (+/-0,01g).

La stade de pigmentation est déterminé pour les échantillonnages de 1991/1992 et de 1996 à 2001 (Elie et al., 1982 ; Grellier et al., 1991). Les civelles sont au stade 5_A à leur arrivée en zone côtière, elles passent ensuite au stade 5_B, c'est le stade le plus fréquemment observé en estuaire (Lecomte-Finiger et Razouls, 1981). Seuls ces deux stades pigmentaires sont pris en compte pour éliminer les individus ayant séjourné plus ou moins longtemps en estuaire et qui pourraient induire une variabilité au sein de l'échantillonnage (Pyper et Peterman, 1998). Pour les échantillonnages de 1978/1979 et de 1979/1980, Charlon et Blanc (1982) avaient défini leur propre classification suivant une échelle de 1 à 8. Une correspondance est établie avec la classification d'Elie et al., (1982) et seuls les stades 0, 1 et 2 sont pris en compte dans l'analyse. Le stade 0 correspond au stade 5_A quand la civelle est entièrement transparente. Les stades 1 et 2 correspondent à une sous division du stade 5_B, fonction du développement de la pigmentation au niveau de la tache cérébrale de la civelle.

Au total, 9827 couples de longueurs et de poids ont été pris sur des civelles aux stades 5_A et 5_B sur le bassin versant de l'Adour au cours de 8 saisons de pêche (novembre à mars). Le tableau 1 répartit ces prélèvements selon les mois des 8 campagnes d'observations.

Tableau I- Nombre de couples (longueur et poids) pris en compte. Sous-tableau utilisé dans le modèle (1) : encadré. Sous-tableau utilisé pour le modèle (2) : ensemble du tableau sauf 2000/2001. Sous-tableau utilisé pour le modèle (3) : en grisé.

Table I- Numbers of couples (length and weight) taken into account. Sub-table used in model (1) : framed. Sub-table for model (2) : all data except 2000/2001. Sub-table for model (3) : shaded.

		Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	
		11	12	1	2	3	Totaux
1978/1979	S78	33	45	46	63	20	207
1979/1980	S79	56	39	53	42	21	211
1991/1992	S91	100	168	192	176	130	766
1996/1997	S96	0	124	1018	836	530	2508
1997/1998	S97	446	759	1898	361	60	3524
1998/1999	S98	0	0	1218	846	198	2262
1999/2000	S99	49	48	47	73	39	256
2000/2001	S00	0	0	93	0	0	93
Totaux		684	1183	4565	2397	998	9827

Traitements statistiques des données - La variabilité inter annuelle de la relation entre la longueur et le poids, de la forme $P = a * L^b$, est étudiée au moyen du modèle linéaire généralisé (GLM) et de la fonction de déviance (Chambers et Hastié, 1992 ; McCullagh et Nelder, 1983) compte-tenu du caractère non linéaire de la relation même après transformation logarithmique des variables (modèle 3).

Les variations inter-annuelles du coefficient d'allométrie (pentes b) pour les mois de janvier sont comparées avec les fluctuations des captures. Janvier correspond en effet à la période centrale de la migration où les civelles sont toujours présentes dans l'estuaire de l'Adour que la saison soit précoce ou tardive. C'est également le mois où l'on dispose d'informations sur toutes les années y compris la saison de pêche 2000/2001 (4565 couples d'observations au total, tableau I).

Certaines cellules du tableau I sont manquantes. On note également que le plan d'échantillonnage est déséquilibré. L'influence des facteurs "mois" et "année" sur les longueurs et les poids des civelles est analysée au moyen d'une analyse de variance à deux facteurs de la manière suivante :

- Sur un sous ensemble (cellules non manquantes) on utilise un modèle complet avec interaction : 7 premières années de pêche pour les mois de janvier à mars (modèle 1).
- Sur l'ensemble du tableau (excepté la saison 2000/2001) on utilise un modèle sans interaction (modèle 2).

Le plan étant déséquilibré, les carrés moyens sont calculés selon la procédure de type III (Julien et al., 1995).

Dans le cas où les effets des facteurs sur les moyennes des longueurs et des poids sont significatifs, le classement des moyennes est effectué par un test de Tukey (Kramer, 1956).

RÉSULTATS

Étude de la variabilité inter annuelle des relations longueur poids (modèle 3).

Le tableau II précise les valeurs de la pente et de l'origine des droites pour chaque année. On constate en particulier que les pentes des droites sont, pour les années S96, S97 et S98, bien inférieures à 3.

Tableau II : Coefficients des droites de régression : modèle (3).

Table II : Coefficients of regression lines : model (3).

	S78	S79	S91	S96	S97	S98	S99	S00
Origine	-7.559	-6.947	-7.086	-6.55	-6.705	-6.533	-7.392	-7.075
Effet saison sur origine	-0.578	0.034	-0.105	0.431	0.276	0.448	-0.411	-0.094
Pente	3.261	2.952	3.052	2.777	2.857	2.755	3.208	3.013

L'analyse de déviance montre que ces droites sont significativement différentes (tableau III). Les comparaisons du modèle général avec les sous-modèles (tableaux IV A et B) permettent de confirmer cette analyse globale en montrant que les sous-modèles : « même ordonnée à l'origine et pentes différentes » (tableau IV A) et « même pente et ordonnées à l'origine différentes » (tableau IV B), ne sont pas équivalents au modèle général.

Tableau III : Analyse de déviance du modèle 3

$\log(\text{poids}) \sim \text{saison} + \text{saison} \times \log(\text{longueur})$.

Table III : Deviance analysis for model 3

$\log(\text{weight}) \sim \text{season} + \text{season} \times \log(\text{length})$.

Effets	Degrés de Liberté	Somme des carrés	Somme des carrés résiduels	Valeur F	Pr ($F > F_{crit}$)
sans			13.584		
saison	7	0.066	13.65	3.173	0.0024
saison x Longueur	8	41.43	55.01	1734.26	< 0.0001

Tableau IV : Comparaison des déviances pour le test :

A : même ordonnée à l'origine et pentes différentes. - **B** : même pente et ordonnées à l'origine différentes.

Table IV : Comparison of the deviancies for the test :

A : same y-intercept and different slopes. **B** : same slope and different y-intercepts.

		Degrés liberté résiduels	Somme carrés résiduels	Variation degrés liberté	Variation Déviance	Valeur F	Pr(F>)
A	Saison+ saison x longueur	4549	13.468				
	Saison :longueur	4556	13.534	-7	-0.0663	3.17	0.0024
B	Saison+ saison x longueur	4549	13.468				
	Saison + longueur	4556	13.538	-7	-0.0703	3.36	0.0014

CPUE et allométries pendant la période étudiée

La comparaison entre les variations des coefficients d'allométrie des mois de janvier des années étudiées et des Captures Par Unité d'Effort sur l'estuaire de l'Adour donne une idée sur la tendance générale des dernières décennies (figure 2).

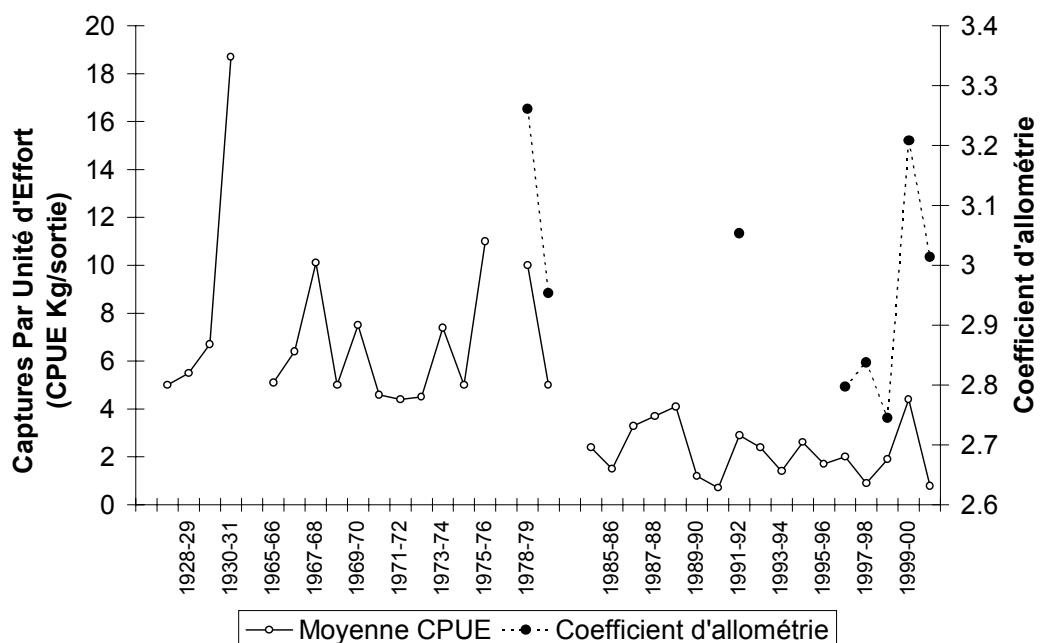


Figure 2.- Variation de la moyenne des CPUE de civelles (kg.sortie^{-1}) au cours de différentes campagnes de pêche sur l'Adour depuis 1928 et variations du coefficient d'allométrie.

Figure 2.- Mean catch variations ($\text{kg.fishing trip}^{-1}$) on the Adour River since 1928 and fluctuations of the allometry coefficient of glass-eels.

La diminution des CPUE depuis le début des années 1980 est bien marquée et les CPUE postérieures à 1990 restent à un niveau très bas sauf pour la campagne 1999/2000, année particulièrement "bonne" avec des CPUE moyennes annuelles de $4,4 \text{ kg.sortie}^{-1}$ contre $1 \text{ à } 2 \text{ kg.sortie}^{-1}$ au cours des années précédentes.

La figure 2 montre qu'il y a une forte variabilité des coefficients d'allométrie sur la période récente. Pour l'année 1999/2000, on note un fort coefficient d'allométrie à 3,2 alors qu'il variait autour de 2,7 et 2,8 les années précédentes. Les valeurs de b pour l'année 1999/2000 sont du même ordre de grandeur que celles observées pendant les années 1978/1979, 1979/1980 et 1991/1992.

Variabilité des longueurs et des poids des civelles observées (modèle 2)

Les valeurs centrales des longueurs et des poids des civelles répertoriées au cours des 2 premières campagnes (S78 et S79) sont supérieures à celles estimées sur les saisons de pêche plus récentes (de S91 à S99) (figure 3A et B).

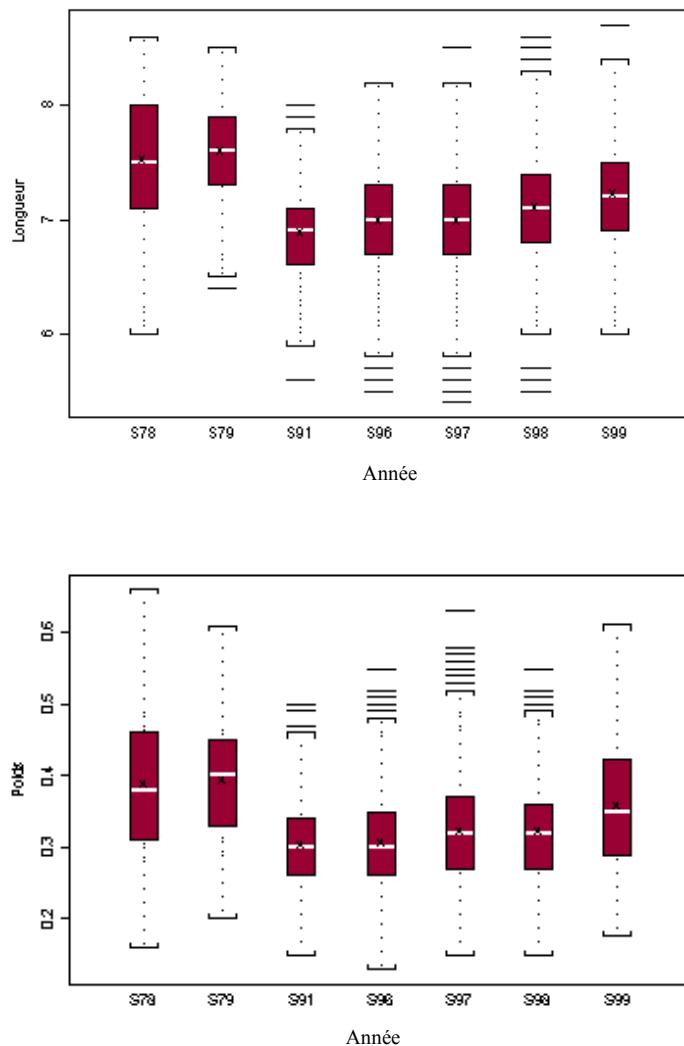


Figure 3 : Variabilités des longueurs (A en cm) et des poids (B en g) observées au cours des saisons de pêche (tous mois confondus).

x : valeur de la médiane. █ 1^{er} et 3^{ème} quartile [] : 1,5 fois la distance interquartile — valeurs au delà de la distribution.

Figure 3 : Variability of lengths (A in cm) and weights (B in g) observed during fishing seasons (irrespective of month).

x: median value █ 1st and 3th quartile []: 1,5 time interquartile distance — outside limits of distribution.

Les longueurs et les poids des civelles toutes années confondues diminuent régulièrement du mois de novembre au mois de mars (figure 4A et B).

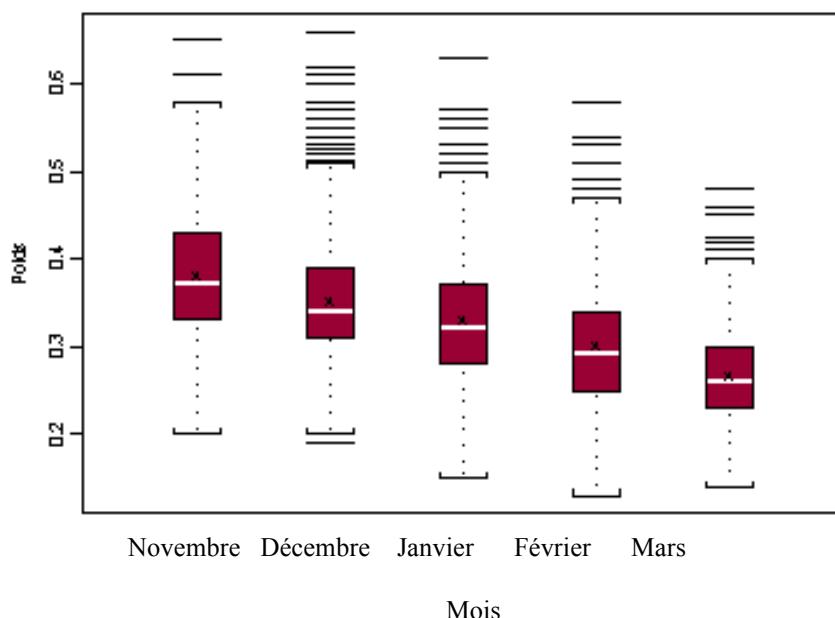
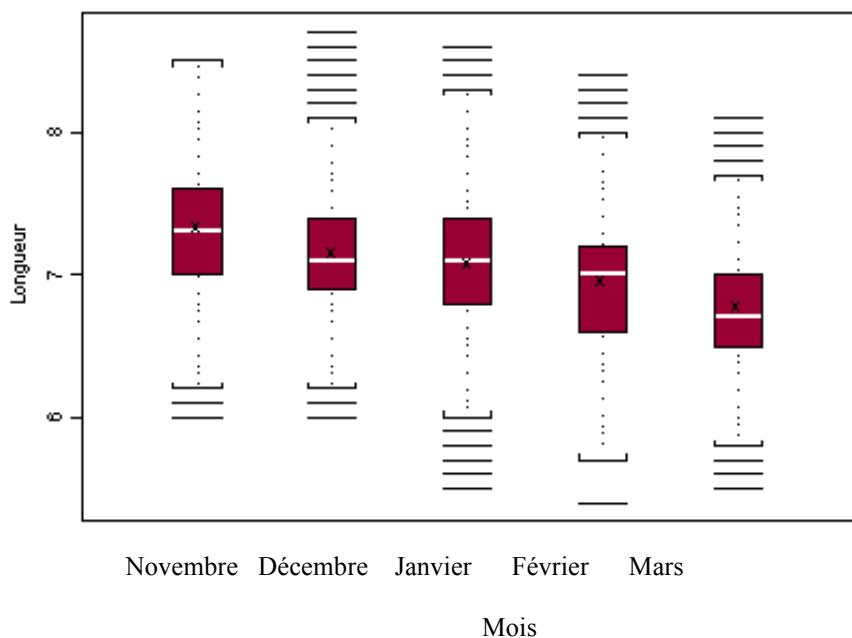


Figure 4 : Variabilités des longueurs (A en cm) et des poids (B en g) observées au cours des mois de pêche (toutes saisons confondues).

x : valeur de la médiane. [] : valeurs du 1^{er} et 3^{ème} quartile [] : 1,5 fois la distance interquartile. — : valeurs au-delà de la distribution.

Figure 4 : Variability of lengths (A in cm) and weights (B in g) observed during fishing months (irrespective of season).

x: median value [] 1st and 3th quartile []: 1,5 time interquartile distance — outside limits of distribution .

Les tableaux V et VI précisent respectivement les valeurs des moyennes mensuelles et annuelles non pondérées ainsi que leurs erreurs type. L'analyse de variance effectuée à partir d'un modèle à 2 facteurs sans interaction indique des effets mensuel et annuel significatifs (tableau VII).

Tableau V : Moyennes mensuelles des longueurs et des poids

(non pondérés par les effectifs annuels).

Table V : Monthly unweighted means lengths and weights.

	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Longueur moyenne (cm)	7.487	7.341	7.187	7.031	6.832
Erreur type	0.017	0.014	0.001	0.011	0.015
Poids moyen (g)	0.399	0.376	0.341	0.314	0.271
Erreur type	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002

Tableau VI : Moyennes annuelles des longueurs et des poids

(non pondérés par les effectifs mensuels).

Table VI : Annual unweighted means lengths and weights.

	S78	S79	S91	S96	S97	S98	S99
Longueur moyenne (cm)	7.502	7.542	6.891	7.076	6.917	7.167	7.212
Erreur type	0.029	0.029	0.015	0.009	0.008	0.010	0.026
Signification (1)	a	a	d	c	d	b	b
Poids moyen (g)	0.386	0.384	0.305	0.325	0.310	0.335	0.358
Erreur type	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.004
Signification (1)	a	a	e	d	e	c	b

(1) deux moyennes affectées de la même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil $p=0,05$ (Méthode de Tukey) two or several means named by the same letter do not differ significantly.

Tableau VII : Analyses de variance sur les longueurs et sur les poids (somme des carrés de type III) à partir d'un modèle à 2 facteurs (mois et année) sans interaction - modèle (2)

Table VII : Analysis of variance for lengths and weights (type III sum of squares) from a bifactorial model (month and year) without interaction. - model (2)

Longueur	Degré de liberté	Somme des carrés	Carrés moyens	Valeur F	Pr(F)
Effet année	6	166.3	27.72	160.29	< 0.0001
Effet mois	4	200.3	50.08	289.58	< 0.0001
Résidus	9723	1681.6	0.173		
Poids					
Effet année	6	3.022	0.504	132.8	< 0.0001
Effet mois	4	7.679	1.920	506.1	< 0.0001
Résidus	9723	36.881	0.004		

Le test de Tukey montre les dissemblances entre moyennes annuelles prises 2 à 2 (tableau VI). On constate en particulier que les moyennes non pondérées des longueurs et des poids ne diffèrent pas significativement entre les années S78 et S79 d'une part et S91 et S97 d'autre part. C'est aussi le cas pour les longueurs moyennes des années S98 et S99 , mais non pour les poids.

Étude de l'interaction entre les facteurs mois et année sur la variabilité de la longueur et du poids (modèle 1).

Cette étude ne prend en compte que les 3 derniers mois des campagnes. Les moyennes et les erreurs type des longueurs et des poids par mois et année sont donnés au tableau VIII.

Tableau VIII : Moyennes mensuelles (Erreur type) suivant les saisons de pêche pour les longueurs (cm) et les poids (g).- modèle (1).

Table VIII : Monthly means (standard error) according to fishing years for lengths (cm) and weights (g). - model (1).

Longueur	Janvier	Février	Mars	Moyenne
S78	7.206 (0.062)	7.425 (0.053)	6.930 (0.094)	7.187
S79	7.660 (0.058)	7.331 (0.065)	7.133 (0.092)	7.375
S91	6.914 (0.030)	6.858 (0.032)	6.628 (0.037)	6.8
S96	7.102 (0.013)	6.965 (0.014)	6.741 (0.018)	6.936
S97	6.934 (0.010)	6.658 (0.022)	6.668 (0.054)	6.753
S98	7.201 (0.012)	6.997 (0.014)	6.844 (0.030)	7.014
S99	7.291 (0.061)	6.986 (0.049)	6.882 (0.067)	7.053
Moyenne	7.187	7.031	6.832	
Poids				
S78	0.333 (0.009)	0.370 (0.008)	0.296 (0.013)	0.333
S79	0.396 (0.008)	0.343 (0.009)	0.289 (0.013)	0.342
S91	0.309 (0.004)	0.301 (0.005)	0.252 (0.005)	0.287
S96	0.334 (0.002)	0.293 (0.002)	0.264 (0.003)	0.297
S97	0.314 (0.001)	0.266 (0.003)	0.243 (0.008)	0.274
S98	0.339 (0.002)	0.301 (0.002)	0.272 (0.004)	0.306
S99	0.365 (0.009)	0.323 (0.007)	0.282 (0.010)	0.323
Moyenne	0.341	0.314	0.271	

Les résultats de l'analyse de variance (tableau IX) montrent que chacun des facteurs a un effet significatif sur les longueurs et les poids des civelles, avec des effets conjoints différents selon les mois et les années. La figure 5 permet de mieux visualiser l'effet de ces 2 facteurs et de leurs interactions. A la diminution progressive des longueurs et des poids des civelles, de janvier à mars, se superpose une fluctuation inter annuelle : saisons S91 et S97, caractérisées par des civelles de petites tailles à l'opposé des civelles de plus grandes tailles durant les saisons S78 et S79. L'interaction provient principalement des échantillons de janvier et février de S78 (figure 5).

Tableau IX : Analyse de variance sur les longueurs et les poids pour le modèle complet avec interaction - modèle (1)

Table IX : Analysis of variance over lengths and weights for the complete model with interaction -model (1).

