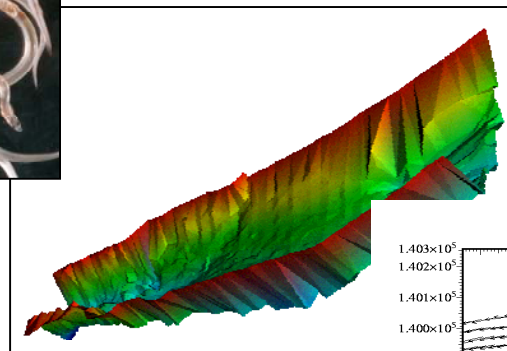




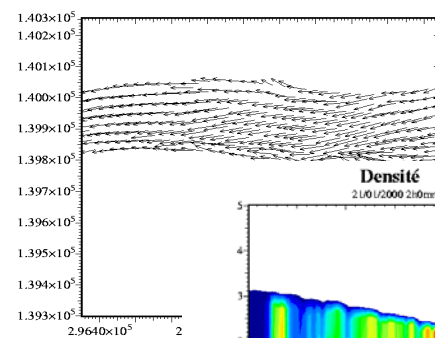
Contrat EC/DG FISH (DG XIV) N° 99/023
Agreement 00/1213516/NF

Rapport Final

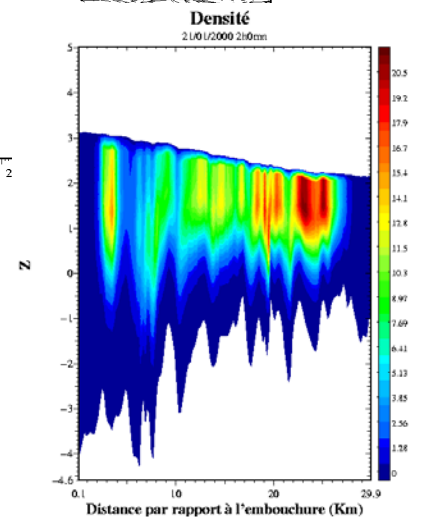
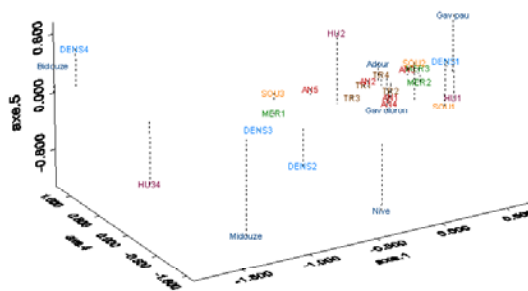
« Historique des captures de civelles, intensité actuelle de leur exploitation, variation de leur capturabilité par la pêche professionnelle maritime et indices de colonisation sur le bassin versant de l'Adour ».



vitesse 11h30



$$\hat{B} = \sum_{s=1}^6 \bar{d}_s \left(\int_{t_{\text{début}}}^{t_{\text{fin}}} v_s(t) dt \right) S_s = \sum_{s=1}^6 \bar{d}_s \times \frac{2}{\pi} \times c_s \times a \times S_s,$$



Coordinateur scientifique : Patrick Prouzet (IFREMER-LHA)

Participants :

Pascal Lazure (IFREMER-DEL).

Amara M., Capatina D., Trujillo D., Puiseux P., Arino O., A. Boussouar, C. Marquet et O. Pardo (Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour).

Bru N., Drouilhet R., d'Aubigny G., M. Lejeune et C. d'Aubigny (Laboratoire de Statistique et d'Analyse des Données de L'Université Pierre Mendès-France – Grenoble II).

Truong – Van B. et Frisou T. (Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse)

Sanchez F., M. Lissardy et De Casamajor M.-N. (ADERA- CERCA)

Castelnaud G. (CEMAGREF – Unité RAC Bordeaux)

Marty A. (Conseil Supérieur de la Pêche – Délégation de Pau)

Malvezin S., Marty S. et D. Barracou (MIGRADOIR).

SOMMAIRE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA PECHERIE CIVELIERE DANS LE GOLFE DE GASCOGNE	4
1.1. Présentation générale.	4
1.2. Cartographie de la pêche civellière en France.	5
1.3. Rappel historique concernant les pêcheries et les productions.	6
1.4. Matériels et méthodes de suivis des indicateurs halieutiques.	8
<i>1.4.1. Bassins de la Vilaine et de la Loire.</i>	8
<i>1.4.2. Bassin de la Gironde.</i>	8
<i>1.4.3. Bassin de l'Adour.</i>	9
<i>1.4.4. Description des réseaux de collecte du CRTS et du CSP.</i>	9
1.5. Analyse des indicateurs halieutiques par bassin.	10
<i>1.5.1. Bassin de la Vilaine.</i>	10
<i>1.5.2. Bassin de la Loire.</i>	11
<i>1.5.3. Bassin de la Gironde.</i>	13
<i>1.5.4. Bassin de l'Adour.</i>	16
1.6. Bilan de la pêche de la civelle pour l'année de référence 1999.	18
1.7. Conclusion.	19
2. ANALYSE HISTORIQUE DES CAPTURES DE CIVELLES SUR LE BASSIN DE L'ADOUR	20
2.1. Variation des captures par sortie sur le bassin de l'Adour depuis la fin des années vingt.	20
2.2. Généralités sur les causes probables de la diminution de cette ressource.	22
3. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES CAPTURES DE CIVELLES SUR LA PERIODE RECENTE (1985 –2001) .	24
4. MODELISATION DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES SUR LA VARIABILITE DES CAPTURES DE CIVELLES.	27
4.1. Présentation des données de captures de civelles.	27
4.2. Captures et variables environnementales.	27
4.3. Première méthode : analyse descriptive des relations entre les captures par sortie (CPUE) et certaines variables environnementales à l'aide d'une analyse canonique fonctionnelle.	28

4.3.1. Principe de la méthode.	28
4.3.2. Résultats numériques.	29
4.4. Deuxième méthode : modélisation des relations entre les CPUE et les variables environnementales à l'aide d'une régression multiple à coefficients lissés.	32
4.4.1. Principe de la méthode.	33
4.4.2. Résultats numériques.	34
4.5. Troisième méthode : analyse des CPUE à l'aide de modèles de séries chronologiques.	35
4.5.1. Analyses univariées et bivariées : Points marquants concernant les données.	36
4.5.2. Etude de l'évolution temporelle des CPUE.	39
4.5.3. Etude de la dépendance temporelle des variables exogènes.	42
4.5.4. Spécification d'un modèle d'Autorégression multiple.	44
4.5.5. Analyse de la distribution des résidus.	44
4.5.6. Discussion des résultats.	47
4.5.7. Modélisation séquentielle des CPUE par une loi de Weibull (cas des zéros exclus).	48
4.5.8. Modélisations dynamiques de la relation du logarithme de CPUE à des prédictors.	50
5. MODELISATION STOCHASTIQUE ET ESTIMATION DES FLUX DE CIVELLES.	54
5.1. Collecte des données.	54
5.1.1. Description du matériel utilisé.	54
5.1.2. Localisation géographique des prélèvements.	56
5.1.3. Plan d'échantillonnage et constitution des données.	57
5.2. Première méthode d'estimation utilisée et étude de la variabilité de ces estimations.	58
5.2.1. Etude du courant : évaluation de l'erreur de mesure de la vitesse du flot.	58
5.2.2. Etude de la variation de la densité de civelles au cours du flot : évaluation de l'incertitude sur cette grandeur.	59
5.2.3. Estimations journalières de la biomasse et évaluation de la variabilité de ces estimations.	60
5.2.4. Estimations de la quantité de civelles : exemple traité – sortie du 9 décembre 1999.	63
5.2.5. Comparaison avec les captures des pêcheurs professionnels de l'Adour .	67

5.2.6. <i>Evaluation du taux d'exploitation.</i>	68
5.2.7. <i>Robustesse de la méthode : sensibilité au découpage de la tranche d'eau.</i>	69
5.2.8. <i>Conclusions et perspectives.</i>	69
5.3. 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 .	70
5.3.1. <i>Schéma méthodologique proposé.</i>	70
5.3.2. <i>Plan d'échantillonnage des données.</i>	70
5.3.3. <i>Modélisation du problème posé.</i>	71
5.3.4. <i>Estimations statistiques.</i>	74
5.3.5. <i>Algorithmes de calcul pour l'estimation de la biomasse.</i>	76
5.3.6. <i>Algorithme de calcul de la variance.</i>	77
5.3.7. <i>Résultats : estimation des biomasses, exemple pour la saison de pêche 1999 – 2000.</i>	78
5.4. Comparaison des estimations de biomasses obtenues par les deux méthodes proposées.	85
6. BATHYMETRIE ESTUARIEENNE ET MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	86
6.1. Etablissement de la carte bathymétrique du bas-estuaire.	86
6.2. Etablissement du modèle hydrodynamique.	87
6.2.1. <i>Cas du modèle unidimensionnel.</i>	87
6.2.2. <i>Cas du modèle bidimensionnel.</i>	90
6.2.3. <i>Evolution des modèles 1D et 2D.</i>	95
6.2.4. <i>Couplage des codes 2D horizontal et 1D.</i>	97
6.2.5. <i>Estimateur a posteriori et code 2D vertical.</i>	99
6.2.6. <i>Conclusions et perspectives.</i>	101
7. CALIBRATION DU MODELE DE CIRCULATION ESTUARIEENNE	102
7.1. Interface utilisateur.	102
7.2. Calibration du modèle.	102

8. SIMULATION DES DEPLACEMENTS DES CIVELLES DANS LA PARTIE NON STRATIFIEE DE L'ESTUAIRE : RESULTATS PRELIMINAIRES DE L'ETUDE THEORIQUE DU MODELE COMPORTEMENTAL DANS LE CADRE DETERMINISTE	110
8.1. Description du modèle comportemental.	110
8.2. Résultats numériques simplifiés.	112
8.3. Simulation comportementale en estuaire.	117
8.3.1. <i>Présentation de la visualisation des résultats.</i>	117
8.3.2. <i>Premier exemple de simulation : conditions hydrodynamiques moyennes.</i>	119
8.3.3. <i>Deuxième exemple : conditions hydrodynamiques marquées (fort coefficient de marée associé à un débit stable).</i>	122
8.4. Conclusion et perspectives.	126
9. EVALUATION DE L'INTENSITE DE COLONISATION ET DE PRODUCTION D'ANGUILLES JAUNES ET ARGENTEEES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'ADOUR ET DES GAVES	127
9.1. Zone d'étude.	127
9.2. Subdivision du bassin versant dans le cadre de l'étude réalisée.	128
9.3. Echantillonnage des anguilles : technique de prospection et nature des données.	128
9.4. Estimation des densités d'anguilles : méthode de calcul utilisée et description du fichier de données.	128
9.5. Méthode d'analyse statistique retenue.	129
9.6. Représentations cartographique et temporelle.	130
9.7. Résultats.	132
9.7.1. <i>Répartition des densités d'anguilles à l'échelle de la rivière.</i>	132
9.7.2. <i>Répartition des densités d'anguilles à l'échelle des sous-bassins versants.</i>	133
9.7.3. <i>Synthèse concernant les densités observées sur les différents sous-bassins.</i>	136
9.7.4. <i>Répartition des structures de taille d'anguilles à l'échelle du bassin.</i>	137
9.7.5. <i>Evaluation du taux d'anguilles argentées.</i>	140
9.7.6. <i>Répartition spatiale des densités d'anguilles.</i>	140
9.8. Discussion et synthèse.	142
9.8.1. <i>Limites méthodologiques : contraintes sur la répartition des stations d'inventaires utilisée dans l'analyse.</i>	142

9.8.2. Répartition spatiale des densités d'anguilles.	142
9.8.3. Répartition temporelle des densités d'anguilles.	144
9.8.4 Caractérisation de l'argenture.	144
BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE	145

Contrat EC/DG FISH (DG XIV) N° 99/023

Agreement 00/1213516/NF

Rapport Final

Libellé de la proposition :

« 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 ».

Coordinateur scientifique : Patrick Prouzet (IFREMER-LHA)

Participants :

Pascal Lazure (IFREMER-DEL).

Amara M., Capatina D., Trujillo D., Puiseux P., Arino O., A. Boussovar, C. Marquet et O. Pardo
(Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour).

Bru N., Drouilhet R., d'Aubigny G., M. Lejeune et C. d'Aubigny (Laboratoire de Statistique et d'Analyse
des Données de L'Université Pierre Mendès-France – Grenoble II).

Truong – Van B. et Frisou T. (Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Institut National des Sciences
Appliquées de Toulouse)

Sanchez F., M. Lissardy et De Casamajor M.-N. (ADERA- CERECA)

Castelnaud G. (CEMAGREF – Unité RAC Bordeaux)

Marty A. (Conseil Supérieur de la Pêche – Délégation de Pau)

Malvezin S., Marty S. et D. Barracou (MIGRADOUR).

RAPPELS DU CONTEXTE DE L'ETUDE

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) est une espèce exploitée à la fois dans les eaux douces, saumâtres et marines de la zone européenne. Cette espèce se reproduit dans l'Océan Atlantique.

Moriarty et Dekker (1997) coordinateurs de l'action concertée AIR 094-1939 mentionnent dans leur rapport le déclin prononcé des captures de cette espèce durant les 20 dernières années dans l'ensemble des pays européens accompagné de l'effondrement spectaculaire de certaines pêcheries. Ils signalent que les causes de cette diminution des captures qui reflètent vraisemblablement une raréfaction de l'espèce sont multiples : dégradation des environnements aquatiques continentaux, effet de l'infestation par le parasite *Anguillicola crassus* introduit en Europe au début des années 80, surexploitation de l'espèce aux principaux stades de son cycle biologique et probablement modification de la circulation océanique qui a influé sur les migrations des larves leptocephales. Le groupe d'experts participant à cette action concertée conclut que l'espèce se trouve en danger de disparition compte tenu que la plupart des indicateurs de la dynamique de cette population (diminution des captures par unité d'effort en civelles et diminution de l'aire de colonisation de l'espèce sur un certain nombre de bassins versants de la zone européenne) se trouve dans « le rouge ».

L'application du principe de précaution devrait aboutir à une interdiction de la pêche ou à une sévère restriction de son exploitation. Cependant l'importance sociale et économique de cette activité est très importante au plan européen. Le groupe d'experts estime que 25 000 personnes vivent directement du produit de cette exploitation. En outre, il n'est pas sûr que les effets d'une simple restriction de la pêche sans des mesures draconiennes concernant le respect de l'intégrité des zones humides continentales et estuariennes soient en mesure d'arrêter le déclin de cette espèce. D'autre part, le groupe constate que les connaissances scientifiques nécessaires à la gestion de l'espèce sont très réduites et très dispersées et qu'il conviendrait à la fois de les renforcer en les intégrant à une démarche commune notamment au sein du groupe de travail EIFAC/ICES sur l'anguille. Celui-ci (Anon., 1997 – CM 1997/M:1) confirme l'insuffisance des connaissances actuelles pour aboutir à des mesures concrètes et rapides sur l'aménagement de cette population à l'échelle européenne. Il conseille néanmoins de restreindre l'exploitation et de maintenir les niveaux de colonisation des civelles en amont des bassins versants au niveau de ceux qu'ils étaient antérieurement aux années 80. Il est également recommandé de maintenir les programmes de suivi existant et d'anticiper sur les programmes de gestion de l'espèce.

Ces recommandations ont été appuyées par le Comité des Ressources Vivantes du CIEM lors de sa dernière conférence statutaire au Portugal de la manière suivante :

« page 206 – ICES Annual Report for 1997/1998 : The EIFAC/ICES Working Group on Eels should consider the following issues as high priority :

1. Review the current status of eels in both North American and Europe, and the current knowledge and perceptions as the factors having led to their present status ;
2. Propose strategies and actions to achieve adequate escapements of elvers to nursery habitats and sub-adults to marine spawning grounds ;
3. Identify index rivers, stations within freshwater and estuarine environments in both Europe and North America in order to monitor recruitment and abundance for both glass eels and juvenile eels. »

C'est dans ce contexte que ce projet est proposé à cet appel d'offre PCP-DGXIV. Il a pour but de mettre en place sur un bassin pilote (index) situé dans la partie sud de l'aire de répartition au fond du golfe de Gascogne, les études permettant d'estimer l'abondance des flux de civelles et de mettre en relation l'intensité de leur exploitation par la pêche professionnelle sur les bras principaux du bassin avec les indices de colonisation répertoriés sur les différents sous-bassins de l'axe Adour-Gaves. Le but de ce travail est de mieux cerner l'effet de la pêche sur les peuplements d'anguille et de proposer une méthode d'évaluation des flux entrants de civelles dans un estuaire ouvert.

Le groupe de travail conjoint ICES/EIFAC en septembre 2002 à Nantes a confirmé ce diagnostic : « Recruitment is at a historical minimum and most recent observations indicate the decline continues » et complète son avis en incluant l'anthropisation générale des milieux.

En effet, la pêche n'est pas le seul facteur mis en cause, mais un des facteurs probables sans qu'il soit possible de hiérarchiser véritablement son impact par rapport à ceux des autres facteurs anthropiques et naturels qui sont identifiés comme influants sur l'état de cette ressource : « Evidence has been given that anthropogenic factors (e.g. exploitation, habitat loss, predation, contamination and transfer of parasites and diseases) as well as natural processes (e.g. climate changes) have contributed to the decline.

Le groupe recommande qu'un plan de restauration de la ressource et de son habitat soit mis en place dans les plus brefs délais à l'échelle européenne : "The ICES/EIFAC Working Group on Eels recommends that a recovery plan for the eel stock is compiled and implemented as a matter of utmost urgency and that fishing and other anthropogenic mortality be reduced to the lowest possible level until such a plan is agreed upon and implemented".

1.1. Présentation générale.

Un premier état sur la production et l'abondance de la civelle en France a été effectué au début des années 90 par Castelnaud *et al*, (1994). Cette publication présentait un historique de la pêche de la civelle en France, une caractérisation de l'exploitation pour l'année de référence 1989 et une analyse de l'évolution de l'abondance des flux de civelle à partir de séries chronologiques d'effort, de captures et de captures par unité d'effort (CPUE) provenant des trois bassins où elles étaient suffisamment longues : Vilaine, Loire, Gironde. Sur ces trois bassins existait un suivi scientifique de la pêche auquel étaient associées des études sur la biologie d'*Anguilla anguilla*. Ce type de suivi et d'études existait aussi sur le bassin de l'Adour, mais les séries chronologiques, disponibles seulement sur la période 1986-1990, avaient été jugées trop courtes par les auteurs pour pouvoir donner lieu à une analyse comparative. Depuis, les séries chronologiques de ce bassin se sont étoffées (cf. chapitre 2) et couvrent toute la période postérieure à 1990 ainsi qu'une longue période antérieure à 1986 pour ce qui concerne les CPUE. Ce suivi s'est aussi poursuivi sur la Gironde jusqu'à aujourd'hui, mais par contre, comme le signalaient déjà Castelnaud *et al* (1994), il a été stoppé sur la Vilaine et sur la Loire en 1990 ; il n'a repris récemment que sur la Vilaine (Briand *et al*, 2001). Aucun nouveau suivi scientifique de la pêche de civelle n'a vu le jour en France depuis. Cependant, la plupart des suivis locaux effectués par les administrations gestionnaires de la pêche maritime et fluviale se sont maintenus et des suivis statistiques nationaux se sont mis en place et ont souvent pris le relais : Centres Régionaux de Traitement des Statistiques (CRTS) en liaison avec la Commission des poissons migrateurs et des estuaires (CIPE) pour la zone sous réglementation maritime et Conseil Supérieur de la Pêche assurant le Suivi National de la Pêche aux Engins et filets (SNPE) pour la zone sous réglementation fluviale.

Le présent travail, orienté par le matériel bibliographique disponible, les résultats des suivis scientifiques et administratifs locaux et nationaux, les textes réglementaires, se focalisera sur le golfe de Gascogne de la Vilaine à l'Adour et comprendra :

- une présentation de la situation pratique et réglementaire de la pêche de la civelle valide en 1999, s'appuyant sur les textes réglementaires les plus récents obtenus auprès de la CIPE (Guernalec, 2000 ; Guernalec, *com. pers.*) et des Administrations locales en charge de la pêche maritime et fluviale ;
- un rappel historique sur l'évolution de la pêche de civelle sur le territoire national depuis les années 20 jusqu'au début des années 90, basé sur l'analyse bibliographique et les résultats de Castelnaud *et al* (1994) ;
- une description du matériel et des méthodes de suivi de l'activité de pêche qui ont permis d'obtenir les données utilisées dans le bilan et l'analyse des indicateurs halieutiques ;
- une compilation et une analyse des indicateurs halieutiques des quatre grands bassins de la Vilaine, de la Loire, de la Gironde et de l'Adour ;
- un bilan de la pêche dans le golfe de Gascogne pour l'année de référence 1999¹, année la plus récente pour laquelle les données sont disponibles en quantité et qualité suffisantes[☞] ;

¹ Les données de la pêche maritime bien que récoltées auprès des marins pêcheurs et saisies dans le cadre du système CRTS ne sont pas accessibles depuis l'année 2000 pour des raisons techniques : pas de logiciel d'interrogation disponible et fiable actuellement.

☞ Conventions utilisées : Sauf en ce qui concerne la partie historique où une incertitude subsiste et sauf indication particulière, le terme « année n » ou « n », désignera dans le reste du texte la saison (ou campagne) de pêche à la civelle s'étalant de façon générale de novembre n-1 à avril n.

Les pêcheurs amateurs affiliés et les pêcheurs (autres que professionnels) avec ou sans droit de pêche (licence) qui vendent (illégalement) le produit de leur pêche, seront regroupés sous l'appellation de pêcheurs non-professionnels, comme dans Castelnaud *et al* (1994).

1.2. Cartographie de la pêche civellière en France².

La pêche de la civelle en France (figure 1) se pratique dans les parties basses des fleuves et sur certaines parties adjacentes de la côte océanique lors de leur migration anadrome de novembre à avril. La côte se trouve sur le Domaine Public Maritime. Les parties basses des fleuves, c'est-à-dire les estuaires et les zones mixtes fluviales où se fait sentir la marée dynamique, se trouvent sur le Domaine Public Fluvial à l'amont de la limite transversale de la mer qui le sépare du Domaine Public Maritime (figure 2).

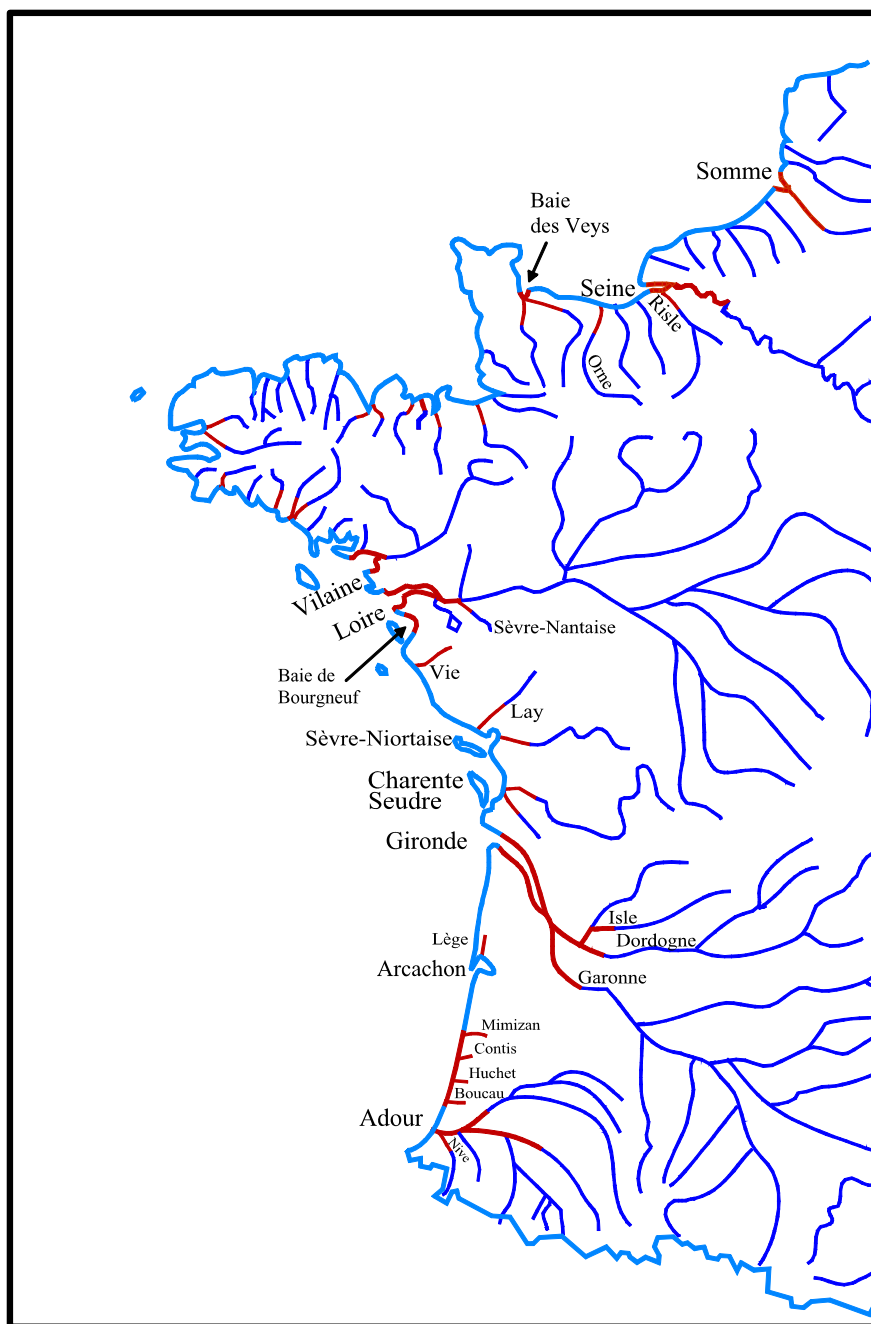


Figure 1 - Situation géographique de la pêche de la civelle en France

Sur les estuaires saumâtres, de la limite transversale de la mer jusqu'à la limite de salure des eaux, la réglementation de la pêche est maritime. Seuls les marins pêcheurs peuvent y exercer la pêche à titre professionnel. Sur les zones mixtes fluviales dulçaquicoles, de la limite de salure des eaux, jusqu'aux limites des Affaires Maritimes (dont la position a pu varier au cours du dernier siècle et dont les plus anciennes, les plus en amont matérialisent généralement la limite de remontée de la marée dynamique), la réglementation

² Les conditions d'exercice de la pêche de la civelle en France ainsi que les exemples de règles de la police de la pêche dans les bassins fluvio-estuariens du Golfe de Gascogne sont rapportés dans une annexe réglementaire (annexe 1).

de la pêche est fluviale. Les pêcheurs professionnels fluviaux et les marins-pêcheurs qui ont obtenu des droits de pêche dans ces zones, y exercent la pêche à titre professionnel.

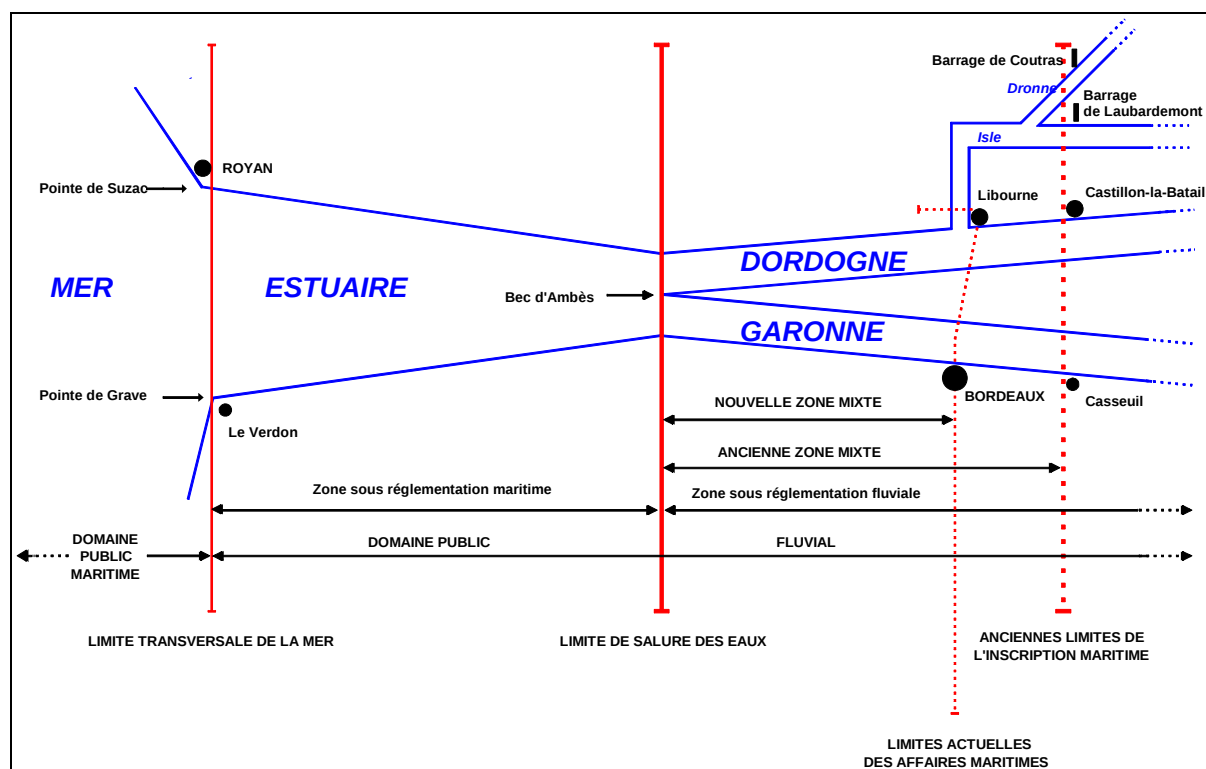


Figure 2 - Limites administratives et réglementaires de la pêche de la civelle en France, exemple du bassin de la Gironde

Des pêcheurs non-professionnels peuvent aussi exercer la pêche sur le Domaine Public Maritime et sur le Domaine Public Fluvial : pêcheurs amateurs maritimes à pied sur la cote et sur les estuaires maritimes avec des restrictions de quantité pêchées ; pêcheurs amateurs fluviaux à pied ou en bateaux sur les zones mixtes fluviales et les chenaux des systèmes fluvio-estuariens soumis à la détention d'une licence de pêche à la civelle avec interdiction de vente ; pêcheurs avec droit de pêche amateur ou sans droit de pêche qui commercialisent leurs prises.

Les engins de pêche utilisés pour la capture de la civelle dérivent tous d'un tamis circulaire à petites mailles, utilisé soit manuellement comme une épuisette depuis la rive ou en bateau par les pêcheurs amateurs ou professionnels (seules les dimensions autorisées et les formes varient), soit poussé par une embarcation sur le coté (2 cercles ou 2 cadres rectangulaires ou carrés) ou à l'avant (1 ou 2 cadres rectangulaires solidaires). Le premier type de pêche sera désigné sous l'appellation « tamis » manœuvré à la main et le deuxième type sous l'appellation « drossage » ; le système de tamis drossés dans les estuaires de Gironde, Charente et Seudre porte le nom local de « pibalour ».

1.3. Rappel historique concernant les pêcheries et les productions.

De 1920 à 1950 environ, la pêche s'effectuait dans les systèmes fluvio-estuariens uniquement le long des berges, à pied ou en bateau à l'arrêt, au tamis à main d'un diamètre généralement inférieur à 0,8 m. Le pêcheur repérait les cordons de civelles et les attirait avec une source lumineuse (Elie, 1979). Cette technique est toujours utilisée surtout en zone fluviale, même si les flux de civelle sont plus diffus.

De 1950 jusqu'à la fin des années 70 environ, on voit apparaître progressivement dans les estuaires sous réglementation maritime la technique du drossage³ (Elie, 1979). Le diamètre du tamis a été porté à 1,20 m en 1958 (décret du 16 septembre 1958) en zone sous réglementation fluviale et en 1965 (arrêté du 17 février 1965), en zone maritime.

³ Plus tardivement sur certains estuaires comme l'Adour où le tamis poussé n'a été toléré en zone maritime qu'en 1995 et régularisé en 1999.

L'évolution des techniques de pêche et des réglementations a entraîné une augmentation du nombre de pratiquants qui a été amplifiée à la fin des années 60 par les prix d'achat de la civelle offerts par les négociants espagnols en liaison avec une demande importante de civelle vivante sur le marché international (Elie et Fontenelle, 1982).

En 1970, Popelin (1971), évaluait à partir d'une enquête administrative la production totale à 1345 tonnes pour une valeur de 2,4 millions d'euros (Tableau 1) ; 648 marins-pêcheurs professionnels et 2424 pêcheurs fluviaux professionnels et amateurs avaient alors été dénombrés.

Tableau 1 - Estimations ponctuelles de la production totale de civelles et des effectifs de pêcheurs entre 1970 et 1989

ANNEE	1970	1979	1983	1986		1989
Production MP (t)	450	1175	591	260		300
Production PF et non-pro fluviaux (t)	895	675				110
Production Totale (t)	1345	1850			500	520 (4)
Prix Moyen/Kg (euro)	2.75	5.65	20	25		61
Valeur Totale (millions d'euros)	2.74	10.44	11.74	6.56	12.5	30.5
Nbre MP(1)	648	964	995	677	850	886
Nbre PF et non-pro fluviaux (2)	2424	2588			4000 (3)	1512
Nbre pêcheurs non-pro Maritimes						2055
Origine des données	Popelin (1971)	CIPE (1982)	CIPE (1983)	CIPE (1986)	Desaunay et Aubrun (1988)	Castelnaud et al (1989)

(1) auquel il faut ajouter nombre inconnu de pêcheurs non-professionnels maritimes sauf pour l' évaluation de 1986 de Desaunay et Aubrun (1988) et pour 1989

(2) auquel il faut ajouter un nombre inconnu de pêcheurs non-professionnels fluviaux sur le Domaine Privé

(3) comprenant aussi les pêcheurs non-professionnels maritimes

(4) dont 110 tonnes pour les non-professionnels maritimes

A partir de 1970, on constate une augmentation de l'effort de pêche et des captures totaux et ce, jusqu'au début des années 80. C'est à cette époque qu'apparait le « pibaleur » dans les estuaires maritimes de Charente, Seudre et Gironde où le dressage avec deux tamis circulaires avait été jugé trop peu performant.

La production totale de l'année 1979 a été estimée après enquête à 1 850 tonnes pour une valeur de 10,44 millions d'euros par la CIPE (Castelnaud et al, 1994), qui indiquait que 1979 a été choisie comme référence car il s'agissait de la dernière bonne année de pêche. 964 marins-pêcheurs et 2 588 pêcheurs professionnels et amateurs fluviaux étaient dénombrés (tableau 1).

A partir du début des années 80, on constate un fort déclin des apports totaux, illustré par les données de la CIPE (Castelnaud et al, 1994) même si celles-ci ne concernent que les marins pêcheurs. Cet organisme évaluait après correction des chiffres collectés auprès des professionnels, la production pour l'année 1983 à 591 tonnes, sa valeur à 11,74 millions d'euros et le nombre de marins-pêcheurs à 995. La chute de la production et de l'abondance de la civelle en France entre 1980 et 1982 a été confirmée par Castelnaud et al, (1994) au travers de l'analyse des tendances des indicateurs halieutiques des trois grands bassins de la Vilaine, de la Loire et de la Gironde.

L'activité de pêche à la civelle a continué pourtant à mobiliser fortement les pêcheurs professionnels (tableau 1) compte-tenu du fort accroissement des prix au kg entre 1979 et 1983, alors qu'ils étaient restés stables en francs constants entre 1971 et 1979.

Les chiffres globaux produits avant 1989 concernaient la seule année 1986 et avaient deux origines (tableau 1) : la CIPE (Castelnaud et al, 1994) qui donnait pour l'année 1986 le chiffre de 260 tonnes pour les seuls marins-pêcheurs et l'IFREMER (Desaunay et Aubrun, 1988), qui arrivait au chiffre de 500 tonnes pour l'ensemble des catégories de pêcheurs répertoriés.

Le niveau des apports de l'année 1986 s'est maintenu en 1989 alors qu'entre temps étaient intervenues des limitations statutaires et réglementaires en zone fluviale (Loi sur la pêche fluviale du 29 juin 1984 et ses décrets d'application). Le nouveau statut de pêcheur professionnel en eau douce avait fait diminuer les effectifs (Castelnaud et Babin, 1992) et la dimension du tamis amateur avait été réduite à 50 cm, avec interdiction de vendre le produit de la pêche. Ces apports de 1989 ont été évalués par Castelnaud et al, (1994) à 520 tonnes dont 350 pour les seuls professionnels (tableau 1).

Les exportations de civelles pour l'alevinage vers les pays asiatiques ont commencé au début des années quatre-vingt dix (Nielsen, 1998) et se sont amplifiées entre 1994 et 1997. Les prix d'achat au pêcheur qui avaient stagné aux alentours de 61 €/kg entre 1989 et 1995, sont passés à 107 €/kg en 1996 et ont

culminé à plus de 152 €/kg en 1997. Cependant, après 1989, les apports ont semble-t-il diminué alors que l'effort de pêche nominal, tout au moins professionnel, semble s'être stabilisé.

C'est ce que nous allons tenter de vérifier par l'analyse du bilan de l'année 1999 et de certaines vues plus précises sur les bassins versants actuellement suivis.

1.4. Matériels et méthodes de suivis des indicateurs halieutiques.

Les séries d'indicateurs halieutiques pour les grands bassins fluvio-estuariens proviennent, au moins en partie, des systèmes de suivi scientifique des pêcheries mis en place par les Instituts de Recherche. Elles sont complétées à partir des données fournies par les systèmes de suivis statistiques nationaux du CRTS et du CSP et par les Administrations locales en charge de la pêche maritime et fluviale.

1.4.1. Bassins de la Vilaine et de la Loire.

Sur le bassin de la Vilaine, Elie et Rigaud (1984) ont mené à la fin des années 70, des investigations de terrain approfondies concernant la population d'anguille avec un examen particulier de l'impact du barrage d'Arzal sur la migration anadrome des civelles. A partir du suivi d'une sélection de pêcheurs professionnels au niveau du réseau commercial local, ils ont calculé des CPUE en kg/sortie sur la période 1977-1982. Ils ont aussi corrigé les chiffres de la période 1965-1982 des administrations maritime et fluviale concernant la production de civelle et la population totale de pêcheurs professionnels (tableau 2). Guerault et Desaunay (1989), Guerault *et al.*, (1994) ont poursuivi ce suivi, les corrections des chiffres de production et d'effort et le calcul de CPUE sur le bassin de la Vilaine en aval du barrage d'Arzal en 1983 et 1984. De la même manière, et à la même époque, sur le bassin de la Loire (estuaire maritime, zone mixte fluviale de Loire et de Sèvre-Nantaise), Guerault et Desaunay (1989), Guerault *et al.*, (1994) ont pris le relais de Elie (1979) en appliquant la même méthode de suivi pour continuer la série de CPUE en kg/sortie, commencée en 1977 (tableau 3).

De 1985 à 1990, Guerault et Desaunay (1989), Guerault *et al.*, (1994), ont estimé la production, l'effort de pêche effectif et les CPUE des marins-pêcheurs (uniques exploitants depuis la construction du barrage d'Arzal au début des années 70) en Vilaine et des marins-pêcheurs et professionnels fluviaux en Loire à partir d'un échantillon (30 à 50 % de la population totale) de pêcheurs professionnels maritimes et fluviaux toujours au niveau du réseau commercial local. Le dénombrement des effectifs de pêcheurs professionnels, marins et fluviaux par identification des navires actifs sur la pêcherie a aussi été effectué durant cette période.

L'Institut d'Aménagement de la Vilaine (IAV) (Briand *et al.*, 2001) a entrepris au milieu des années 90, un suivi du recrutement en civelle au niveau de la passe à civelle installée sur le barrage d'Arzal, en liaison avec l'exploitation par pêche. Les enregistrements par les marins pêcheurs sur les fiches de pêche du CRTS sont vérifiés par l'IAV à partir de sorties-vérification de terrain, d'évaluation des temps de pêche de la flottille et de confrontations avec les enregistrements commerciaux. Ainsi l'IAV a débuté une série d'indicateurs halieutiques en 1996 : CPUE, efforts nominal et effectif en nombre de sorties et en nombre d'heures de pêche (tableau 2).

Les productions des marins pêcheurs sur la Loire (tableau 3) pour la période antérieure à 1985 et sur la Loire et la Vilaine pour la période postérieure à 1990 proviennent des Directions des Affaires Maritimes (Hien, com. Pers.) qui les obtiennent auprès du réseau de mareyeurs. Ces chiffres de production sont préférés pour la Loire sur la période récente 1998-2001 à ceux du CRTS qui, même redressés, apparaissent minimisés. Par contre, l'effort nominal et effectif uniquement fourni par le CRTS, est retenu pour cette période (Grandpierre, com. Pers.). Les effectifs de marins pêcheurs entre 1990 et 1995 sur la Vilaine (tableau 3) sont ceux des Affaires Maritimes. Les productions des professionnels et des amateurs fluviaux en Loire (tableau 3) proviennent de la DDAF (Aubineau, com. pers.) de 1977 à 1997 et du CSP à partir de 1999 (Changeux, com. Pers.).

1.4.2. Bassin de la Gironde.

Sur la Gironde (estuaire maritime, zone mixte fluviale de Garonne-Dordogne-Isle), un système de suivi de l'activité halieutique a été mis en place par le Cemagref à partir de 1976 dans le cadre des études

d'impact du Centre Nucléaire de Production Electrique installé sur la rive droite de l'estuaire, financées par Electricité de France (Castelnaud *et al.*, 1994 ; Castelnaud *et al.*, 2001a et b).

Ce système qui a été progressivement amélioré fait appel à des pêcheurs professionnels volontaires (dits coopératifs) qui, sur une base de confiance et de réciprocité, fournissent des données de captures et d'effort de pêche et des renseignements complémentaires concernant leur activité de pêche et celle des autres pêcheurs professionnels et non-professionnels dans leur zone de pêche. Des sorties de vérification et d'échantillonnage biologique sont associées. Une stratification des données de l'échantillon de pêcheurs coopératifs est opérée par métier de pêche (pibalour, tamis à main, drossage) et par zone de pêche ou regroupement de zones. L'échantillon de pêcheurs représente selon les saisons, de 8 à 27 % de l'effectif total de pêcheurs professionnels pour le métier pibalour, de 4 à 31 % pour le tamis à main, de 23 à 37 % pour le drossage. La population de pêcheurs professionnels est parallèlement structurée en métiers et dénombrée par zone de pêche pour chaque saison de pêche à partir des informations collectées régulièrement auprès de la pêcherie et des organisations professionnelles locales.

Le calcul des captures et des efforts effectifs totaux a été effectué pour la période 1979-1999 (tableaux 4 et 5) sur la base de cette stratification par extrapolation des captures moyennes et des efforts moyens des pêcheurs coopératifs à l'effectif de pêcheurs professionnels correspondant (Castelnaud *et al.*, 2001a).

La production de la pêche non-professionnelle qui s'exerce surtout en zone fluviale est évaluée en Gironde à titre indicatif sur toute la période 1979-1999 à partir des effectifs de pêcheurs amateurs fluviaux (auxquels a été délivrée une licence de pêche au tamis à civelle) et des captures moyennes des pêcheurs "coopératifs" (Castelnaud *et al.*, 2001a). Un amateur licencié a été considéré comme développant un effort égal à celui d'un professionnel pour le métier civelle - tamis afin de tenir compte de la part inconnue liée au braconnage. Cette évaluation (tableau 6) permet de mieux prendre en compte la mortalité réelle par pêche et l'incidence socio-économique globale de cette activité.

Les CPUE sont calculées en kg/jour de pêche pour la période 1979-1999 par saison, par métier de pêche, par zone ou regroupement de zones à partir des données de capture et d'effort effectif des pêcheurs "coopératifs" (Castelnaud *et al.*, 2001a).

1.4.3. Bassin de l'Adour.

Sur le bassin de l'Adour (estuaire maritime, zone mixte fluviale de l'Adour, de la Nive et de la Bidouze), l'IFREMER (Prouzet *et al.*, 2000 ; 2001) a utilisé les carnets CIPE, puis le système de suivi CRTS pour obtenir les indicateurs halieutiques (captures, effort nominal et effectif, CPUE en kg/sortie) des deux métiers, tamis à main de 1986 à 2000 et drossage de 1995 à 2000, pratiqués par les marins pêcheurs (tableau 7). L'IFREMER assure la vérification de terrain des données collectées et leur validation. La collaboration entre marins pêcheurs et IFREMER sur ce bassin, instaurée depuis plus de quinze ans, permet d'obtenir une bonne fiabilité de ces données. Un certain nombre de carnets de pêche anciens ont pu être répertoriés par l'IFREMER depuis les années 20 (cf. figure 8 et tableau 10 du §2) ce qui a permis d'avoir également sur ce bassin des séries historiques longues. Les effectifs et les productions des pêcheurs non-professionnels maritimes autorisés à pêcher la civelle dans les zones sous réglementation maritime du bassin de l'Adour et des courants Landais sont fournis par la Direction des Affaires Maritimes de 1992 à 1999 (tableau 8). Les productions des professionnels et amateurs fluviaux (tableau 7) sont obtenues auprès de la DDAF de 1990 à 1998 et auprès du CSP pour 1999 (Changeux, *com. pers.*).

1.4.4. Description des réseaux de collecte du CRTS et du CSP.

De façon générale, le suivi de l'activité des marins pêcheurs des systèmes fluvio-estuariens du golfe de Gascogne est effectué depuis 1993 par les CRTS (essentiellement celui de La Rochelle) dans le cadre du système national des statistiques de pêches (SNSP) de la Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture (DPMA) à partir des données issues des déclarations obligatoires sur les fiches de pêche et de celles issues des passages en criées (très limités pour la civelle). Des enquêteurs halieutiques de l'IFREMER, mis à disposition de la DPMA, ont pour tâche de collecter les fiches de pêche auprès de l'ensemble des marins pêcheurs des estuaires et des zones mixtes fluviales, de sensibiliser ces derniers, de saisir les données et d'apporter si possible une première validation de terrain.

Les fiches de pêche spécifiques des systèmes fluvio-estuariens sont très détaillées avec, pour chaque navire et par mois, le nombre de marées, les captures par espèce, le ou les engins de capture, le ou les rectangles statistiques qui identifient les zones de pêche. La Gironde, par exemple, fait partie du secteur

statistique 20 E 8, lui-même divisé en plusieurs sous-secteurs. Les données du CRTS de La Rochelle (Grandpierre, *com. pers.*), accessibles de 1998 à 2001, seront utilisées dans l'étude particulière du bassin de la Loire (effort nominal et effectif) et dans le bilan 1999 (effort nominal et productions corrigées) pour les bassins où des données de systèmes de suivis scientifiques ou administratifs de bonne qualité n'existent pas : essentiellement Baie de Bourgneuf, Vie, Lay, Sèvre Niortaise, Charente, Seudre, Bassin d'Arcachon.

Le suivi national de la pêche aux engins et aux filets (SNPE) pratiquée par les pêcheurs fluviaux professionnels et amateurs dans les zones mixtes fluviales de l'ensemble des bassins fluvio-estuariens, a été lancé progressivement à partir de 1997 par le CSP. Ce suivi est basé sur des déclarations obligatoires sur des fiches de pêches mensuelles détaillées qui doivent être renvoyées par les pêcheurs, à l'aide d'enveloppes pré-affranchies, au service technique du CSP à Paris. Les résultats sont utilisés dans le bilan 1999 pour les bassins où elles sont disponibles, c'est-à-dire la Loire, la Charente et l'Adour.

Pour simplifier et coordonner les procédures, les déclarations des marins-pêcheurs, lorsqu'ils exercent en zone mixte, sont collectées uniquement au CRTS.

1.5. Analyse des indicateurs halieutiques par bassin.

1.5.1. Bassin de la Vilaine.

La pêche professionnelle de la civelle est pratiquée en bateau, à l'aide de deux tamis circulaires de 1.20 m de diamètre par les marins pêcheurs uniquement, à l'aval du barrage d'Arzal.

L'effort effectif en sorties de pêche suit, pour les périodes 1985-1990 et 1996-1998 où il est disponible (tableau 2), l'évolution de l'effort nominal qui varie entre 100 et 150 marins pêcheurs tout au long de la période 1977-1999. Cependant, le nombre de sorties a diminué par pêcheur entre la période 1977-1990 où il varie de 86 à 138 sorties et la période récente où il est de 72 sorties par pêcheur en 1997 et en 1998 (Briand *et al*, 2001). Les captures totales ainsi que les CPUE montrent un pic en 1978-1979, puis déclinent jusqu'en 1990 avant d'amorcer un second recul qu'on constate nettement en 1996-1999 (figure 3).

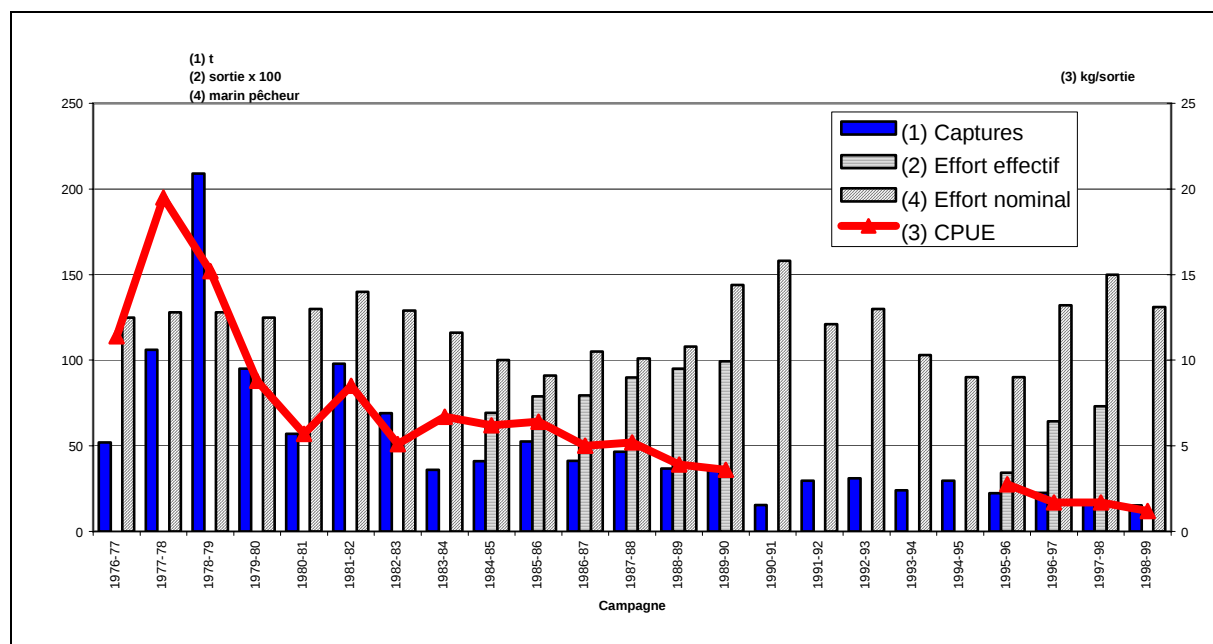


Figure 3 - Indicateurs halieutiques du bassin de la Vilaine sur la période 1977-1999.