Longueur	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carrés moyens	Valeur F	Pr (F>Fcrit)
Effet année	6	59.2	9.86	56.1	< 0.0001
Effet mois	2	28.4	14.22	80.9	< 0.0001
Interaction	12	12.06	1.005	5.72	6.4×10^{-10}
Résidus	7846	1378.8	0.176		
Poids					
Effet année	6	0.80	0.133	36.3	< 0.0001
Effet mois	2	1.096	0.548	149.2	< 0.0001
Interaction	12	0.306	0.025	6.94	1.15×10^{-12}
Résidus	7846	28.81	0.004		

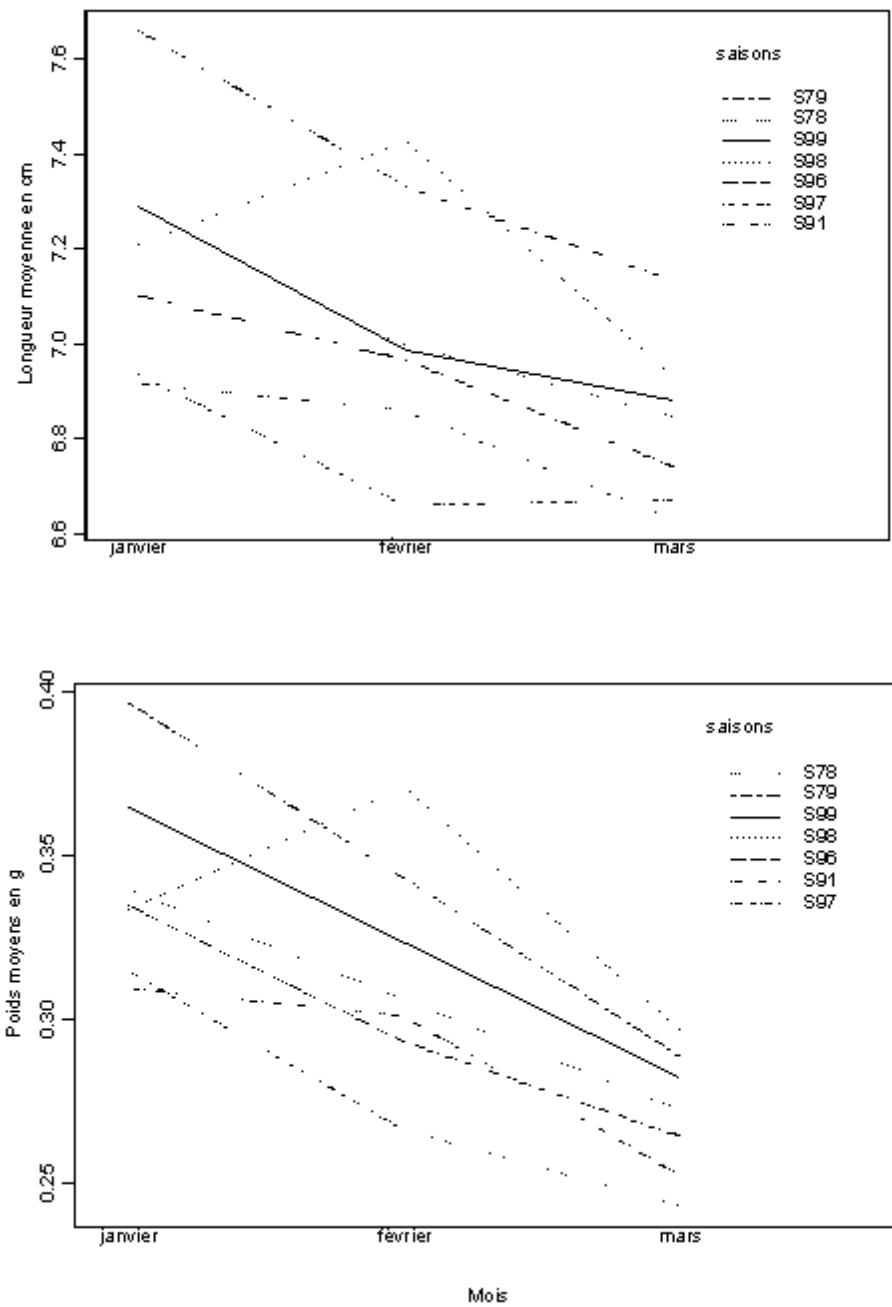


Figure 5 : Diagrammes d'interaction mois x saison pour les longueurs et les poids.
Figure 5 : Diagrams of interaction month x year for lengths (upper) and weights (lower).

DISCUSSION

La diminution progressive des captures de civelles depuis le début des années 1980 est un phénomène préoccupant au niveau de la gestion de l'espèce, sur l'Adour, comme sur l'ensemble de l'aire de répartition de l'anguille européenne (Moriarty, 1996 ; Dekker, 2002). Cette préoccupation touche également l'anguille américaine (Nilo et Fortin, 2001). Les causes de cette diminution sont multiples. La pêche est un facteur probable, mais ne reste qu'une des causes de mortalité parmi d'autres : modifications climatiques ou océanographiques, dégradation des milieux aquatiques (réduction des

habitats et mauvaise qualité des eaux) sont autant de paramètres qui entravent le bon déroulement du cycle biologique de l'anguille (Castonguay et al., 1994 ; Dekker, 2002).

Limites de l'étude

Pour la période 1978-2001, les données biométriques sont disponibles sur huit saisons de migration ; l'interprétation des résultats permet de dégager uniquement des tendances face à la variabilité inter annuelle des caractéristiques biométriques des civelles (Désaunay et Guérault, 1997). L'extrapolation de la seule saison de migration 1991/1992 à l'ensemble d'une période (1980 à 1996) doit être faite avec prudence. Il est difficile de dire que cette fluctuation n'est jamais arrivée auparavant car l'on manque de recul par rapport aux données existantes.

Les travaux antérieurs montrent que les civelles migrent toute l'année (Guérault et al., 1992). Or, ce travail ne concerne que la période principale de migration, où la pêche de la civelle est autorisée sur l'Adour, de novembre à mars. Un échantillonnage mensuel sur l'année serait complémentaire pour étudier le stade larvaire de l'anguille européenne depuis l'éclosion jusqu'au recrutement estuarien. Cependant, ces données ne peuvent pas être disponibles pour les années antérieures.

Tendances générales

Variations intra annuelles - La diminution saisonnière des caractéristiques biométriques des civelles est un phénomène largement connu et étudié sur l'ensemble des estuaires européens (Boëtius et Boëtius, 1989). Il n'est donc pas étonnant d'observer un effet mois significatif pour toutes les années étudiées, avec une diminution mensuelle progressive de la longueur et du poids des individus. Actuellement, l'hypothèse principale pour expliquer cette diminution est liée à l'origine géographique et/ou la date d'éclosion des larves dans la mer des Sargasses. Les larves auraient des caractéristiques biométriques différentes et arriveraient à l'embouchure des estuaires échelonnées dans le temps. Cette hypothèse semble être confirmée par des travaux physiologiques à partir de l'indice de condition ADN/poids sec et des microstructures inscrites sur les otolithes (de Casamajor et al., 2001a et b). Une analyse plus fine des otolithes de civelles, à partir du comptage et des mesures de distances entre les microstries journalières d'accroissement permettrait d'approfondir les connaissances sur cette diminution. En effet, une analyse des rythmes de croissance pendant la phase océanique en liaison avec la productivité planctonique serait complémentaire.

Variations inter annuelles - L'intérêt de ce travail porte plus particulièrement sur les variations inter annuelles peu étudiées en raison du manque de données sur du long terme. Cette étude montre un effet année significatif sur les variations des longueurs et des poids des civelles, avec une tendance à la diminution sur la période étudiée. Les années 1978/1979 et 1979/1980 sont caractérisées par des civelles significativement plus longues et plus lourdes que celles migrant dans les années 1990.

Dans les travaux antérieurs, la diminution du recrutement en civelles est mise en parallèle avec la diminution des caractères biométriques dans la bibliographie (Haro et Krueger, 1987 ; Castonguay et al., 1994 ; Désaunay et Guérault, 1997). Les années de faible recrutement seraient caractérisées par des civelles plutôt maigres pour leur longueur tandis que les années à fort recrutement seraient caractérisées par des civelles plutôt lourdes pour leur longueur. Sur l'Adour, on manque encore de recul pour valider ce type d'hypothèse. Cette analyse descriptive souligne, face à la variabilité observée, l'importance de poursuivre le travail de collecte des données pour obtenir un nombre suffisant d'années et réaliser une analyse statistique.

Knights, (2001) souligne l'importance des phénomènes naturels d'origine océanique et climatique sur le déclin observé au cours des dernières décennies. Ces phénomènes se surimposent aux facteurs d'origine anthropogéniques. Depuis 1970, on a observé une diminution significative du débit du *Gulf Stream* de plusieurs dizaines de sverdrups ($1 \text{ sverdrup} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Levitus, 1991), ainsi que des modifications de sa latitude en liaison avec l'index d'oscillation nord Atlantique (NAO) (Taylor & Stephens, 1998). En parallèle, un réchauffement des eaux entraîne des modifications de la production planctonique (Lavin et al., 1994). Or, le manque de disponibilités trophiques au moment de l'éclosion et de la première prise alimentaire diminuerait considérablement les chances de survie des larves (Tanaka et al., 2001). Ces facteurs physiques pourraient influencer les conditions de migrations rencontrées par les larves leptocéphales et modifier la mortalité naturelle. Ainsi, les causes océaniques évoquées expliquant la diminution du recrutement pourraient également être à l'origine d'une

modification des caractéristiques biométriques. Toutefois, la migration transocéanique des larves leptocéphales reste encore mal connue et ces suppositions méritent d'être étayées.

L'action des facteurs anthropiques sur le recrutement des civelles, au-delà du facteur pêche, ne doit pas être minimisée. En effet, la dégradation des habitats pendant la phase de grossissement du cycle biologique de l'Anguille pourrait modifier indirectement la production de juvéniles.

A l'échelle locale, les conditions hydrologiques et climatiques de l'estuaire sont prépondérantes sur la capturabilité des civelles lors de leur entrée en estuaire (de Casamajor, 1998). Les principaux facteurs environnementaux reconnus pour expliquer de faibles CPUE sont l'absence de crue (manque de rejet d'eau douce en mer), les blocages thermiques par différences (autour de 5°C) entre les eaux marines et fluviales (McCleave et Kleckner, 1982 ; Gascuel, 1987 ; Lara, 1994 ; Martin, 1995). Ainsi, les conditions environnementales locales de remontée en estuaire viennent moduler l'influence des facteurs océaniques à grande échelle. L'intensité du recrutement et les fluctuations inter annuelles biométriques résultent probablement de la superposition des deux phénomènes.

Situation à la fin des années 1990

A la fin des années 1990, les cinq campagnes consécutives étudiées reflètent bien les tendances à la baisse. Cependant, la saison 1999/2000 apparaît de façon atypique avec des civelles particulièrement lourdes pour leur longueur. Lors de cette saison de migration, les captures ont été particulièrement abondantes pour la pêcherie professionnelle (Prouzet et al., 2001). La production totale est supérieure à 9 t. (CPUE : 4,45 kg.sortie⁻¹) alors qu'elle reste autour de 5 t. (autour de 1,5 kg.sortie⁻¹) pendant la période qui précède. Il s'agit de la meilleure année enregistrée sur la fin des années 1990. Il est cependant difficile d'identifier les raisons qui expliquent les bons rendements et l'embonpoint des civelles lors de cette saison : conditions de migration des larves leptocéphales, migration de reproduction des adultes ou encore conditions d'éclosion. Les processus de croissance et d'alimentation sont développés en partie plus au large pendant la phase leptocéphale. Les conditions locales au niveau du golfe de Gascogne ne peuvent être invoquées car les conditions climatologiques et hydrologiques au niveau de l'estuaire de l'Adour ne présentent pas de caractères exceptionnels (de Casamajor et al., 2001a et b).

En 1999/2000, les otolithes de civelles ont été étudiés (de Casamajor et al., 2001b) et comparés aux otolithes échantillonnés en février 1992 sur l'Adour (Désaunay et al., 1996). Les otolithes en 1999/2000 sont plus gros (rayon 195µm) que ceux collectés en 1992, sur l'Adour (rayon 158,2µm) la Vilaine (161,6µm) et la Somme (149,8µm) (Désaunay et al., 1996). Lecomte-Finiger (1994) donne les valeurs moyennes des différentes zones de croissance de l'otolithe d'*Anguilla anguilla*, valeurs également inférieures à celles mesurées en 1999/2000.

Les données otolithométriques ne sont pas disponibles pour les autres années et ne permettent pas des interprétations sur du long terme. Il apparaît important lors des années futures de poursuivre, en parallèle avec la biométrie, les échantillonnages d'otolithes car ils apportent de précieuses informations sur les différentes étapes de la migration transocéanique : durée, métamorphose, couches d'eau traversées, conditions physico-chimiques de la migration.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les personnes ayant participé aux collectes et saisies des données de captures des pêcheurs professionnels ainsi que celles ayant participé à l'échantillonnage et aux mesures morpho-métriques des civelles lors des campagnes expérimentales menées par le laboratoire Ifremer entre 1996 et 2001. Les remerciements vont également à J.P. Martinet pour la collecte des données morpho-métriques des civelles de la campagne 1991/1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boëtius, I., Boëtius, J., 1989. Ascending elvers, *Anguilla anguilla*, from five European localities. Analyses of pigmentation stages, condition, chemical composition and energy reserves, *Dana* 7, 1-12.
- Casamajor, (de) M.N., 1998. Comportement migratoire de la civelle d'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans l'estuaire de l'Adour en fonction de la variabilité des conditions environnementales. *Thèse Dr. UPPA* 138p + Annexes.

- Casamajor, (de) M.-N., Prouzet, P., Lazure P., 2000a. Identification des flux de civelles d'Anguille (*Anguilla anguilla*) à partir des relations d'allométrie en fonction des conditions hydrodynamiques de l'estuaire de l'Adour. - *Aquat. Living Ressour.* 13, 411-420.
- Casamajor, (de) M.-N., Bru, N., Prouzet, P., 2000b. Fluctuations des captures de civelles (*Anguilla anguilla* L.) et analyse de la variation de leur capturabilité dans l'estuaire de l'Adour. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 357/358, 387-406.
- Casamajor, (de) M.-N., Lecomte-Finiger, R., Prouzet, P., 2001a. Détermination de l'état d'amagrissement des civelles (*Anguilla anguilla*) en migration en zone côtière et estuarienne. *C. R. Acad. Sc. Paris. Série III* 324, 345-353.
- Casamajor, (de) M.-N., Lecomte-Finiger, R. Prouzet, P., 2001b. Passé larvaire des civelles *Anguilla anguilla* (Linné, 1758) en migration en zones côtière et estuarienne (Adour, golfe de Gascogne) à partir de l'examen des otolithes. *C. R. Acad. Sc. Paris. Série III*, 324, 1011-1019.
- Casselman, J.M., Marcogliese, L. A., Hodqon, P.V., 1998. The american eel Anguilla rostrata stock of the upper St.Lawrence River and Lake Ontario : long-term trends, decreaseing abundance, cause and effet. *Am. Fish. Soc. 128th Annual meeting*, august : 23-27, Hartford, Connecticut.
- Castonguay, M., Hodson, P.V., Couillard, C.M., 1994. Why is recruitment of the american eel, *Anguilla rostrata* declining in the St Lawrence river and gulf? *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 51, 479-488.
- Chambers, J.M., Hastié, T.J., 1992. Statistical models in S. Ed. Wadsworth & Brooks/Cole Computer Science Series, 608p.
- Charlon, N., Blanc, J.M., 1982. Étude des civelles d'*Anguilla anguilla* L. dans la région du bassin de l'Adour, 1-Caractéristiques biométriques de longueur et de poids en fonction de la pigmentation, *Arch. Hydrobiol.* 93, 238-255.
- Dekker, W., 1997. Long-term trends in the glass eels immigrating at Den Oever, the Netherlands. *EIFAC/ICES*, Ijmuiden, 23-27 Septembre 1996.
- Dekker, W., 2002. Monitoring of glass eel recruitemetn., *Netherlands Institute of Fisheries Research*, report C007/02-WD, 256p.
- Désaunay, Y., Guérault, D., 1997. Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae : a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity., *J. Fish Biol.* 51, 317-339.
- Désaunay, Y., Lecomte-Finiger, R., Guérault, D., 1996. Mean age and migration patterns of *Anguilla anguilla* (L.) glass eels from three french estuaries (Somme, Vilaine and Adour rivers)., *Arch. Pol. Fish.* 4, 187-194.
- Elie, P., Lecomte-Finiger, R., Cantrelle, I., Charlon, N., 1982. Définition des limites des différents stades pigmentaires durant la phase civelle d'*Anguilla anguilla* L. (Poisson Téléostéen Anguilliforme). *Vie Milieu* 32, 149-157.
- Gascuel, D., 1987. La civelle d'Anguille dans l'estuaire de la Sèvre Niortaise. Biologie, Écologie, Exploitation. *Les publications du département d'halieutique* 4/1, 559p.
- Grellier, P., Huet, J., Désaunay, Y., 1991. Stades pigmentaires de la civelle *Anguilla anguilla* (L.) dans les estuaires de la Loire et de la Vilaine. *Rapport IFREMER*, DRV 91.14-RH/Nantes, 18p.
- Guerault, D., Lecomte-Finiger, R., Desaunay, Y., Biagianti-Risbourg, S., Beillois, P., Grellier, P., 1992. Glass eel arrivals in the Vilaine estuary (Northern Bay of Biscay) in 1990 : Demographic features and early life history. - *Irish Fisheries Investigations Serie A (Freshwater)* 36 : 5-14.
- Haro, A.J., Krueger, W.H., 1987. Pigmentation, size and migration of elvers (*Anguilla rostrata* (Lesueur)) in a coastal Rhode Island stream, *Can. J. Zool.* 66, 2528-2533.
- Heldt, H., Heldt, H., 1929. Études sur les civelles de Sidi-Daoud, *Bull. Stn. Oceano. Sulammbô*. 14, 1-40.
- Jessop, B.M., 1998. Geographic and seasonal variation in biological characteristics of American eel elvers in the Bay of Fundy are on the Atlantic coast of Nova Scotia. *Can. J. Zool.* 76, 2172-2185.
- Julien A., Gasqui, P., Chabanet, C., 1995. Le modèle linéaire, exemples traités avec Splus. *Rapport INRA Biometrie*, Jouy en Josas.
- Knights, B., 2001. Speculations on adaptive life strategies of Northern Hemisphere anguillids and the causes of decadal variations in recruitment. *CEFAS " Detecting environmental change - Science & Society"* 12p.
- Kramer, C.Y., 1956. Extension of multiple range tests to group means with unequal numbers of replications. *Biometrics* 12, 309-310.

- Lara, M.J., 1994. Catch statistics, capture methods size and development stages of glass eels in asturias (Northwestern Spain). *Bull. of the Sea Fisheries Institute*. 131, 31-39.
- Lavin, A, Bryden, H., Garcia, M.J., Parilla, G., 1994. Decadal time changes in the circulation at 24°N in the Atlantic Ocean. *ICES-CM-1994/S:3 - 16pp*
- Lecomte-Finiger, R., 1983. Étude morphométrique et énergétique de la civelle de méditerranée au cours de la pigmentation, *Vie et Milieu* 33, 87-92.
- Lecomte-Finiger, R., 1994. Contribution de l'otolithométrie à l'étude de la dynamique de la migration larvaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*. *Bull. Fr. Pêche & Piscic.* 335, 17-31.
- Lecomte-Finiger, R., Razouls, C., 1981. Influence des facteurs hydrologiques et météorologiques sur la migration anadrome des civelles dans le Golfe du Lion., *Cah. Lab. Montereau* 12, 13-16.
- Levitus, S., 1991. A diagnosis of Interpentadal Circulation changes in the North Atlantic. *J. Geoph. Research* 96, 22.009-22.023.
- Martin, M.H., 1995. The effects of temperature, river flow, and tidal cycles on the onset of glass eel and elver migration into fresh water in the American eel. *J. Fish Biol.* 46 : 891-902.
- McCleave, J.D., Kleckner, R.C., 1982. Selective tidal stream transport in the estuarine migration of glass eels of the American eel (*Anguilla rostrata*). *J. Cons. int. Explor. Mer* 40, 261-271.
- McCullagh, P., Nelder, J.A., 1983. Generalized Linear Models (second eds.), Monograph on statistics and applied probability *Chapman and Hall*, London, 511p.
- Moriarty, C., 1996. The decline in catches of European elver 1980-1992. *Arch. Pol. Fish.* 4, 245-248.
- Nilo, P., Fortin, R., 2001. Synthèse des connaissances et établissement d'une programmation de recherche sur l'anguille d'amérique (*Anguilla rostrata*). *Univ. du Québec Dept. Sc. Biol.*, 298p.
- Prouzet, P., Martinet, J.P., Cuende, F.X., 1994. Les pêches estuariennes du bassin de l'Adour de 1985 à 1991. *Repère Océan Ifremer* (eds) 6, 31-48.
- Prouzet, P., Sanchez, F., Lazure, P., 2000. Modèle hydrodynamique à une dimension de l'estuaire de l'Adour : mise au point et calibration, application à la modélisation de la migration de la civelle dans l'estuaire. *Rapport interne Ifremer*, DRV/RH/LHA.
- Prouzet, P., Lissardy, M., Morandeau, G., Cuende F.X., 2001. La pêche maritime professionnelle dans l'estuaire de l'Adour en 2000. *Rapport interne Ifremer* DRV/DRH/LHA.
- Pyper, B.J., Peterman, R.M., 1998. Comparison of methods to account for autocorrelation in correlation analyses of fish data., *Can. J. Fish. Aquat. Sci* 55, 2127-2140.
- Tanaka, H., Kagawa, H., Ohta, H., 2001. Production of leptocephali of japanese eel (*Anguilla ajaponica*) in captivity. *Aquaculture* 201 : 51-60.
- Taylor A.H., Stephens, J.A., 1998. The North Atlantic Oscillation and the latitude of the Gulf Stream. *Tellus* 50 : 134-142.

ANNEXE 3 :

Détermination de l'état d'amaigrissement des civelles (*Anguilla Anguilla*) en migration en zones côtière et estuarienne.