Tableau 2 - Captures, efforts et CPUE des pêcheurs professionnels dans le bassin de la Vilaine sur la période 1965-2001

Remarque : en ce qui concerne la pêche non-professionnelle de la civelle sur le littoral sud-Gascogne, Castelnau *et al* (1994) avaient pu se référer pour leur bilan 1989, à l'inventaire sur les effectifs de pêcheurs et la production (notamment des pêcheurs maritimes à pied) réalisé par Aubrun (1987) de septembre à novembre 1986. Pour le bilan 1999, nous ne disposons de données pour les amateurs fluviaux que pour quatre bassins seulement et pour les pêcheurs maritimes à pied pour le bassin de l'Adour uniquement.

SAISON	Captures	Effort nominal	Effort effectif		CPUE
	t	professionnel	sortie	heure	kg/sortie
1965	5	60			
1966	4	60			
1967	9	60			
1968	12	60			
1969	10	60			
1970	8	60			
1971	44				
1972	38				
1973	78				
1974	107				
1975	44	80			
1976	106	120			
1977	52	125			11.4
1978	106	128			19.5
1979	209	128			15.2
1980	95	125			8.8
1981	57	130			5.7
1982	98	140			8.5
1983	69	129			5.1
1984	36	116			6.7
1985	41	100	6921		6.2
1986	52.6	91	7896		6.4
1987	41.2	105	7955		5
1988	46.6	106	8990		5.2
1989	36.7	110	9498		3.9
1990	35.9	146	9940		3.6
1991	15.35	158			
1992	29.57	121			
1993	31	130			
1994	24	103			
1995	29.7	90			
1996	22.4	90	3419	15300	2.75
1997	22.6	132	6435	28900	1.69
1998	17.5	150	7309	33200	1.69
1999	15.3	131		35000	1.2
2000	14.2				
2001	8.1				

Les CPUE passent de 14 kg/sortie à 4 kg/sortie sur la période 1977-1990 et sur la période 1996-1999, elles se situent en dessous de 2 kg/sortie (tableau 2). Les captures totales passent de la centaine de tonnes entre 1974-1982 à 30-40 tonnes entre 1990-1995, puis atteignent seulement 8 à 17 tonnes selon les saisons entre 1998 et 2001.

Comme le niveau d'effort est très élevé dans la Vilaine au cours de la saison, le meilleur indice d'abondance est la capture totale (Briand et al, 2001). Cet indicateur est représentatif en Vilaine du recrutement estuarien en civelle du fait qu'il ne dépend pas des conditions environnementales et que la pêche est uniquement professionnelle (Guerault *et al*, 1991).

1.5.2. Bassin de la Loire.

La pêche professionnelle de la civelle est pratiquée en bateau, à l'aide de deux tamis circulaires de 1.20 m de diamètre par les marins pêcheurs uniquement dans l'estuaire maritime de la Loire, par les marins pêcheurs et les professionnels fluviaux dans la zone mixte de la Loire, par les professionnels fluviaux dans la zone mixte de la Sèvre Nantaise.

Les données d'effort, très parcellaires, montrent une relative stabilité pendant la période 1985-1990 et une diminution en ce qui concerne le nombre de marins pêcheurs entre cette période et la période récente 1998-2000 (tableau 3).

Comme pour la Vilaine, les CPUE suivent la tendance des captures totales sur la période où elles sont calculées, mais la chute est moins brutale et s'étale de 1980 à 1983. Elles passent d'une moyenne de 25-30 kg/sortie à moins de 10 kg/sortie. Les captures diminuent de moitié, passant de 507.5 tonnes à 240.5 tonnes. Après une diminution supplémentaire entre 1983 et 1984 (figure 4), surtout des captures, on observe une relative stabilisation des captures et des CPUE jusqu'en 1988 et ensuite une deuxième chute de ces indicateurs halieutiques (Castelnaud *et al*, 1994). A partir de 1990, les captures totales oscillent entre 60 et 100 tonnes jusqu'en 2000.

Tableau 3 - Captures des pêcheurs professionnels et amateurs, efforts et CPUE des pêcheurs professionnels dans le bassin de la Loire sur la période 1969-2001

SAISON	Captures				Effort		CPUE kg/sortie
	marins pêcheurs	pro fluviaux	total professionnels	amateurs fluviaux	nominal	effectif	
	t	t	t	t	marin pêcheur	sortie	
1969	225		225				
1970	452,6		452,6				
1971	330		330				
1972	311,4		311,4				
1973	291,6		291,6				
1974	557		557				
1975	497		497				
1976	770		770				
1977	673	4	677				26,8
1978	514	11,9	525,9				31,6
1979	620	21,7	641,7				26,4
1980	507,5	18	525,5				20,8
1981	287,5	15,2	302,7				16,1
1982	261	13	274				13,6
1983	240,5	19	259,5				9,8
1984	168	14,5	182,5				9
1985	145	8,8	153,8		285	16224	8,2
1986	113	10,4	123,4		268	13207	8
1987	131	14	145		265	15481	8,3
1988	165	11,6	176,6		264	20683	9
1989	78	9,1	87,1		253	17457	4,3
1990	80,5	15,5	96		244	17626	4,4
1991	30,5	5,2	35,7				
1992	32,2	7,1	39,3				
1993	80	10,5	90,5				
1994	94,6		94,6	0,1			
1995	126,9	5,6	132,5	0,175			
1996	72,7	8,1	80,8				
1997	67,2	3,6	70,8				
1998	60,7		60,7		185	8761	
1999	80,4	6,5	86,9	0,78	203	11644	
2000	73,9	6	79,9	0,56	135	6216	
2001		2,5		0,28	107	5206	

Les captures totales ont diminué d'un facteur 5 ou 6 sur l'ensemble de la période 1977-2000 et l'effort nominal a baissé de moitié entre 1985-1990 et 2000.

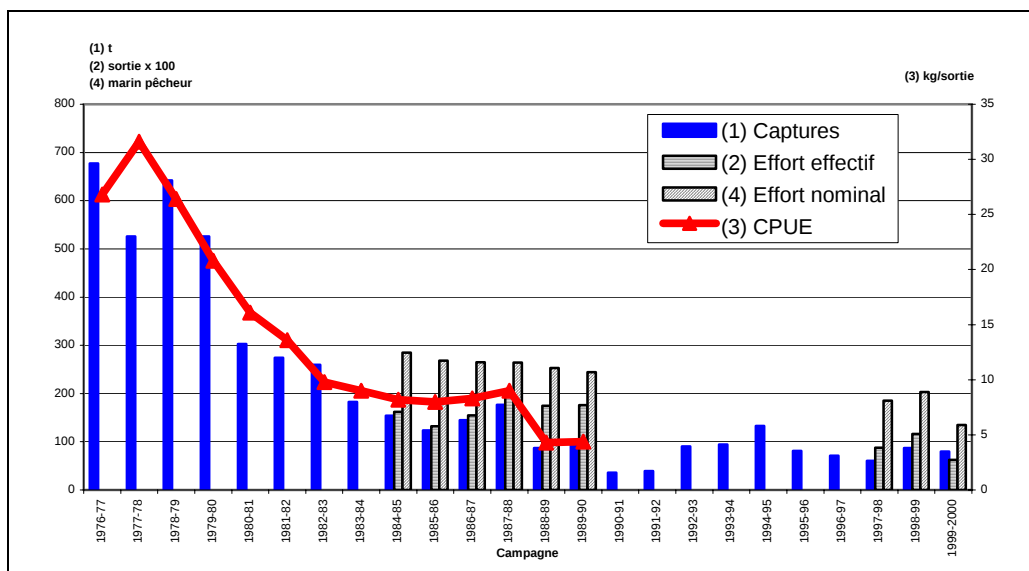


Figure 4 : Indicateurs halieutiques du bassin de la Loire sur la période 1977-2000

1.5.3. Bassin de la Gironde.

La pêche professionnelle de la civelle en Gironde est pratiquée au pibalour en bateau par les seuls marins pêcheurs dans l'estuaire maritime et au tamis manœuvré à la main depuis une embarcation, ainsi qu'au drossage depuis 1996, par les professionnels fluviaux et quelques marins pêcheurs dans les zones mixtes fluviales de Garonne-Dordogne-Isle. Les pêcheurs non-professionnels pêchent généralement au tamis manœuvré à la main depuis une embarcation ou depuis la rive, dans les zones mixtes fluviales et depuis la rive dans les chenaux débouchant dans l'estuaire. Les braconniers utilisent aussi des filets-poche. Le bassin de la Gironde est le seul où les indicateurs halieutiques concernent l'ensemble du territoire de pêche, des professionnels marins et fluviaux et des métiers de pêche.

Tableau 4 - Captures, efforts et CPUE pour le tamis et le drossage des pêcheurs professionnels dans la zone mixte fluviale de la Gironde sur la période 1979-1999.

SAISON	Captures		Effort nominal			Effort effectif		CPUE	
	tamis	drossage	tamis	drossage	tamis+dros	tamis	drossage	tamis	drossage
	t	t	professionnel	professionnel	professionnel	jour	jour	kg/jour	kg/jour
1979	100.6		285		285	6270		19.7	
1980	134		285		285	7410		22.6	
1981	114.3		285		285	6840		17	
1982	35.15		265		265	6097		6	
1983	25.7		226		226	6102		4.3	
1984	22.7		194		194	5044		4.9	
1985	18.5		192		192	4416		3.3	
1986	10.8		189		189	5103		5.7	
1987	22.9		157		157	4396		6.4	
1988	3.9		164		164	2952		3.7	
1989	18.5		115		115	2530		7.2	
1990	7.9		110		110	2535		2.75	
1991	9.7		86		86	3870		3.2	
1992	9.7		85		85	3423		3	
1993	10.8		76		76	2052		5.2	
1994	5		76		76	1748		3.2	
1995	8.7		72		72	2592		3.6	
1996	1.5	2.30	48	42	59	860	1302	2.1	1.80
1997	3.13	7.90	64	65	74	640	2600	5.1	3.00
1998	0.53	1.70	44	58	68	528	1632	0.9	1.20
1999	0.75	7.55	25	74	75	275	3480	3.2	2.20

Les captures totales professionnelles comme les captures par sortie du métier « tamis » montrent une cassure très nette entre 1981 et 1982 avec une diminution d'un facteur 3 environ pour chacun des deux indicateurs (figure 5). L'effort total professionnel baisse aussi, mais de façon plus progressive et étalée : il passe de 7000 jours de pêche environ en 1980 à 3000 en 1989. Il ne remontera sensiblement qu'en 1990 et 1991 et en 1999 où le drossage a pris presque totalement le relais du tamis à main (tableau 4). L'effort professionnel et amateur a diminué, mais l'effort développé par les braconniers sur les domaines public et privé reste inconnu.

Les CPUE du « métier tamis » qui sont restées stationnaires de 1982 à 1989 ont amorcé par la suite une nouvelle baisse qui n'est pas contredite par celles du « métier drossage » qui lui a été associé à partir de 1996. Les CPUE du « métier tamis » n'ont plus beaucoup de sens en 1999, compte tenu de la faiblesse et de l'irrégularité de cette pêche.

Les captures totales cumulées des deux métiers « tamis » et « drossage » stagnent à un niveau bas malgré l'introduction du drossage en 1996.

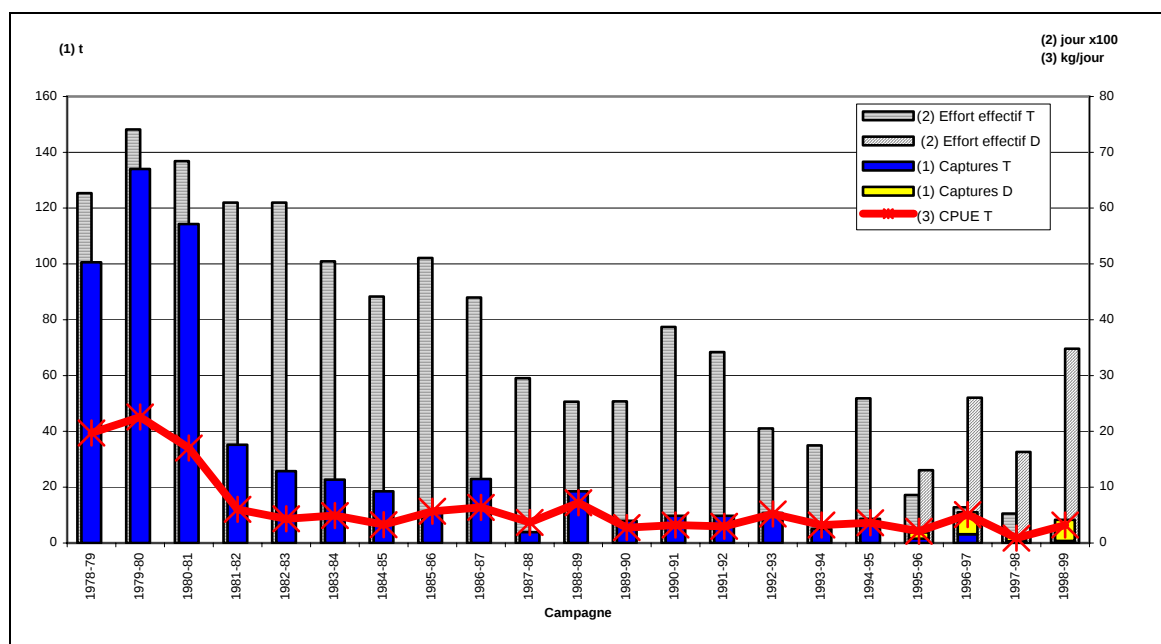


Figure 5 - Indicateurs halieutiques du bassin de la Gironde pour les métiers tamis et drossage sur la période 1979-1999

Globalement, après une chute de l'abondance de la civelle en deux temps entre 1980-1983 et 1988-1990 (figure 5), on observe actuellement pour les métiers « tamis » et « drossage », une situation stationnaire, avec des niveaux de captures totales et de CPUE nivelés vers le bas (Castelnaud *et al.*, 2001a).

Pour le « métier pibalour », les captures baissent aussi au début des années 80, de façon nette entre 1982 et 1983 avec un décalage d'une saison par rapport au « métier tamis » (figure 6). Les CPUE, elles, décroissent régulièrement entre 1980 et 1989 et par la suite, se stabilisent autour de 7-8 kg/ jour (tableau 5). L'effort de pêche est resté relativement stable entre 1979 et 1988 puis, a augmenté nettement, ce qui a fait remonter les captures entre 1989 et 1995, mais non les CPUE (Castelnaud *et al.*, 2001a). Ces captures ont à nouveau baissé par la suite, avec un effort réel qui a poursuivi sa croissance (en nombre de pêcheurs, en nombre de sorties par pêcheurs, en surface totale de pibalour).

Tableau 5 - Captures, effort et CPUE pour le pibaleur des pêcheurs professionnels dans l'estuaire de la Gironde sur la période 1979-1999

SAISON	Captures t	Effort nominal marin pêcheur	Effort effectif jour	CPUE kg/jour
1979	49.20	41	2130	19.70
1980	80.80	41	3120	25.90
1981	58.20	41	2800	20.00
1982	53.70	41	3310	14.95
1983	28.00	40	2000	13.60
1984	32.00	40	1640	19.20
1985	24.40	40	2000	9.60
1986	26.00	40	2760	10.60
1987	29.10	40	2800	14.00
1988	25.30	40	3200	10.90
1989	41.00	65	5005	7.20
1990	31.40	66	4224	5.60
1991	39.10	67	4422	7.70
1992	16.60	66	4224	3.70
1993	36.70	64	3840	8.20
1994	30.40	64	4262	8.70
1995	46.00	73	5840	8.20
1996	22.70	66	5544	4.80
1997	33.80	76	6308	6.50
1998	21.50	77	5082	4.30
1999	33.20	74	4694	7.50

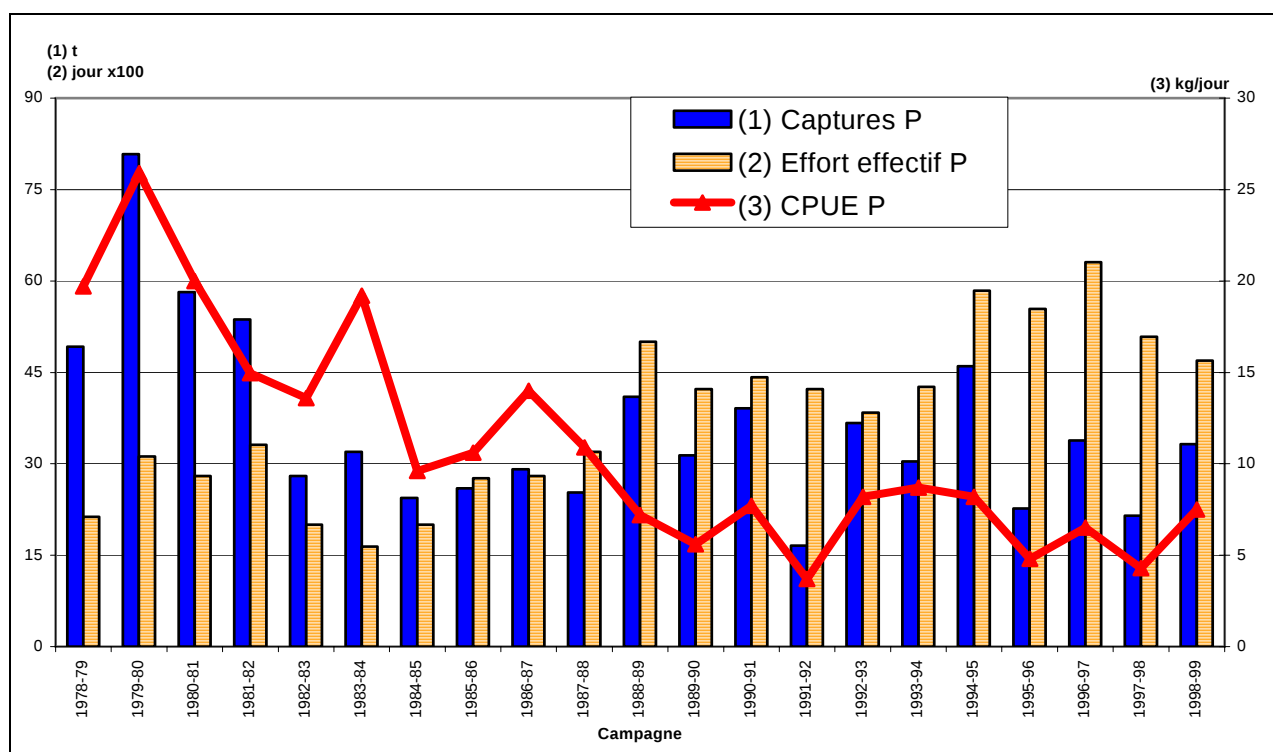


Figure 6 - Indicateurs halieutiques du bassin de la Gironde pour le métier pibaleur sur la période 1979-1999

Les captures estimées de la pêche non-professionnelle sont indiquées au tableau 6. On constate qu'entre 1979 et 1999, les captures totales du bassin (professionnelles et non-professionnelles) auraient diminué d'un facteur 7 alors que si on ne prend en compte que les captures professionnelles, celles-ci auraient apparemment diminué « seulement » d'un facteur 4.

Tableau 6 - Captures totales des pêcheurs professionnels et non-professionnels dans le bassin de la Gironde sur la période 1979-1999

SAISON	Captures Pro	Captures Non-Pro	Total Captures Pro et Non-Pro
	t	t	t
1979	149.8	136.40	286.2
1980	214.8	190.00	404.8
1981	172.5	159.70	332.2
1982	88.85	34.45	123.3
1983	53.7	26.60	80.3
1984	54.7	27.30	82
1985	42.9	21.60	64.5
1986	36.8	8.40	45.2
1987	52	30.40	82.4
1988	29.2	3.80	33
1989	59.5	20.50	80
1990	39.3	8.80	48.1
1991	48.8	15.20	64
1992	26.3	15.40	41.7
1993	47.5	21.90	69.4
1994	35.4	10.40	45.8
1995	54.7	18.50	73.2
1996	26.5	4.20	30.7
1997	44.83	5.67	50.5
1998	23.73	1.27	25
1999	41.5	2.60	44.1

1.5.4. Bassin de l'Adour⁴.

Jusqu'en 1995, la pêche de la civelle par les marins pêcheurs dans le bassin de l'Adour se différenciait des pratiques de pêche dans les autres estuaires français. Elle se pratiquait généralement en zone mixte fluviale, concurremment avec les professionnels fluviaux, à l'aide d'un tamis manœuvré à la main depuis la berge ou le bateau.

Après 1995, apparaît dans l'estuaire maritime, comme sur d'autres estuaires antérieurement, une pêche pratiquée par les marins pêcheurs uniquement, utilisant deux tamis de 1,20 m de diamètre poussés juste sous la surface par un bateau (drossage). Sur les courants Landais, la pêche de la civelle se fait au tamis manœuvré à la main surtout à pied. Elle se pratique de cette manière également, sur le littoral où elle est qualifiée de « pêche à la vague ».

Tableau 7 - Captures des pêcheurs professionnels, efforts et CPUE des marins pêcheurs dans le bassin de l'Adour sur la période 1986-2000

SAISON	Captures (MP)			Captures (PF)	Effort (MP)		CPUE (MP)		
	tamis t	drossage t	totale t	t	nominal MP	effectif sortie	tamis kg/sortie	drossage kg/sortie	globale kg/sortie
1986	8		8				1.5		1.5
1987	9.5		9.5				3.3		3.3
1988	12		12		41	1 875	3.7		3.7
1989	9		9		60	1 833	4.1		4.1
1990	3.2		3.2	4.3	57	2 237	1.2		1.2
1991	1.5		1.5	3.7	52	1 976	0.7		0.7
1992	8		8	12	42	2 405	2.9		2.9
1993	5.5		5.5	6.7	44	2 549	2.4		2.4
1994	3		3	7	47	2 083	1.4		1.4
1995	7.5		7.5	3.8	44	2 443	2.6		2.6
1996	4.1		4.1	3.1	52	2 660	1.53		1.53
1997	2.9	1.6	4.6		49	2 865	1.37	2.3	1.6
1998	0.6	0.7	1.5	6.5	55	1 919	0.66	1.47	1.07
1999	2.6	1.7	4.3	2.3	46	2 162	1.72	2.43	1.82
2000	5	5	10		57	2 180	3.5	4.2	3.9

⁴ On trouvera dans le chapitre « Analyse historique des captures de civelles sur le bassin de l'Adour » des compléments précis sur l'évolution des indicateurs halieutiques

Pour la tendance sur une période plus longue, on se reportera au § 2 sur l'analyse historique des captures de civelles.

Pour ce qui concerne une période plus récente, les CPUE pour les marins pêcheurs ne changent pas sur la période 1986-2000 (tableau 7 et figure 7). Les captures totales ont fluctué de 3 à 10 tonnes (12 tonnes en 1988) entre 1986 et 1995 et depuis elles stagnent à moins de 5 tonnes.

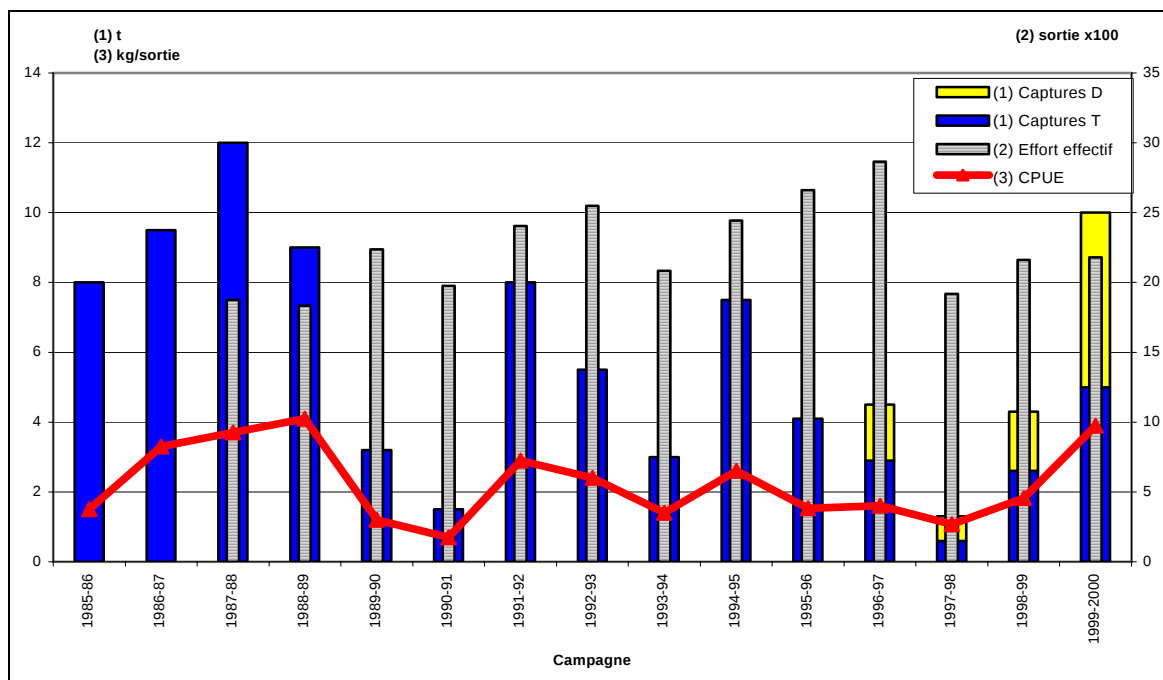


Figure 7 - Indicateurs halieutiques du bassin de l'Adour pour les métiers tamis et drossage sur la période 1986-2000

L'apparition du drossage durant la saison 1994-1995 n'a pas permis d'accroître significativement la CPUE globale et n'a pas eu d'effet significatif sur les productions totales débarquées : les moyennes des captures totales des marins pêcheurs avant et après l'utilisation du drossage sont respectivement de 4910 kg et de 4098 kg (Prouzet *et al*, 2000), (cf également § 2.1).

L'effort effectif avait augmenté en 1996 et 1997 avec l'introduction du drossage, mais il est revenu entre 1998 et 2000 à des niveaux comparables à ceux de la période antérieure 1988-1995.

Tableau 8 - Captures et effort des pêcheurs non-professionnels dans le bassin de l'Adour et les Courants Landais sur la période 1990-1999.

SAISON	Captures		Effort
	non-pro maritimes t	amateurs fluviaux t	non-pro maritimes
1990		0.3	
1991		0.5	
1992		1	
1993		0.7	935
1994	17	0.7	694
1995	9.3	0.6	405
1996	11.2	0.3	357
1997	5.9		253
1998	3	4	217
1999	2	0.2	109

Les captures des professionnels et amateurs fluviaux (années civiles de 1990 à 1998 et saison 1998-1999) sont aussi rapportées aux tableaux 7 et 8 pour la période 1990-1999, mais elles ne sont pas associées à l'effort de pêche. L'importance de la pêche non-professionnelle dans le bassin de l'Adour et des Courants Landais peut être mesurée avec les effectifs de pêcheurs maritimes à pied ayant obtenu jusqu'en 1999 une autorisation de pêche avec un tamis de 1.20m de diamètre et une tolérance de vente du produit de la pêche (tableau 8). La production de ces « dérogataires » varie de 2 à 17 tonnes sur la période où elle est comptabilisée⁵, c'est-à-dire 1994-1999 alors que la production des professionnels marins et fluviaux varie de 5 à 11 tonnes sur cette même période. Elle a été équivalente à celle de professionnels entre 1995 et 1997 et largement supérieure en 1994.

1.6. Bilan de la pêche de la civelle pour l'année de référence 1999.

Le tableau 9 indique les secteurs du golfe de Gascogne où se pratique la pêche professionnelle et non-professionnelle de la civelle ; ces secteurs listés du Nord au Sud peuvent être situés géographiquement sur la figure 1.

Tableau 9 - Effectifs et productions de pêcheurs professionnels et non –professionnels, engins de pêche par secteur de pêche du Golfe de Gascogne en 1999.

catégorie de pêcheur	professionnel		non-professionnel		engin de pêche prof/ Amateur	production pro		production non-pro
	maritime	fluvial	maritime	fluvial		mar.	fluv.	
SECTEUR DE PECHE	bateau	bateau	à pied	à pied/ bat.		(t)	(t)	(t)
1 Vilaine	131				2 T circ. 1.20m/0,6m	15.3		
2 Loire mar.et fluv.,Sevre Nantaise	203	45		130	2 T circulaires 1.20m/0.50m	80.4	6.5	0.8
3 Baie de Bourgneuf	55				2 T circulaires 1.20m/0.50m	10.5		
4 Vie	23				2 T rectangulaires 2x0.9m/0.50m	6.6		
5 Lay	53				2 T carrés 1.20m/0,50m	11.6		
6 Sèvre Niortaise	87				2 T rectangulaires 1.80x1.20m/0,50m	18.8		
7 Charente	81	17		190	Pibalour (2 T rect de 4à7m²)/0,50m	6.8	0.2	
8 Seudre	94				Pibalour (2 T rect de 4à7m²)/0,50m	27.7		
9 Gironde Estuaire maritime	74				Pibalour (2 T rect de 4à7m²)/0,50m	33.2		
10 Garonne,Dordogne,Isle fluviale		75		87	1 ou 2 T circulaires 1.20m/0.50m		8.3	2.6
11 Arcachon canal de Lége	18				1 T ovale 1.20m/0,50m	2		
12 courants Landais : Mimizan,Contis,Huchet, Vieux-Boucau			109		1 T ovale 1.20m/0,50m			2
13 Adour,Nive maritime	57				1 ou 2 T circulaires 1.20m/0.50m	4.3		
14 Adour,Nive,Bidouze fluviale		104		113	1 T ovale 1.20m/0.50m		2.4	0.2
TOTAL GENERAL	876	241	109	520		217.2	17.4	5.6

Si le recensement des sites peut être considéré comme exhaustif pour la pêche professionnelle, il n'en va pas de même pour la pêche non-professionnelle. En effet, cette pêche, relativement bien cadrée pour les pêcheurs au statut d'amateur fluvial, est diffuse dans l'espace et dans le temps pour les pêcheurs au statut d'amateur maritime et opaque pour les braconniers.

Comme cela a été signalé dans les méthodes d'obtention des données, aucune évaluation de terrain de cette pêche à laquelle on pourrait apporter crédit, n'existe à notre connaissance.

Les résultats d'effort nominal et de production présentés au tableau 9 sont donc incomplets du fait des inconnues concernant la pêche non-professionnelle. De plus, il est important de signaler que la représentativité et le réalisme des chiffres énoncés dépend de la fiabilité des données de base que seules l'origine et la méthode d'obtention indiquée plus haut peuvent nous garantir.

Nous avons dénombré 876 marins pêcheurs en bateau dans le golfe de Gascogne qui se concentrent fortement sur l'estuaire de la Vilaine, le bassin de la Loire et les estuaires où est autorisé le pibalour : Seudre, Charente, Gironde. Les professionnels fluviaux en bateau, au nombre total de 241, ne se trouvent que sur le bassin de la Loire, de la Charente, de la Gironde et de l'Adour, ces deux derniers bassins représentant près des trois-quarts du total dénombré.

⁵ La diminution du nombre d'autorisations de vente s'est faite par le retrait progressif des pêcheurs ayant déclaré moins de 10kg, la saison précédente. Rien n'indique, cependant, qu'ils aient arrêté la pêche. La disparition de cette catégorie « autorisée » s'est faite ensuite par la mise en place du statut du pêcheur professionnel à pied conformément à la loi.

Seuls les pêcheurs non-professionnels maritimes à pied de l'Adour ont pu être comptabilisés. Ils sont passés de 935 en 1993 à 109 en 1999 (tableau 8). Les pêcheurs non-professionnels fluviaux répertoriés sont les amateurs licenciés au nombre de 520, dont plus du tiers sur le bassin de la Charente.

Un grand nombre de marins pêcheurs pratiquent le drossage, en poussant avec un navire deux tamis circulaires, carrés ou rectangulaires dont les plus importants en surface sont les pibaloirs (14 m² maximum pour les deux cadres). Les professionnels fluviaux du bassin de la Loire et la majorité des professionnels fluviaux du bassin de la Gironde pratiquent aussi le drossage avec deux tamis circulaires ; les professionnels fluviaux du bassin de l'Adour utilisent un seul tamis manœuvré à la main. Les pêcheurs amateurs maritimes et fluviaux ont droit à un tamis de 0.50 m de diamètre ; sur le bassin de la Vilaine uniquement, ce diamètre est porté à 0.60 m.

En 1999, la production totale du golfe de Gascogne est estimée à 240.2 t se décomposant en 234.6 t pour les professionnels, soit 217.2 t pour les marins et 17.4 t pour les fluviaux et en 5.6 t pour les non-professionnels. La production de civelles pour Manche-Bretagne en 1999, pêchées par 60 marins pêcheurs environ, essentiellement sur les bassins de la Somme, de la Seine, de la Risle, de l'Orne, la baie des Veys et certains petits fleuves de Bretagne, est évaluée à 5 t environ (Delpech, *com. pers.* ; Euzenat et Fagard, *com. pers.* ; Briand, *com. pers.*). **La production totale de civelle en France est ainsi estimée à 245 tonnes en 1999.**

Avec un prix moyen de vente de 137 €/kg, on arrive à une valeur pour le golfe de Gascogne de 32,9 millions d'euros et pour le territoire national de 33,6 millions d'euros.

La production totale sur le territoire national des marins pêcheurs, qui atteint 223 tonnes, peut être comparée à l'évaluation du CRTS de La Rochelle (Grandpierre, *com. pers.*) qui indique pour l'année civile 1999, une production déclarée par les marins pêcheurs de 167 tonnes et une production estimée de 225 tonnes après correction du facteur de sous-déclaration.

Les résultats pour 1999 peuvent être aussi comparés à ceux obtenus en 1989 par Castelnaud *et al* en 1994. La production du golfe de Gascogne s'élevait à 482 tonnes, se décomposant en 320 tonnes pour les professionnels (soit 270 tonnes pour les marins et 50 tonnes pour les fluviaux) et 162 tonnes pour les non-professionnels. On constate immédiatement la distorsion due à l'estimation des captures des non-professionnels. Cependant, cela ne doit pas masquer le fait que la production des pêcheurs professionnels a globalement baissé en une décennie et notamment celle des professionnels fluviaux.

1.7. Conclusion.

Après la chute du début des années 80, les bilans effectués successivement à une décennie d'intervalle, en 1989 et 1999, montrent que les captures totales de la pêche tout au moins professionnelle de la civelle ont baissé. La diminution de l'abondance de la civelle qui colonise la façade Atlantique française est montrée par la tendance décroissante des CPUE depuis le début des années 80 et au mieux stationnaire ces dernières années, dans l'ensemble des bassins qui font l'objet d'un suivi.

Cette diminution de l'abondance de la civelle est illustrée aussi par les indicateurs halieutiques de la pêche professionnelle maritime : les captures totales sont sur une pente descendante comme le confirment les chiffres corrigés du CRTS pour 2000 (180 t) et 2001 (90 t), alors que l'effort nominal s'est maintenu et que la puissance de pêche, donc l'effort réel a vraisemblablement augmenté dans les années 90 (nombre de sorties par saisons, surface totale de filtration des tamis). Il semble bien, au final, que la ressource montre plus des signes d'essoufflement que de récupération.

2. ANALYSE HISTORIQUE DES CAPTURES DE CIVELLES SUR LE BASSIN DE L'ADOUR

2.1. Variation des captures par sortie sur le bassin de l'Adour depuis la fin des années vingt.

Les données de captures par sortie ont pu être compilées à partir de diverses sources d'informations (livres comptables, enquêtes auprès des pêcheurs et des services gestionnaires, fiches de pêche) depuis la fin des années 1920.

Depuis 1985, les données sont récupérées de manière précise auprès des marins-pêcheurs affiliés à la Commission Interprofessionnelle de la Pêche en estuaire et des Poissons migrateurs (CIPE).

L'analyse de l'ensemble de la série de données (tableau 10) nous permet de tirer déjà un certain nombre d'enseignements.

Tableau 10- Variations de la moyenne des captures par sortie (en kg) et valeurs minimales et maximales observées selon différentes campagnes.

Campagnes	Moy. CPUE	Mini mensuel	Maxi mensuel
1927-28	5	4,7	5,3
1928-29	5,5	4,4	7
1929-30	6,7	4,3	9,9
1930-31	18,7	10,1	35,2
1965-66	5,1	1,3	8,8
1966-67	6,4	4,1	9,7
1967-68	10,1	3	23,3
1968-69	5	0,9	7,8
1969-70	7,5	3,6	11,2
1970-71	4,6	2,9	5,6
1971-72	4,4	1,5	7,8
1972-73	4,5	3,5	6,8
1973-74	7,4	4,3	12,3
1974-75	5	2,2	7,9
1975-76	11	3,3	16
1978-79	10*		
1979-80	5		
1984-85	2,4	1,5	3,3
1985-86	1,5	0,6	2,1
1986-87	3,3	0,3	5,3
1987-88	3,7	1,4	5,6
1988-89	4,1	0,9	6,2
1989-90	1,2	0,2	2,1
1990-91	0,7	0,15	1,1
1991-92	2,9	0,4	4,4
1992-93	2,4	1,3	2,3
1993-94	1,4	0,8	1,9
1994-95	2,6	0,85	3,9
1995-96	1,53	0,75	1,8
1996-97	1,60	1,13	1,97
1997-98	1,07	0,49	1,31
1998-99	1,82	1,05	2,21
1999-2000	4,43		
2000-2001	0,49		

(d'après source : IFREMER)

* d'après Charlon (1980)

L'engin de pêche utilisé sur l'Adour (tamis de 1,20m) n'a pas changé depuis le début du siècle. Un certain nombre de carnets de pêche ont pu être répertoriés depuis les années 20⁶. L'analyse des observations récoltées, depuis cette époque montre déjà que deux grandes périodes, séparées par le début des années 80, peuvent être distinguées.

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-vingts, les captures par sortie sont inférieures ou voisines de 4 kg (figure 8).

La transparence relative des transactions imposées dès 1980 par le paiement par chèque ne peut, à elle seule, expliquer la chute durable des débarquements observée depuis cette période par la diminution des déclarations officielles. En outre, l'utilisation d'indicateurs d'abondance tels que les captures par sortie, tirés de l'analyse de carnets de pêche personnels ne peut-être sensible à la modification des règles de transaction financière. Cette diminution des prises par sortie sur les bassins versants de la Loire et de la Vilaine (Guérault & *al.*, 1987) ou sur la Gironde (Castelnaud & *al.*, 1994) est également notée à partir du début des années 80 (cf §1).

Ces dix dernières années, l'analyse des captures effectuées par les marins pêcheurs montre que cette évolution à la baisse est beaucoup plus qu'une simple tendance.

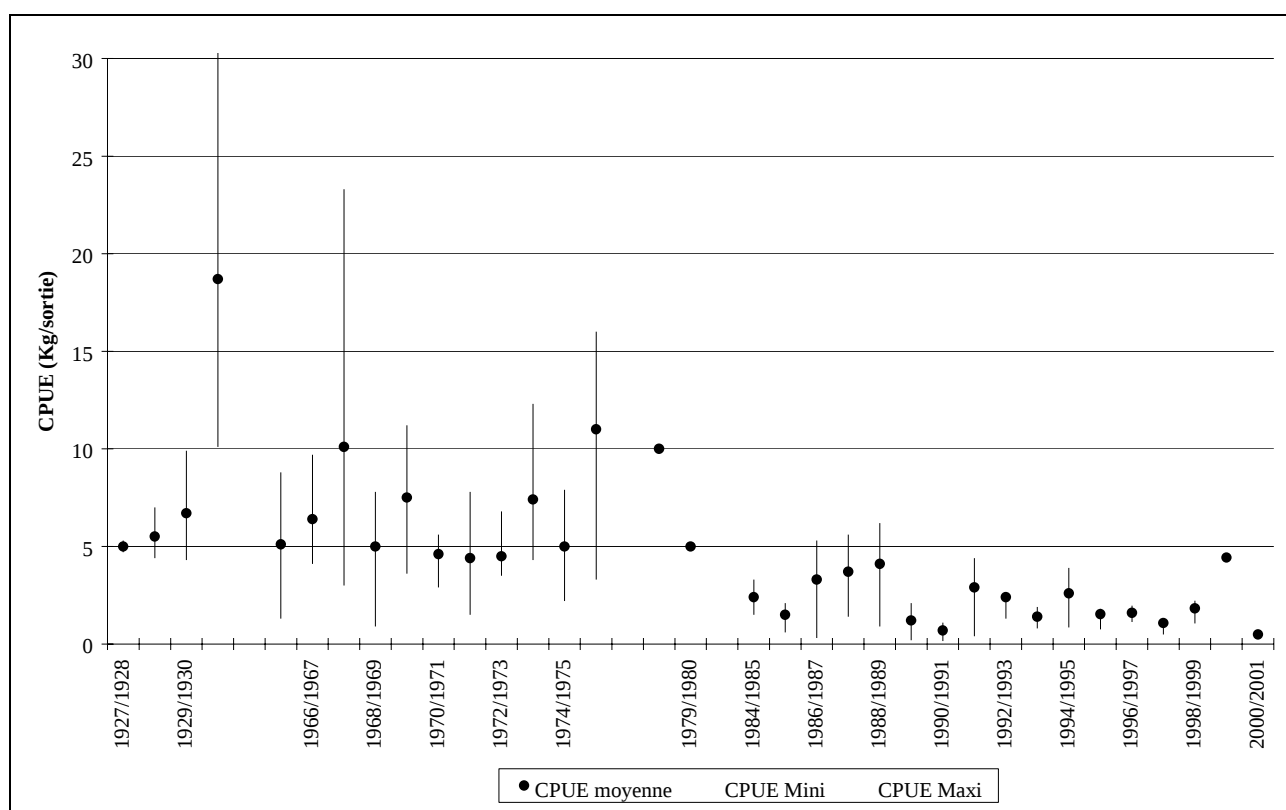


Figure 8 - Variations des prises de civelles par sortie (en kg) de 1927 à 2001.

Le tableau 11 donne des informations plus précises sur la variabilité des moyennes mensuelles des captures par sortie. La longueur de la saison de pêche principale est plus courte dépassant rarement trois mois et le mois de mars constitue maintenant une période où les prises sont rarement conséquentes. Cela n'était pas le cas avant les années soixante-dix.

⁶ D'après Bordoef (1929), une quantité importante de civelles était expédiée Outre-Bidassoa au début de ce siècle, entre 100 et 500 tonnes suivant les années de 1915 à 1928. Cette production était destinée à la conserve, à la fabrication de colle ou utilisée comme « rogue » pour appâter le poisson.

On peut constater également que l'apparition du tamis poussé⁷ en zone maritime de l'Adour n'a pas permis de relever en moyenne le niveau des captures par sortie, ni d'accroître les maximums mensuels depuis 1995.

Tableau 11 - Variabilités mensuelles des captures moyennes par sortie (kg) sur l'Adour de 1927 à 1999.

	Octobre	novembre	décembre	Janvier	février	mars
1927-28		4,7	5,3			
1928-29	4,4	6,1	7	4,5		
1929-30			4,3	9,9	6	
1930-31	11,8	35,2	10,1	18		
1931-32			14,5			
1965-66		1,3	8,8			
1966-67	9,7	5,9	5,3	7,2	4,1	
1967-68		3,1	10,5	23,3	10,5	3
1968-69	0,9		7,8	5,6	6,1	4,5
1969-70		6,7	6,2	11,2	9,9	3,6
1984-85		1,53	2,7	3,27	1,95	1,98
1985-86		0,9	1,62	2,12	0,59	1,49
1986-87		0,34	5,32	2,97	1,74	2,04
1987-88		1,6	3,45	5,58	1,35	2,28
1988-89		0,86	3,06	6,22	3,94	1,73
1989-90		0,24	0,59	2,05	1,3	0,95
1990-91		0,24	0,13	0,75	0,83	1,14
1991-92		0,38	1,56	3,04	4,4	2,9
1992-93		3,1	1,96	2,29	2,34	1,26
1993-94		0,79	1,92	1,43	1,04	0,77
1994-95		2,6	3,9	2,2	1,1	0,85
1995-96		0,75	1,63	1,77	1,81	1,20
1996-97		1,44	1,34	1,97	1,67	1,13
1997-98		0,85	1,12	1,31	1,07	0,49
1998-99		1,85	2,21	1,98	1,09	1,05

(d'après source : IFREMER)

2.2 Généralités sur les causes probables de la diminution de cette ressource.

La chute constatée dans la plupart des grands estuaires français au début des années 80 (cf. § 1) pourrait être liée à une chute de la production en subadultes (anguilles jaunes et argentées) au début ou au milieu des années soixante-dix compte-tenu du cycle de vie relativement long de l'anguille en eau douce : 3 à 5 ans pour les mâles et 5 à 12 ans pour les femelles sous nos latitudes.

Cette période correspond sur beaucoup de bassins versants aux modifications des pratiques culturales, au développement de l'élevage hors-sol et de la culture du maïs qui a entraîné le drainage de zones humides, une intensification de l'irrigation et un accroissement de l'utilisation des xénobiotiques.

La figure 9 nous donne pour le bassin de l'Adour, une idée de l'évolution de la superficie irriguée depuis 1980.

⁷ Alors qu'avant cette date, l'ensemble des usagers n'utilisait qu'un seul tamis manié à la main et non 2 tamis dressés sur le franc-bord et poussés par le bateau.

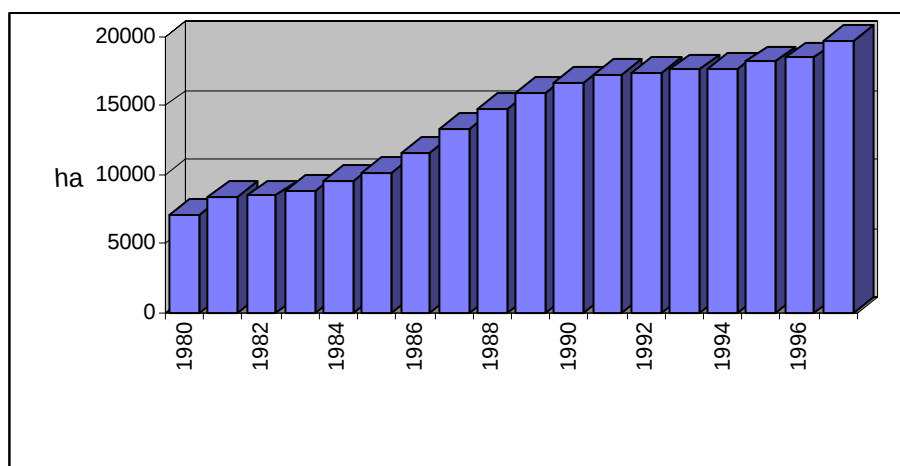


Figure 9 - Evolution de la surface irriguée totale sur les communes situées entre Onard et Aire sur Adour (d'après données de l'Observatoire de l'Eau in Baudry, 2000).

On retrouve cette évolution sur de nombreux bassins versants. C'est le cas par exemple sur les sous-bassins Garonne-Dordogne et Charente où la superficie des surfaces irriguées est passée de 100 000 hectares en 1970 à 500 000 hectares en 2000 (sources SCEES du Ministère de l'agriculture in Teyssier *et al*, 2002). Cette intensification de l'irrigation généralement liée à l'extension des cultures céréalières et fourragères et notamment à celle du maïs, s'est accompagnée de travaux connexes : drainage des zones humides, recalibrage, accroissement de l'utilisation des pesticides et herbicides comme nous l'avons déjà signalé précédemment.

L'anguille est un excellent concentrateur de ces contaminants. Sur l'Adour par exemple des dosages de PCB effectués dans le cadre des travaux du GIS ECOBAG ont montré que des taux de contamination compris entre 100 et 220 microg./kg avaient été détectés. Ces concentrations sont supérieures à ce qui est admis en Suède pour cette espèce (taux de 100 microg./kg au maximum). Ces forts taux de contamination ont été également noté en Belgique où le taux légal admis pour la consommation humaine est de 75 microg./kg. Dans ce pays, des anguilles provenant de 244 sites de prélèvement avaient des taux de contamination supérieurs à cette norme limite pour 80% des sites étudiés.

Cette dégradation des zones humides qui constituent un habitat primordial pour cette espèce est un phénomène préoccupant. On estime qu'en France, la moitié des zones humides a disparu durant ces trois dernières décennies. Cette régression se poursuit encore. Plus localement, on estime que sur les dix-neuf zones humides majeures du bassin Adour-Garonne, dix-huit ont subi des dégradations, pour une seule qui a vu son état s'améliorer (de Faveri, 2002).

La prolifération des barrages qui fractionnent fortement l'habitat de l'anguille et entrave la diffusion des individus vers les bassins supérieurs qui produisent des femelles, est également un élément d'anthropisation des écosystèmes continentaux qu'il convient de considérer avec attention. D'une manière générale, l'Europe a procédé, depuis le milieu du 20^{ème} siècle, à une intensification du stockage des eaux pour de l'alimentation en eau humaine, pour des besoins agricoles ou industriels et pour de la régulation de débits. Actuellement, on considère que 65% des rivières européennes ont des débits fortement régulés. Ces dernières années, certaines politiques de développement d'énergie dites « douces » préconisent le développement de l'hydroélectricité pour diminuer l'effet de serre. L'Europe favorise actuellement la production d'énergie dite « verte »⁸ ce qui indirectement peut être très préjudiciable à l'anguille compte-tenu non seulement de l'obstacle à la montaison, mais également des mortalités engendrées à la dévalaison. Cette mortalité à la dévalaison est particulièrement importante pour les anguilles argentées : une synthèse effectuée par le groupe de travail du CIEM sur l'anguille en 2002 a estimé qu'en moyenne 69% des anguilles argentées étaient tuées par le passage dans les turbines d'une centrale hydroélectrique (Anonyme, 2002⁹). Comme les femelles se situent en haut des bassins qui sont parfois équipés de plusieurs installations successives, il est fort probable que la production de ces tronçons de cours d'eau soit pratiquement réduite à néant quels que soient les efforts effectués pour réguler la pêche et pour assurer la libre circulation de cette

⁸ La Directive Européenne (201/77/EC) préconise l'accroissement de la production d'électricité d'origine hydraulique. Elle demande en moyenne un accroissement de la consommation nationale de 13,9% à 22%.

⁹ tableau 5.2.1 – ICES/EIFAC Working Group on Eels – Nantes 2-6 September 2002.

espèce à la montaison. Des simulations effectuées sur la Meuse ont montré que les 6 centrales hydroélectriques provoqueraient au total une mortalité de 34 à 45% pour les mâles argentés et de 40 à 63% pour les femelles dévalantes¹⁰. Les systèmes de déflexion des flux des turbines hydroélectriques sont pour le moment à l'étude et la seule assurance pour minimiser la mortalité liée à cette activité industrielle serait d'interrompre le turbinage au moment de la dévalaison qui est déclenchée par des facteurs externes facilement identifiables (élévation du débit, variation brutale de la température,...) durant une fenêtre de temps optimale située préférentiellement en automne.