Marie-Noëlle de Casamajor, Raymonde Lecomte-Finiger, Patrick Prouzet

Détermination de l'état d'amaigrissement des civelles (*Anguilla Anguilla*) en migration en zones côtière et estuarienne

Marie-Noëlle de Casamajor^{a,b*}, Raymonde Lecomte-Finiger^b, Patrick Prouzet

^a Laboratoire halieutique d'Aquitaine, Ifremer, B.P. 3, 64310 Saint-Pée-sur-Nivelle, France

^b Laboratoire d'ichtyoécologie, Ephe-CNRS, ESA8046, université de Perpignan, 66860 Perpignan Cedex France

Reçu le 23 octobre 2000 ; accepté le 18 décembre 2000

Présenté par Jean Rosa

Abstract – Determination of the emaciation state of the glass eels (*Anguilla anguilla*) in migration in coastal and estuarine areas. The objective of this work is to characterise the variations of the quality of the glass eels recruitment during a season of migration, from November till March and before and after the transition from marine to continental environment. The emaciation state measured from the ratio DNA/Dry weight and percentage of body water is analysed from a sampling of glass-eels collected at sea and in estuary, in the South of the Bay of Biscay during the migration period 1999/2000. The length and the mass are taken into account, they decrease during the season while the individuals are more and more pigmented. However, our work shows that groups of glass eels arriving on the coasts of the Bay of Biscay are homogeneous from the point of view of their energetic and hydride reserves with a high individual variability within these groups. Also no significant difference in losses of water and energetic reserve were observed among the individuals migrating at the beginning and during tide stream. Fluctuations of the biochemical indication and the percentage of water between the glass eels caught in sea and in estuary show that the transition between maritime and continental environment is not a mobilising event of a lot of energy for glass eels. Differences were only observed in December. © 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

DNA / dry weight / glass eels / Bay of Biscay / biochemical index / migration

Résumé – L'objectif de ce travail est de caractériser les variations de la qualité du recrutement en civelles au cours d'une saison de migration (de novembre à mars) avant et après la transition entre le milieu marin et continental. L'état d'amaigrissement des civelles, mesuré à partir du rapport ADN/poids sec et du pourcentage d'eau est analysé à partir d'un échantillonnage d'individus capturés en mer et en estuaire, dans le sud du golfe de Gascogne sur la saison de migration 1999/2000. La longueur et la masse sont mesurées, elles diminuent au cours de la saison, alors que les individus sont de plus en plus pigmentés. En revanche, nos travaux montrent que les groupes de civelles, arrivant chaque mois sur les côtes du golfe de Gascogne sont homogènes du point de vue de leur réserves énergétiques et hydriques, avec des variations individuelles importantes au sein de ces groupes. Aucune différence significative des pertes en eau et des réserves énergétiques n'est observée entre les individus migrant au début de flot et pendant le flot. Les variations de l'indice biochimique et du pourcentage d'eau entre les civelles

*Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : decasa@st-peee.inra.fr (M.N. de Casamajor).

capturées en mer et en estuaire montrent que la transition entre le milieu marin et continental n'est pas un événement mobilisateur de beaucoup d'énergie chez la civelle. Des différences sont observées en décembre seulement. © 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

ADN / poids sec / civelle / golfe de Gascogne / indice biochimique / migration

Abridged version

Spatial and temporal fluctuations of the ratio DNA/dry weight and water contents were studied with glass eels of *Anguilla anguilla* from a sampling program realised between November to March 1999/2000 in the South of the Bay of Biscay. Temporal fluctuations were studied at the rate of one per month (during five months) at the time of the new moon. Glass eels were caught in the Adour estuary. To characterise energy losses during the estuary crossing, these samples were compared with two groups of glass eels caught in coastal water.

Decrease in length and weight of the glass eels during the season was indicated in numerous works. In comparison, an evolution of the pigmentation stage was noticed, nevertheless, the V_B stage remaining the major for all samples. Variations of the ratio DNA/dry weight and the water contents show a stability during the season with individual fluctuations. The geographic origin and/or the date of hatching of larvae in Sargasso Sea would produce glass eels with different biometric

characteristics that would arrive on the European coasts spread out in the time but with the same physiological state. These results support the hypothesis of the existence of 3 geographically different European sub-populations of eels. The glass eels of the South of the Bay of Biscay would result from a single sub-population.

A significant difference was observed between the glass eels sampled at sea and in estuary in December. No difference was observed in February. Former work starting from the reading of the microstructures of otoliths does not exclude a return at sea after a passage in estuary. This assumption is possible because it appears many individuals at the estuarine stage VB at sea in February. This would confirm the strong osmotic capacities of glass eels.

The glass eels of European eel present the particularity, with regard to the other larvae of fishes, to fast for a long period and to be at the end of metamorphosis. An otolithometric study and a better knowledge of the ways of migration would allow defining the environmental conditions during the oceanic crossing.

1. Introduction

Lors de la métamorphose du leptocéphale en civelle sur le talus continental, les larves cessent de s'alimenter [1] jusqu'en phase de colonisation du milieu fluvial (stade VI_{A3}–VI_{A4}). Ainsi, lors de la traversée du plateau continental et de l'estuaire, les civelles ne s'alimentent pas et puisent dans leurs propres réserves énergétiques pour poursuivre leur migration. De nombreux auteurs signalent au cours de la période principale de migration une diminution globale du poids et de la longueur des civelles [2–4]. Les caractéristiques biométriques des individus ont été étudiées sur l'Adour entre novembre et mars à partir des relations d'allométrie lors des saisons 1996/1997 et 1997/1998 [5]. Ces caractéristiques avaient été étudiées uniquement d'un point de vue descriptif, par Charlon et Blanc [6], mais l'état physiologique des individus en migration n'a jamais été déterminé.

L'importance des conditions hydrodynamiques sur les modalités de migration en estuaire a été montrée à partir de l'étude des variations de taille et de poids des individus. Des conditions défavorables telles, que des crues, provoquent des variations pondérales supplémentaires liées à la difficulté pour les civelles de migrer à contre courant [5]. Les civelles étant en phase de jeûne, leurs cellules sont

privées d'apport exogène. Les réserves énergétiques disparaissent progressivement, mais la quantité d'ADN reste constante au niveau de la cellule lors du changement de milieu ou du jeûne [7]. La transition entre le milieu marin et continental se traduit pour la civelle par des modifications importantes de la pression osmotique. Cette transition se traduit au niveau physiologique par des pertes importantes en eau [8], d'où la nécessité de tenir compte également des variations du pourcentage d'eau individuel pour présenter un bilan métabolique des individus analysés. Les acides nucléiques jouent un rôle important dans la croissance et le développement des larves de poissons [9]. Ainsi, les variations de l'ADN/poids sec à titre individuel reflètent l'état d'amaigrissement des larves en migration ; ce rapport s'avère performant en tant qu'indice d'amaigrissement sur des larves de sole [10, 11]. Le rapport ADN/carbone a lui été utilisé sur des larves de bar [12]. L'originalité de ce travail est d'utiliser pour la première fois le rapport ADN/poids sec sur les larves d'anguille qui présentent la particularité par rapport aux autres larves de poissons d'avoir une capacité à jeûner sur une longue période [7].

L'objectif de ce travail est de compléter les travaux réalisés dans cette zone géographique pour déterminer, à partir d'un bilan métabolique plus précis des groupes

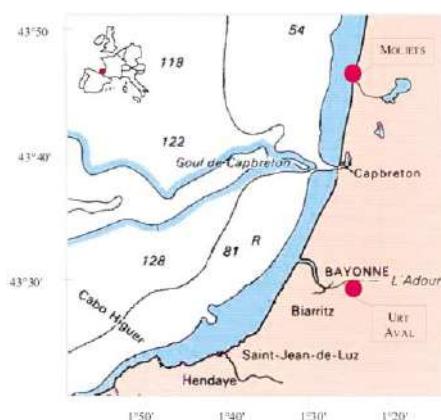


Figure 1. Localisation des sites de capture de civelles.

d'individus en migration, l'aptitude des civelles à coloniser la zone continentale en fonction de leur état d'amaigrissement et de déshydratation. Des travaux japonais, basés sur le rapport ARN/ADN, ont montré une activité métabolique réduite chez *Anguilla japonica* lui permettant de jeûner longtemps malgré des conditions environnementales restrictives nécessitant une adaptation physiologique au changement du milieu [13].

2. Matériaux et méthodes

2.1. Cadre géographique

Les civelles d'estuaire proviennent de l'Adour, dans le Sud-Ouest de la France, et sont capturées au niveau d'Urt à 22 km en aval de la limite transversale de la mer (figure 1). Ce secteur est localisé en zone de propagation de la marée dynamique, les eaux salées n'y parviennent pas pendant la période d'étude (salinité de 0 g·L⁻¹). Les civelles en migration sont donc déjà acclimatées à l'eau douce. Elles proviennent soit des campagnes expérimentales menées par le Laboratoire halieutique d'Aquitaine de

l'Ifremer et sont capturées au tamis poussé en surface et en profondeur, soit de la pêcherie professionnelle et sont prises en surface à l'aide d'un tamis tracté par le bateau (tableau I). Les civelles de mer, proviennent de la plage de Moliets, en zone côtière (salinité autour de 30–35 g·L⁻¹) à une trentaine de kilomètres au nord de l'embouchure de l'Adour (figure 1). Elles sont issues des captures professionnelles et prises par la technique de pêche dite « à la vague », c'est à dire avec un tamis tenu à la main dans la zone de déferlement des vagues pendant la marée montante. Ces individus vivent encore en eau salée.

2.2. Échantillonnages biologiques

La principale saison de migration sur l'Adour, se déroule entre novembre et mars. Pour caractériser les flux (on entend par flux un groupe de civelles arrivant en estuaire et présentant des caractéristiques morphométriques homogènes en taille, poids et stade de pigmentation), les échantillonnages se répartissent au rythme d'un par mois, au moment de la nouvelle lune, soit 5 échantillons de 25 civelles. Pour caractériser les pertes énergétiques pouvant survenir au cours de la traversée de l'estuaire, ils sont comparés avec 2 échantillons de 25 civelles capturées en mer à quelques jours d'intervalle (tableau I). Deux lots de 15 civelles, en début de marée et au maximum du flot, sont étudiés pour déterminer une éventuelle différence de l'état d'amaigrissement d'individus migrant quand les courants favorables sont faibles ou forts. Au terme de cette campagne, 205 civelles ont été analysées. Ainsi les caractéristiques des individus sont étudiées sur deux échelles de temps : au cours de la saison et au cours de la marée, et dans deux secteurs géographiques : la mer et l'estuaire.

La masse (en grammes), la taille (en millimètres) et le stade pigmentaire (selon l'échelle d'Elie et al. [14]) sont répertoriés pour chaque individu frais. À leur arrivée en zone côtière, les civelles sont en majorité au stade V_A (présence de quelques cellules pigmentées sur la partie caudale). La pigmentation se développe quand les civelles pénètrent en estuaire, elles sont pour une large part au stade V_B. Ensuite le processus de mélénisation se poursuit

Tableau I. Echantillonnages réalisés au cours de la saison de migration 1999/2000.
(n = nombre d'individus ; C = coefficient de marée)

Date	Localisation (cf. figure 1)	Origine	n	Débit(m ³ ·s ⁻¹)	C	T °C mer	T °C estuaire	Code
10/11/1999	ADOUR - Urt	Pêche tamis poussé*	25	145	80	15	11,3	A
6/12/1999	MER - Moliets	Pêche à la vague**	25	140	76	13	7,7	(B)
9/12/1999	ADOUR - Urt	Pêche expérimentale***	25	142	78	13	7,4	B
9/01/2000	ADOUR - Urt	Pêche expérimentale	25	206	78	12	7,9	C
1/02/2000	MER - Moliets	Pêche à la vague	25	120	48	12	7	(D)
2/02/2000	ADOUR - Urt / début flot	Pêche expérimentale	15	128	57	12	8	m
2/02/2000	ADOUR - Urt / plein flot	Pêche expérimentale	15	128	57	12	8	M
8/02/2000	ADOUR - Urt	Pêche expérimentale	25	157	87	12	9,4	D
7/03/2000	ADOUR - Urt	Pêche expérimentale	25	219	97	12	10,6	E

* trawl-net - ** wave hand-net - *** scientific trawl-net

plus ou moins vite en fonction du temps de résidence en estuaire et de la température de l'eau. Ces stades plus pigmentés ont été regroupés au sein du stade VI_A car ils représentent un faible nombre d'individus dans l'échantillonnage.

2.3. Méthode de détermination de l'indice de condition

Les larves sont lyophilisées pendant 24 h pour obtenir le poids sec avant d'être stockées dans des eppendorfs à –80 °C en attendant d'être broyées. L'homogénéisation de la civelle dans le liquide de broyage (héparine +PBS) est réalisée au mortier et au pilon, la méthode par « *plotter* » s'étant révélée inefficace pour l'obtention d'une solution homogène. L'indice biochimique utilisé est le rapport de ADN/poids sec (µg/mg) [10]. Son application à des larves de poissons présente l'avantage sur le rapport ARN/ADN, d'une plus grande stabilité liée à l'instabilité des mesures de la molécule d'ARN. Cet indice est applicable à titre individuel sur une petite quantité de matière sèche. La méthode fluorimétrique, employée pour déterminer la quantité d'ADN par larve a été proposée par Le Pecq et Paoletti [15] puis modifiée et simplifiée par Karsten et Wollenberger [16]. Les dosages des acides nucléiques sont réalisés suivant la méthode de Karsten et Wollenberger [17]. L'ADN standard utilisé provient de thymus de veau et les mesures d'ADN sont effectuées au spectrofluorimètre (longueurs d'ondes utilisées : excitation à 365 nm et émission à 590 nm).

2.4. Traitements statistiques des données récoltées

Les données récoltées sont examinées par stade pigmentaire, pour déterminer l'existence d'une différence significative au cours de la pigmentation et ainsi de dissocier les variations liées au développement larvaire des civelles et les variations liées aux conditions environnementales subies par les individus. Ainsi trois stades de développement sont pris en compte (V_A, V_B, VI_A). Les variations saisonnières de la longueur et de la masse des civelles ont été testées par une analyse de variance à un facteur, après vérification des conditions d'application : normalité de la distribution et homogénéité des variances.

Les données d'ADN/poids sec et le pourcentage d'eau présentent une forte variabilité. De plus, l'utilisation d'un estimateur rapport ADN/poids sec dont la distribution n'est pas forcément normale nous conduit à utiliser des tests non paramétriques pour remplir au mieux les conditions d'application et négliger les valeurs extrêmes induisant une forte variabilité.

L'analyse descriptive des données est réalisée par l'intermédiaire de « boîtes à moustaches » (Box plot sous Splus) pour les différents échantillonnages réalisés au cours de la campagne. L'avantage de cette technique, basée sur le calcul des médianes et des quartiles, est de déceler la présence de valeurs extrêmes dans le jeu de données et de juger de la symétrie d'une distribution. Un test de Dixon est ensuite appliqué sur ces valeurs extrêmes afin de détecter d'éventuelles valeurs aberrantes. Il consiste à

vérifier l'appartenance des individus d'une même population normale et peut-être utilisé dans le cas de petits échantillons [18]. Les valeurs aberrantes ainsi repérées seront supprimées car elles accroissent l'hétérogénéité des séries statistiques. Pour étudier les variations saisonnières du rapport ADN/poids sec et du pourcentage d'eau des flux en migration, le test de rang de Kruskal-Wallis est appliquée pour comparer les 5 mois d'échantillonnage [19]. Ce test est également utilisé pour étudier les variations de l'indice de condition ADN/poids sec et pourcentage d'eau en fonction de 4 classes de taille : [6–6,5] [6,6–7] [7,1–7,5] et [7,6–8]. Pour les comparaisons des individus, capturés en mer et en estuaire et capturés en début et en milieu de marée, le test de rang de Wilcoxon est utilisé [20]. La condition d'indépendance des échantillons en vue de l'application de ces tests est vérifiée.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques générales de l'échantillonnage

Un graphique de dispersion entre la longueur et le poids frais montre que les civelles présentent une distribution différente au cours de la saison : en début de saison les civelles pèsent 0,41 g (± 0,07 g) et mesurent 7,44 cm (± 0,38 cm) (figure 2). En fin de saison, elles sont plus petites, pèsent 0,28 g (± 0,05 g) et mesurent 6,78 cm (± 0,05 cm) (figure 2). Les variations saisonnières de longueur et de masse sont statistiquement différentes (poids $F = 72,3 - ddl = 203 - p \approx 0$ – taille $F = 36,71 - ddl = 203 - p \approx 0$).

L'examen de ces paramètres ne permet pas toutefois de déterminer si les réserves énergétiques sont moindres pour les civelles arrivant en fin de saison. Les individus pigmentés (VI_A et +) sont absents en début de saison. A l'inverse, en fin de saison les individus non pigmentés (V_A) sont peu nombreux dans l'estuaire (tableau II). Le stade V_B domine lors de tous les échantillonnages (70 % des individus sur toute la saison).

Le calcul des moyennes de l'indice ADN/poids sec et des teneurs en eau montre que ce rapport est constant entre le début et la fin de la saison, avec une forte variabilité au sein des échantillons (tableau II). Aucune différence significative du rapport ADN/poids sec pour les différents stades pigmentaires V_A, V_B, et VI_A n'est observée (tableau III). Parmi les individus au stade VI_A, trois sous-groupes sont testés, les différences ne sont pas significatives (tableau III). Les individus tous stades confondus sont pris en compte pour les tests suivant.

3.2. Variations saisonnières et spatiales

Au cours du cycle saisonnier, des valeurs extrêmes d'ADN/poids sec expliquant des écarts types élevés sont mises en évidence (figure 3). La médiane diffère peu et on constate également une dissymétrie des écarts interquartiles d'un mois sur l'autre. De même, des valeurs extrêmes d'ADN/poids sec sont mises en évidence, entre mer et

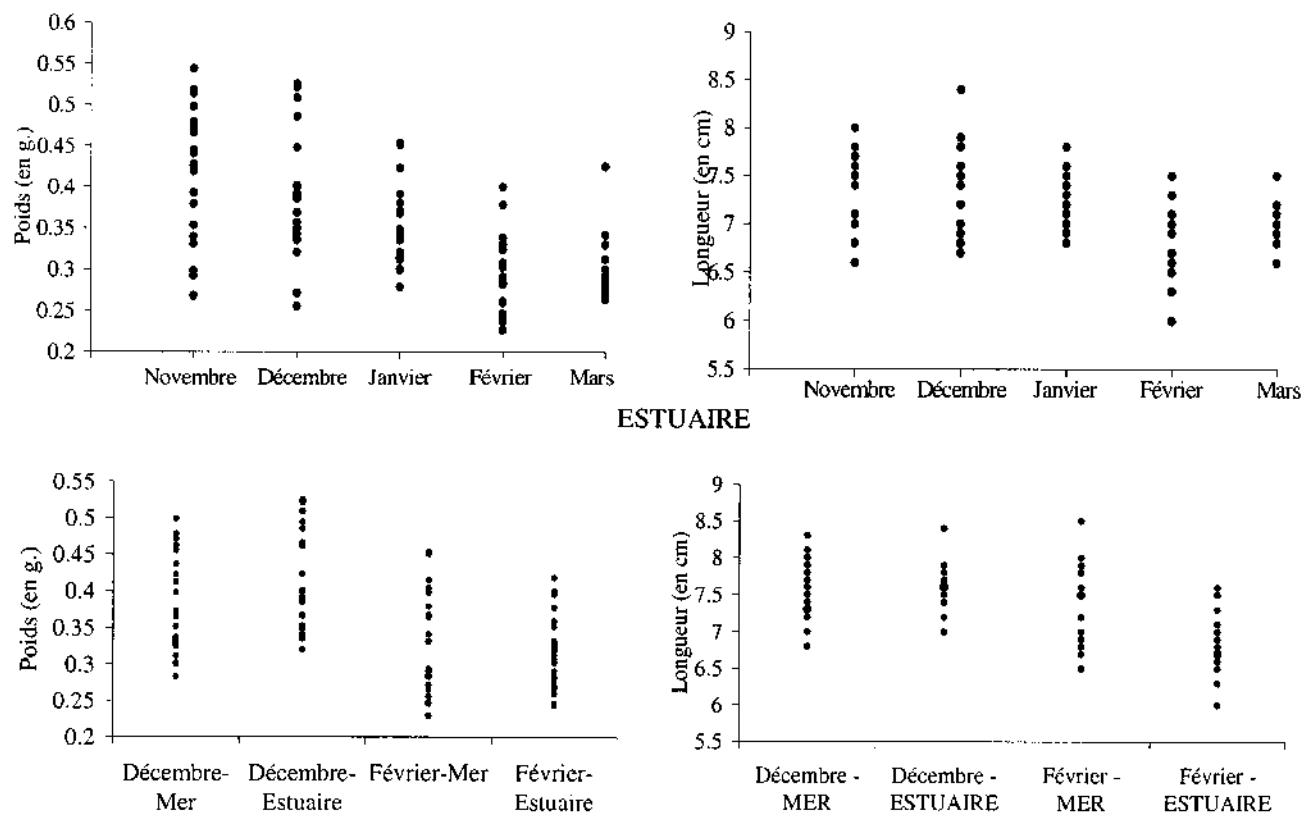


Figure 2. Longueur et masse des civelles échantillonnées au cours de la saison 1999/2000.

estuaire (*figure 3*). Les médianes diffèrent peu en estuaire par rapport à la mer en décembre comme en février. L'amplitude des valeurs est plus forte en mer qu'en estuaire. Il apparaît également des valeurs extrêmes pour les teneurs

en eau, et une tendance à l'augmentation des médianes au cours de la saison plus régulière que pour les valeurs ADN/poids sec. Les écarts-interquartiles sont plus symétriques (*figure 4*).

Tableau II. Moyennes et écarts-type du rapport ADN/Poids sec individuel (en µg/mg) et du pourcentage d'eau des civelles en fonction de la date de capture et du stade de pigmentation (N représente le nombre de civelles analysées).

Saison	V_A						V_B						VI_{A+}					
	1992/2000		ADN/P. sec		% H ₂ O		ADN/P. sec		% H ₂ O		ADN/P. sec		% H ₂ O		ADN/P. sec		% H ₂ O	
	Moy.	E-type	Moy.	E-type	N	Moy.	E-type	Moy.	E-type	N	Moy.	E-type	Moy.	E-type	N	Moy.	E-type	N
10/11/1999								0,038	0,010	77,05	1,7	24						
6/12/1999	0,046	0,025	77,53	0,98	8	0,042	0,013	77,05	0,75	16								
9/12/1999	0,026	0,013	78,14	1,15	8	0,033	0,011	77,66	0,74	17								
9/1/2000	0,032	0,006	77,6	0,34	3	0,035	0,01	77,23	0,89	20								
1/2/2000	0,045	0,021	77,81	0,5	3	0,041	0,011	78,03	0,88	18	0,045	0,003	78,14	0,6	3			
2/2/2000								0,035	0,013	76,42	1,23	10	0,039	0,013	75,63	0,64	4	
2/2/2000								0,034	0,014	76,73	1,22	8	0,037	0,018	76,67	1,05	7	
8/2/2000								0,039	0,022	77,77	1,99	12	0,045	0,011	78,03	1,86	12	
7/3/2000	0,030	0,009	78,56	0,73	2	0,033	0,009	78,56	1,17	17	0,049	0,012	78,85	1,31	6			

Tableau III. Résultat des analyses de rang réalisées sur le rapport ADN/poids sec et le pourcentage d'eau. Risque $\alpha = 0,05$.

Comparaison	ADN/PoidsSec		% H ₂ O		H ₀
	Kruskal-Wallis	Proba.	Kruskal-Wallis	Proba.	
Stade VI _{A0} - VI _{A1} - VI _{A2}	4,3017	0,1164	1,1833	0,5534	Acceptée
Stade V _A - V _B - VI _A	2,4793	0,2895	3,2119	0,2007	Acceptée

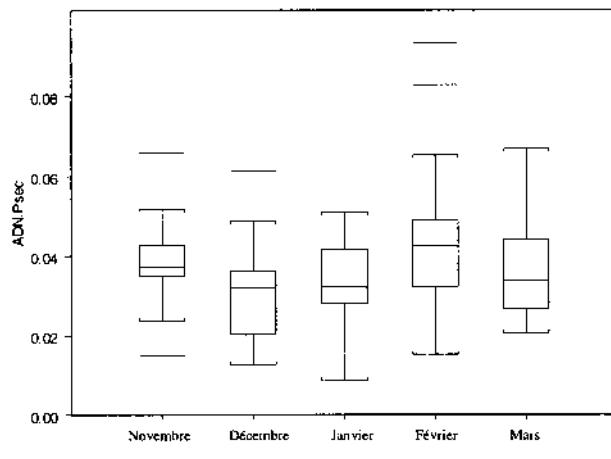
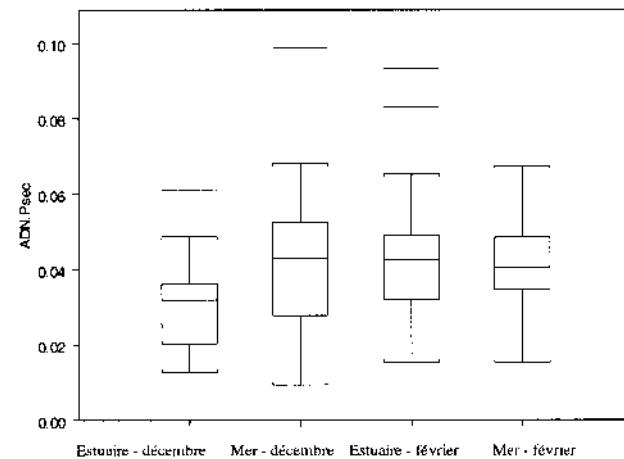


Figure 3. Données ADN/Poids sec pour les civelles au cours de la saison de migration 1999/2000 et capturées en mer et en estuaire (Boîte à moustaches).

Des valeurs aberrantes sont décelées lors de la construction des boîtes à moustaches sur des valeurs extrêmes (*tableau IV*). Ces valeurs sont éliminées du jeu de données pour la réalisation des tests de rang ultérieurs.

Les tests appliqués montrent qu'il existe une différence faiblement significative entre les civelles capturées en décembre en mer et les civelles capturées à la même période en estuaire, aussi bien pour le rapport ADN/poids sec que pour le pourcentage d'eau (*tableau V*). En février, aucune différence significative n'est observée.

L'analyse du rapport ADN/poids sec et de la teneur en eau des civelles capturées en estuaire pour les 5 principaux mois de migration montre des différences en prenant en compte tous les stades confondus, surtout au niveau des teneurs en eau. En revanche, les stades V_B ne présentent aucune différence significative. Ces fluctuations peuvent être liées à la structure de l'échantillonnage (présence



d'individus pigmentés seulement en fin de saison, voir *tableaux II et IV*). Pour vérifier l'existence d'une relation entre les caractéristiques biométriques des civelles et les fluctuations de l'indice de condition et du pourcentage d'eau, 4 classes de taille ont été définies. L'hypothèse d'égalité entre les classes est testée mais aucune différence significative n'est observée ($\chi^2 = 3 - ddl = 3 - p = 0,39$).

4. Discussion

Comme dans les travaux antérieurs sur l'Adour [5, 6] ou sur d'autres estuaires [3, 4] une diminution saisonnière de la longueur et du poids des civelles en migration dans l'estuaire accompagnée d'une évolution pigmentaire est observée (voir *tableau II*). Ici, la problématique est d'évaluer un éventuel affaiblissement des civelles en fin de saison par des pertes en eau et en réserves énergétiques

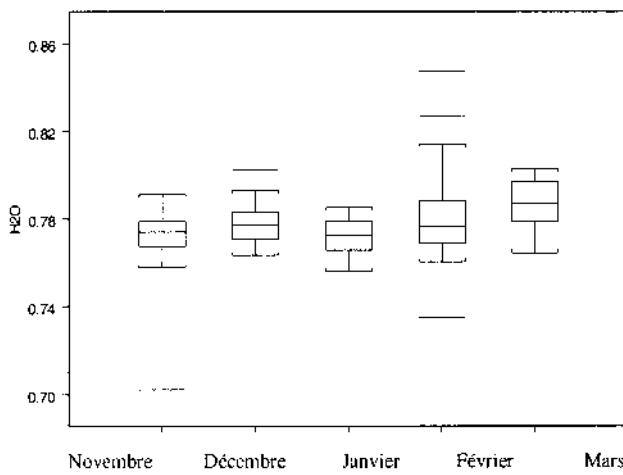


Figure 4. Valeurs hydriques des civelles prélevées en mer et en estuaire au cours de la saison.

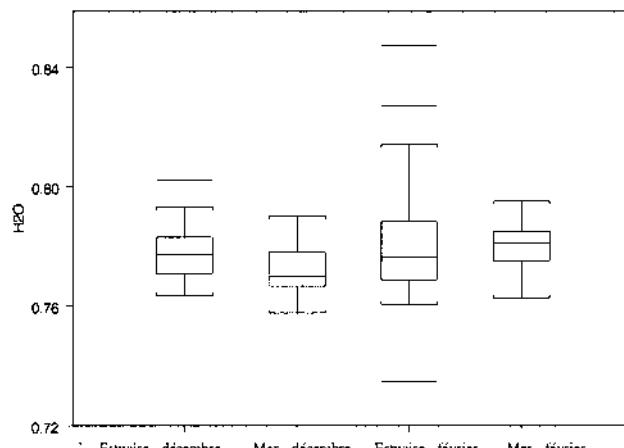


Tableau IV. Application du Test de Dixon sur les valeurs extrêmes.

Date	ADN/P.sec ($\mu\text{g}/\text{mg}$)	Stade Pigmentaire	N individus	Test de Dixon	Valeur de $(r)p$	Résultats
10 novembre 1999	0,0149	V_B	25	0,3518	0,406	Conservée
10 novembre 1999	0,0659	V_B	25	0,4097	0,406	Rejetée
9 décembre 1999	0,0612	V_B	25	0,3598	0,406	Conservée
6 décembre 1999	0,0988	V_A	25	0,4692	0,406	Rejetée
2 février 2000	0,0590	V_B	15	0,4490	0,525	Conservée
2 février 2000	0,0730	VI_{A2}	15	0,5942	0,525	Rejetée
8 février 2000	0,0933	V_B	25	0,4201	0,406	Rejetée
8 février 2000	0,0829	V_B	25	0,4278	0,406	Rejetée
	% H ₂ O					
10 novembre 1999	70,22	V_B	25	0,718	0,406	Rejetée
9 décembre 1999	80,22	V_A	25	0,356	0,406	Conservée
2 février 2000	79,64	V_B	15	0,462	0,525	Conservée
8 février 2000	84,74	V_A	25	0,412	0,406	Rejetée
8 février 2000	82,72	VI_{A1}	25	0,381	0,406	Conservée
8 février 2000	73,48	V_B	25	0,356	0,406	Conservée

induites par le jeûne et la transition entre le milieu océanique et continental. Ainsi l'indice ADN/poids sec et le pourcentage d'eau sont utilisés en complément des paramètres biométriques. Les résultats de nos travaux montrent que ces paramètres ne permettent pas de différencier dans le temps et dans l'espace les groupes de civelles en migration, la variabilité au sein des groupes est importante (voir *tableau II*). Les civelles jeûnent pendant la traversée du plateau continental, dont la durée est estimée entre 30 et 80 jours [21], et la reprise de l'alimentation se fait en eau douce (stades VI_{A3} à VI_{A4}) [2, 22]. Tous les individus analysés sont à un stade plus précoce et sont supposés jeûner depuis 1 à 3 mois.

4.1. Fluctuations d'origine océanique

L'hypothèse d'une diminution de la longueur et du poids résultant de conditions de migrations océaniques plus ou moins favorables en fonction de la saison [23]

n'est pas validée par nos résultats. La productivité de l'écosystème océanique est plus faible en fin de saison d'après les rythmes de croissance mesurés sur les otolithes [24]. L'origine géographique et/ou la date d'éclosion des larves dans la mer des Sargasses produiraient des civelles aux caractéristiques biométriques différentes qui arriveraient sur les côtes européennes de façon échelonnée dans le temps. De nouveaux individus arriveraient tous les mois en estuaire dans le même état physiologique que le groupe précédent mais avec une longueur et un poids différents. Les individus qui arrivent dans le sud du golfe de Gascogne à un stade peu pigmenté présentent les mêmes caractéristiques. Des travaux préliminaires montrent également, à partir d'études biométriques et physiologiques, une homogénéité des civelles capturées en Loire et en Adour [25]. En revanche, elles s'avèrent très différentes d'un lot capturé en Méditerranée. Ces résultats étayent les hypothèses basées sur des données courantologiques [26] et génétiques [27]. Ces études portent sur l'existence de 3

Tableau V. Résultat de l'Analyse de rang réalisée sur le rapport ADN/Psec et % d'eau sur les civelles au stade V_B et tous stades pigmentaires confondus. Au risque $\alpha = 0,05$.

V_B	ADN /Poids Sec		% H ₂ O		H_0
	Wilcoxon	Proba	Wilcoxon	Proba	
Décembre - mer-estuaire	2,9586	0,0031	1,9977	0,0457	Rejetée
Février - mer-estuaire	0,7408	0,4588	0,1443	0,8852	Acceptée
Février - marée	-0,3273	0,7434	0,1575	0,8748	Acceptée
Saison	Kruskal - Wallis 4,6375	0,3265	Kruskal - Wallis 3,2119	0,2007	Acceptée
$V_A - V_B - VI_A$	ADN /Poids Sec		% H ₂ O		H_0
Décembre - mer-estuaire	Wilcoxon -2,4701	Proba 0,0135	Wilcoxon 2,5303	Proba 0,0114	Rejetée
Février - mer-estuaire	0,2426	0,8083	-0,3687	0,7124	Acceptée
Février - marée	-0,8947	0,371	1,0256	0,3051	Acceptée
Saison	Kruskal - Wallis 10,5958	0,0315	Kruskal - Wallis 20,3481	0,0004	Rejetée

sous-populations d'anguille européenne, provenant de 3 zones géographiques distinctes au niveau de la mer des Sargasses et qui alimentent les 3 secteurs de l'Atlantique Est, les côtes du golfe de Gascogne étant alimentées principalement par le courant Nord Atlantique. Ainsi les résultats confortent l'hypothèse selon laquelle les civelles analysées dans le cadre de ce travail seraient originaires de la même zone de ponte [27] et emprunteraient la même voie de migration [4].

4.2. Cycle saisonnier de la migration

En estuaire, une augmentation du rapport ADN/poids sec traduisant un affaiblissement des individus migrant en fin de saison était envisageable. Les travaux japonais montrent une augmentation saisonnière de la quantité individuelle d'ADN [13]. Cette augmentation semble être mise en relation avec celle de la température de l'eau qui nécessiterait une mobilisation plus importante des réserves énergétiques. Cependant ces travaux portent seulement sur une dizaine d'individus par mois et présentent également une forte variabilité individuelle [13]. Les variations du rapport ADN/poids sec et des teneurs en eau dans le cas du sud du golfe de Gascogne montrent une stabilité au cours de la saison avec des fluctuations mensuelles liées à la pigmentation des individus en fin de saison. De plus, dans la zone d'étude aucune augmentation de la température des eaux marines et seulement un faible accroissement de la température des eaux estuariennes sont mesurés en fin de saison ce qui pourrait expliquer en partie la stabilité observée.

4.3. Variations liées à la traversée de l'estuaire

La transition entre les deux milieux aux caractéristiques de salinité et température différentes nécessite une adaptation métabolique mobilisant de l'énergie [28]. Des variations de l'indice d'amaigrissement et du pourcentage d'eau devraient apparaître dans les résultats. Les variations observées de l'indice ADN/poids sec et de la teneur en eau entre les civelles capturées en mer et en estuaire ne sont pas significativement différentes, sauf en décembre où cette différence est significative. Les civelles de mer, capturées en eau salée et provenant de la plage de Moliets, sont prises juste en face d'un courant où elles pénètrent en abondance pendant la saison de migration. Il est possible que les individus échantillonnés aient pénétré en eau douce avant de repartir en mer. Les travaux antérieurs à partir de la lecture des otolithes n'excluent pas un retour en mer après un passage en estuaire [29]. Cette hypothèse est envisageable car on retrouve de nombreux stades estuariens V_B dans les échantillonnages marins, surtout en février. Un échantillonnage plus éloigné d'une embouchure pourrait être plus pertinent. De plus, les travaux sur l'hydrodynamisme dans l'estuaire, à partir de la simulation de trajectoires de civelles sur l'Adour, montrent qu'elles peuvent remonter à 22 km en amont (Urt) en une journée, à partir du moment où elles ont franchi le front de salinité [30]. Les civelles utilisent les courants favorables

pour pénétrer en estuaire et poursuivre leur migration, minimisant ainsi les dépenses énergétiques [31]. Si on considère qu'elles mettent 2 à 3 jours pour changer de milieu [28, 32] cela signifie qu'il s'écoule 3 à 4 jours entre la capture en mer et en estuaire. L'activité métabolique des civelles pendant la transition de milieu est peu connue et les pertes énergétiques qu'elles subissent à travers le processus d'osmorégulation n'ont jamais été étudiées. Les fortes capacités d'osmorégulation des civelles, souvent citées dans la bibliographie [33, 34] à travers d'expérimentations en laboratoire, pourraient expliquer des pertes lipidiques négligeables en quelques jours seulement alors qu'elles sont capables de résister au jeûne plusieurs mois. De plus, la faible activité métabolique signalée sur *Anguilla japonica* [13] conforte les résultats obtenus. Des travaux complémentaires sur le processus d'adaptation des civelles à l'eau douce permettraient de quantifier les dépenses énergétiques en fonction de l'avancée des individus dans l'estuaire et de la diminution de la salinité. De plus, ces travaux permettraient d'évaluer l'impact d'événements hydroclimatiques, tels que des crues, sur le recrutement de civelles en quantité et en qualité dans l'estuaire.

5. Conclusion et Perspectives

L'homogénéité du rapport ADN/poids sec et de la teneur en eau des individus prélevés au cours de la saison de migration 1999/2000 soulève quelques réflexions concernant la méthodologie employée. Celle-ci peut-être non appropriée pour des larves de poissons sauvages, à forte variabilité individuelle, jeûnant sur une longue période et en fin de phase de métamorphose. Ces résultats pourraient être validés par une étude en condition expérimentale afin de définir un rythme d'augmentation de ces paramètres au cours du jeûne.

L'homogénéité saisonnière des flux de civelles arrivant en estuaire suggère que la diminution en taille et en poids observée soit le reflet de la présence de plusieurs aires de pontes au niveau de la mer des Sargasses, ou bien de pontes échelonnées dans le temps. L'échantillonnage tel qu'il est réalisé montre que la transition entre le milieu marin et continental n'est pas un événement mobilisateur de beaucoup d'énergie, ce qui confirme les fortes capacités osmotiques de la civelle. Ce travail doit également être validé et complété par une étude otolithométrique pour une meilleure connaissance des voies de migration des civelles afin de définir les conditions environnementales trouvées par les individus lors de la traversée océanique.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes ayant participé à l'échantillonnage biologique. Le personnel du Laboratoire d'ichtyoécologie de l'équipe Ephe-CNRS (université de Perpignan) pour le traitement des échantillons. Les remerciements s'adressent également au Laboratoire de chimie-physique de l'université de Perpignan pour la mise à disposition du spectrofluorimètre.

Références

- [1] Lee T.W., Lee K.S., Daily growth increments and lunar pattern in otolith of the eel, *Anguilla japonica*, in the freshwater, Bull. Korean Fish. Soc. 22 (1989) 36–40.
- [2] Lecomte-Finiger R., Etude morphométrique et énergétique de la civelle de méditerranée au cours de la pigmentation, Vie et Milieu 33 (1983) 87–92.
- [3] Boëtius I., Boëtius J., Ascending elvers, *Anguilla anguilla*, from five european localities. Analyses of pigmentation stages, condition, chemical composition and energy reserves, Dana 7 (1989) 1–12.
- [4] Desaunay Y., Gueurault D., Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae : a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity, J. Fish Biol. 51 (1997) 317–339.
- [5] de Casamajor M.N., Prouzet P., Lazure P., Identification des flux de civelle (*Anguilla anguilla*) à partir des relations d'allométrie en fonction des conditions hydrodynamiques dans l'estuaire de l'Adour, Aquat. Living. Resour. 13 (2000) 411–420.
- [6] Charlon N., Blanc J.M., Etude des civelles d'*Anguilla anguilla* L. dans la région du bassin de l'Adour. 1-Caractéristiques biométriques de longueur et de poids en fonction de la pigmentation, Arch. Hydrobiol. 93 (1982) 238–255.
- [7] Bergeron J.P., Nucleic acids in ichthyoplankton ecology : a review, with emphasis on recent advances for new perspectives, J. Fish Biol. 51 (1997) 284–302.
- [8] Fontaine M., Les mécanismes physiologiques des migrations des poissons, Océanis 2 (1976) 343–363.
- [9] Ferron A., Leggett W.C., An appraisal of condition measures for marine fish larvae, Adv. Mar. Biol. 30 (1994) 217–303.
- [10] Bergeron J.P., Boulhic M., Galois R., Effet de la privation de la nourriture sur la teneur en ADN de la larve de sole (*Solea solea* L.), J. Mar. Sci. 48 (1991) 127–134.
- [11] Richard P., Bergeron J.P., Boulhic M., Galois R., Person-Le Ruyet J., Effect of starvation on rna, dna and protein content of laboratory reared larvae and juveniles of *Solea solea*, Mar. Ecol. Prog. Ser. 72 (1991) 69–77.
- [12] Bergeron J.P., Person-Le Ruyet J., Teneur en ADN de la larve de *Dicentrarchus labrax* : évolution ontogénétique et effet de la privation de nourriture, Aquat. Living Resour. 10 (1997) 247–250.
- [13] Kawakami Y., Mochioka N., Kimura R., Nakazono A., Seasonal changes of the rna/dna ratio, size and lipid contents and immigration adaptability of japonese glass-eels, *Anguilla japonica*, collected in northern Kyushu, Japan, J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 238 (1999) 1–19.
- [14] Elie P., Lecomte-Finiger R., Cantrelle I., Charlon N., Définition des limites des différents stades pigmentaires durant la phase civelle d'*Anguilla anguilla* L. (Poisson Téléostéen Anguilliforme), Vie Milieu 32 (1982) 149–157.
- [15] Le Peccq J.B., Paoletti C., A new fluorometric method for RNA and DNA determination, Anal. Biochem. 17 (1966) 100–107.
- [16] Karsten U., Wollenberger A., Determination of DNA and RNA in homogenised cells and tissues by surface fluorometry, Anal. Biochem. 46 (1972) 135–148.
- [17] Karsten U., Wollenberger A., Improvements in the ethidium bromide method for direct fluorimetric estimation of DNA and RNA in cell and tissue homogenates, Anal. Biochem. 77 (1977) 464–470.
- [18] Anonyme, Statistique appliquée à l'exploitation des mesures, tome 1, Ed. Masson, C.E.A., 1978.
- [19] Kruskal W.H., Wallis W.A., Use of ranks in one criterion variance analysis, J. Am. Statist. Ass. 47 (1952) 583–621.
- [20] Wilcoxon F., Individual comparisons by ranking methods, Biometrics 1 (1945) 80–83.
- [21] Lecomte-Finiger R., Growth history and age at recruitment of European eels (*Anguilla anguilla*) as revealed by otolith microstructure, Mar. Biol. 114 (1992) 205–210.
- [22] Dutil J.D., Michaud M., Giroux A., Seasonal and diel patterns of stream invasion by American eels (*Anguilla rostrata*) in the northern Gulf of St Lawrence, Can. J. Zool. 67 (1987) 182–188.
- [23] Haro A.J., Krueger W.H., Pigmentation, size and migration of elvers (*Anguilla rostrata* (Lesueur)) in a coastal Rhode Island stream, Can. J. Zool. 66 (1987) 2528–2533.
- [24] Desaunay Y., Guérault D., Grellier P., Validation of daily increments in the otoliths of *Anguilla anguilla* (L.) larvae by vital marking experiment in oceanic area. Poster, Ifremer, Nantes, 1998.
- [25] Lacourge M., Etude comparée de civelles (*Anguilla anguilla*) en provenance de l'Atlantique (Loire, Adour) et de Méditerranée (Salses-Leucate) : pigmentation, taille, masse, âge, indice de condition et rapport ADN/Poids sec, Mémoire Maîtrise, Uppa-Ephe, Perpignan, 2000.
- [26] Otten J.J., April and august northeast Atlantic surface water masses reflected in planktic foraminifera, Netherlands J. Sea Res. 28 (1992) 261–283.
- [27] Daemen E., Volckaert F.A.M., Cross T., Ollevier F., New evidence of genetic structure in european eel. EIFAC/ICES, Working group on eel, Silkeborg, Denmark, 20-24/09/1999.
- [28] Cicciotti E., Ricci T., Scardi M., Fresi E., Cataudella S., Interseasonal characterization of glass eel migration in the River Tiber: space and time dynamics, J. Fish Biol. 47 (1995) 248–255.
- [29] Lecomte-Finiger R., Contribution de l'otolithométrie à l'étude de la dynamique de la migration larvaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, Bull. Fr. Pêche Piscic. 335 (1994) 17–31.
- [30] Prouzet P., Sanchez F., Lazure P., Modèle hydrodynamique à une dimension de l'estuaire de l'Adour : mise au point et calibration, application à la modélisation de la migration de la civelle dans l'estuaire, Rapport interne Ifremer, St-Pée-sur-Nivelle, 2000.
- [31] Barbin G.P., Krueger W.H., Behaviour and swimming performance of elvers of the American eel, *Anguilla rostrata*, in an experimental flume, J. Fish Biol. 45 (1994) 111–121.
- [32] McGovern P., McCarthy T.K., Elvers migration in the River Corrib system, western Ireland, Irish Fish. Invest. Series A (Freshwater) 36 (1992) 25–32.
- [33] Tosi L., Sala L., Sola C., Spamanato A., Tongiorgi P., Experimental analysis of the thermal and salinity preferences of glass-eels, *Anguilla anguilla* (L.) before and during the upstream migration, J. Fish Biol. 33 (1988) 721–733.
- [34] Cicciotti E., Macchi E., Rossi A., Cataldi E., Cataudella S., Glass eel (*Anguilla anguilla*) acclimation to freshwater and seawater : morphological changes of the digestive tract, J. Appl. Ichtyol. 9 (1993) 74–81.