D'autres facteurs anthropiques peuvent être également retenus et concernent aussi la totalité de l'aire de répartition de l'espèce. C'est le cas par exemple de l'anguillicolose apparu en Europe, dès le début des années 80, à la suite d'importations d'anguilles exotiques en Méditerranée. Son introduction a donné lieu à une véritable pandémie. Certaines populations d'anguilles sont totalement infestées par le parasite *anguillicola crassus* alors que son impact sur la mortalité de l'anguille argentée est encore source de nombreuses interrogations. Sa présence a bien évidemment été détectée sur le bassin versant de l'Adour et des cours d'eau adjacents comme la Nivelle et la Bidassoa (Anonyme, 1998¹¹). La prévalence du parasite sur la majeure partie des prélèvements réalisés se situait entre 50 et 70%.

3. ANALYSE DE LA VARIABILITE DES CAPTURES DE CIVELLES SUR LA PERIODE RECENTE (1985 –2001) .

Depuis 1985, le Laboratoire Halieutique d'Aquitaine (IFREMER) a répertorié avec l'aide de la CIPE, les captures et le nombre de sorties journalières effectuées dans le cadre de l'exploitation de la civelle sur le bassin versant de l'Adour.

Les observations récoltées sont résumées dans le tableau 12 et concernent le nombre d'observations récoltées par saison de pêche (novembre année n à mars année $n+1$), le nombre de sorties de pêche, le nombre de licences CIPE délivrées et le nombre de marins pêcheurs ayant déclaré pêcher sur l'Adour.

La figure 10 mentionne la variabilité des captures totales et par sortie moyenne effectuées journalièrement sur l'ensemble des saisons étudiées de 1985 à 2001.

Parallèlement à la récolte de ces statistiques de pêche, des informations précises sur la fluctuation des facteurs hydroclimatiques ont été répertoriées. Elles concernent la température de l'air, la pluviométrie, les débits, les coefficients de marée, la température de l'eau de mer, les phases lunaires depuis 1984, la température de l'eau depuis 1997 et la turbidité depuis 1998.

Tableau 12 : Observations récoltées sur les productions de civelles et l'effort déployé sur le bassin versant de l'Adour de 1985 à 2000¹².

Saisons	Nb de sorties	Nb de lignes	Poids total en kg	poids par sortie
84-85	1849	857	4 065	2,2
85-86	1888	626	2 718	1,4
86-87	2140	973	6 073	2,8
87-88	1875	1359	7 715	4,1
88-89	1833	1833	7 887	4,3
89-90	2237	2074	2 844	1,3
90-91	1976	1968	1 338	0,7
91-92	2180	2180	6 807	3,1
92-93	2549	2306	5 449	2,1
93-94	2083	2041	2 822	1,4
94-95	2444	2407	6 497	2,7
95-96	2660	2660	4 081	1,5
96-97	2865	2863	4 585	1,6
97-98	1919	1919	2 058	1,1
98-99	2188	2161	4 036	1,8
99-00	2200	2043	9 081	4,4

¹⁰ Larinier et Dartiguelongue 1989 . La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. *Bull. Franç. Piscic.* 312-313 (numéro spécial) – 53 pages.

¹¹ Infestation parasitaire de l'Anguille sur le bassin de l'Adour et sur certains cours d'eau côtiers des Landes et des Pyrénées Atlantiques. Rapport MIGRADOIR- GDSAA- IFREMER, 46 pages.

¹² La différence entre le nombre de lignes du fichier et le nombre de sorties donne une idée de l'agrégation des données et donc de la qualité de l'information récoltée. Plus la différence est forte, plus les informations sont agrégées et moins la précision sur la moyenne des captures par sortie est bonne.

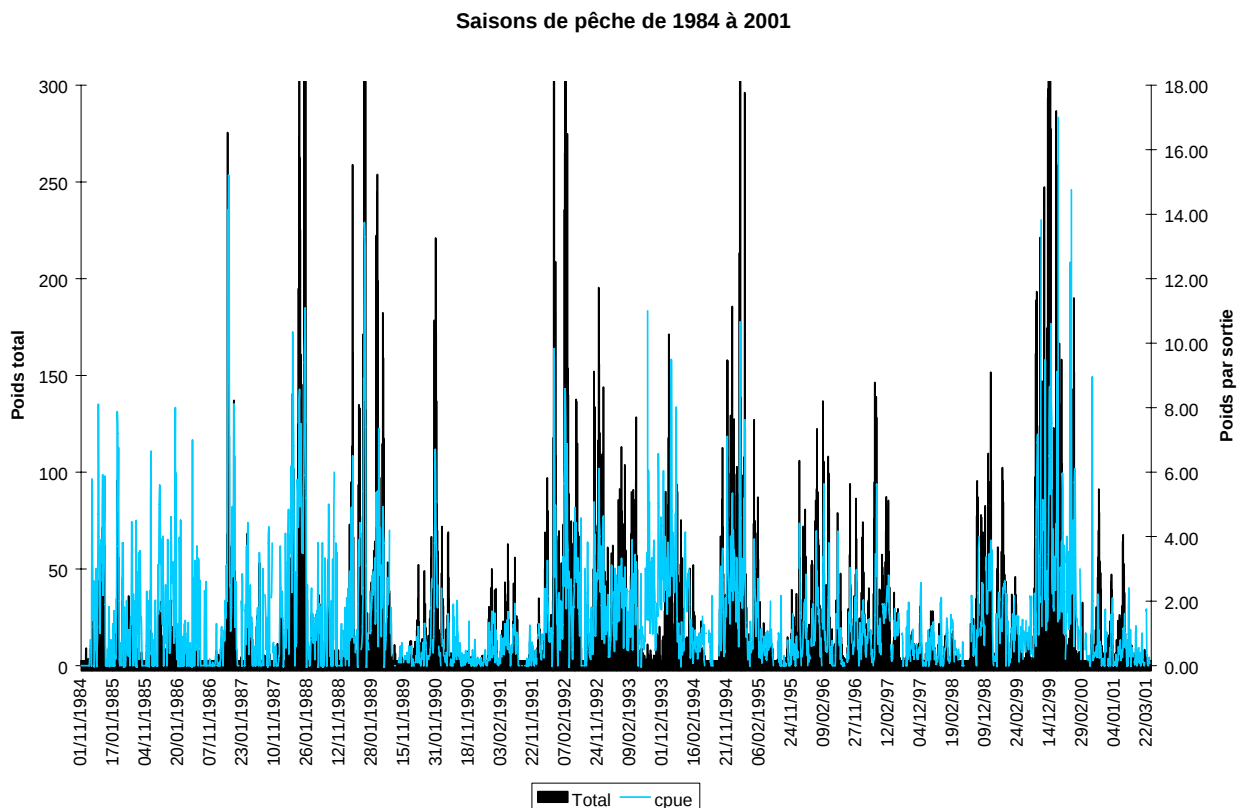


Figure 10 – Variabilités journalières des captures totales et par sortie moyenne de 1984 à 2001

Les premières analyses effectuées (De Casamajor 1998, Bru 1998, De Casamajor, Bru et Prouzet, 1999) montrent un effet très marqué des phases lunaires et de la turbidité sur le comportement des civelles dans la colonne d'eau. Le facteur intensité du coefficient de marée ne semble pas avoir un effet simple sur la variabilité des captures de civelles (De Casamajor *et al*, 1999). Les travaux réalisés ont montré qu'il s'agit d'un effet combiné du coefficient de marée et de l'intensité du débit du fleuve. C'est pourquoi, la base des modèles de simulation de la dispersion des flux de civelles est constituée par un modèle hydrodynamique (cf. § 6) qui permet de calculer la vitesse d'avancée du front de la marée dynamique (lieu d'inversion du sens du courant). Les premières analyses indiquent que des blocages hydrologiques sont à l'origine des fortes concentrations observées dans l'estuaire.

Si la présence en abondance des civelles dans la colonne d'eau semble conditionnée par le blocage de la marée en aval suivi de nouveau de la 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 observations récoltées et des premiers traitements effectués, les biologistes ont proposé aux mathématiciens le modèle comportemental schématisé en figure 11.

Dans la composante horizontale : L'action du coefficient de marée et celle du débit fluvial sur le comportement des civelles ne peuvent pas être considérées séparément. Le modèle hydrodynamique 1D de Lazure (1998), appliqué à l'Adour (cf. § 6) montre bien les conditions hydrologiques qui provoquent 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 m/s. 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.

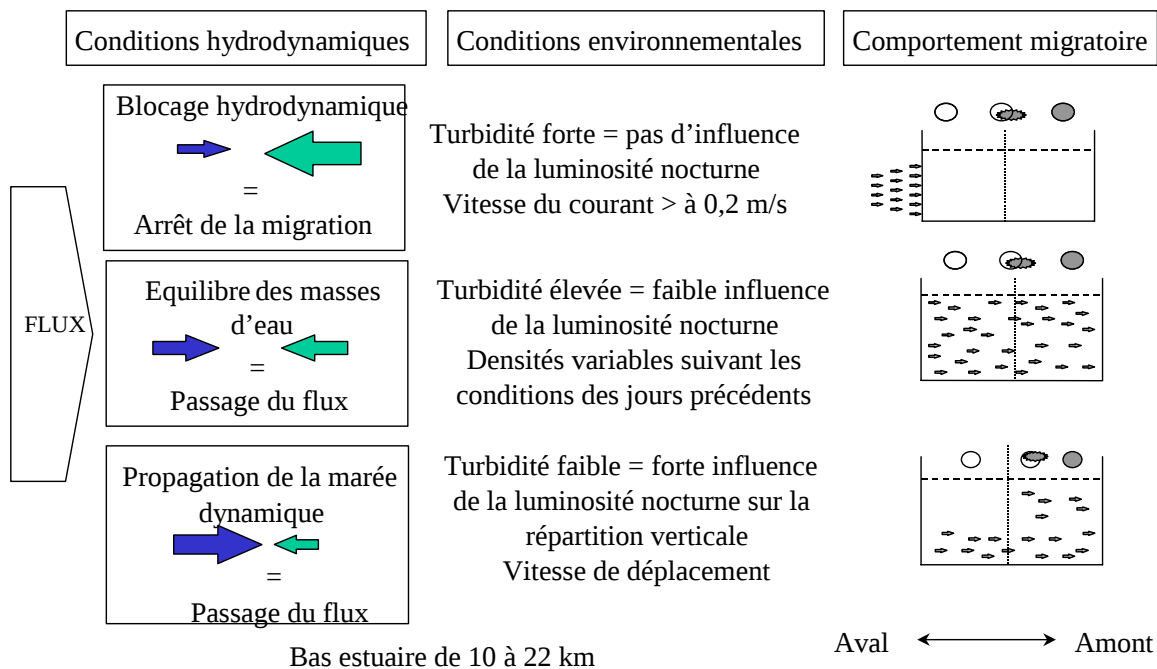


Figure 11 – Schéma explicatif du modèle de comportement migratoire de la civelle dans la partie maritime de l'estuaire de l'Adour

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. La modélisation des flux actuellement entreprise par les équipes de l'IFREMER et de l'UPPA est basée sur ce schéma de principe (cf § 8).

4. MODELISATION DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES SUR LA VARIABILITE DES CAPTURES DE CIVELLES.

4.1. Présentation des données de captures de civelles.

Les données qui ont motivé ce travail représentent les observations journalières de captures de civelles d'anguille par les pêcheurs professionnels de l'Adour sur 9 saisons de pêche depuis 1984/85 jusqu'à 1992/93. Ces valeurs de capture sont notées CPUE (Capture Par Unité d'Effort) et correspondent à une moyenne de prises prenant en compte le nombre de sorties de pêche effectuées par chaque pêcheur. Elles sont exprimées en kilogrammes. Chaque saison de pêche couvre une période de 5 mois qui va du 1^{er} novembre au 31 mars de l'année suivante.

4.2. Captures et variables environnementales.

Jusqu'en 1993, la pêche professionnelle de la civelle dans l'estuaire de l'Adour se pratiquait à l'aide d'un tamis à main plongé depuis le bateau à poste fixe ou de la berge, et de nuit uniquement. Par la suite, et surtout à partir de la saison de pêche 1995, la pratique du tamis poussé a commencé à se développer (cf. § 2). C'est pour cette raison d'homogénéité que la série de données traitées, dans cette partie du projet, s'arrête en 1993.

L'intensité des prises est donc fortement conditionnée par l'accessibilité des civelles au tamis de surface donc à la pêche professionnelle. Cette accessibilité varie en fonction des conditions hydroclimatiques (cf. figure 11), et est bien intégrée par les pêcheurs professionnels sur l'Adour, mais de façon intuitive.

Cette partie du projet vise à confirmer ou non leurs intuitions à travers différentes analyses statistiques des données des captures des carnets de pêche présentées précédemment *via* des variables environnementales telles que :

- La température de l'air : c'est une variable quantitative qui s'exprime en degré Celsius et dont les valeurs journalières sont collectées par la station météo-France basée à l'aéroport de Biarritz-Parme à quelques kilomètres de la zone effective de pêche.
- Le coefficient de marée : c'est une variable quantitative qui s'exprime en huitièmes de l'échelle astronomique et dont les valeurs journalières sont publiées par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Les valeurs sont données pour le port du Boucau qui se situe à quelques kilomètres de la zone effective de pêche.
- Le débit fluvial : c'est une variable quantitative qui s'exprime en m³/s et dont les valeurs journalières sont relevées par le service maritime de la DDE (Direction Départementale de l'Équipement). Chaque valeur de débit pour l'Adour correspond à la somme de 4 valeurs de débit collectées sur des stations de jaugeage de l'Adour et de ses principaux affluents.
- La pluviométrie : c'est une variable quantitative qui s'exprime en millimètres et dont les valeurs journalières sont collectées par la station météo-France basée à l'aéroport de Biarritz-Parme à quelques kilomètres de la zone effective de pêche.
- Les phases lunaires : c'est une variable qualitative nominale dont les valeurs (pleine lune, premier quartier, nouvelle lune et dernier quartier) sont lues sur un calendrier.
- La nébulosité : c'est une variable quantitative qui s'exprime en octats convertis ensuite en pourcentage de couverture du ciel. Ce sont des valeurs journalières moyennées sur un ensemble d'observations faites toutes les 3 heures sur l'ensemble de la journée par la station météo-France basée à l'aéroport de Biarritz-Parme à quelques kilomètres de la zone effective de pêche. Cette variable a ensuite fait l'objet d'un recodage en 3 classes correspondant à : ciel dégagé, ciel nuageux et ciel couvert.

L'objet de ce chapitre est de définir des conditions environnementales favorables ou non à la remontée en surface des civelles dans l'estuaire de l'Adour afin d'évaluer leur accessibilité à la pêche professionnelle et d'étudier les liens entre la variable à expliquer (CPUE) et les variables environnementales supposées explicatives

4.3. Première méthode : analyse descriptive des relations entre les captures par sortie (CPUE) et certaines variables environnementales à l'aide d'une analyse canonique fonctionnelle.

L'évolution temporelle des CPUE comme celle des autres variables environnementales quantitatives présentent une forte variabilité des valeurs de mesure aussi bien à l'intérieur d'une saison de pêche, que sur l'ensemble de celles-ci. De ce fait, l'évolution conjointe entre la variable à expliquer CPUE et les différentes variables environnementales explicatives n'est pas facile à appréhender au premier abord.

En partant également du fait que les CPUE de civelles sont des indicateurs (bruités) de l'abondance, les courbes de captures sont supposées refléter un phénomène halieutique beaucoup plus régulier qui est bien l'abondance de la ressource présente dans l'estuaire de l'Adour. C'est pourquoi nous avons considéré dans la suite de ce paragraphe que les différentes variables quantitatives sont de nature fonctionnelle en suivant en cela une définition de Ramsay et Silverman (1997).

De plus, certains autres problèmes d'ordre purement technique tels que les jours d'observation différents d'une saison à l'autre, les valeurs manquantes, le manque de précision des données, le nombre d'unités statistiques très inférieur au nombre de variables...etc font que les méthodes statistiques classiques d'analyse de liaisons ne paraissent pas pertinentes.

4.3.1. Principe de la méthode.

Pour pallier ces inconvénients, nous nous sommes intéressés à une méthode d'analyse descriptive de données dérivée d'une méthode classique d'analyse de relation entre différentes variables quantitatives : une analyse canonique fonctionnelle.

Notons par X_i , $i=1, \dots, n$, le processus stochastique décrivant la variation temporelle des CPUE de civelles et par Y_i , $i=1, \dots, n$, le processus stochastique décrivant la variation temporelle de la température de l'air par exemple, sur la $i^{\text{ème}}$ saison de pêche. On dispose donc d'un échantillon de n couples de processus stochastiques $(X_i, Y_i)_{i=1, \dots, n}$ mesurés sur un ensemble de points de discrétisation $(t_{ij})_{j=1, \dots, p_i}$ et $(t_{is})_{s=1, \dots, q_i}$ respectivement, qui sont chacun non-identique d'une saison à l'autre mais également différents d'un ensemble à l'autre. On note $(x_i(t_{ij}))_{j=1, \dots, p_i}$ (resp. $(y_i(t_{is}))_{s=1, \dots, q_i}$) l'ensemble des points de mesure correspondant à des réalisations du processus X_i (resp. Y_i) aux dates $(t_{ij})_{j=1, \dots, p_i}$ (resp. $(t_{is})_{s=1, \dots, q_i}$).

Nous supposons que ces deux familles de données sont compatibles avec les modèles suivants :

$$\begin{cases} x_i(t_{ij}) = \mu_i^X(t_{ij}) + \varepsilon_{ij}^X \\ y_i(t_{is}) = \mu_i^Y(t_{is}) + \varepsilon_{is}^Y \end{cases} \quad i = 1, \dots, n \text{ et } j = 1, \dots, p_i$$

Les traitements réalisés sur ce couple de données supposent que :

(i) Les $(X_i, Y_i)_{i=1, \dots, n}$ sont des couples de variables aléatoires de carré intégrable et tels que :

$$E(X_i) = \mu_i^X \quad \text{et} \quad E(Y_i) = \mu_i^Y \quad i = 1, \dots, n ;$$

(ii) ε_i^X et ε_i^Y sont des termes d'erreur aléatoires indépendants et de moyennes nulles ;

(iii) Les effets μ_i^X et μ_i^Y sont supposés lisses et appartenir à un sous-espace affine d'un espace de Sobolev de fonctions régulières définies sur $[0,1]$, V étant de dimension finie k et peuvent donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \mu_i^X = \mu^X + \sum_{l=1}^k z_{il} \theta_l, \\ \mu_i^Y = \mu^Y + \sum_{l=1}^k z_{il} \varphi_l, \end{cases} \quad i = 1, \dots, n,$$

avec les contraintes : $\sum_{i=1}^n z_{il} = 0$ et $\frac{1}{n} z_{l'}^T z_l = \delta_{l'l} = 1$ si $l=l'$ et 0 sinon (où $z_l \in \mathbb{R}^n$).

Le terme μ_i^X peut être vu comme représentant l'abondance de civelles présentes dans l'estuaire de l'Adour à la $i^{\text{ème}}$ saison de pêche et le terme μ_i^Y représentant l'évolution régulière de la température de l'air au cours de cette même saison. De ce fait, les termes μ^X et μ^Y s'interprètent de la même façon, mais

représentent chacun une moyenne de la variable sur l'échantillon de saisons de pêche. Le vecteur z_i est un vecteur de IR^k qui permet de prendre en considération la liaison éventuelle entre μ_i^X et μ_i^Y mais également de discuter de la forme de cette liaison au cours de la saison de pêche.

La méthode concentre l'effort d'analyse sur les composantes μ_i^X et μ_i^Y dont on souhaite interpréter l'évolution conjointe pour comprendre le mécanisme qui lie les deux variables étudiées.

La procédure d'implémentation de la méthode ci-dessus se réalise en deux étapes :

Etape 1 : *Estimation préliminaire des effets moyens par régression non-paramétrique* ; Cette étape permet de réduire les bruits éventuels de mesure et de fournir des premières estimations des effets μ_i^X et μ_i^Y en tant que fonctions régulières et de telle sorte que l'on puisse ensuite les évaluer en tout point.

Etape 2 : *Minimisation d'un critère moindres-carrés fonctionnels pénalisés*. Cette procédure donne les estimations explicites des paramètres du problème (Bru 1998).

La méthode ci-dessus présente l'intérêt de se généraliser aisément à l'étude de plus de deux ensembles de courbes observées sur chaque unité statistique. Elle est également particulièrement recommandée lorsqu'on s'intéresse à la liaison entre la dynamique de ces courbes.

La difficulté lorsqu'on introduit plusieurs courbes réside ensuite dans l'interprétation des résultats graphiques qui devient vite laborieuse, mais on s'intéressera toujours à l'interprétation des résultats suivants : Comparaison des effets moyens ; discussion sur l'évolution conjointe des facteurs canoniques ; corrélation. Un autre inconvénient de ce type d'étude réside dans l'impossibilité de prendre en compte des variables qualitatives, nous devons donc écarter l'étude de l'influence des phases lunaires, de la nébulosité... De plus, le choix de la technique de lissage (et également du paramètre de lissage) influe également sur l'interprétation des résultats : si le lissage est trop fort, on ne peut pas détecter certains phénomènes qui pourraient être importants ; s'il est trop faible on met en évidence des phénomènes parasites qui ne contiennent pas, en fait, une véritable information.

4.3.2. Résultats numériques.

L'étape 1 décrite ci-dessus a été réalisée à l'aide d'un lissage par la méthode des noyaux, nous ne comparons pas dans ce qui suit l'efficacité des différentes méthodes de lissage.

Dans ce qui suit, l'intervalle de temps considéré est symbolisé par (0,200) sur les graphiques, mais représente concrètement la période du 1^{er} novembre au 31 mars, soit une saison de pêche.

Nous commençons par présenter les résultats des analyses effectuées en ne considérant tout d'abord que deux ensembles de courbes : les CPUE avec les différentes variables environnementales quantitatives disponibles. Nous étendrons ensuite les résultats à l'étude de plus de 2 ensembles de courbes.

Nous discuterons uniquement de la relation qui semble exister entre les variables à travers l'étude de l'évolution du premier couple de facteurs canoniques dont nous préciserons la corrélation pour évaluer la qualité de représentation de la liaison.

- **Etude de la relation entre CPUE et températures de l'air :**

Le graphique ci-dessous (figure 12) représente les estimations des effets moyens μ^X et μ^Y globaux des CPUE (courbe de gauche) et de la température de l'air (courbe de droite).

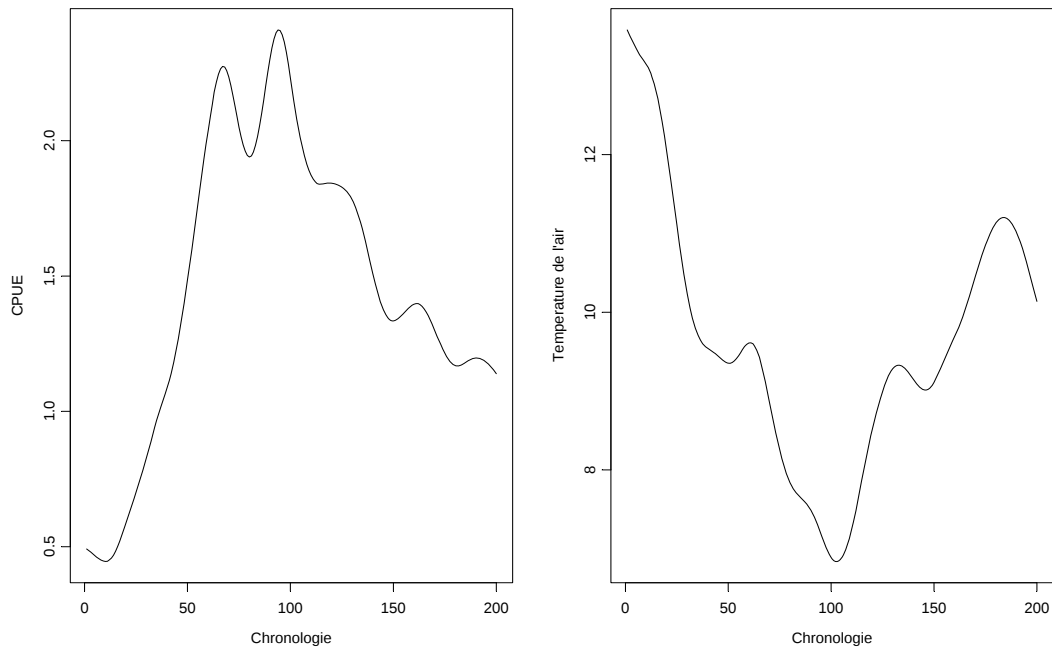


Figure 12 - Effets moyens globaux des CPUE et de la température de l'air.

Les tendances moyennes de ces deux variables au cours d'une saison sont les suivantes :

- Les CPUE augmentent rapidement en début de saison pour atteindre un maximum qui se maintient durant le mois de janvier puis diminuent progressivement jusqu'à la fin de la saison de pêche (cf. figure 12 gauche) ;
- Les températures de l'air sont maximales en début et fin de saison et diminuent progressivement pour être les plus froides en milieu de saison (cf. figure 12 droite).

Le premier couple de facteurs canoniques qui explique le mieux le phénomène ($r^2 = \lambda_1 = 0.875$) permet de discuter de la liaison éventuelle entre ces 2 variables et présente l'évolution suivante (figure 13) :

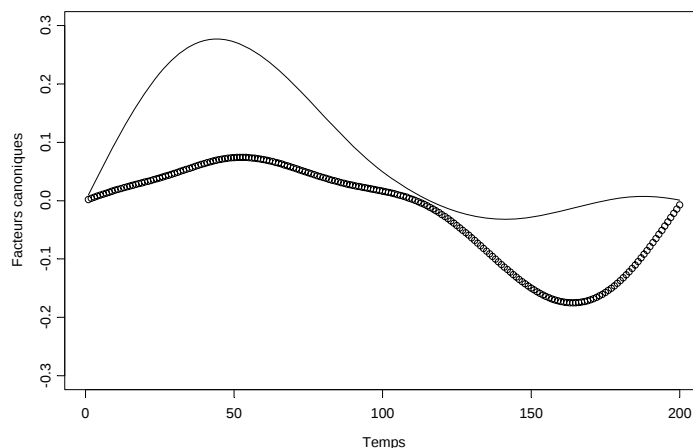


Figure 13 : Premier couple de facteurs canoniques.