ANNEXE 4 :

Passé larvaire des civelles, *Anguilla anguilla* (Linné, 1758) en migration en zones côtière et estuarienne (Adour, golfe de Gascogne) à partir de l'examen des otolithes.

Marie-Noëlle de Casamajor, Raymonde Lecomte-Finiger, Patrick Prouzet

Passé larvaire des civelles, *Anguilla anguilla* (Linné, 1758) en migration en zones côtière et estuarienne (Adour, golfe de Gascogne) à partir de l'examen des otolithes

Marie-Noëlle de Casamajor^{a,b}, Raymonde Lecomte-Finiger^b, Patrick Prouzet^{a*}

^a Laboratoire halieutique d'Aquitaine, Ifremer, Technopole Izarbel Côte Basque, Maison du parc, 64210 Bidart, France

^b Laboratoire d'ichtyoécologie, Ephe–CNRS ESA8046, université de Perpignan, 66860 Perpignan cedex, France

Reçu le 10 janvier 2001 ; accepté le 2 juillet 2001

Présenté par Jean Rosa

Abstract – Larval history of glass eels, *Anguilla anguilla*, (Linné, 1758) in migration in coastal and estuarine areas (Adour, Bay of Biscay) as revealed by otolith structure. The embryonic past of glass eels was studied from the interpretation of microstructures registered on otoliths. The aim of this work is to put in evidence possible seasonal modifications of the growth of otoliths so that differences between otoliths of glass eels caught off marine and estuarine environment. So during the season 1999–2000, from November till March, otolith sampling was realised in the southwestern part of France, in an estuarine and coastal zone. We observed a spatial and temporal evolution of proportions of the three various types of otoliths taken into account. Glass eels sampled at sea sometimes have a mark on their otoliths indicating the transition in the estuary, especially at the end of the fishing season. Measures of growth marks of otoliths showed that there were no seasonal differences during phases of the transoceanic migration and the crossing of the continental shelf. The radius of otoliths of glass eels sampled at sea was significantly smaller than those sampled in estuary. These results translated homogeneous environmental modifications met by the various larvae groups during the oceanic crossing and during the principal migration season as well as a turn over of these groups during the transition between marine and continental environment.

© 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

otolith / glass eels / golf of Biscay / larval past / migration

Résumé – Le passé larvaire des civelles est étudié à partir de l'interprétation des microstructures inscrites sur les otolithes. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence d'éventuelles modifications saisonnières de la croissance des otolithes ainsi que des différences entre les otolithes des individus capturés en milieux marins et estuariens. Ainsi, au cours de la saison 1999–2000, de novembre à mars, un échantillonnage d'otolithes est réalisé dans le Sud-Ouest de la France, en zones côtières et estuariennes. On observe une évolution spatiale et temporelle des proportions des trois différents types d'otolithes pris en compte. Les civelles capturées en mer présentent parfois sur leurs otolithes une marque de transition en estuaire, surtout en fin de saison de

*Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : decasa@st-peee.inra.fr (M.N. de Casamajor).

pêche. Les mesures des marques de croissance des otolithes montrent qu'il n'existe pas de différences saisonnières au cours des phases de migration transocéanique et de la traversée du plateau continental. Le rayon des otolithes de civelles capturées en mer est significativement plus petit que celui des civelles capturées en estuaire. Ces résultats traduisent des conditions environnementales homogènes rencontrées par les différents flux de larves pendant la traversée océanique au cours de la saison ainsi qu'un brassage de ces flux lors de la transition entre le milieu marin et le milieu continental. © 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

otolithe / civelle / golfe de Gascogne / passé larvaire / migration

. Abridged version

During the season of migration 1999–2000, from November to March, a sampling of glass eels was carried out in the Adour estuary and in the coastal zone of the Bay of Biscay. Each glass eel was characterised by its weight, its length, its pigmentation stage, its losses in water and an index of condition DNA/dry weight. Together with these informations, otoliths were taken off. We present the results concerning the interpretation of the otolith microstructures, technique widely used to study the larval past of fish larvae. Informations on glass-eel larval past during the transoceanic and estuary crossing, according to the reading of the microstructures of otoliths, will allow to specify and to confirm assumptions based on the state of slimming observed on these same glass eels.

Each otolith was embedded in resin, then grounded and etched to highlight microstructures registered in the otolith. Images were made on a scanning electron microscope with magnifications of 600 after gold metallisation. Otoliths were classified in three categories according to the presence or absence of transition mark in estuary registered and the presence of a growth zone on the edge of otolith. Proportions of these various types were opposed between the beginning and the end of the season and were significantly different among the individuals sampled at sea and in estuary. Proportions of otolith types followed the same tendencies as the development of the pigmentation. These results translated an increase in time of residence in the littoral zone and estuarine area at the end of the principal migration season. The assumption of the turn over of glass eel groups during the transition between

marine and continental environment at the end of the season suggested by the study of glass eel slimming was confirmed from the classification of the otoliths according to their type. Moreover, this otolith classification was more precise and more reliable than the state of pigmentation which was dependant on water temperature fluctuations. Knowledge on the precise conditions of deposit of the transition zone on otolith would make it possible to specify the larval past of the individuals.

Measurements of the various zones of growth registered on the otoliths show that there were seasonal differences on the level of the otolith growth. However variations observed were not statistically different. Globally, the average radius of the otoliths increased during the season. Parallelly, otolith proportions of the most developed type increased. The continuation of growth after the zone of transition in estuary was more frequently observed at the end of the season whereas the growth on the edge of the otolith in the zone of transition was constant around 5 µm.

If the glass eels which arrived in the south of the Bay of Biscay borrow the same migration path, they should be subjected to different environmental conditions according to the migration season. But the width of growth zones on otolith during oceanic crossing were constant during the fishing season, in accordance with the results obtained from the index of condition. However, their energy expenditure based on the DNA/dry weight ratio was constant over the season. This translated conditions of overall similar migration. So, microchemical analyses of otoliths would allow to specify the physicochemical parameters met by glass eels during their larval past.

1. Introduction

L'étude du passé larvaire des poissons à partir des microstructures des otolithes s'est largement développée depuis les travaux de Pannella [1]. Les *Sagittae*, les plus gros des trois otolithes, sont les plus couramment étudiés, notamment chez les anguilles [2–4]. L'utilisation du

microscope électronique à balayage permet une lecture beaucoup plus fine aboutissant à la définition d'un schéma de développement larvaire similaire quelle que soit l'espèce du genre *Anguilla* [2, 5, 6]. Seule la croissance larvaire varie entre les espèces en fonction des conditions de migration, mais surtout en raison de la distance entre l'aire de ponte et la zone de grossissement subadulte. D'autre part les travaux antérieurs montrent qu'il n'y a

aucune relation entre la croissance de la civelle et celle de ses otolithes [3].

L'espèce européenne, *Anguilla anguilla* (Linné, 1758) est celle dont la migration est la plus longue (6 000 km). Les scientifiques ne s'accordent pas encore sur la durée de la migration larvaire. Des travaux tout récents [2] confortent l'évaluation de Lecomte-Finiger et Yahyaoui [7] qui estiment, à partir du dénombrement des accroissements journaliers inscrits dans les otolithes, la durée de 7 à 9 mois. Tesch [8] se base sur les classes de taille des larves leptocéphales et propose un temps de 2 à 3 ans avant l'arrivée des civelles sur les côtes européennes.

Les seuls travaux sur les otolithes de civelles de l'Adour datent de 1992 [9], où ils sont comparés aux otolithes de civelles provenant d'autres estuaires. Ils sont plus développés et présentent une zone de transition et de croissance en estuaire plus large que les otolithes des estuaires plus septentrionaux. La migration des civelles dans l'estuaire de l'Adour a été largement étudiée au cours des dernières années. Différentes approches visent à estimer l'importance des flux de civelles en migration pour déterminer le taux d'exploitation de la civelle par la pêcherie professionnelle dans un soucis de gestion de la ressource [10]. On entend par « flux de civelles » les groupes d'individus arrivant en estuaire avec les mêmes caractères biologiques : longueur, masse et stade pigmentaire. L'étude du comportement dans l'estuaire [11, 12] permet une meilleure compréhension des modalités de passage des individus et est pris en compte dans le cadre de la modélisation de l'intensité des flux migratoires [13]. Ces études portent également sur les caractères morphométriques des civelles [14, 15]. Un mélange des flux en fin de saison, induit par les conditions environnementales, est observé dans l'estuaire [15]. L'objectif de ce travail est de compléter les travaux réalisés sur l'état d'amaigrissement des civelles [16] car les otolithes étudiés appartiennent aux mêmes individus et peuvent fournir des éléments expliquant les variations de leur état physiologique. Ces travaux montrent qu'il n'y a pas d'amaigrissement des civelles au cours de la saison bien qu'une diminution de la longueur et de la masse des individus soit observée. Les mesures des zones de croissance de l'otolithe au cours des différentes phases de la traversée océanique donneront des indices sur des modifications saisonnières des conditions de migration. L'hypothèse du mélange des flux en février avec un éventuel retour en mer des civelles [16] pourra être également précisé à partir de l'interprétation des microstructures inscrites sur les otolithes. En effet les otolithes, outre leur utilisation pour estimer l'âge individuel des poissons, permettent d'appréhender le passé larvaire des poissons et donnent des informations sur le milieu environnant [17].

2. Matériels et Méthodes

2.1. Cadre géographique

Les civelles dites « d'estuaire » proviennent de l'Adour, dans le Sud-Ouest de la France, et sont capturées à 22 km

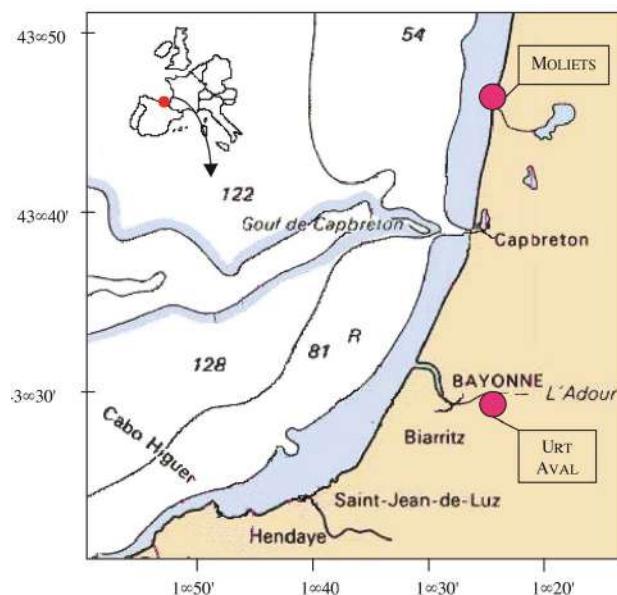


Figure 1. Localisation des sites de captures des civelles analysées.

de la limite transversale de la mer (secteur d'Urt, figure 1). Ce secteur se situe dans la zone de propagation de la marée dynamique, mais les eaux salées n'y pénètrent pas ou peu pendant la période d'étude. Les civelles qui y migrent sont déjà acclimatées à l'eau douce. Elles proviennent soit des campagnes expérimentales menées par le Laboratoire halieutique d'Aquitaine de l'Ifremer (prises aux tamis poussés en surface et en profondeur [11]) soit de la pêcherie professionnelle, qui les captures uniquement en surface à l'aide de tamis poussés par le bateau (tableau I). Les civelles dites « de mer », proviennent de la plage de Moliets (figure 1) et sont capturées par les pêcheurs professionnels à partir d'une technique de pêche dite « à la vague ».

2.2. Echantillonnages biologiques

La principale saison de migration se déroule entre novembre et mars. Pour caractériser les flux, les échantillonnages se répartissent au rythme d'un par mois, au moment de la nouvelle lune. Cela correspond à 5 échantillons de 25 civelles chacun. La caractérisation des otolithes avant la traversée de l'estuaire est établie à partir de la comparaison avec deux prélèvements de 25 civelles chacun capturés en mer. Au terme de cette campagne, 175 otolithes ont été analysés et se répartissent sur l'ensemble de la saison de migration.

2.3. Méthode de lecture des otolithes

Après la capture, chaque civelle est pesée (en g) et mesurée (en mm). Le stade pigmentaire est répertorié suivant l'échelle d'Elie et al., [18]. Le stade V_A est le moins pigmenté, le stade VI_A regroupe les individus les plus pigmentés. Le stade V_B est un stade intermédiaire le plus fréquemment observé en estuaire. Les *Sagittae* sont ensuite

Tableau I. Bilan des échantillonnages réalisés au cours de la saison de migration 1999/2000. () nombre d'otolithes interprétés.

Date 1999/2000	Zone géographique (cf.fig.1)	Origine	Nombre d'individus	Code
10 novembre 1999	Adour – Urt aval	Pêche tamis poussé	25 (18)	A
6 décembre 1999	Mer – Moliets	Pêche à la vague	25 (24)	(B)
9 décembre 1999	Adour – Urt aval	Pêche expérimentale	25 (25)	B
9 janvier 2000	Adour – Urt aval	Pêche expérimentale	25 (21)	C
1 février 2000	Mer – Moliets	Pêche à la vague	25 (22)	(D)
8 février 2000	Adour – Urt aval	Pêche expérimentale	25 (23)	D
7 mars 2000	Adour – Urt aval	Pêche expérimentale	25 (20)	E

prélevées. Chaque otolithe est inclus dans une résine synthétique (type dentaire) poncé avec un papier abrasif fin (grain 1 000). La zone poncée est polie, puis décalcifiée à l'EDTA (solution à 5 %) pour mettre en évidence les différentes structures inscrites dans l'otolithe. Des électrographies sont réalisées au microscope électronique à balayage (MEB-Hitachi S520) après métallisation à l'or (couche de 20 nm). Le grossissement le plus fréquemment utilisé est de 600 fois car il permet de mesurer les différentes phases de croissance depuis le nucleus jusqu'au bord externe de l'otolithe. Sur les 175 otolithes de civelles traités au cours de la saison de migration 1999–2000, 153 ont été interprétés (22 ne sont pas pris en compte pour des raisons techniques : précision de ponçage et lisibilité au microscope) (tableau 1).

L'interprétation de ces photographies permet une classification des otolithes et les mesures des différentes zones suivant la description définie par Lecomte-Finiger et Yahyaoui [7]. Cette interprétation à partir des structures observées sur l'otolithe, correspond au schéma de déve-

loppement larvaire admis par la majorité des scientifiques travaillant sur le genre *Anguilla* [2–4]. Dans la partie centrale de l'otolithe (figure 2), est observé le nucleus qui matérialise l'éclosion et le début de la vie larvaire des anguilles. Depuis la mer des Sargasses, jusqu'aux abords du plateau continental l'otolithe poursuit sa croissance et une nouvelle marque s'inscrit, matérialisant la métamorphose de leptocéphale en civelle. La zone de croissance qui suit correspond à la phase de croissance pendant la traversée du plateau continental. L'arrivée en estuaire s'inscrit en bordure d'otolithe sous la forme d'une double marque. Cette double marque, appelée « zone de transition » est suivie d'une reprise de croissance de l'otolithe chez les civelles ayant séjourné en estuaire.

Les otolithes sont classés suivant trois types (figure 2). Le type 1 correspond à l'absence de zone de transition entre « milieu marin et estuaire » à la périphérie de l'otolithe ; le type 2, à la présence d'une zone de transition en bordure d'otolithe ; le type 3 présente un développement de l'otolithe au-delà de la transition en eau estuarienne. Les

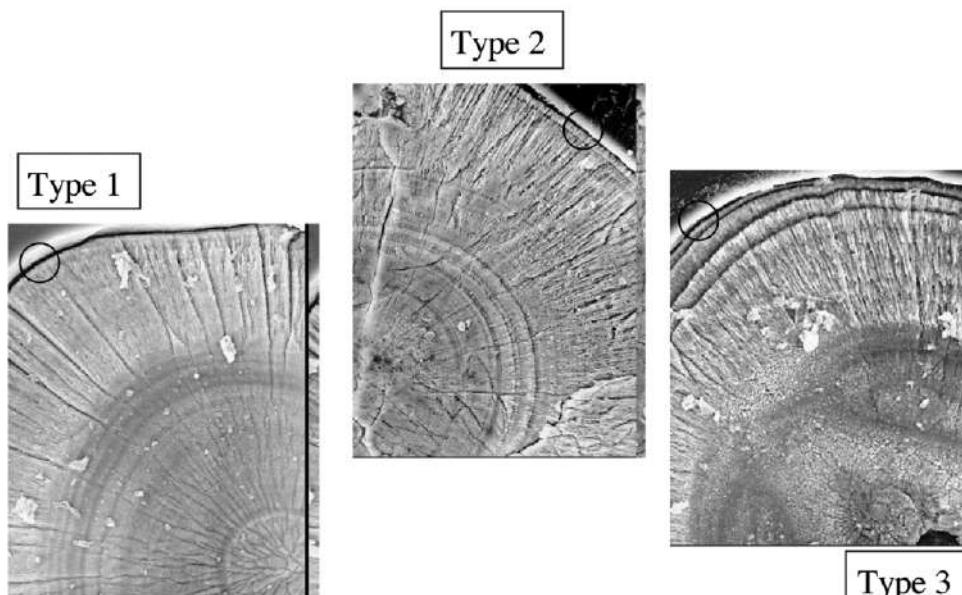


Figure 2. Classification des otolithes en fonction des microstructures (photo MEB – X600). ○ Zone de croissance en bordure d'otolithe permettant de différencier les types. Type 1 : pas de double marque en bordure d'otolithe – Type 2 : apparition de la double marque – Type 3 : croissance de l'otolithe après l'inscription de la double marque.

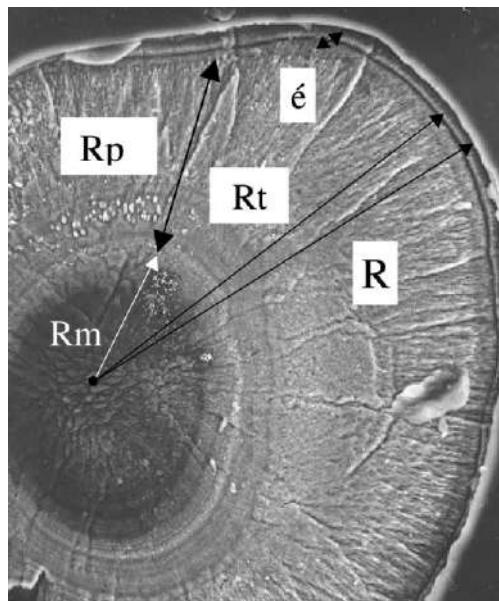


Figure 3. Paramètres mesurés dans les différentes zones de croissance inscrites sur les otolithes. R_m : distance entre le nucleus et la zone de métamorphose leptocéphale-civelle – R_t : distance entre le nucleus et la double marque – R : rayon total de l'otolithe – ϵ : épaisseur de la zone de transition en estuaire – R_p : distance entre la métamorphose leptocéphale-civelle et la double marque.

mesures (en μm) des principales zones de croissance inscrites sur l'otolithe sont les suivantes (*figure 3*). La distance (R_m) entre le nucleus et la zone de métamorphose de leptocéphale en civelle correspond à la croissance de l'otolithe pendant la traversée de l'océan Atlantique. La distance (R_t) depuis le nucleus jusqu'à la double marque est supposée matérialiser la zone de transition en estuaire. Le rayon total de l'otolithe (R) représente sa croissance globale depuis l'éclosion jusqu'au bord. Cette mesure inclut l'épaisseur (ϵ) de la zone de transition pour caractériser la traversée de l'estuaire. À partir de ces mesures, on calcule la distance (R_p) correspondant à la traversée du plateau continental durant la phase civelle.

2.4. Traitement statistique des données

Afin de déterminer si les types d'otolithes représentés et les différentes zones de croissance mesurées diffèrent soit au cours de la saison soit entre la zone côtière et estuarienne, des tests statistiques ont été mis en œuvre. Ces méthodes permettront de déterminer d'éventuelles différences dans le passé larvaire des civelles. L'hypothèse nulle d'égalité des échantillons est testée, les décisions statistiques sont prises avec un risque d'erreur α égal à 5 %.

Les variations des proportions des différents types d'otolithes au cours de la saison sont testées par un test du χ^2 de conformité. Pour éliminer au mieux la variabilité individuelle intragroupe, des mesures des microstructures d'otolithes liées au métabolisme de chaque civelle, et mettre en évidence la variabilité liée au phénomène étudié, on

utilise un estimateur rapport. Ainsi, la distance R_m est remplacée par R_m/R et la distance R_p par R_p/R . L'utilisation de ces estimateurs a pour effet de diminuer la variance à l'intérieur de chaque échantillon. La variabilité des mesures d'otolithes, au cours de la saison de migration (5 échantillons en provenance d'estuaire) entre les trois types d'otolithes, est étudiée avec le test du rang médian à deux niveaux de classification [19]. Il s'agit de tester l'effet des mesures des otolithes en fonction des types d'otolithe en se basant sur les valeurs des médianes.

Pour la comparaison des otolithes de civelles de mer et d'estuaire en décembre et en février, l'application du test t de Student est possible grâce à l'homogénéisation des variances de l'échantillon par l'utilisation de l'estimateur rapport. Ce test présente l'avantage d'être plus robuste qu'un test de comparaison non paramétrique. La condition d'indépendance des échantillons et de normalité de la distribution pour l'application de ce test est vérifiée.

3. Résultats

Les trois catégories d'otolithes définies représentent dans l'échantillonnage les effectifs suivants : type 1, 35,3 % ; type 2, 39,2 % ; type 3, 25,5 %. En moyenne, le rayon total est de 192,4 μm ($\pm 16 \mu\text{m}$). Les distances mesurées du nucleus aux différentes structures remarquables sont en moyenne de 186,7 μm ($\pm 15,2 \mu\text{m}$) pour R_t , la distance depuis le nucleus jusqu'à la métamorphose du leptocéphale en civelle est en moyenne de 114,5 μm ($\pm 10,9 \mu\text{m}$). L'épaisseur de la zone de transition (ϵ) est constante autour de 5 μm . Au sein de ces tendances générales, des variations saisonnières et spatiales sont observées.

3.1. Modifications saisonnières a partir des civelles capturées en estuaire

3.1.1. Variations saisonnières de la structure des otolithes

Echantillonnages estuariens : la proportion des types d'otolithes de civelles change fortement au cours de la saison (*figure 4*). Le test du χ^2 est fortement significatif ($\chi^2 = 228$ pour $d_f = 12$ avec une probabilité ≈ 0). Au cours des cinq mois de migration le pourcentage d'otolithes de type 1 diminue progressivement (de 64,7% en novembre à 10 % en mars). Celui des otolithes de type 2, augmente en début de saison, puis diminue (maximum en janvier : 68,2 %). Enfin, pour les otolithes de type 3, la proportion augmente régulièrement pour atteindre le maximum en fin de saison (75 %). Echantillonnages prélevés en mer : une forte majorité d'individus présente des otolithes de type 1 en décembre (75 %) ; ceux de type 3 sont absents. En février, les 3 types d'otolithes sont bien représentés (*figure 4*). Les différences entre la mer et l'estuaire sont hautement significatives : en décembre ($\chi^2 = 45,26$ pour $d_f = 4$ avec une probabilité ≈ 0) comme en février ($\chi^2 = 24,01$ pour $d_f = 4$ avec une probabilité $\approx 0,0001$). La composition par type d'otolithe suit des tendances identi-

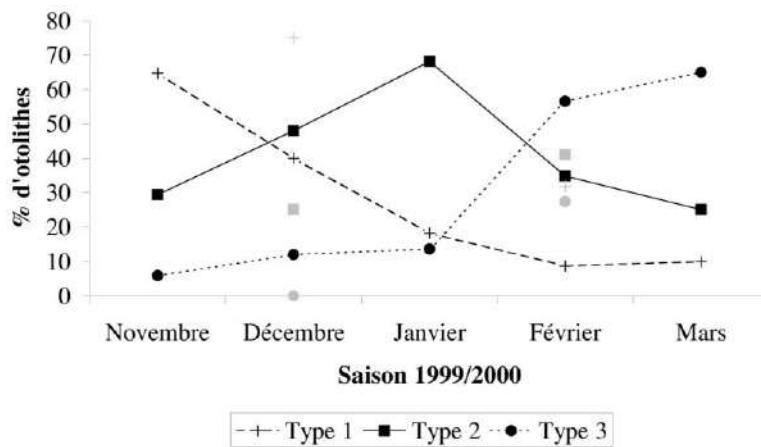


Figure 4. Evolution de la répartition des types d'otolithes (en %) au cours de la saison de migration en mer (gris) et en estuaire (noir).

ques à l'évolution pigmentaire des civelles (*tableau II*). Les otolithes de type 1 appartiennent le plus souvent à des civelles au stade V_A , les otolithes de type 3 à des civelles au stade V_{IA} et plus (*tableau II*). Pour le stade V_B , la tendance est moins marquée. Les trois types d'otolithes sont trouvés, les otolithes de type 2 étant toujours en forte proportion. Des modifications de la structure des otolithes sont constatées au cours de la saison. Pour les échantillons réalisés en zone côtière, les otolithes sont plus fréquemment de type 1 et les civelles au stade V_A en décembre. En février, les otolithes sont plus développés et les stades de pigmentation plus avancés (*tableau II*).

3.1.2. Variations saisonnières des mesures des otolithes

Une évolution globale de la taille des otolithes au cours de la saison est observée. Les grands sont plus fréquents en fin de saison et les petits et moyens mieux représentés en début de saison (*tableau III*). En moyenne, le rayon total des otolithes de civelles augmente d'un type à l'autre et d'un mois à l'autre. De plus, une forte hétérogénéité des variances est notée (*tableau III*). Celles-ci s'accroissent au cours de la saison. Entre novembre et janvier, les rayons totaux des otolithes de civelles échantillonées sont constants puis s'accroissent rapidement en février et en mars (*tableau IV*). La croissance de l'otolithe semble plus importante pendant la phase leptocéphale jusqu'à la métamorphose en civelle, que pendant la phase correspondant à la traversée du plateau continental. Mais les tests montrent que cette tendance n'est pas significative (*tableau V*). Les

mesures des différentes structures inscrites sur l'otolithe au cours de la saison ne sont pas statistiquement différentes en fonction du type d'otolithe. Ces résultats traduisent une croissance de l'otolithe identique au cours de la traversée océanique quelle que soit la date d'arrivée en estuaire (*tableau V*).

3.2. Comparaison entre les otolithes de civelles de mer et d'estuaire

Le rayon total (R) des otolithes de civelles capturées en estuaire est supérieur à celui de celles capturées en zone côtière aussi bien en décembre qu'en février (*tableau VI*). La croissance de l'otolithe pendant les phases leptocéphale et civelle est identique entre les échantillonnages en mer et en estuaire.

On constate une différence significative entre les rayons totaux (R) des otolithes prélevés sur les civelles capturées en zone côtière et celles capturées en estuaire pour les deux mois étudiés (*tableau VI*). Cela traduit un développement de l'otolithe pendant la traversée de l'estuaire. En outre, le rapport (R_p/R) est significativement différent en février entre les deux lots de civelles, ce qui n'est pas le cas en décembre.

4. Discussion

Les mesures des otolithes réalisées dans ce travail correspondent à celles citées pour *Anguilla anguilla* par

Tableau II. Répartition des otolithes en fonction de leur type et du stade pigmentaire des individus au cours de la saison et en fonction de la localisation de l'échantillonnage.

Type	Estuaire												Mer					
	Novembre			Décembre			Janvier			Février			Mars			Décembre		
V_A	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
V_B	9	5	2	2	11	3	3	13	1	2	5	6	2	5	6	10	6	4
V_{IA+}				1	0	1	1		3	7			6			9	3	3

Tableau III. Moyenne (écart standard) du rayon total des otolithes de civelles d'estuaire en fonction du type d'otolithe et du mois.

R	Novembre		Décembre		Janvier		Février		Mars	
	μ	n	$\mu$	n	$\mu$	n	$\mu$	n	$\mu$	n
Type 1	191,2 (13,5)	10	190,7 (14,5)	10	180,3 (19,7)	4	185,1 (15,3)	5	200,8 (21,6)	2
Type 2	194,7 (10,7)	5	194,4 (15,8)	12	192,6 (17,8)	14	196,9 (17,3)	4	201,9 (19,5)	5
Type 3	182,2		200,7 (16,5)	3	198,3 (3,9)	2	203 (16,8)	14	197,3 (20,6)	13
Type 123	191,7 (12,2)	16	193,7 (15)	25	190,7 (17,7)	20	198 (17,4)	23	199,8 (19,3)	20

Lecomte-Finiger [4]. Mais Desaunay et al. [9], à partir des mêmes mesures et de civelles provenant de l'Adour en février 1992 trouvent des résultats différents. Il apparaît

Tableau IV. Mesures du rayon total des otolithes (R) de la distance du nucléus à la métamorphose (R_m) et de la traversée du plateau (R_p) au stade civelle et leurs écarts standard au cours de la saison de migration principale.

Estuaire	Phase leptocéphale (R_m)	Phase civelle (R_p)	Rayon total (R)
Novembre	113,01 (8,49)	76,61 (9,26)	191,74 (12,23)
Décembre	112,86 (10,03)	77,03 (14,54)	193,68 (15,05)
Janvier	116,94 (10,85)	69,56 (9,31)	190,69 (17,66)
Février	121,04 (10,51)	68,06 (13,66)	198,06 (17,42)
Mars	116,45 (12,01)	72,92 (14,15)	199,83 (19,31)

Tableau V. Test du rang médian en fonction de la date d'échantillonnage et des différents types d'otolithes.

	Type 1	Type 2	Type 3	χ^2
R	190,3	195,6	202,8	12,43
R_m/R	0,603	0,607	0,592	12,78
R_p/R	0,396	0,371	0,348	13,11

$$\chi^2=15,5 - \alpha = 0,05$$

une variabilité entre les deux années, tant au niveau des rayons mesurés, des proportions des différents types que de l'évolution de la pigmentation des individus. Cette différence reflète une variabilité interannuelle des conditions de migration transocéanique à travers le développement des otolithes.

4.1. Passé larvaire et migration transocéanique

Les mesures des distances de croissance inscrites sur les otolithes de civelles (phases leptocéphale et civelle) sont homogènes quelle que soit la date d'arrivée en estuaire. Ces résultats confortent ceux obtenus à partir de l'état d'amaigrissement. En effet, l'indice de condition ADN/poids sec de ces mêmes civelles est stable au cours de la saison [16]. Des travaux japonais [2, 5, 6] montrent une stabilité saisonnière du rayon de l'otolithe, pour un stade donné, au sein d'une même espèce. Par contre, ces mesures diffèrent entre plusieurs espèces d'anguilles tropicales [6]. Guérault et al. [20] suggèrent pour l'anguille européenne que les conditions de migration sont plus ou moins favorables au cours de la saison : modifications du métabolisme pouvant être liées à des facteurs environnementaux externes ou à la durée de la migration en relation avec la courantologie. Ces paramètres expliqueraient des modifications saisonnières des caractéristiques biométriques. Cependant, les résultats obtenus dans ce travail

Tableau VI. Comparaison des mesures réalisées sur les otolithes de civelles (R , R_m , R_p) et leurs écarts standard en zone côtière et estuarienne. Application du test t de Student ($\alpha = 0,05$).

	Phase leptocéphale (R_m)	Phase civelle (R_p)	Rayon total (R)
Décembre mer	110,07 (9,95)	72,08 (12,3)	183,4 (13,01)
Décembre estuaire	112,86 (10,03)	77,04 (14,59)	193,68 (15,05)
Février mer	111,76 (10,7)	70,58 (11,47)	185,7 (9,19)
Février estuaire	121,04 (10,51)	68,06 (13,66)	198,06 (17,42)

	Décembre Mer-Estuaire			Février Mer-Estuaire		
	t	P	décision	t	P	décision
Rayon total (R)	-2,52	0,015	Rejetée	-2,94	0,005	Rejetée
Leptocéphale (R_m/R)	1,08	0,285	Acceptée	-0,77	0,45	Acceptée
Civelle (R_p/R)	-0,28	0,78	Acceptée	2,29	0,03	Rejetée

montrent que la diminution de la longueur et de la masse des civelles au cours de la saison résulterait de pontes provenant de zones géographiques distinctes ou étaillées dans le temps au niveau de la mer des Sargasses plutôt qu'à un amaigrissement lié aux conditions océaniques de migration.

4.2. Passage des flux entre la mer et l'estuaire

La double marque en bordure d'otolithe, différenciant le type 1 du type 2, est caractéristique d'un changement de milieu [4, 7, 21, 22]. Les échantillons prélevés en mer présentent des otolithes de type 2 et même quelques exemplaires de type 3 en février. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées expliquant la présence en mer de civelles dont les otolithes présentent une marque de transition.

Une partie des civelles entrant en estuaire pendant le flot pourrait être refoulée en mer lors du jusant. Elles n'auraient pas le temps de migrer suffisamment en amont pour lutter contre les courants contraires ou de s'enfouir dans le sédiment. Cette hypothèse est envisageable sur l'Adour comme le montrent les simulations des trajectoires suivies par les civelles en période de crue [10]. De forts débits conjugués avec de faibles coefficients de marée empêchent les civelles de poursuivre leur migration en estuaire car les courants ne s'inversent pas pendant le flot [15]. De plus, leurs fortes capacités osmotiques leur permettraient de supporter un retour en eau salée [23]. Cependant, un apport massif d'eau continentale n'explique pas la présence de civelles avec des otolithes de type 2 et 3 en mer, car les débits sont faibles (autour de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pendant et avant les échantillonnages 1999–2000.

Les civelles pourraient être refoulées en mer par une forte différence thermique entre les eaux marines et continentales. Cette différence est peu marquée fin novembre ($< 3\text{--}4^\circ\text{C}$). Par contre, fin janvier, la température de l'eau de mer est de 12°C , celle des eaux continentales est de $5,5^\circ\text{C}$, soit un écart de $6\text{ à }7^\circ\text{C}$ [16]. Les travaux antérieurs témoignent d'une inhibition des remontées de civelles pour des différences thermiques supérieures à $3\text{--}4^\circ\text{C}$ [24]. Ainsi, les civelles pourraient pénétrer dans le bas estuaire où les eaux sont brassées, mais ne pourraient pas franchir le seuil thermique, ce qui expliquerait la présence de civelles avec des otolithes de type 2 et 3 en mer, en proportion importante en février.

En début de saison, les otolithes de civelles ne présentent pas tous une marque de transition bien que capturées en eau continentale. Des travaux antérieurs témoignent également de l'absence de cette marque sur des civelles capturées en estuaire [4]. De plus, la température influence la déposition de matériel sur l'otolithe, il peut être plus ou moins important en fonction de la température [25, 26]. Peu d'éléments sont disponibles sur les conditions dans lesquelles s'inscrit cette marque de transition sur l'otolithe [27], le temps de résidence en estuaire n'étant pas connu. Il n'est pas exclu que les civelles venant de transiter dans l'estuaire n'aient pas eu le temps d'inscrire cette marque. Il est également possible que cette marque corresponde à une résistance physiologique extrême, témoin d'un épuise-

ment énergétique [28]. Les travaux portant sur l'indice d'amaigrissement des civelles de l'Adour [16] ne le montrent pas. Cette marque pourrait également s'inscrire en zone côtière sous l'effet d'apports d'eaux continentales.

4.3. Développement des otolithes et de la pigmentation

L'épaisseur de la zone de transition en estuaire est constante, $5 \mu\text{m}$, ce qui représente une très faible proportion du rayon total de l'otolithe (2,6%). Les otolithes de type 3 sont significativement plus grands. Ils appartiennent, pour un grand nombre, à des individus pigmentés et sont fréquents en février et mars. La dynamique des masses d'eau montre que les civelles sont capturées très rapidement après leur entrée en estuaire [10]. Le déplacement des civelles, synchronisé avec celui de la marée montante est très rapide. Quelques jours suffisent pour qu'elles atteignent la zone de capture à 22 km en amont de l'embouchure. Les conditions hydrologiques et thermiques plus favorables en début de saison ont permis une remontée rapide de l'estuaire. Ces résultats confortent ceux obtenus sur l'état physiologique de ces mêmes individus analysés. Ils témoignent en décembre d'un amaigrissement entre les civelles capturées en mer et en estuaire. À ce moment, les individus sont peu pigmentés (V_A) [16] et les otolithes peu développés (type 1) en mer. Ceci se traduit par un flux de civelles homogènes.

Le pourcentage d'otolithes de type 3 augmente au cours de la saison de migration, alors que les otolithes de type 1 diminuent. En parallèle, la proportion de civelles pigmentées est de plus en plus importante au cours de la saison comme en témoignent de nombreux travaux [7, 29]. Les travaux de Desaunay et al. [9] montrent que l'otolithe et la pigmentation sont plus développés sur l'Adour que dans les autres estuaires français localisés plus au nord. Les otolithes de type 1 sont majoritairement des civelles au stade V_A et les types 3 sont des stades V_{IA} . Pour les otolithes de type 2, on trouve en forte proportion des stades V_B , mais tous les stades pigmentaires y sont représentés. En conséquence, le stade pigmentaire semble être sur la côte sud du golfe de Gascogne un bon indicateur du stade de développement des otolithes sauf pour les stades V_B ; le développement de la pigmentation étant très dépendant de la température [30]. Le type d'otolithe est un paramètre plus pertinent pour définir le stade de développement des individus. L'évolution saisonnière observée témoigne d'un mélange important des différents flux de civelles qui arrivent sur les côtes atlantiques avec des caractéristiques biométriques propres à chaque flux [15].

5. Conclusions

L'étude des otolithes réalisée conjointement à celle de l'indice de condition apporte des éléments importants permettant de mieux comprendre le passé larvaire des flux de civelles qui arrivent dans le sud du golfe de Gascogne au cours de la saison principale de migration de novembre à mars. Ces différents flux de civelles emprunteraient la

même voie de migration. Leur état d'amaigrissement serait semblable en début comme en fin de saison ainsi que les mesures des marques de croissance inscrites sur les otolithes. Les deux approches, otolitométrique et biochimique, montrent un mélange des flux entre la mer et l'estuaire à la fin de la saison principale de migration.

En conséquence, la diminution saisonnière des paramètres biométriques pourrait s'expliquer par une origine différente au niveau de l'aire de ponte de la mer des Sargasses ou de pontes étaillées dans le temps. Pour préciser ces informations, des analyses génétiques sont en

cours et des analyses chimiques des otolithes vont être réalisées.

Remerciements. Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant participé à l'échantillonnage biologique, le personnel du laboratoire d'ichtyoécologie de l'équipe EPHE-CNRS et du centre de microscopie électronique de l'université de Perpignan, plus particulièrement Dimitri Gorand pour son aide technique lors des prises de vue avec le MEB.

Références

- [1] Pannella G., Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns, *Science* 173 (1971) 1124–1127.
- [2] Arai T., Otake T., Tsukamoto K., Timing of metamorphosis and larval segregation of the Atlantic eels *Anguilla rostrata* and *Anguilla anguilla* as revealed by otolith microstructure and microchemistry, *Mar. Biol.* 137 (2000) 39–45.
- [3] Desaunay Y., Guerault D., Seasonal and long-term changes in biometrics of eel larvae: a possible relationship between recruitment variation and North Atlantic ecosystem productivity, *J. Fish Biol.* 51 (1997) 317–339.
- [4] Lecomte-Finiger R., Contribution de l'otolithométrie à l'étude de la dynamique de la migration larvaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 335 (1994) 17–31.
- [5] Arai T., Otake T., Tsukamoto K., Drastic changes in otolith microstructure and microchemistry accompanying the onset of metamorphosis in the Japanese eel *Anguilla japonica*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 161 (1997) 17–22.
- [6] Arai T., Limborg D., Otake T., Tsukamoto K., Metamorphosis and inshore migration of tropical eels *Anguilla* spp. In the Indo-Pacific, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 182 (1999) 283–293.
- [7] Lecomte-Finiger R., Yahyaoui A., La microstructure de l'otolithe au service de la connaissance du développement larvaire de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. III* 308 (1989) 1–7.
- [8] Tesch F.W., Age and growth rates of North Atlantic eel larvae (*Anguilla* spp.) based on published length data, *Helgol. Meeresunters* 52 (1998) 75–83.
- [9] Desaunay Y., Lecomte-Finiger R., Guérault D., Mean age and migration patterns of *Anguilla anguilla* glass eels from three french estuaries (Somme, Vilaine & Adour rivers), *Arch. Pol. Fish.* 4 (1996) 187–194.
- [10] Prouzet P., Sanchez F., Lazure P., Modèle hydrodynamique à une dimension de l'estuaire de l'Adour : mise au point et calibration, application à la modélisation de la migration de la civelle dans l'estuaire, Rapport Ifremer, 2000, 25 p. + annexes.
- [11] de Casamajor M.N., Comportement migratoire de la civelle d'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans l'estuaire de l'Adour en fonction de la variabilité des conditions environnementales, thèse, université Pau et des Pays de l'Adour, 1998, 138 p. + annexes.
- [12] de Casamajor M.N., Bru N., Prouzet P., Influence de la luminosité nocturne et de la turbidité sur le comportement vertical de migration de la civelle d'anguille (*Anguilla anguilla* L.) dans l'estuaire de l'Adour, *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 355 (1999) 327–347.
- [13] Bru N., Etude de quelques méthodes d'estimation non-paramétriques de courbes. Application à l'évaluation des flux de civelles d'anguille, thèse, université Pau et des Pays de l'Adour, 1998, 160 p.
- [14] Charlon N., Blanc J.M., Etude des civelles d'*Anguilla anguilla* L. dans la région du bassin de l'Adour. 1-Caractéristiques biométriques de longueur et de poids en fonction de la pigmentation, *Arch. Hydrobiol.* 93 (1982) 238–255.
- [15] Casamajor M.N. (de), Prouzet P., Lazure P., Identification des flux de civelle (*Anguilla anguilla*) à partir des relations d'allométrie en fonction des conditions hydrodynamiques dans l'estuaire de l'Adour, *Aquat. Living. Resour.* 13 (2000) 1–10.
- [16] Casamajor M.N. (de), Lecomte-Finiger R., Prouzet P., Détermination de l'état d'amaigrissement des civelles (*Anguilla anguilla*) en migration en zone côtière et estuarienne, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. III* 324 (2001) 345–353.
- [17] Lecomte-Finiger R., L'otolithe : la « boîte noire » des Téléostéens, *Année Biol.* 38 (1999) 107–122.
- [18] Elie P., Lecomte-Finiger R., Cantrelle I., Charlton N., Définition des limites des différents stades pigmentaires durant la phase civelle d'*Anguilla anguilla* L. (Poisson Téléostéen Anguilliforme), *Vie Milieu* 32 (1982) 149–157.
- [19] Tate M.W., Clelland R.C., Nonparametric and shortcut statistics in the social, biological and Medical Sciences, Interstate Printers and Publishers, Danville, Illinois, 1959, 168 p.
- [20] Guerault D., Desaunay Y., Lecomte-Finiger R., Biagianti-Risbourg S., Beillois P., Grellier P., Biometry and otolithometry of *Anguilla anguilla* (L.) glass eels: towards a model for seasonal variation? VIIIth SEI congress, Oviedo, 1993, 8 p.
- [21] Michaud M., Dutil J.D., Dodson J.J., Determination of young American eels, *Anguilla rostrata*, in fresh water, based on otolith surface area and microstructure, *J. Fish Biol.* 32 (1988) 179–189.
- [22] Mounaix B., Validation de l'estimation de l'âge de l'anguille européenne, *Anguilla anguilla*, dans le bassin versant de la Vilaine (Bretagne) : résultats préliminaires, Otolithométrie (1991) 109–117.
- [23] Cicotti E., Macchi E., Rossi A., Cataldi E., Cataudella S., Glass eel (*Anguilla anguilla*) acclimatation to freshwater and seawater: morphological changes of the digestive tract, *J. Appl. Ichtyol.* 9 (1993) 74–81.
- [24] McGovern P., McCarthy T.K., Elvers migration in the River Corrib system, western Ireland, *Ir. Fish. Investig. Ser. A (Freshw.)* 36 (1992) 25–32.
- [25] Umezawa A., Tsukamoto K., Factors influencing otolith increment formation in Japanese eel, *Anguilla japonica* T. & S., elvers, *J. Fish Biol.* 39 (1991) 211–223.
- [26] Antunes C., Tesch F.W., A critical consideration of the metamorphosis zone when identifying daily rings in otoliths of European eel, *Anguilla anguilla* (L.), *Ecol. Freshw. Fish* 6 (1997) 106–107.
- [27] Lecomte-Finiger R., Desaunay Y., Guérault D., Grellier P., The immigration of *Anguilla anguilla* (L.) glass eels in coastal waters: questions about the determinism of the otolith structures, 8th session of the EIFAC, Working Party of Eel, 1993, 3 p.
- [28] Lecomte-Finiger R., Growth history and age at recruitment of European eels (*Anguilla anguilla*) as revealed by otolith microstructure, *Mar. Biol.* 114 (1992) 205–210.
- [29] Guerault D., Lecomte-Finiger R., Desaunay Y., Biagianti-Risbourg S., Beillois P., Grellier P., Glass eel arrivals in the Vilaine estuary (Northern Bay of Biscay) in 1990: Demographic features and early life history, *Ir. Fish. Investig. Ser. A (Freshw.)* 36 (1992) 5–14.
- [30] Strubberg A., The metamorphosis of elvers is influenced by outward conditions some experiments, *Meddelelser Fra Kommissionen for Havundersogelser* 3 (1913) 11.