(— : facteur associé aux CPUE ; ◇◇◇◇ : facteur associé aux températures de l'air)

Ce premier couple de facteurs canoniques traduit les relations entre les températures de l'air et la capturabilité des civelles en début et en fin de saison. En début de saison, un effet différentiel important des CPUE est associé à un effet différentiel de grande amplitude des températures de l'air dans le même sens puisque les deux facteurs sont de même signe ; en fin de saison, on observe une situation opposée (évolution contraire des signes).

En d'autres termes, durant la période novembre-décembre, une augmentation des captures par rapport à la moyenne est associée à un réchauffement de la température de l'air par rapport à la moyenne ;

par opposition à cela, durant la période de fin de saison, une diminution des captures par rapport à la moyenne est associée à un réchauffement de la température de l'air. Ceci peut s'expliquer par le fait que le réchauffement de la température de l'air en fin de saison entraîne une fonte des neiges donc un apport d'eau froide dans l'Adour inhibitrice de la remontée des civelles vers la surface. Phénomène qui a bien été observé sur l'Adour durant la campagne 2001-2002 lorsque les températures de l'eau sont inférieures à 4°C.

- **Etude de la relation entre CPUE et coefficient de marée :**

La figure 14 représente les estimations des effets moyens globaux des CPUE (courbe de gauche) et du coefficient de marée (courbe de droite).

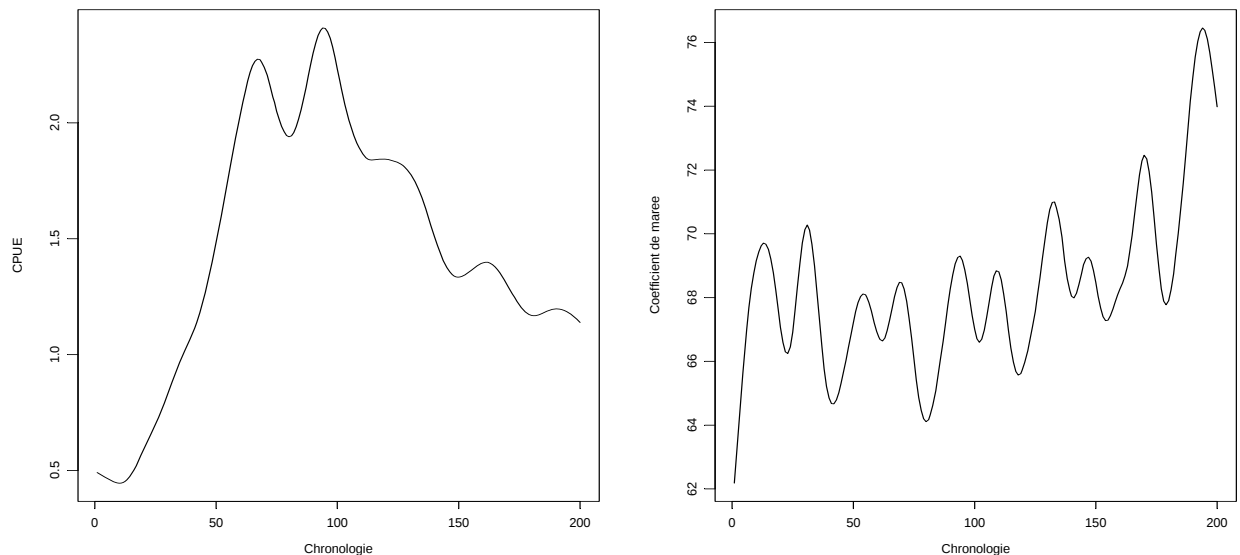


Figure 14 : Effets moyens globaux des CPUE et du coefficient de marée.

Les variations du coefficient de marée sont de forme sinusoïdale avec une tendance générale à une augmentation progressive des valeurs de coefficients de marée au cours de la saison.

Le premier couple de facteurs canoniques qui explique le mieux le phénomène ($r^2 = \lambda_1 = 0.9025$) présente l'évolution suivante (figure 15) :

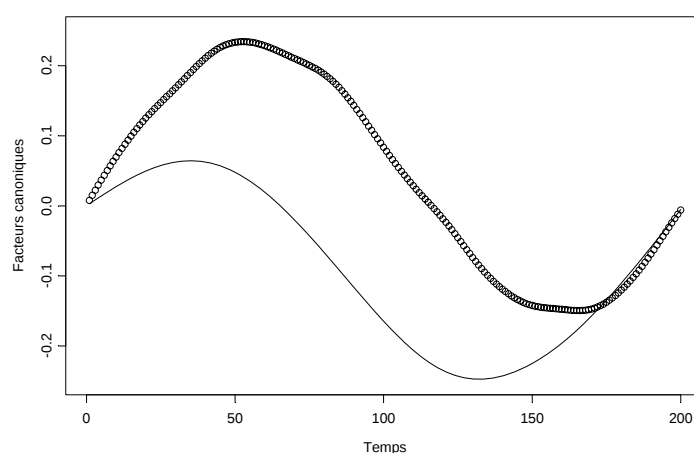


Figure 15 - Premier couple de facteurs canoniques.
(— : facteur associé aux CPUE ; ◇◇ : facteur associé aux coefficients de marée)

Ce premier couple de facteurs canoniques traduit les relations entre le coefficient de marée et la capturabilité des civelles au cours de la saison. On observe principalement deux courbes de même allure, mais qui présentent un décalage dans le temps de l'ordre de 13 jours.

Ceci peut refléter le phénomène bien connu des pêcheurs : on doit avoir une augmentation du transport des flux de civelles pour observer après quelques jours une augmentation des prises et vice versa.

- **Etude de la relation entre CPUE, coefficient de marée et températures de l'air :**

Les estimations des effets moyens globaux des CPUE, du coefficient de marée et de la température de l'air sont présentées et discutées précédemment (cf. figures 12 et 14), mais de manière séparée.

Le premier couple de facteurs canoniques qui explique le mieux le phénomène global présente l'évolution suivante (figure 16) :

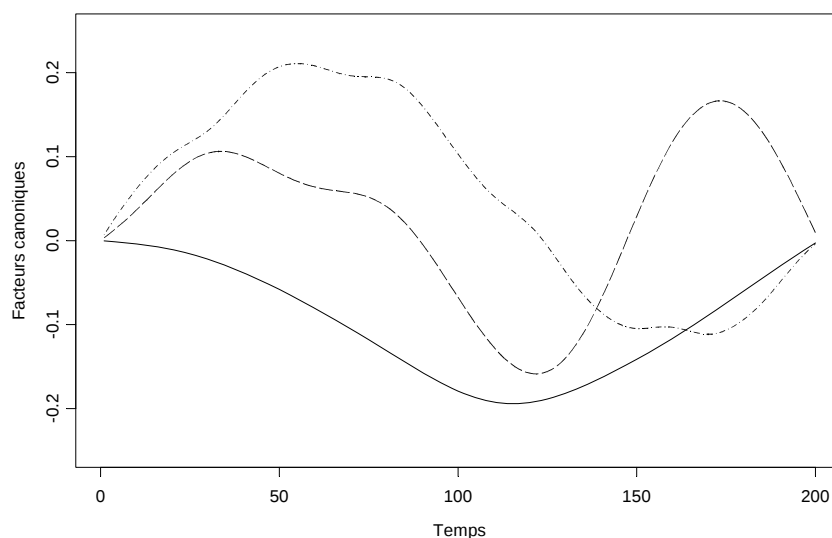


Figure 16 - Premier triplet de facteurs canoniques.

(— : facteur associé aux CPUE ; ---- : facteur associé aux coefficients de marée ; -.- : facteur associé aux températures de l'air)

On observe la même tendance entre les CPUE et le coefficient de marée que celle matérialisée en figure 15 avec un décalage plus accentué dans le temps. L'introduction de la température de l'air dans le modèle ne semble entraîner qu'un décalage plus important entre CPUE et coefficient de marée. Cela peut s'interpréter comme suit : les civelles pénètrent dans l'estuaire préférentiellement durant des périodes de flot marqué, mais lorsque les conditions de températures de l'air (consécutivement de l'eau) sont favorables. Il semblerait que le coefficient de marée ait une influence majeure sur l'intensité des CPUE (combinée avec des conditions de températures favorables) en début de saison alors qu'en fin de saison, ce soit la température de l'air qui conditionne principalement le niveau des CPUE. On retrouve ici les facteurs déclencheurs de la migration en début de saison qui véhiculent le flux de migrants et permettent d'augmenter les captures, comme le coefficient de marée et des facteurs modulant plus le positionnement ou la dispersion des civelles dans la colonne d'eau, comme la température et qui joue un rôle prépondérant sur l'abondance de la capture en fin de saison lorsque plus aucun flux important de civelles ne pénètre dans l'estuaire.

4.4. Deuxième méthode : modélisation des relations entre les CPUE et les variables environnementales à l'aide d'une régression multiple à coefficients lissés.

La régression linéaire multiple est une méthode qui peut à la fois être considérée comme descriptive pour étudier l'hypothèse d'une liaison linéaire entre la variable à expliquer et les variables explicatives et comme prédictive en ce sens qu'elle aboutit à l'écriture d'un modèle qui, s'il est validé, peut permettre de faire des prévisions de la variable d'intérêt en fonction des variables explicatives supposées connues¹³.

¹³Cette technique a été implémentée et appliquée aux données de civelles avec la collaboration du Professeur Anestis Antoniadis (LMC – Université de Grenoble 1).

4.4.1. Principe de la méthode.

Soit $(t_{ij})_{j=1,\dots,T_i}$ l'ensemble des points temporels sur lesquels ont été effectuées les mesures de captures de civelles sur le i -ème individu statistique à savoir une saison de pêche. Soit Y_{ij} la réponse observée et $\underline{X}_{ij}$ le vecteur des d covariables $(X_{ij}^1, \dots, X_{ij}^d)$ observées également sur le i -ème individu à la date $(t_{ij})_{j=1,\dots,T_i}$. Ces données sont représentées par le triplet $(t_{ij}, \underline{X}_{ij}, Y_{ij})$, $j = 1, \dots, T_i$ et $i = 1, \dots, n$. On considère le modèle linéaire fonctionnel suivant :

$$Y(t) = \underline{X}(t)\underline{\beta}(t) + \varepsilon(t),$$

où $\varepsilon(t)$ est un processus de moyenne nulle et indépendant du vecteur $\underline{X}(t)$.

Le triplet $(t_{ij}, \underline{X}_{ij}, Y_{ij})$ peut être considéré comme un échantillon aléatoire issu du modèle fonctionnel ci-dessus et par conséquent on peut écrire :

$$\underline{Y}(t_{ij}) = \underline{\beta}_0^*(t_{ij}) + \underline{Z}(t_{ij})\underline{\beta}(t_{ij}) + \underline{\varepsilon}(t_{ij}),$$

avec les notations et les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} Z_l(t) = X_l(t) - IE(X_l(t)), \\ \mu_l(t) = IE(X_l(t)), \\ \beta_0^*(t) = \beta_0(t) + \sum_{l=1}^{d-1} \mu_l(t)\beta_l(t), \\ E(\varepsilon(t)) = 0 \text{ et } \gamma(s, t) = \text{cov}(\varepsilon_i(s), \varepsilon_i(t)), \text{ ind. de } \underline{X}(t) \end{cases}$$

Le terme $\beta_0(t) = \beta_0^*(t) - \sum_{l=1}^{d-1} \mu_l(t)\beta_l(t)$ représente la tendance moyenne des captures de civelles au cours d'une saison de pêche, les termes $\mu_l(t)$ représentent les tendances moyennes des covariables étudiées au cours d'une saison de pêche et les termes $\beta_l(t)$ sont les coefficients associés à chaque covariable et qui représente l'effet journalier de ces covariables sur les captures de civelles.

Les estimations brutes obtenues avec ce problème ne sont pas en général lisses et donc, difficiles à interpréter et ne prennent pas en compte l'aspect temporel des données. Pour remédier à cela, il suffit de les lisser par rapport à l'axe du temps.

La procédure d'implémentation de la méthode ci-dessus se réalise en deux étapes :

Etape 1 : minimisation d'un critère "moindres carrés" ; cette procédure donne les estimations explicites des paramètres du problème.

Etape 2 : lissage des coefficients par régression à l'aide de polynôme locaux (méthode « lowess »).

La méthode ci-dessus présente l'intérêt d'obtenir un modèle explicite entre les différentes variables et peut être utilisée pour la prédiction. Elle est également particulièrement recommandée lorsqu'on s'intéresse à l'évolution temporelle des données. Elle est plus facile à interpréter que la première méthode puisqu'on a à faire à une méthode classique de régression linéaire multiple : corrélation, significativité des coefficients et interprétation de leur évolution dans le temps à l'aide de graphes. Elle peut également prendre en compte des variables non numériques et avec une méthodologie qui rejoint celle des modèles linéaires généralisés. Cependant, le choix de la technique de lissage influe sur l'interprétation des résultats et constitue un inconvénient commun aux 2 méthodes présentées ci-dessus. De plus, on interprète indépendamment des autres covariables l'effet de chacune sans tenir compte des relations existant éventuellement entre ces covariables.

4.4.2. Résultats numériques.

L'étape 2 décrite ci-dessus a été réalisée à l'aide d'un lissage des coefficients par la méthode des polynômes locaux. Nous présentons ici les résultats obtenus en considérant les covariables : coefficient de marée, températures de l'air et pluviométrie ; la variable à expliquer étant toujours la variable CPUE.

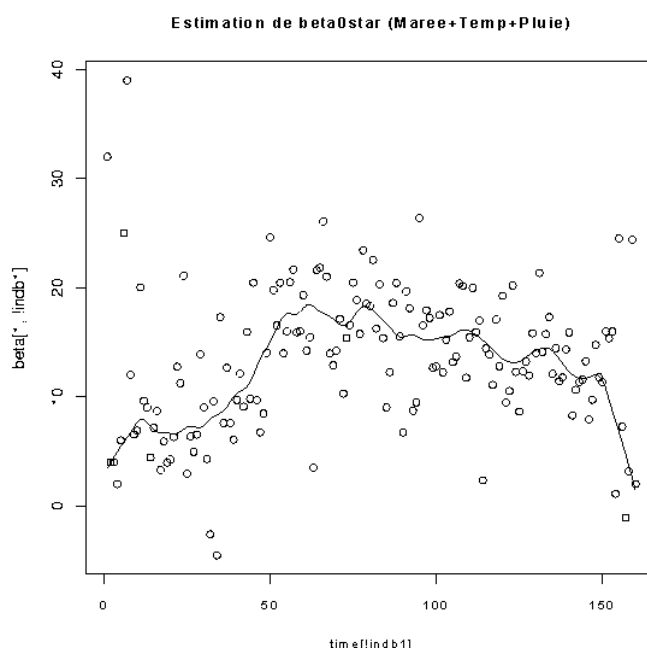


Figure 17 - Estimations des valeurs moyennes de CPUE au cours d'une saison de pêche.
(°: estimations brutes ; — : estimations lissées)

La figure 17 représente les estimations brutes (points) et lissées des CPUE moyennes sur une saison de pêche. On remarque que la courbe des estimations lissées ressemble fortement à celle obtenue par la première méthode (cf. figure 14) : croissance rapide en début de saison, maximum en milieu et décroissance lente en fin de saison. Au vu des valeurs brutes, on peut aussi se poser la question de la qualité du lissage qui passe « au mieux » des données car la variabilité des points autour de cette tendance moyenne reste très élevée et est considérée ici comme du « bruit » autour de cette tendance.

Les coefficients associés à chacune des covariables considérées présentent les évolutions suivantes (figure 18). Ces coefficients traduisent les effets journaliers de chaque variable sur les CPUE au cours d'une saison de pêche. Pour interpréter l'influence de chacune de ces variables on s'intéresse au signe de ces coefficients jour par jour.

Le coefficient de marée semble influencer les CPUE, surtout dans les 2 premiers tiers de la saison et essentiellement en positif au vu de la courbe lissée. Ceci peut refléter l'effet de la marée en tant que vecteur du flux lorsque celui-ci est disponible. On retrouve une conclusion identique à celle obtenue avec la première méthode.

La température de l'air influe sur les CPUE de la façon suivante : effet positif sur les CPUE en début de saison et effet négatif en fin de saison. On retrouve également une conclusion identique à celle obtenue avec la première méthode.

La pluviométrie semble avoir un effet plutôt positif en début de saison. Ce qui peut être lié au phénomène d'augmentation du débit fluvial qu'elle engendre et qui lui-même est interprété comme un « appel d'eau » en début de saison qui attire les civelles vers l'estuaire et qui entraînerait le retard remarqué à l'aide de la première méthode entre les CPUE et le coefficient de marée : appel d'eau lié au débit puis transport accru du flux lorsque le coefficient de marée augmente.

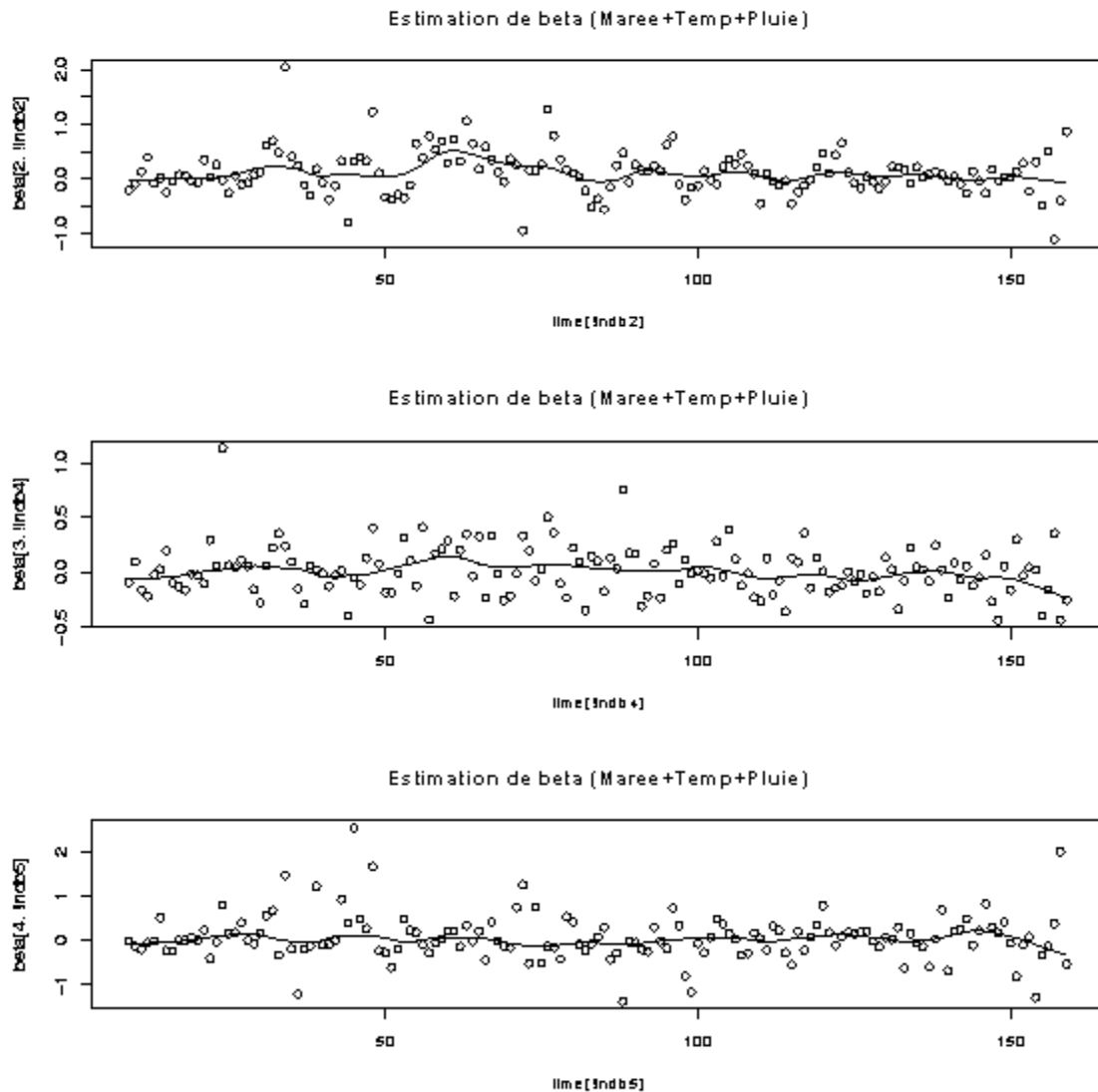


Figure 18 - Coefficients bruts et lissés associés aux 3 variables environnementales considérées.
(en haut : coefficient associé au coefficient de marée ; au milieu : coefficient associé à la température de l'air ; en bas : coefficient associé à la pluviométrie).

4.5. Troisième méthode : analyse des CPUE à l'aide de modèles de séries chronologiques.

L'objectif de cette troisième méthode est d'arriver à construire un modèle de prévision de la variable CPUE intégrant les outils méthodologiques suivants :

- un modèle de Régression Linéaire Multiple ;
- une structure éventuelle d'autocorrélation des résidus du modèle, envisageable parce que les variables observées sont des séries temporelles ;
- une vérification de l'adéquation aux données de loi de répartition des résidus, généralement postulée ; en d'autres termes choisit-on les bons résumés statistiques ?

La démarche adoptée tout d'abord est de type exploratoire et s'intéresse progressivement aux deux étapes méthodologiques indispensables suivantes qui conduisent de la statistique descriptive et à de la spécification de modèles.

4.5.1. Analyses univariées et bivariées : Points marquants concernant les données.

L'échantillon de données présente une représentativité équivalente aux 2 échelles de temps considérées que ce soit en termes de saison (effectifs par saison équilibrés d'environ 151) ou par jours de la semaine (effectifs par jour équilibrés d'environ 191) (tableau 13).

Tableau 13 - Nombre de données disponibles par campagne et par jour de la semaine.

	Effectif		Effectif
1	151	1	191
2	151	2	192
3	151	3	191
4	152	4	193
5	151	5	193
6	151	6	190
7	141	7	192
8	141		
9	153		
9 campagnes de 1984/85 à 1992/93		7 jours de pêche par semaine	

Les observations correspondent aux données de CPUE sur 1342 jours de pêche depuis la saison de pêche 1984/85 jusqu'à la saison de pêche 1992/93 et les variables considérées dont on cherche une éventuelle influence sont en fait les suivantes :

- *jour, mois, année, lune, nuage, cpue, pluie, débit, tempera, marée* : variables présentées en introduction ;
- *indic* : variable indicatrice ne prenant en compte que 2 valeurs dont 0 pour indiquer une mauvaise capture et 1 pour une bonne capture. Cette variable *indic* sert à gérer l'existence de cas zéro (sorties sans capture de civelles) ;
- *y84, y85, y86, y87, y88, y89, y90, y91, y92* : variables indicatrices permettant de distinguer un effet éventuel de la saison.

- **Les CPUE de civelles sont transformées** en $\ln(\text{CPUE})$ pour symétriser les répartitions des CPUE.

Les saisons 89/90 et 90/91 se distinguent par de moindres performances au niveau des captures professionnelles (figure 19).

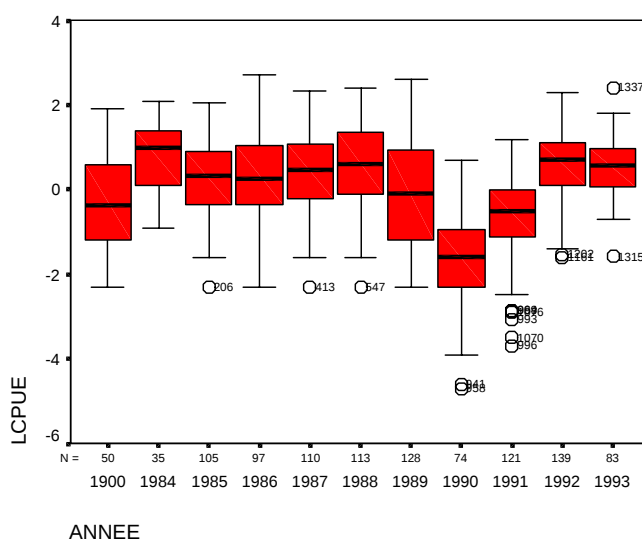


Figure 19 - Boxplot des $\ln(\text{CPUE})$ par saison. (la variable 1900 représente la dispersion globale de la série de données)

- **Les débits** : On observe également une forte volatilité inter-annuelle des débits (exprimés en échelle logarithmique à la figure 20 afin de symétriser la loi de répartition globale des débits).

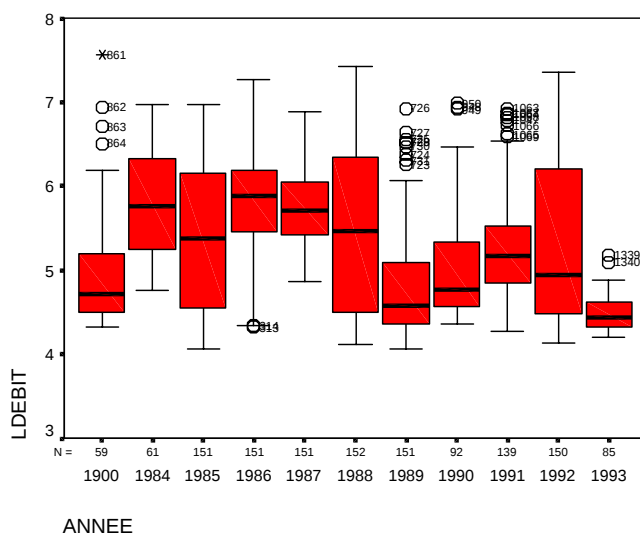


Figure 20 - Boxplot des ln(Débit) par saison.