ANNEXE 5 :

Deuxième méthode d'estimation de la biomasse de civelles transitant dans l'estuaire de l'Adour durant le flot de marée – Modélisation stochastique du flux de civelles

Annexe 5 (d'après document DG XIV, Prouzet (coord.) 2002)

Deuxième méthode d'estimation de la biomasse de civelles transitant dans l'estuaire de l'Adour durant le flot de marée – Modélisation stochastique du flux de civelles

1.1. Schéma méthodologique proposé.

Pour évaluer la biomasse de civelles durant un flux, nous préconisons d'utiliser en plus des données des campagnes d'échantillonnage, un modèle de comportement de civelles *via* une équation de transport, de relier les mesures de concentration de civelles prélevées à la concentration locale initiale *via* un modèle statistique obtenu par agrégation de concentrations locales, puis d'exprimer la biomasse d'un flux montant de civelles en fonction de la concentration locale initiale. Cette concentration locale initiale, condition de bord du modèle de transport, et qui correspond au flux de civelles à l'entrée de l'estuaire, peut être alors définie par un faible nombre de paramètres dont les estimateurs nous permettent de déduire un estimateur de la biomasse. La variance de ce dernier est ensuite approchée par la « méthode Delta » à partir des covariances des estimateurs des paramètres de la concentration locale initiale.

1.2. Plan d'échantillonnage des données.

Pour ce qui concerne le lieu d'échantillonnage et le protocole d'évaluation des densités de civelles et de recueil des paramètres physiques on se reportera au chapitre 2. Ce protocole fait référence à celui mis en œuvre dans le cas d'une station de prélèvement en position fixe et située à 18 km de l'embouchure de l'Adour en aval du port d'Urt.

1.3. Modélisation du problème posé.

➤ Formalisation des données recueillies et du problème posé

Soit N le nombre total de transects, et t_1, \dots, t_N les horaires des débuts de transect pour une campagne de mesures. On dispose pour chaque campagne des poids $P(t_1), \dots, P(t_N)$ des civelles capturées par l'engin de prélèvement en surface et $Pf(t_1), \dots, Pf(t_N)$ en profondeur. Entre 20 et 24 mesures sont effectuées pour chaque campagne de prélèvement.

Le problème de l'estimation de la biomasse de civelles pendant une campagne se pose selon les termes suivants :

- Soit la biomasse totale vraie $B(t_j)$ récoltée durant un transect à l'instant t_j , qui correspond au volume d'eau total $V(t_j)$ de l'ensemble de la zone d'échantillonnage pendant cette durée. Nous ne disposons pour l'estimer que de 2 mesures de poids de civelles $P(t_j)$ et $Pf(t_j)$ récoltés dans 2 volumes $v(t_j)$ et $vf(t_j)$ filtrés par un filet en surface et un en profondeur.
- L'estimation de $B(t_j)$ par une simple règle de trois et telle que :
$$\frac{B(t_j)}{V(t_j)} = \frac{P(t_j) + Pf(t_j)}{v(t_j) + vf(t_j)}$$
 n'est pas satisfaisante car nous ne connaissons pas $B(r_j)$ qui correspond à la biomasse circulant durant la durée de repositionnement du bateau.

En outre, cette approximation ne tient pas compte de l'hétérogénéité des concentrations de civelles en surface et en profondeur, ni entre les rives et le milieu de la zone d'échantillonnage. Enfin, elle ne peut pas permettre une évaluation de la variance de la biomasse totale des civelles pendant la marée montante. En effet, si $Be(t_j)$ (resp. $Be(r_j)$) désigne un estimateur de $B(t_j)$ (resp. de $B(r_j)$), l'estimateur Be de la biomasse totale B de civelles pendant la marée montante est égale à une somme de tous les $Be(t_j)$ et de tous les $Be(r_j)$. Une formule simple du calcul de la variance de Be par la somme des variances des $Be(t_j)$ et des $Be(r_j)$ n'est pas satisfaisante car plus le nombre N de mesures (taille de l'échantillon) augmente, plus la variance de Be s'accroît si elle est calculée de cette façon.

De plus, un estimateur statistiquement judicieux de la variance de Be doit être défini à partir de l'ensemble des mesures de la campagne et ce, d'autant plus que l'on se trouve dans le cas de petits échantillons.

Pour résumer notre problème, nous devons déterminer un estimateur de la biomasse d'un flux de civelles qui minimise le biais et la variance en étant adapté au cas des échantillons de petites tailles avec des données manquantes.

➤ Modèle de comportement à l'échelle locale des civelles

Ce problème n'est en fait soluble que si nous incorporons à la connaissance générée par les campagnes, nos informations concernant l'éthologie migratoire de la civelle (cf. § 5.4). En particulier, dès que la vitesse du courant vers l'aval devient supérieure à un seuil de 0,30m/s, la civelle se plaque au fond. Elle se laisse porter par le courant lorsque celui-ci est dirigé vers l'amont pendant le flot de marée.

On peut donc assimiler le déplacement d'une civelle à celui d'une particule soumise à un champ $u=u(t,x,y,z)$ de vitesses de propagation du flot. Ce déplacement peut être décrit par un modèle de convection-diffusion. De manière plus explicite, il s'agit d'un modèle de transport déterministe décrivant le comportement d'une particule au moyen de concentrations élémentaires $c(t,x,y,z)$ de ces particules dans un volume élémentaire $(x+dx, y+dy, z+dz)$ en tout point (x,y,z) de l'espace et pendant une durée dt à partir de l'instant t et tel que :

- (x,y,z) sont les coordonnées d'un point quelconque de l'estuaire de l'Adour, avec x désignant la coordonnée longitudinale (*i.e.* dans la direction du courant), y la coordonnée latérale (celle qui positionne le point par rapport aux rives) et z la profondeur ;
- $c(x,y,z,t)$ la concentration de civelles à l'instant t dans un volume élémentaire centré en (x,y,z) ;
- $u(x,y,z,t)$ le champ vectoriel de vitesses à l'instant t au point (x,y,z) ;
- $E(\mathbf{X})$ l'espérance mathématique d'une variable aléatoire \mathbf{X} ;
- $\nabla(u)$ (resp. $div(u)$) le gradient de u (resp. la divergence de u) ;
- $V_1 \times V_2$ le produit scalaire de deux vecteurs V_1 et V_2 .

Le modèle de transport de flux de particules est décrit par l'équation aux dérivées partielles (EDP) suivante :

$$(1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x,y,z,t) - div(u_c \times c(x,y,z,t)) + \nabla(K \times \nabla c(x,y,z,t)) = 0$$

avec les conditions initiales déterminées par le paramètre du modèle $c(x,y,z,0)$, concentration initiale des civelles.

L'équation (1) décrit l'évolution de la concentration de civelles dans le temps autour du point de coordonnées spatiales (x,y,z) . Le rapport $\frac{\partial c}{\partial t}(x,y,z,t)$ est le taux de variation locale dans le temps de la concentration, tandis que les termes $\nabla(u_c \times c(x,y,z,t))$ et $\nabla(K \times \nabla c(x,y,z,t))$ traduisent l'évolution spatiale de la concentration en fonction des points voisins de (x,y,z) .

$u_c(x,y,z,t)$ est la vitesse des civelles présentes à l'instant t dans le volume élémentaire entourant (x,y,z) .

Plus précisément, l'opérateur $\nabla(u_c \times c(x,y,z,t))$ est dit de transport ; il s'écrit de manière explicite comme suit :

$$\nabla(u_c \times c(x,y,z,t)) = \frac{\partial}{\partial x}(u_c \times c(x,y,z,t)) + \frac{\partial}{\partial y}(u_c \times c(x,y,z,t)) + \frac{\partial}{\partial z}(u_c \times c(x,y,z,t))$$

et

$$\begin{aligned} \nabla(K \times \nabla c(x,y,z,t)) &= \\ \frac{\partial}{\partial x}(K_x \times \frac{\partial}{\partial x}c(x,y,z,t)) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \times \frac{\partial}{\partial y}c(x,y,z,t)) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \times \frac{\partial}{\partial z}c(x,y,z,t)) \\ \text{avec } K = (K_x, K_y, K_z), \text{ vecteur des coefficients de diffusion dans les trois directions } x, y, z. \end{aligned}$$

Les études que nous avons effectuées semblent indiquer qu'il est plus approprié pour décrire le comportement de civelles de considérer plutôt une diffusion stochastique que déterministe car le terme de diffusion dans l'équation (1) conduit à des comportements peu réalistes de civelles. Aussi, nous retiendrons plutôt le modèle stochastique suivant comme modèle de transport de flux de civelles en migration portée (équation 2) :

$$(2) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x,y,z,t) - \nabla(u_c \times c(x,y,z,t)) = \frac{\partial W}{\partial t}(x,y,z,t) + \nabla W(x,y,z,t)$$

où $W(t,x,y,z)$ est un mouvement brownien représentant à la fois une diffusion aléatoire et les erreurs de mesures éventuelles.

➤ Modèle hydrodynamique

A marée montante, les civelles adoptent un comportement de migration portée, c'est à dire qu'elles se laissent transporter longitudinalement¹ par le courant. Leurs vitesses $uc(x,y,z,t)$ se confondent, alors, avec celle du courant.

Le modèle hydrodynamique utilisé est celui de l'IFREMER qui est décrit au § 6.

Il sert de base à la définition d'un modèle comportemental de civelles à migration portée qui est défini comme suit : $\frac{\partial c}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial}{\partial x}(u_c(x,t)c(x,t)) = \frac{\partial}{\partial t}W(t,x) + \frac{\partial}{\partial x}W(x,t)$

Compte tenu des informations disponibles sur le comportement migratoire des civelles, la vitesse des civelles $uc(x,t)$ est égale à la vitesse du courant lorsque celle-ci est positive (marée montante), et nulle lorsque la vitesse du courant devient négative².

¹ Elles peuvent, comme nous l'avons mentionné au § 5.4, avoir un comportement migratoire actif dans la colonne d'eau suivant les conditions d'éclairement.

² En fait inférieure à un seuil de -0,2 à 0,3 m/s.

➤ Modèle statistique

Le problème que nous avons ensuite à résoudre est d'établir le lien entre ce modèle à l'échelle locale et les mesures collectées lors des campagnes d'échantillonnage. C'est la résolution de ce problème qui est présentée ci-dessous.

En divisant la biomasse échantillonnée par le volume d'eau filtré, on obtient la concentration prélevée pour chaque transect et telle que :

$$\text{concentration prélevée} = \frac{\text{masse prélevée}}{\text{volume d'eau échantillonné}}$$

avec

$$\begin{aligned} \text{volume d'eau échantillonné} &= (\text{vitesse bateau} + \text{vitesse courant}) * \text{durée du transect} * \text{surface du filet} \\ &= \text{vitesse surface} * \text{durée du transect} * \text{surface du filet} \end{aligned}$$

La figure 161 donne un exemple de l'évolution des concentrations de civelles observées au cours d'une sortie expérimentale le 9 décembre 1999.

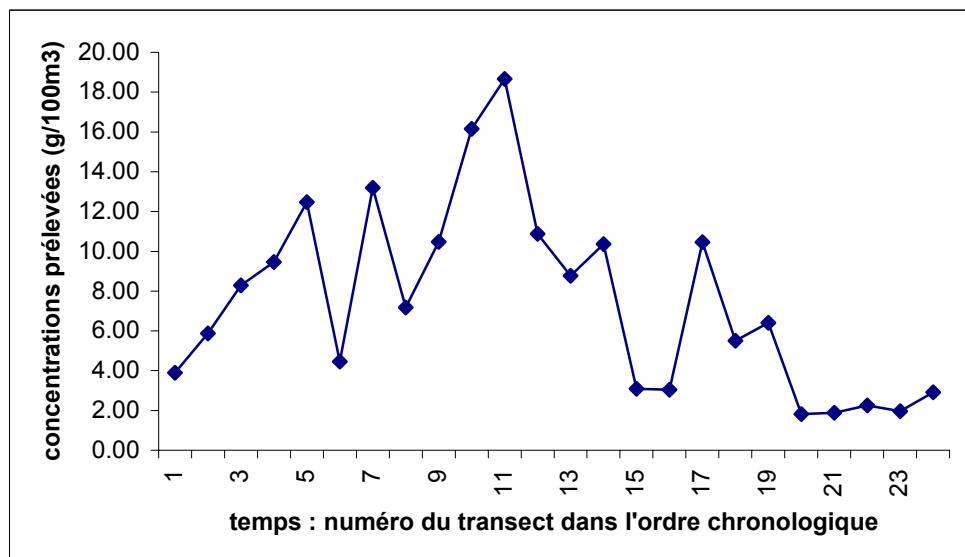


Figure 161 : Variation de la concentration de civelles en $\text{g.}100\text{m}^{-3}$ observée durant un cycle de marée et selon les transects numérotés de 1 à 24

Désignons par $C(t_i)$ la concentration de civelles prélevée lors du $i^{\text{ème}}$ transect au temps t_i . L'origine de l'espace d'estimation est fixée à l'embouchure de l'estuaire, soit à 18 km en aval de la station de prélèvement. Au début de chaque transect, le bateau a donc pour abscisse $x = 18000$ mètres ; la taille de la maille choisie étant de un mètre.

Soit s la variable *temps* qui varie entre t_i et $t_i + ds$ (fixé à 5 minutes). Pour chaque instant s compris entre t_i et $t_i + ds$, on note $x(s)$ la trajectoire du bateau. Elle est donnée par la relation suivante : $x(s) = 18000 - v_b * (s - t_i)$ pour s entre t_i et $t_i + ds$; Vb : vitesse du bateau.

Soit $C(t_1), \dots, C(t_N)$ les concentrations mesurées lors de ces transects. Le calcul de la masse prélevée pendant un transect lorsque le bateau se situe au point $x(s)$, entre l'instant s et $s + ds$, est effectué par la formulation suivante :

$$\text{Longueur d'eau filtrée} \times \text{aire du tamis} \times \text{concentration au point } x(s) \text{ au temps } s$$

La « Longueur d'eau filtrée » durant l'intervalle de temps ds est estimée par la vitesse résultante qui est la somme des valeurs absolues des vitesses du bateau et de l'eau.

$$\text{Aire du tamis} = \pi \times R^2, \text{ avec } R = 60 \text{ cm}$$

$$\text{Concentration au point } x(s) \text{ au temps } s = C(x(s), s)$$

Le poids dm capturé entre les instants s et $s+ds$ est donc donné par la formule suivante :

$$dm = \pi \times R^2 \times c(x(s), s) * (vb + u(x(s), s)) ds. \text{ D'où le poids total capturé pendant un transect :}$$

$$\text{masse totale} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} dm = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \pi \times R^2 \times c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds$$

$$\text{Le volume total filtré est donné par } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \pi \times R^2 \times (vb + u(x(s), s)) ds$$

La concentration mesurée $C_{\text{modèle}}(t_i)$ est alors modélisée par le quotient $\text{masse totale/volume total filtré}$

$$C_{\text{modèle}}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right) / \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} (vb + u(x(s), s)) ds \right)$$

Les valeurs $c(x(s), s)$ et $u(x(s), s)$ sont calculées grâce au modèle local.

Comme le champ de vitesses $u(x, t)$ est une donnée du problème et que la concentration $c(t, x, y, z)$ en tout instant t et en tout point (x, y, z) de l'estuaire est parfaitement déterminée par l'équation de transport et la donnée du flux entrant $\phi(x, y, z) = c(0, x, y, z)$ (condition initiale à $t = 0$ de l'équation de transport), **les seuls paramètres du problème sont la fonction inconnue ϕ et les paramètres de diffusion .**

1.4. Estimations statistiques.

Tout d'abord il faut estimer les valeurs des paramètres de la fonction "concentration initiale", ainsi qu'une estimation de leurs variances. Une fois cette estimation effectuée, on estime la biomasse qui est fonction de la concentration initiale ainsi que sa variance.

➤ Estimateurs statistiques de la concentration initiale

Le modèle statistique des prélèvements est le suivant :

Pour $i=1, \dots, 24$, $C_{\text{mes}}(i) = C_{\phi, K}(i) + \varepsilon(i)$, les termes $\varepsilon(i)$ sont des termes d'erreur dont la variance commune σ^2 est à estimer.

Nous considérons les estimateurs des moindres carrés (éventuellement pondérés), c'est à dire les « fonction –paramètres » $\hat{\phi}$ et les coefficient \hat{K} qui minimisent :

$(\hat{\phi}, \hat{K}) = \arg \min_{\phi, K} \sum_{i=1}^N w_i \times (C_{mes}(i) - C_{\phi, K}(i))^2$, les nombres w_i étant les poids de la régression.

Les solutions obtenues du problème de minimisation donnent l'estimation de la concentration initiale cherchée.

La dépendance des erreurs du modèle peut poser problème. Nous sommes donc amenés à supposer que les erreurs ou aléas forment des processus linéaires stationnaires³.

Au vu des données, les fonctions paramètres ϕ sont choisies parmi les fonctions gaussiennes c'est à dire des fonctions du type :

$$\phi_{ampli, pente, axe, seuil}(x) = ampli \times \exp(-(pente \times (x - axe)) \wedge 2) + seuil$$

où x est la coordonnée longitudinale du point x et $ampli, pente, axe, seuil$ sont les paramètres que l'on estime par minimisation de $\sum_{i=1}^N w_i \times (C_{mes}(i) - C_{\phi, K}(i))^2$

Dans cette étude, le modèle de transport choisi a un terme de diffusion stochastique (K) de moyenne nulle. Au lieu d'estimer K nous estimons la variance des « termes d'erreur » définis à partir du mouvement brownien.

Une fois estimés les paramètres $ampli, pente, axe, seuil$, on calcule la variance de ces estimateurs. On note $f_i = C_{\phi, K}(i)$ pour $K=0$. On définit la matrice jacobienne des fonctions

$$(f_i, i = 1, \dots, N) \text{ que nous appelons } \mathbf{jacob} \text{ par } jacob(i, n) = \frac{\partial f_i}{\partial (\text{coeff}(n))} \text{ pour } i = 1, \dots, N \text{ et } n = 1, \dots, 4$$

On calcule ensuite la matrice de variance-covariance asymptotique des estimateurs. En posant $F = jacob^T \times jacob$ où $jacob^T$ est la matrice transposée de $jacob$.

$$\text{L'estimateur de } \sigma^2 \text{ est donné par } \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (c \text{ mod èle}(i) - c(i))^2}{N-1}.$$

On note $\hat{\phi}$ l'estimateur calculé et ϕ le vecteur des « vrais paramètres » du modèle. Lorsque le nombre de données augmente, la variable $\hat{\phi} - \phi$ converge en distribution vers une loi normale multidimensionnelle de moyenne nulle et de matrice de variance covariance $\sigma^2 \times inv(F)$ où $inv(F)$ est l'inverse de la matrice F . Ce résultat est obtenu par une méthode de linéarisation du modèle non linéaire.

Comme on ne dispose pas des valeurs de σ^2 ni de celle de $inv(F)$ puisqu'ils sont dépendants du paramètre ϕ à estimer, on calcule une estimation de la matrice de variance-covariance du modèle,

estimation donnée par la relation suivante : $\hat{\sigma}^2 \times \hat{F}^{-1}$, \hat{F} étant l'analogie de la matrice F pour les valeurs estimées des paramètres.

³ dans le cas général, ce sont des processus spatio-temporels à indices discrets, par exemple ARMA spatio-temporels.



Estimateur de la biomasse

On a estimé précédemment les paramètres du *modèle de concentration initiale*.

La connaissance de la concentration initiale nous permet de calculer la concentration $c(x,t)$ à l'échelle locale en chaque point x de l'estuaire et à chaque instant t . Puis on calcule :

$$C_{\text{modèle}}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right) / \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} (vb + u(x(s), s)) ds \right) \quad \text{et}$$

$$\text{masse}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right)$$

Ces masses et ces concentrations correspondent aux transects effectués par le bateau, mais il faut aussi calculer la biomasse lorsqu'il y a remplacement du bateau vers un nouveau transect. Le bateau se retrouve, à l'issue du transect de durée ds égale à cinq minutes, en aval de la zone, au point d'abscisse $x : 18000 - vb \times ds$, puis il se repositionne en amont après un temps de durée tr . On fait partir alors un bateau fictif d'abscisse initiale 18000 et de vitesse :

$$vr = \frac{\text{longueur du transect}}{\text{temps fin de replacement} - \text{temps début de replacement}}$$

$$\text{d'où } \text{massep}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_i + tr} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right)$$

Soit P_ϕ , la biomasse totale qui est donnée alors par $P_\phi = \sum_{i=1}^N \text{masse}(i) + \text{massep}(i)$

La variance de la biomasse peut être calculée de deux manières :

- en calculant la variance de la somme ce qui revient à faire une somme de variances et nécessite d'avoir un modèle de covariance pour les masses ;
- en utilisant la relation qui lie le vecteur paramètre ϕ à la biomasse ce qui revient à mettre en œuvre la **méthode delta**

➤ Méthode delta

Considérons la différence $P_\phi - P_{\phi^*}$ en rappelant que ϕ^* est le vrai paramètre du modèle. On a vu précédemment que plus le nombre de données est important, plus les lois de ϕ^* et ϕ sont proches. La théorie statistique permet d'affirmer que si $\phi - \phi^*$ converge vers une loi normale de moyenne 0 et de matrice de variance-covariance V , alors $P_\phi - P_{\phi^*}$ suit une loi normale de moyenne 0 et de matrice de variance covariance $(\nabla p(\phi^*))^T \times V \times (\nabla p(\phi))$.