- **Etude d'une liaison entre intensité de capture et jour de la semaine.** On s'attendrait à une indépendance plus marquée entre "bonne pêche" et "jour de la semaine" ce qui n'apparaît pas dans l'interprétation d'un Khi-deux d'indépendance (tableau 15). Ceci révèle que les bonnes prises se situent certains jours de la semaine. Cela traduit-il une certaine stratégie de pêche ?

Tableau 14 - Tableau de contingence entre qualité de pêche et jour de la semaine.

Tableau croisé DAY * INDIC

Effectif		INDIC		Total
		0	1	
DAY	1	43	148	191
	2	29	163	192
	3	21	170	191
	4	25	168	193
	5	35	158	193
	6	61	129	190
	7	73	119	192
Total		287	1055	1342

Tableau 15 - Résultat du test du khi-deux d'indépendance

Tests du Khi-deux

	Valeur	ddl	Signification asymptotique (bilatérale)
Khi-deux de Pearson	70,881 ^a	6	,000
Rapport de vraisemblance	68,899	6	,000
Association linéaire par linéaire	31,223	1	,000
Nombre d'observations valides	1342		

a. 0 cellules (,0%) ont un effectif théorique inférieur à 5.
L'effectif théorique minimum est de 40,63.

En regardant de plus près le tableau croisé (cf. tableau 14) entre les variables *jour* (DAY) et *indic*, on remarque en fait que les bonnes prises ont lieu en milieu de semaine et les moins bonnes le week-end. On peut supposer que la fréquentation des sites de pêche est moins importante en fin de semaine. Ainsi, la zone exploitable est moins bien explorée car le nombre de pêcheurs est moindre d'où une plus grande probabilité de tomber sur des zones de concentrations moins élevées ce qui implique des prises moins importantes.

- **Etude de la liaison entre la nébulosité et les variables exogènes.** La liaison entre la nébulosité et les variables exogènes porte non seulement sur la moyenne, mais aussi sur les variances. Ce dernier point invite à la prudence dans l'interprétation des phénomènes en niveau seulement.

Tableau 16 - test d'homogénéité des variances.

Test d'homogénéité des variances

	Statistique de Levene	ddl1=	ddl2	Signification
CPUE	6,363	2	1051	,002
PLUIE	85,986	2	1051	,000
DEBIT	32,178	2	1051	,000
TEMPERA	4,531	2	1051	,011
MAREE	,154	2	1051	,858

Tableau 17 - test d'homogénéité des moyennes (à variance constante).

ANOVA

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
CPUE	Inter-groupes	31,144	2	15,572	3,796	,023
	Intra-groupes	4310,880	1051	4,102		
	Total	4342,024	1053			
PLUIE	Inter-groupes	6422,889	2	3211,445	47,724	,000
	Intra-groupes	70724,444	1051	67,293		
	Total	77147,333	1053			
DEBIT	Inter-groupes	2449144,1	2	1224572,0	18,213	,000
	Intra-groupes	70664866	1051	67235,838		
	Total	73114010	1053			
TEMPERA	Inter-groupes	320,784	2	160,392	10,187	,000
	Intra-groupes	16547,805	1051	15,745		
	Total	16868,589	1053			
MAREE	Inter-groupes	32,411	2	16,205	,039	,962
	Intra-groupes	436220,811	1051	415,053		
	Total	436253,222	1053			

- **Liaison entre la lunaison et les variables exogènes.** La liaison entre la lunaison et les variables exogènes porte, elle aussi, non seulement sur la moyenne, mais aussi sur les variances.

Tableau 18 - test d'homogénéité des variances.**Test d'homogénéité des variances**

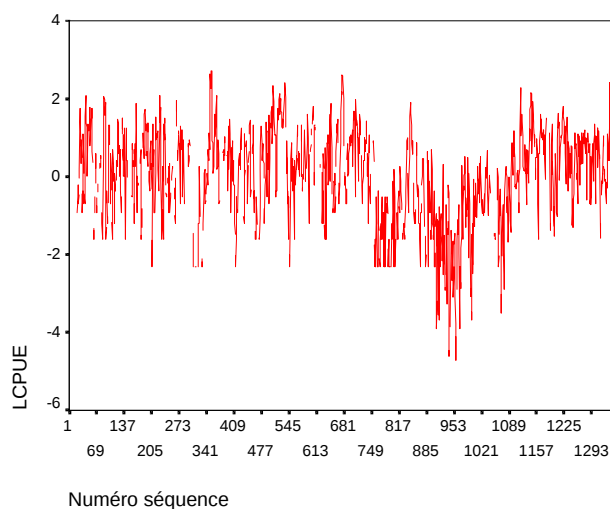
	Statistique de Levene	ddl1=	ddl2	Signification
CPUE	5,076	7	1047	,000
PLUIE	15,757	7	1047	,000
DEBIT	4,560	7	1047	,000
TEMPERA	4,141	7	1047	,000
MAREE	1,391	7	1047	,205

Tableau 19 - test d'homogénéité des moyennes (à variance constante).**ANOVA**

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
CPUE	Inter-groupes	113,598	7	16,228	4,018	,000
	Intra-groupes	4228,942	1047	4,039		
	Total	4342,540	1054			
PLUIE	Inter-groupes	3168,137	7	452,591	6,404	,000
	Intra-groupes	73997,359	1047	70,676		
	Total	77165,496	1054			
DEBIT	Inter-groupes	1471155,2	7	210165,028	3,071	,003
	Intra-groupes	71643015	1047	68426,948		
	Total	73114170	1054			
TEMPERA	Inter-groupes	655,473	7	93,639	6,045	,000
	Intra-groupes	16219,449	1047	15,491		
	Total	16874,922	1054			
MAREE	Inter-groupes	158173,388	7	22596,198	85,037	,000
	Intra-groupes	278210,893	1047	265,722		
	Total	436384,281	1054			

4.5.2. Etude de l'évolution temporelle des CPUE.

- Toutes les saisons de pêche ont été mises bout à bout après contrôle du caractère licite d'une telle représentation (figure 21) :

Tracé de la série transformée des $\ln(\text{CPUE})$ **Figure 21** - Evolution chronologique des $\ln(\text{CPUE})$.

- Le **corrélogramme** montre la non stationnarité du processus LCPUE (figure 22). La répartition des captures évolue au cours d'une saison de pêche.

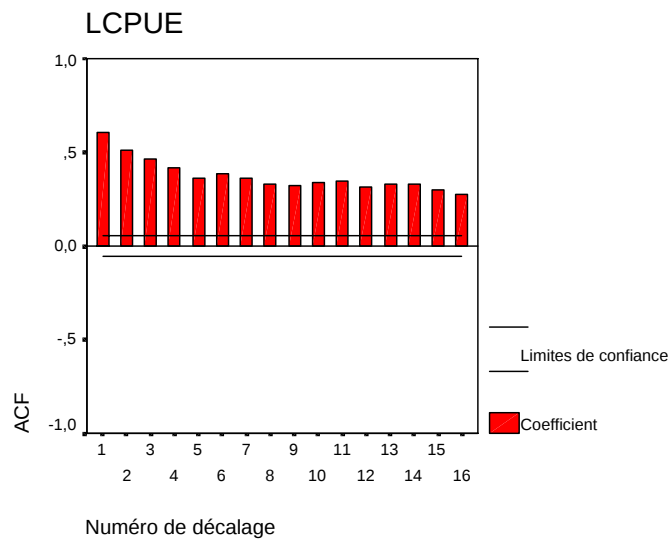


Figure 22 - Corrélogramme des $\ln(\text{CPUE})$.

Deux solutions techniques aux problèmes de non stationnarité :

- o Différencier la série : c'est s'intéresser à la stationnarité des accroissements du processus de capture ;
- o Modéliser la cause de non stationnarité : Existence de variables influentes (qui seront recherchées ensuite par régression dynamique), ce qui peut apporter une explication aux non-stationnarités en niveau de CPUE au cours d'une saison de pêche.

- Le **corrélogramme partiel** montre une structure autorégressive d'ordre 3 ou 4 (figure 23) :

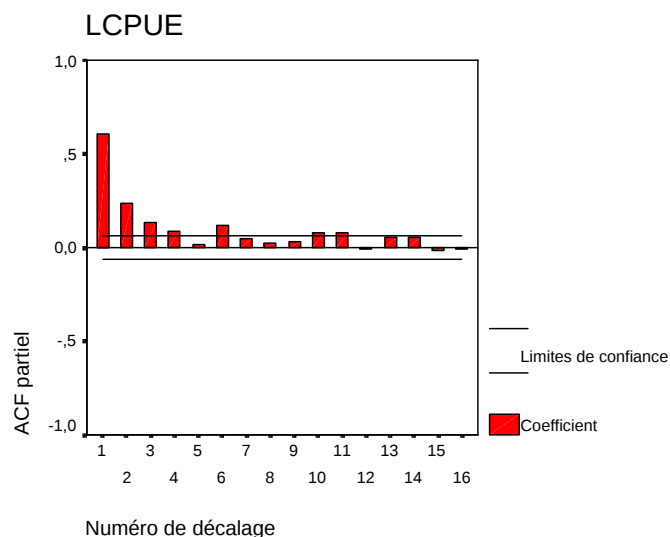


Figure 23 - Corrélogramme partiel des $\ln(\text{CPUE})$.

Deux causes possibles et parfois complémentaires pour expliquer cela :

- Non prise en compte de variables influentes elles mêmes autocorrélées,

- Phénomène intrinsèquement dynamique : la quantité de civelles pêchées est régulée par des caractéristiques environnementales dont l'évolution est structurée dans le temps.

• **La spécification d'un modèle AR(p) sur les CPUE :** le Modèle AR(3) est le plus satisfaisant.

FINAL PARAMETERS (édition des sorties du programme SPSS):

Number of residuals 1055
Standard error ,81241106
Log likelihood -1302,1539
AIC 2612,3078
SBC 2632,153

Analysis of Variance:

	DF	Adj. Sum of Squares	Residual Variance
Residuals	1051	728,45339	,66001173

Variables in the Model:

	B	SEB	T-RATIO	APPROX. PROB.
AR1	,54883680	,03275366	16,756504	,00000000
AR2	,15164952	,03909760	3,878742	,00011152
AR3	,09658626	,03321485	2,907924	,00371487
CONSTANT	-,00608469	,11076129	-,054935	,95620057

Correlation Matrix:

	AR1	AR2	AR3
AR1	1,0000000	-,5576743	-,1743062
AR2	-,5576743	1,0000000	-,5531959
AR3	-,1743062	-,5531959	1,0000000

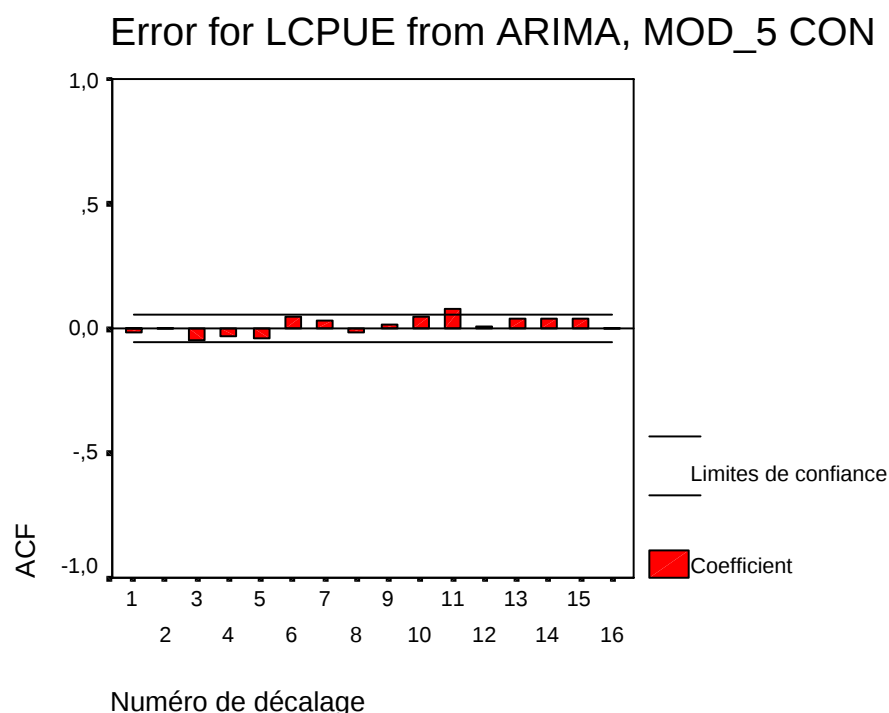


Figure 24 - Corrélogramme des erreurs de modélisation.

La fonction PACF, calculée sur la série chronologique des résidus du modèle AR(3), montre les mêmes caractéristiques (figure 24). Il n'est pas nécessaire d'intégrer l'information portée par LCPUE dues

au passé lointain (à plus de trois jours de décalage) pour prédire LCPUE au jour d'intérêt t (aux aléas environnementaux non prévisibles près).

4.5.3. Etude de la dépendance temporelle des variables exogènes.

On constate que des liaisons asynchrones doivent être prises en compte dans la modélisation des liaisons entre pêche et conditions météorologiques afin d'intégrer les inerties induites par le fonctionnement du système et/ou les imperfections du système de mesure.

- Liens entre CPUE et Marée (figure 25):

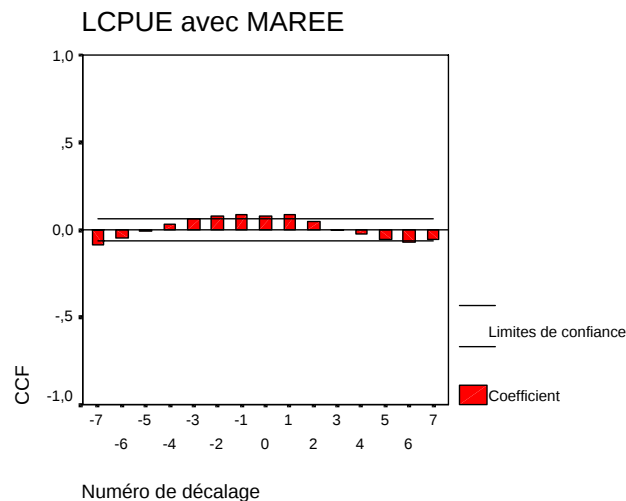


Figure 25 - Corrélogramme croisé entre LCPUE et MAREE.

L'effet de la marée, n'est pas seulement ponctuel (synchrone ou instantané), sans doute du fait du caractère cyclique de cette caractéristique : la marée d'un jour est corrélée ou plutôt nous informe sur les captures des deux jours précédents et des deux jours suivants.

- Liens entre CPUE et Débit (figure 26):

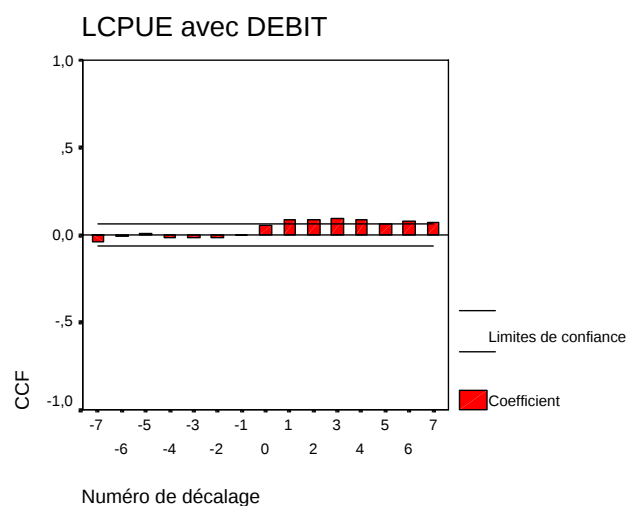


Figure 26 - Corrélogramme croisé entre LCPUE et DEBIT.

L'effet du débit sur les captures ne peut pas être perçu si l'on travaille en termes de corrélation instantanée. Il y a un fort décalage et le débit d'un jour semble agir sur les captures de la semaine qui suit. Cela est-il dû au fait que les variations de débit se font sentir dès l'embouchure ? On retrouve ici, les

interprétations effectuées précédemment par l'utilisation de la seconde méthode (cf § 4.4) : phase d'appel d'eau douce.

➤ Liens entre CPUE et Pluie (figure 27):

Aucune relation significative entre les captures par sortie et l'intensité de la pluie, hors cas zéro, n'a été trouvée.

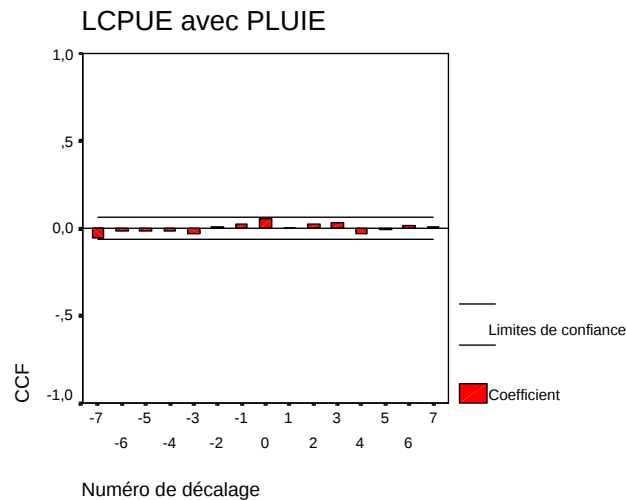


Figure 27 - Corrélogramme croisé entre LCPUE et PLUIE.

➤ Liens entre DEBIT et PLUIE (figure 28) :

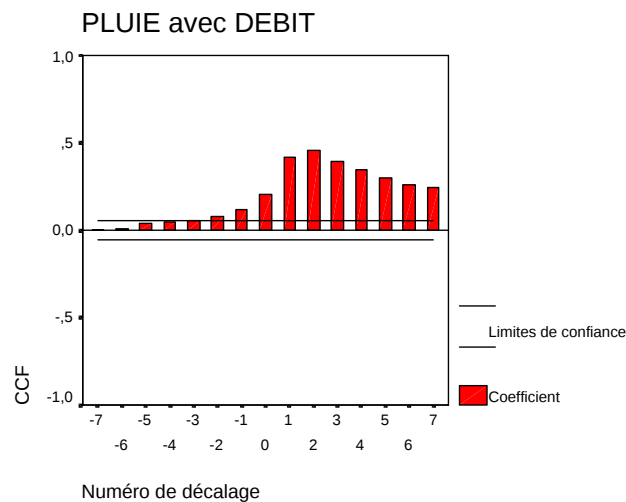


Figure 28- Corrélogramme croisé entre PLUIE et DEBIT.

Cet aspect (figure 28), à première vue, un peu surprenant est lié en fait au décalage de temps observé entre les événements de précipitations et leur traduction en augmentation de débit. Cela rend, en particulier, un peu plus complexe qu'usuellement admis l'articulation reconnue entre nébulosité (couverture nuageuse forte par temps pluvieux) et prises de civelles.

4.5.4. Spécification d'un modèle d'autorégression multiple.

La méthode de simplification progressive d'un modèle complexe initial comprend les étapes suivantes :

- On estime les paramètres d'un modèle de régression multiple à résidus supposés Indépendants et Identiquement Distribués (IID), c'est-à-dire de même loi de répartition. Nous remettons en question l'hypothèse de travail classique d'indépendance temporelle adoptée par tous les logiciels standards plus bas ;
- On travaille avec la variable transformée LCPUE et on l'interprète en tant que fonction linéaire de *Marée*, *Ltemperature*, *Ldébit*, *Pluie*, *Day*, *les Yan*, *lune*, *Nuage* ;
- On mène une analyse de la série chronologique des résidus au sens des Moindres Carrés Ordinaires (donc supposant les résidus gaussiens et indépendants) de ce modèle pour spécifier une formulation ARIMA(p,i,q). On a finalement dû retenir pour ce cas un ARIMA(4,1,3).
- On recherche dans un deuxième temps une spécification parcimonieuse par simplification progressive du modèle de régression multiple à résidus postulés ARIMA(4,1,3).

La faiblesse temporaire de la méthode réside dans le fait que la variable *LUNE* n'a été traitée ni sous forme recodée ni comme lot de 8 indicatrices de ses modalités et qu'aucune variable explicative n'est supposée avoir un effet retardé.

- Finalement, on retiendra que le modèle final réserve quelques surprises. Il s'écrit :

$$LCPUE_t = cste + Y89_t + Y90_t + INDIC_t + DAYGT_t + MAREE_t + LDEBIT_t + LDEBITGT_t + LTEMPGT_t + PLUEGT_t + \eta_t$$

avec : $\eta_t = \alpha_1 \eta_{t-1} + \alpha_2 \eta_{t-2}$ et par exemple *LDEBITGT* est le produit de *LDEBIT* par la variable *INDIC*.

- Il nécessite donc des INTERACTIONS pour distinguer les jours avec capture des jours sans capture et des **Résidus AUTO REGRESSIFS** d'ordre 2 (périodicité aléatoire ?) ;
- Les résidus ne sont pas Gaussiens et, en particulier, non symétriques ;
- L'écart type résiduel de 1.345 est assez faible ;
- Au bilan, c'est un modèle NON CLASSIQUE si l'on en juge par les caractéristiques atypiques des résidus. La spécification des lois de répartition des CPUE doit être affinée.

4.5.5. Analyse de la distribution des résidus

- Recherche d'une loi de répartition adaptée au phénomène observé.

Celle-ci se fait par essai-erreur, en puisant dans un catalogue de lois usuelles ajustées à l'aide du logiciel SPSS¹⁴

- On a essayé d'ajuster une série de lois usuelles aux résidus. Les lois de Gauss sont rejetées, car elles se révèlent incapables de traduire la dissymétrie de la répartition observée des CPUE (figures 29 et 30).

¹⁴ Les résultats de nos essais sont visualisés à l'aide de papiers fonctionnels, c'est-à-dire de graphiques montrant l'inadéquation d'une loi de probabilité en termes d'écart à une droite (figurant l'ajustement parfait).

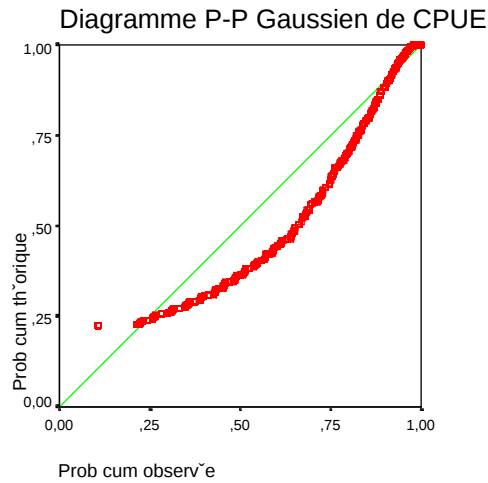


Figure 29 - Ajustement gaussien des CPUE.

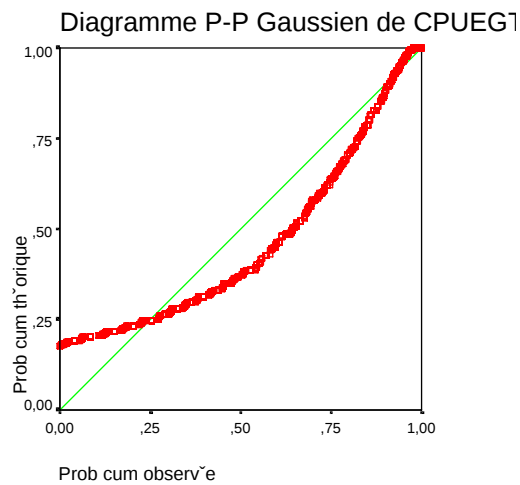


Figure 30- Ajustement gaussien des CPUEGT.

- Le meilleur modèle pour décrire la tendance des résidus est la loi de Weibull (figure 31). Cela est confirmé par le fait que le meilleur modèle ajusté aux transformées logarithmiques des résidus est la loi des extrêmes (dite loi de Gumbel).
- Cela est confirmé aussi par le fait que la loi de Weibull ajuste bien la répartition de CPUE. Nous proposons ci-dessous une justification biologique en terme de durée de vie des individus capturables (présents sur les lieux de pêche).

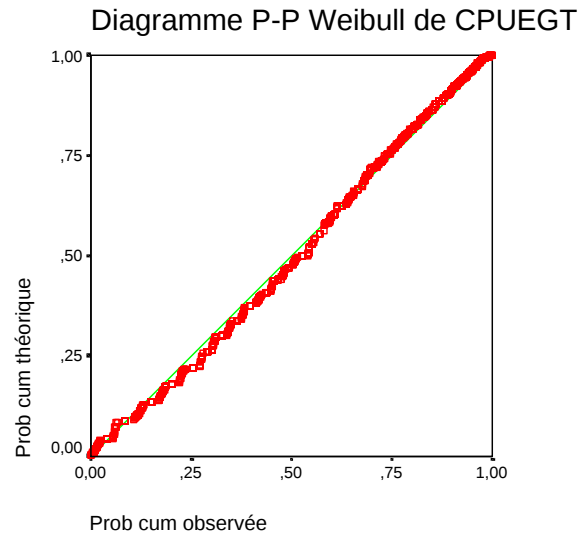


Figure 31 - Ajustement à une loi de Weibull.

➤ La distribution de WEIBULL :

Il est nécessaire de rappeler certaines caractéristiques de la loi de Weibull, car l'adoption de ce modèle oblige l'utilisateur à changer ses pratiques d'évaluation des quantités de civelles capturables dans des conditions environnementales données.