$\nabla p(\phi^*) = \left(\frac{\partial p}{\partial \phi_1}, \frac{\partial p}{\partial \phi_2}, \dots, \frac{\partial p}{\partial \phi_N} \right)$ au point ϕ^* . $P_\phi - P_{\phi^*}$ a pour matrice de variance asymptotique $V = \sigma^2 \times \text{inv}(F)$.

Comme nous ne connaissons pas ϕ^* , on utilise une estimation de ce vecteur , $\nabla p(\phi)$.

Une estimation de la variance asymptotique est donc donnée par l'équation suivante :

$$\sigma^2 \times (\nabla p(\phi))^T \times \text{inv}(F) \times (\nabla p(\phi)).$$

1.5. Algorithmes de calcul pour l'estimation de la biomasse.

On calcule les concentrations locales, puis les concentrations du modèle statistique et enfin la variance du poids. Ce vecteur est dénommé *grad* dans le programme de calcul (annexe 4).

Le calcul de la concentration locale revient à calculer les valeurs $c(x,t)$ où x désigne la variable d'espace et t la durée. L'origine des x est prise à l'embouchure de l'estuaire. L'origine des temps est prise au début de la marée montante. On calcule dans l'algorithme qui suit les valeurs de $c(x,t)$ tout les mètres et toutes les secondes.

La méthode utilisée revient à discréteriser l'équation aux dérivées partielles que nous rappelons :

$$(1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial}{\partial x}(u_c(x,t)c(x,t)) = 0 \quad (\text{on choisit de considérer le bruit nul}).$$

L'estuaire est découpé en une subdivision d'intervalles de longueur 1 mètre notés $[x_i, x_{i+1}]$ avec $x_{i+1} - x_i = 1 \text{ mètre}$. x_0 désigne le premier point de la subdivision situé à l'embouchure. Le dernier point du maillage (L) est pris dans l'algorithme à 68000 mètres de l'embouchure.

La fin de la période de temps est prise en fin de la campagne d'échantillonnage (T) de la marée. L'intervalle $[0, T]$ est subdivisé en intervalles $[t_i, t_{i+1}]$ de longueur 1 seconde.

Les opérateurs de l'équation sont approchés par des différences finies aux points (x_i, t_j) du maillage de l'espace temps $[0, T] \times [0, L]$

$$(1-1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x_i, t_j) \approx \frac{c(x_i, t_{j+1}) - c(x_i, t_j)}{t_{j+1} - t_j} \quad \text{et}$$

$$(1-2) \quad \frac{\partial}{\partial x}(u(x_i, t_j)c(x_i, t_j)) \approx \frac{u(x_{i+1}, t_j)c(x_{i+1}, t_j) - u(x_i, t_j)c(x_i, t_j)}{dx}$$

avec dx , pas d'espace égal à 1 mètre et dt , pas de temps égal à 1 seconde.

En tenant compte de (1), (1-1) et (1-2), on obtient l'équation qui exprime la concentration de civelles à l'instant t_{j+1} en tout point du maillage spatial en fonction des concentrations à l'instant précédent t_{j+1} et telle que :

$$c(x_i, t_{j+1}) = c(x_i, t_j) + \frac{dt}{dx} \times (u_c(x_{i+1}, t_j) \times c(x_{i+1}, t_j) - u_c(x_i, t_j) \times c(x_i, t_j))$$

Cette dernière relation montre comment les concentrations locales à un instant donné t_{j+1} dépendent des concentrations calculées à l'instant précédent, d'où l'importance fondamentale de la concentration initiale. Sa forme, ses valeurs vont conditionner l'évolution spatio-temporelle du flux pendant toute la marée et donc la forme du modèle statistique.

A chaque seconde, on calcule donc la concentration locale sur tout le long de l'estuaire. La concentration au temps $n - 1$ est notée ca et celle au temps courant est notée cn . On regarde ensuite si le temps auquel on se trouve est dans un intervalle de temps de transect, ces intervalles étant tabulés dans les vecteurs $tdebut$ et $tfin$. L'algorithme calcule alors la position du bateau à l'instant donné (bateau réel si on se situe dans un intervalle de transect et virtuel si on est dans un intervalle de replacement) et la masse élémentaire prélevée, puis on ajoute cette masse au nombre $masse(i)$ qui désigne la masse prélevée au $ième$ transect ou bien à $massep(i)$ dans le cas d'un replacement du bateau. A la fin de la simulation de la marée, on calcul la biomasse totale qui est égale à P_ϕ en faisant la somme de toutes les composantes de $masse(i)$ et de $massep(i)$.⁴

1.6. Algorithme de calcul de la variance.

Les estimateurs du vecteur ϕ sont stockés dans un vecteur appelé $coeff$. Ils sont calculés pas à pas, car on ne dispose pas d'une relation directe entre ϕ et P_ϕ . Une fois ces paramètres estimés, on calcule la matrice jacobienne de la fonction qui à ϕ associe la biomasse, c'est à dire la fonction P_ϕ qui est représentée par la variable *poidstotal*.

Pour calculer la matrice jacobienne (*jacobi*), il faut calculer les dérivées partielles des concentrations obtenues par le modèle statistique par rapport aux différents coefficients. Les concentrations obtenues pour un vecteur *coeff* donné sont stockées dans le vecteur *conc*. On appellera que *conc(i)* est la concentration calculée par le modèle pour un vecteur *coeff* donné pour le transect *i* et tel que $jacobi(i,n) = \frac{\partial conc(i)}{\partial (coeff(n))}$

Pour estimer ces dérivées partielles, on en calcule une approximation. Par exemple, supposons qu'on veuille calculer $\frac{\partial conc(1)}{\partial (coeff(1))}$

$$\frac{\partial conc(1)}{\partial (coeff(1))} \approx \frac{conc(1) \text{ pour les paramètres } (coeff + \delta) - conc(1) \text{ pour les paramètres } (coeff)}{\delta_n}$$

où $\delta = (\delta_1, \dots, 0)$ avec δ_1 très petit. On fait deux appels de la procédure *calculmasse* en modifiant entre les deux appels le vecteur *coeff*, puis on calcule le quotient différentiel donné plus haut. On calcule ensuite $F = jacobi^T \times jacobi$, puis *Finv* par appel de la procédure *invers*.

Pour calculer la variance de la biomasse, il faut calculer le gradient du *poidstotal* par rapport aux paramètres *coeff*. Ce vecteur gradient est nommé *grad* dans le programme et se calcule de manière analogue à *jacobi* et tel que $grad = (\frac{\partial poidstotal}{\partial coeff(1)}, \dots, \frac{\partial poidstotal}{\partial coeff(4)})$

La variance estimée σ^2 est stockée dans la variable *sigmacarré*. La variance du poids est obtenue par la relation : $variancepoids = sigmacarré \times (grad^T * jacobi * grad)$ où $*$ est désigne un produit matriciel.

⁴ Calculs regroupés dans la procédure appelée *calculmasse*.

ANNEXE 6 :

Estimation des biomasses, exemple pour la saison de pêche 1999/2000.



Étude sur la civelle (*Anguilla anguilla*) dans l'estuaire de l'Adour :
Pêche, biologie, comportement, modélisation hydrodynamique et comportementale, estimation
des flux

Annexe 6 : Estimation des biomasses, exemple pour la saison de pêche 1999/2000.

Les résultats obtenus sont synthétisés au tableau 1 et les figures 1 à 8 permettent de visualiser les écarts entre valeurs observées et simulées.

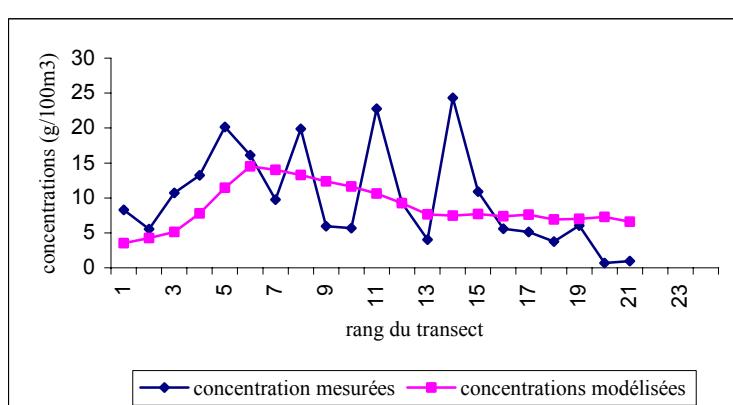
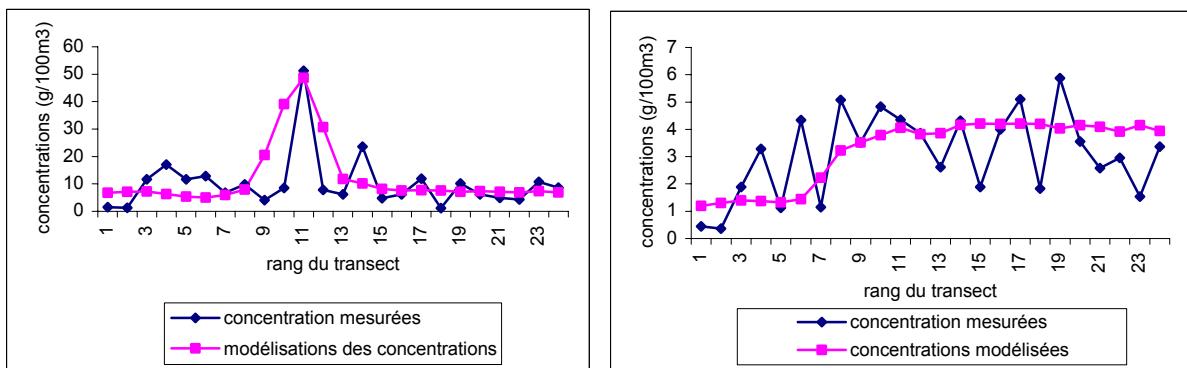
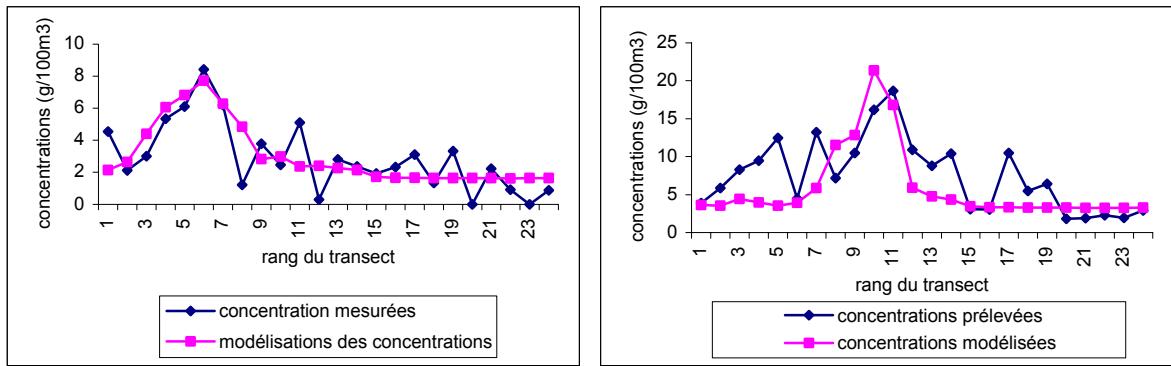
Les résultats obtenus apparaissent satisfaisants compte-tenu des données dont nous disposons : données "manquantes" et échantillons de petites tailles. Cependant, le modèle statistique utilisant le modèle hydrodynamique unidimensionnel a l'avantage d'être parcimonieux en nombre de paramètres et donc bien adapté au cas de petits échantillons qui est le nôtre.

Nous sommes partis de l'hypothèse, étayée par les observations comportementales réalisées, que les civelles ont essentiellement un comportement passif. De ce fait, l'hétérogénéité de leurs concentrations dans la section transversale (perpendiculaire à l'axe du fleuve) devrait provenir principalement de l'hétérogénéité des vitesses du courant. Dans ces conditions, l'utilisation d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel permettra de prendre en compte cette hétérogénéité et d'ajouter une pondération judicieuse sur les mesures de concentrations collectées, puis d'appliquer le modèle statistique à ces mesures "corrigées".

La méthode développée peut s'appliquer directement aux modèles comportementaux à 2 ou 3 dimensions de civelles dès que l'on pourra disposer d'un modèle hydrodynamique adéquat.

Tableau 1 : Estimation de la biomasse de civelles pour certaines des campagnes d'évaluation de la saison 1999/2000 avec écart-type asymptotique : $\sqrt{\text{variance poids}}$

Date	Biomasse fond (écart-type)	Biomasse surface (écart-type)
9 décembre	660,65 kg (91,8 kg)	32,9 kg (31,4 kg)
22 décembre	249,18 kg (24,7 kg)	999,47 kg (171,3 kg)
5 janvier	50,74 kg (94,9 kg)	
7 janvier	397,57 kg (50,3 kg)	450,86 kg (51,9 kg)
8 janvier	520,43 kg (62,7 kg)	65,2 kg (50,2 kg)
12 janvier	60,71 kg (758,3 kg)	66,88 kg (372,95 kg)
1 février	582,33 kg (93,01 kg)	311,16 kg (0,25 kg)
8 février	91,11 kg (10,4 kg)	80,78 kg (22,4 kg)



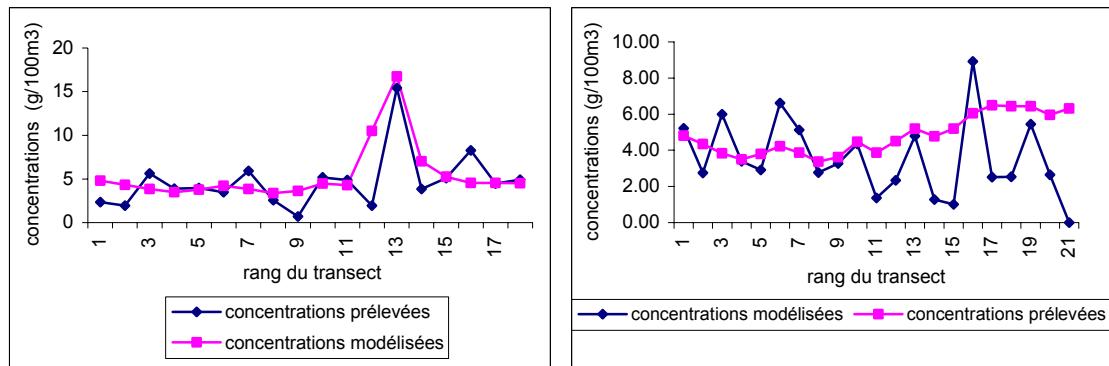


Figure 4 : Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 7 janvier en surface - graphe de gauche et au fond - graphe de droite.

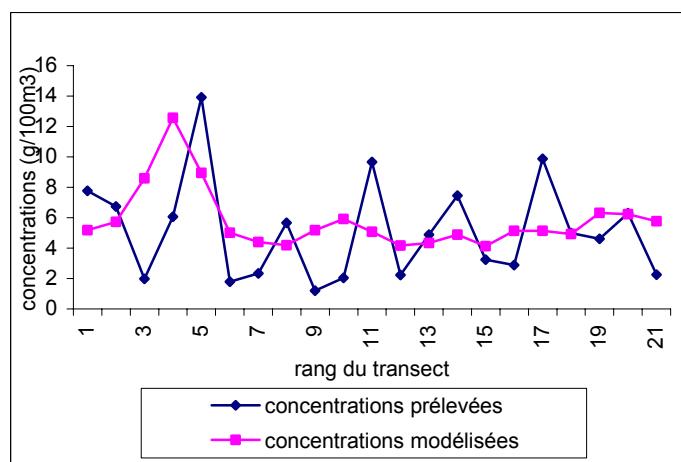


Figure 5 : Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 8 janvier au fond

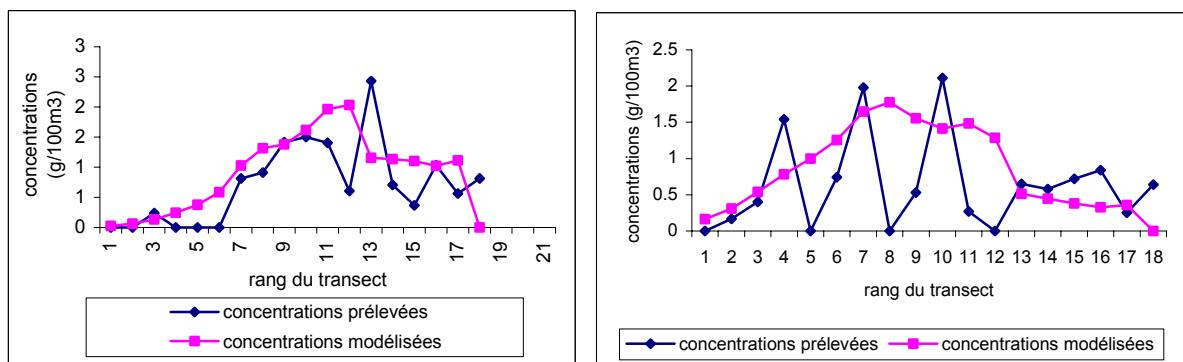


Figure 6 : Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 12 janvier en surface - graphe de gauche et au fond - graphe de droite.

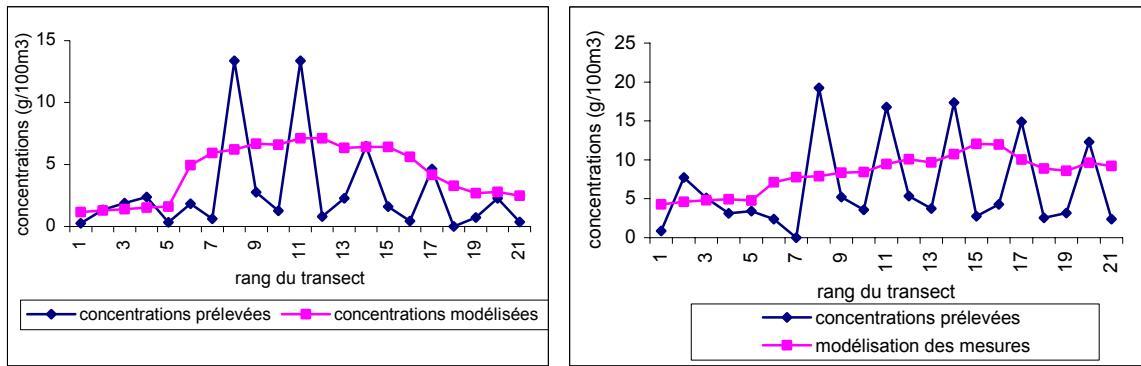


Figure 7 : Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 1^{er} Février en surface - graphe de gauche et au fond - graphe de droite.

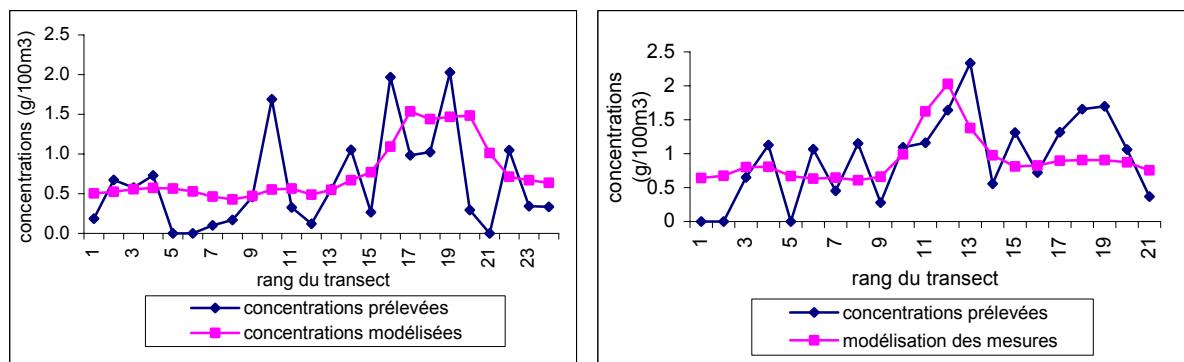


Figure 8 : Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 8 février en surface - graphe de gauche et au fond - graphe de droite.

Nous voyons que dans la plupart des cas, l'écart type asymptotique n'excède pas la biomasse estimée (cf tableau 1), ce qui représente l'apport essentiel de la "méthode Delta" qui consiste à relier la biomasse à estimer à des paramètres et ce, par l'intermédiaire, d'une fonction suffisamment régulière.

Lorsque l'écart type asymptotique est très élevé, cela peut provenir de plusieurs causes :

- le modèle peut ne pas être adapté aux données. C'est le cas le 8 janvier 2000 en surface : il y a un effet berge manifeste qui n'est pas pris en compte dans le modèle puisqu'on ne dispose pas d'un modèle 2 D pour les vitesses. Ceci explique la forte variance asymptotique.

- Il peut y avoir un problème lié au modèle statistique, lui-même et qui concerne la convergence asymptotique de nos estimateurs. La théorie dit que, sous certaines conditions (notamment l'inversibilité de la matrice Hessienne), les estimateurs des paramètres définissant la concentration initiale et, par conséquent, celui de la biomasse totale sont asymptotiquement normaux. L'inversibilité de la matrice assure en fait que la variance asymptotique "n'explose" pas. Dans le cas du 22 décembre, l'ajustement est bon, mais que ce soit en surface ou en profondeur, l'écart type est presque égal à la biomasse. Ceci vient du fait que l'inversion de la matrice Hessienne fait apparaître des coefficients importants. Cela souligne le fait qu'un ajustement qui paraît correct "à l'œil" n'est pas nécessairement d'une grande efficacité d'un point de vue statistique.