Définition : La variable Aléatoire X suit une loi de Weibull d'indice β , de paramètre de localisation λ et de paramètre d'échelle η si elle a pour densité :

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - \lambda}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x - \lambda}{\eta} \right)^{\beta} \right\}, \quad x > \lambda$$

et pour fonction de répartition :

$$F(x) = P(X < x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x - \lambda}{\eta} \right)^{\beta} \right\}, \quad x > \lambda$$

Alors, la variable standardisée $Y = (X - \lambda)/\eta$ est distribuée selon une loi Gamma, de densité :

$$g(y) = \beta y^{\beta-1} \exp\{-y^{\beta}\}, \quad y > 0$$

et de fonction de répartition :

$$G(y) = P(Y < y) = 1 - \exp\{-y^{\beta}\}, \quad y > 0$$

Caractéristiques :

- o Pour $\beta=1$, on obtient une loi exponentielle ; Cette situation traduit une constance de la quantité de civelles capturables au cours de la période considérée ;
- o Pour $\beta = 3.6$, la dissymétrie est nulle ;
- o et pour $\beta > 3.6$ la dissymétrie est négative (queue lourde à gauche).

- **Espérance :** $E(Y) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$
- **Variance :** $Var(Y) := \sigma^2 = \Gamma(1 + \beta) - \left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right\}^2$
- **Dissymétrie :** $Skew(Y) = \left[\Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) - 3 \times \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + 2 \times \left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right\}^3 \right] / \sigma^3$

Le paramètre β doit être estimé à partir des CPUE car il renseigne sur le niveau moyen de captures, sur la précision avec laquelle ce niveau moyen est connu et sur l'équilibre relatif entre jours de bonne pêche et jours de faible capture.

4.5.6. Discussion des résultats.

La variable de pluie est également bien ajustée par une loi de Weibull : ces résultats ont été validés par une modélisation campagne par campagne. Le modèle reste satisfaisant, de façon un peu étonnante, mais rassurante et le « caractère Weibull » des résidus reste très stable d'une année à l'autre. Les années 89 et 90 sont un peu moins satisfaisantes en terme de captures, mais aussi bien ajustées que les autres par le modèle de loi de Weibull : le modèle de répartition adopté n'est donc pas conjoncturel.

On a comparé les lois de Weibull ajustées, en termes de paramètres estimés de la loi des CPUE (tableau 20):

Tableau 20 - Paramètres de forme (béta) et d'échelle (éta) de la loi de Weibull ajustée aux CPUE.

Année	Echelle	Forme
1	2.2421	1.1864
2	2.1588	1.3275
3	2.2245	1.0885
4	2.9126	1.2200
5	2.7230	1.3447
6 (saison 89/90)	0.7242	1.0332
7 (saison 90/91)	0.4920	1.0381
8	2.0500	1.1604
9	2.1910	1.6010

La différenciation des saisons 6 et 7 porte sur le paramètre d'échelle (éta) - donc le niveau moyen de captures cette saison- mais non sur le coefficient de forme (béta), c'est-à-dire l'évolution des captures de civelles au cours de la saison.

- On a aussi comparé les lois de Weibull ajustées, en termes de paramètres estimés de la loi de répartition de la variable PLUIE (tableau 21):

Tableau 21 - Paramètres de forme (béta) et d'échelle (éta) de la loi de Weibull ajustée aux pluies.

Année	Echelle	Forme
1	8.84	0.83
2	7.60	0.81
3	6.93	0.75
4	8.47	0.77
5	6.75	0.75
6 (saison 89/90)	5.15	0.69
7 (saison 90/91)	8.80	0.91
8	7.14	0.70
9	8.88	0.74

On note alors le caractère spécifique des précipitations enregistrées au cours de la saison 90/91 en terme de répartition dans la période ainsi que la spécificité de la saison 89/90 en termes d'évolution, mais surtout de niveau.

4.5.7. Modélisation séquentielle des CPUE par une loi de Weibull (cas des zéros exclus).

Nous avons repris l'estimation des paramètres de la loi de Weibull année par année, par une méthode plus précise, afin de contrôler les calculs précédents faits par SPSS.

Tableau 22 - Paramètres de la loi de Weibull ajustée aux CPUE en comparaison aux paramètres classiques.

	Année	N	Moyenne de CPUE	Coef. Variat.	beta-estimé (paramètre de forme)	éta-estimé (paramètre d'échelle)	CV(béta-est)	CV(éta-est)
1	1984	98	2,153	0,87	1,16	2,268	7,8	9,2
2	1985	100	2,022	0,812	1,246	2,169	7,8	8,5
3	1986	97	2,304	1,245	0,81	2,051	7,9	13,2
4	1987	126	2,788	0,865	1,169	2,94	7	8,1
5	1988	114	2,617	0,953	1,052	2,67	7,3	9,4
6	1989	125	0,787	1,351	0,751	0,662	7	12,5
7	1990	124	0,481	0,897	1,12	0,501	7	8,4
8	1991	121	2,004	0,974	1,029	2,027	7,1	9,3
9	1992	150	1,991	0,722	1,41	2,187	6,4	6,1
	Période	1055	1,882	1,079	0,928	1,818	2,4	3,5

Les estimations de *béta* et *éta* données au tableau 22 et représentées à la figure 32 permettent de tirer un certain nombre de considérations:

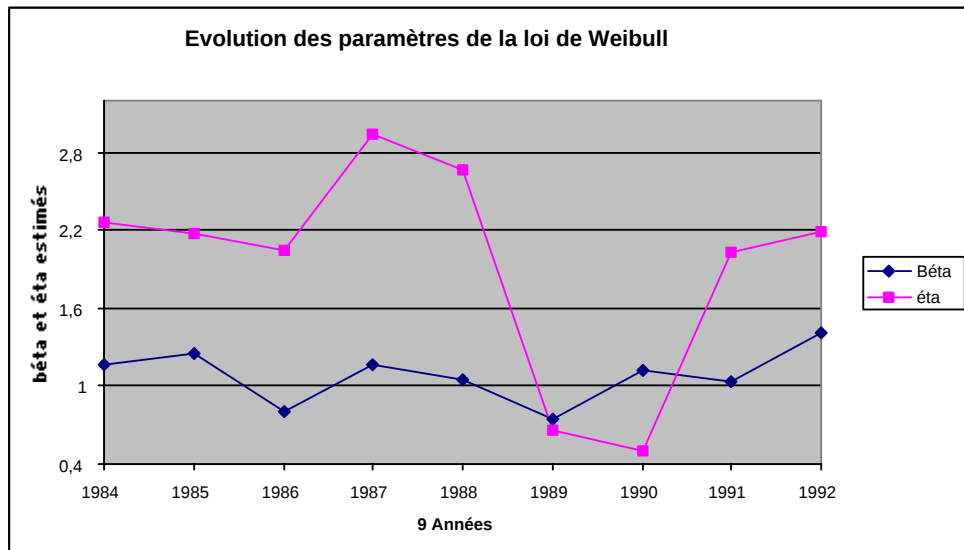


Figure 32 - Evolution des paramètres *éta* et *béta* de la loi de Weibull.

- les saisons 1986/87 et 1989/90 sont singulières et caractérisées par un coefficient de variation $CV(\text{éta})$ élevé indiquant une forte variabilité de l'estimation de la capture moyenne ces années-là ;
- Les saisons de pêche comprises entre 1984 et 1988 sont caractérisées par un coefficient *éta* (paramètre d'échelle) élevé qui montre que le niveau des prises par sortie de civelles est fort ;
- Le *béta* estimé varie entre 0,75 et 1,25 avec des coefficients de variation estimés de l'ordre de 7. Par suite $\text{béta} = 1$ est toujours recouvert par l'intervalle $[\hat{\beta} - 3\hat{\sigma}(\hat{\beta}); \hat{\beta} + 3\hat{\sigma}(\hat{\beta})]$. Les variations de *béta* ne semblent pas significatives en regard des valeurs des coefficients de variation des ces estimateurs. Il n'est pas absurde de faire l'hypothèse d'une constance de la capturabilité au cours des saisons de pêche.

• Si l'on agrège toutes les années de la période considérée alors la valeur de *béta* est de $\hat{\beta} \approx 0,928$, $\hat{\sigma}(\hat{\beta}) \approx 0,0325 \Rightarrow I.C. \approx [0,831 ; 1,026]$; l'intervalle de confiance à 95% recouvre la valeur théorique 1 ce qui est en cohérence avec le point précédent. Dans ces conditions, *éta* le paramètre d'échelle renseigne sur le niveau moyen des CPUE.

• Une modélisation exponentielle ($\beta = 1$: stabilité temporelle de la ressource en civelles) semble envisageable, mais nécessite une analyse plus fouillée, en particulier pour qualifier les cas zéro ;

• Actuellement, les cas zéro interdisent de conclure entre: $\beta > 1$ (diminution des captures en civelles, fonction de hasard monotone croissante), $\beta = 1$ (stabilité temporelle de la ressource, dite aussi absence de mémoire du système) ou $\beta < 1$ (augmentation des captures de civelles, fonction de hasard monotone décroissante) ;

• Un modèle adéquat de type exponentiel ($\beta = 1$) consisterait à modéliser la variabilité observée de la moyenne ou, dit de façon équivalente, du coefficient d'échelle éta (η) :

$E(T) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ dit le temps moyen séparant deux captures d'une civelle par unité d'effort. *Eta* renseigne donc de façon indirecte sur la quantité de civelles pêchées par unité d'effort.

4.5.8. Modélisations dynamiques de la relation du logarithme de CPUE à des prédicteurs.

Dans ce paragraphe, nous reprenons la modélisation des captures de civelles, en introduisant maintenant des effets décalés potentiels des variables influentes.

➤ Modèle de base : absence de prédicteurs

Si l'on ne s'intéresse qu'à l'évolution propre de la série *LCPUE*, sans action potentielle de prédicteurs, on retient le modèle ARMA(2,1) suivant, afin de permettre une comparaison avec les modèles autorégressifs présentés dans le paragraphe 4.5.4 (en particulier, celui du type AR(3)=ARMA(3,0) qui possède le même nombre de paramètres) :

```
Variable : LCPUE          Regressors : NONE
Non-seasonal differencing : 0    No seasonal component in model.
Parameters : AR1  AR2  MA1  CONSTANT
Split group number : 1 (absence de cas zéro) Series length : 1055 , No missing data.
Adjusted sum of squares = 785,58217
Estimation terminated at iteration number 8 because : Sum of squares decreased by less than ,001 percent.
```

FINAL PARAMETERS :

```
Number of residuals 1055
Standard error      ,8321322
Log likelihood      -1301,5906
AIC                 2611,1811
SBC                 2631,0263
```

Analysis of Variance :

	DF	Adj. Sum of Squares	Residual Variance
Residuals	1051	728,42535	,69244399

Variables in the Model :

	B	SEB	T-RATIO	APPROX. PROB.
AR1	1,3893557	,04825757	28,790418	,00000000
AR2	-,4053089	,04383002	-9,247289	,00000000
MA1	,8630451	,03286448	26,260723	,00000000
CONSTANT	,0825513	,21394118	,385860	,69967858

Covariance Matrix :

	AR1	AR2	MA1
AR1	,00232879	-,00210025	,00128674
AR2	-,00210025	,00192107	-,00110191
MA1	,00128674	-,00110191	,00108007

Correlation Matrix :

	AR1	AR2	MA1
AR1	1,0000000	-,9929627	,8113311
AR2	-,9929627	1,0000000	-,7649777
MA1	,8113311	-,7649777	1,0000000

Regressor Covariance Matrix :

	CONSTANT
CONSTANT	,04577083

➤ **Modèle d'autorégression : introduction des prédicteurs**

Une tentative d'élargissement des prédicteurs retenus est faite. Au préalable un travail de recodage a été entrepris afin de construire un indicateur sensible et non discrétisé de lunaison.

Les objectifs poursuivis par cette construction sont de :

- ❑ Corriger des erreurs trop flagrantes dans le codage (ex : lunaison sur 36 jours !);
- ❑ Corriger l'effet « calendrier banal » : Observation d'une alternance 29 et 30 jours ;
- ❑ Proposer un codage « plus continu » d'un phénomène périodique :
 - Transformée en jours depuis la nouvelle lune ;
 - Transformée de « linéarisation des effets » . $\sin\left(2\pi\frac{k}{J} + \varphi_J\right)$ et $\cos\left(2\pi\frac{k}{J} + \varphi_J\right)$;
- ❑ Redonner une variabilité à cette variable potentiellement influente.

➤ **Le modèle final retenu :**

Variable : LCPUE

Regressors: PLUIE Y89 Y90 COSLUNE L2DEBIT L1MAREE :

Non-seasonal differencing : 0 No seasonal component in model.

Parameters : AR1 MA1 PLUIE Y89 Y90 COSLUNE L2DEBIT L1MAREE
CONSTANT

Split group number : 1 Series length: 1055 No missing data.

Termination criteria : Adjusted sum of squares = 708,42684

Conclusion of estimation phase. Estimation terminated at iteration number 3 because : Sum of squares decreased by less than ,001 percent.

FINAL PARAMETERS :

Number of residuals 1055

Standard error ,81094033

Log likelihood -1271,5983

AIC 2561,1966

SBC 2605,8483

Analysis of Variance :

	DF	Adj. Sum of Squares	Residual Variance
Residuals	1046	688,14433	,65762422

Variables in the Model :

	B	SEB	T-RATIO	APPROX. PROB.
AR1	,7451792	,03545812	21,015759	,00000000
MA1	,2885262	,05102941	5,654116	,00000002
PLUIE	,0072440	,00314966	2,299935	,02164809
Y89	-1,4379539	,20954113	-6,862394	,00000000
Y90	1,5408657	,20938680	-7,358944	,00000000
COSLUNE	,1657233	,06563534	2,524910	,01171972
L2DEBIT	-,0006548	,00016269	-4,025076	,00006106
L1MAREE	,0054920	,00177742	3,089892	,00205518
CONSTANT	,1854434	,15409709	1,203419	,22908636

Covariance Matrix :

	AR1	MA1
AR1	,00125728	,00147387
MA1	,00147387	,00260400

Correlation Matrix :

	AR1	MA1
AR1	1,0000000	,8145587
MA1	,8145587	1,0000000

Regressor Covariance Matrix :

	PLUIE	Y89	Y90	COSLUNE	L2DEBIT	L1MAREE
CONSTANT						
PLUIE	,00000992	,00002623	-,00000675	,00000134	,00000004	,00000025
Y89	,00002623	,04390749	,00774852	-,00063903	,00000407	,00000153
Y90	-,00000675	,00774852	,04384283	,00017785	,00000299	,00001112
COSLUNE	,00000134	-,00063903	,00017785	,00430800	-,00000023	-,00000451
L2DEBIT	,00000004	,00000407	,00000299	-,00000023	,00000003	-,00000001
L1MAREE	,00000025	,00000153	,00001112	-,00000451	-,00000001	,00000316
CONSTANT	-,00007365	-,00741966	-,00762337	,00025653	-,00000747	-,00021502

Regressor Correlation Matrix :

	PLUIE	Y89	Y90	COSLUNE	L2DEBIT	L1MAREE
CONSTANT						
PLUIE	1,0000000	,0397464	-,0102314	,0064587	,0819947	,0453840
Y89	,0397464	1,0000000	,1766039	-,0464635	,1194258	,0041143
Y90	-,0102314	,1766039	1,0000000	,0129409	,0878221	,0298803
COSLUNE	,0064587	-,0464635	,0129409	1,0000000	-,0211124	-,0386309
L2DEBIT	,0819947	,1194258	,0878221	-,0211124	1,0000000	-,0486184
L1MAREE	,0453840	,0041143	,0298803	-,0386309	-,0486184	1,0000000
CONSTANT	-,1517448	-,2297842	-,2362671	,0253634	-,2980376	-,7850565

Ce modèle apporte une information additionnelle significative par rapport au modèle sans variable explicative, comme le montre la comparaison statistique des vraisemblances ou des coefficients SBC. De plus, un problème de redondance entre paramètres estimés subsiste encore. Ce modèle est donc simplifiable. Du point de vue des aspects positifs, cette spécification améliore, sans la rendre très bonne, l'adéquation des résidus à un modèle de répartition gaussienne, outre ce fait de dissymétrie rémanente¹⁵ (figure 33).

Les modèles linéaires présentés montrent bien le caractère particulier des saisons de pêche 89/90 et 90/91 (faibles niveaux de CPUE) et décrivent l'environnement influant sur la quantité de civelles par sortie comme une fonction linéaire du niveau de pluie, du cosinus de la lunaison, de la marée de la veille (*L1MAREE*) et du débit de l'Adour de l'avant veille (*L2DEBIT*). Les deux derniers sont décalés. Ce décalage avec la marée pourrait être expliqué par le temps de migration depuis la pénétration dans l'estuaire jusqu'au site de capture (cf. § 8 simulation comportementale) et pour ce qui concerne le débit, le décalage sur 2 jours pourrait être lié à un effet d'appel des civelles par le panache d'eau douce à l'embouchure puis à une reprise un jour plus tard de ces migrants par le flot qui les transportent sur le site de capture.

¹⁵ un deuxième modèle est proposé et décrit en annexe 2

P-Plot Gaussien : résidus du modèle final
Régression dynamique de LCPUE, résidus AR(2)

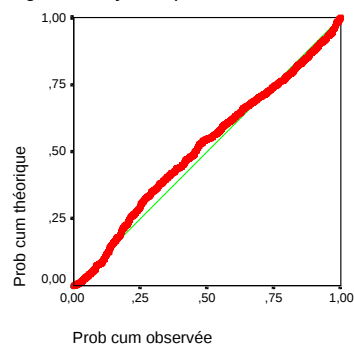


Figure 33 - Ajustement des résidus à une loi gaussienne.

5.1. Collecte des données.

Cette collecte a été réalisée selon un protocole expérimental qui a été éprouvé et validé lors des premières campagnes. Il prend en compte le schéma comportemental de migration des civelles dans l'estuaire (en particulier sondage en surface et en pleine eau dans l'estuaire), le modèle hydrodynamique (prise en compte de la vitesse de propagation de la marée vers l'amont) et l'hétérogénéité possible du flux de migrants dans la section transversale du fleuve (délimitation de trois transects parallèles aux berges au sein de la station d'échantillonnage.

5.1.1 Description du matériel utilisé.

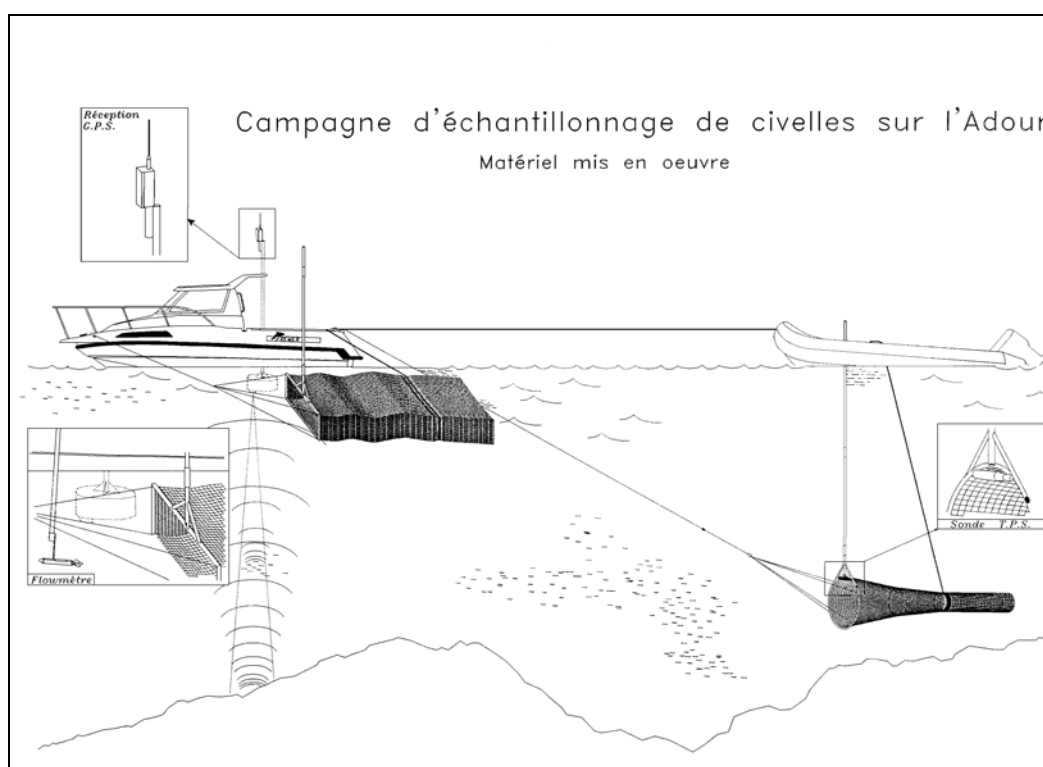


Figure 34 – Schéma descriptif des matériels de prélèvement et de positionnement utilisés

Les prélèvements s'effectuent à l'aide de deux embarcations motorisées (figure 34). Trois transects par station, un sur chaque rive et un au milieu de l'estuaire, déterminent la répartition transversale des individus en surface et au fond. Chaque transect dure 5 mn, le cap et la vitesse sont constants (transect parallèle à l'axe du fleuve à une vitesse de l'ordre de 1 noeud).

Le positionnement du bateau est assuré par un GPS de type NR58²⁵ équipé d'une antenne de correction différentielle dans la bande MF et HF (moyenne et haute fréquence). Une balise permet de traiter les corrections reçues dans la bande des ondes UHF²⁶. Elle augmente la précision sur le positionnement (entre 0,5 à 1 m) grâce à la réception d'une station de référence des services maritimes de la Direction Départementale de l'Équipement. Cette station se localise à l'embouchure de l'estuaire de l'Adour. Un traceur de route, logiciel MaxSea © 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. Le GPS précédemment décrit est connecté au traceur de route pour la localisation du bateau sur la carte.

²⁵ NR58 : 5 canaux de réception

²⁶ UHF : 1575,42 MHz

➤ Prélèvements en surface

Ces prélèvements sont réalisés depuis un bateau de 6,8 m équipé d'un moteur de 100 CV. Il abrite l'appareillage électronique permettant la collecte des paramètres environnementaux caractérisant les captures. Le tamis est immergé depuis le bateau à l'aide d'un treuil. Il s'agit d'un tamis circulaire de 0,7 m¹ de diamètre instrumenté par un débitmètre (« flowmetre »). La profondeur du tamis est de 3,6 m. La poche ainsi formée a un maillage carré de 1 mm. Il se positionne sur le bâbord du bateau.

➤ Prélèvements en profondeur

Un bateau pneumatique de 4 m de long, tracté par le bateau principal, permet l'immersion d'un deuxième tamis. Celui-ci, de 0,7 m² de diamètre, assure le prélèvement des individus en profondeur. Il est emmanché et tenu à la main depuis le pneumatique. Il peut être immergé jusqu'à 7 m de profondeur.

La profondeur du tamis est de 3,6 m. Le cône ainsi formé a un maillage carré de 1,6 mm à l'entrée du filet et de 1 mm au fond. Une sonde mesure la température, la salinité et la profondeur. Elle se situe à l'entrée du filet et caractérise les conditions du milieu au moment des captures. L'engin de pêche est immergé à la main, le plus près possible du fond en fonction de la topographie du site. La sonde indique exactement dans quelle tranche d'eau les civelles ont été prélevées.

➤ Bathymétrie

Un sondeur numérique à haute résolution de type OSSIAN 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 (cf. figure 34). Le profil du fond ainsi que les échos des différentes cibles rencontrées sont enregistrés en continu pendant la sortie.

Ces fichiers peuvent être traités en écho-intégration 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.

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

Lors de la première campagne (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 TVG²⁸ est de 20logR (portée de 967 m). Lors de la deuxième campagne 1997/1998 et pour celles effectuées ultérieurement, un transducteur de 120 kHz avec une durée d'impulsion de 0,3 ms est utilisé parallèlement en bifréquence. 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 (*)

L'interface de l'ensemble des appareils de mesures et de positionnement s'effectue par l'intermédiaire d'une unité centrale où transitent les informations caractérisant les traits de chalut et les captures : durée, coordonnées géographiques, profondeur, vitesse surface, vitesse fond, cap du bateau. Le système de référence cartographique utilisé est le WGS84 (World Geodesic System).

¹ Pour la première campagne et afin de tester différents matériels de prélèvements, nous avons utilisé un tamis rectangulaire, comme indiqué à la figure 7, qui a été remplacé pour les campagnes d'estimation de l'abondance par un tamis circulaire de 0,7m de diamètre.

² Lorsque les densités sont particulièrement faibles dans l'estuaire, il peut être utilisé un tamis plus grand de 1,2 mètres de diamètre.

²⁸ Gain variable dans le temps, compense les pertes de propagation du son dans l'eau.

* Des essais ont été faits pour estimer la biomasse à partir de l'utilisation de l'acoustique. Ils ont été concluants (cf Sanchez et al, 2000), mais ne permettent pas à certaines périodes la discrimination de matériel biologique insonifié.

5.1.2 Localisation géographique des prélèvements³.

Lors des 2 premières campagnes pour évaluer le comportement des civelles dans la colonne d'eau, nous avons effectué des prélèvements à diverses stations échelonnées entre le Pont de l'autoroute **(1)** et la limite amont de la zone maritime : le pont d'Urt **(2)** (tableau 23).

Tableau 23 - Répartition des stations échantillonnées dans l'estuaire d'aval en amont.
(Campagnes 1996/1997 et 1997/1998)

	Nom	Coordonnées GPS ¹⁹	
Station -2*	Amont Pont Saint-Esprit	43°29'40''N	1°27'90''O
Station -1*	Aval Pont de l'Autoroute	43°29'13''N	1°27'00''O
Station 1	Produits chimiques	43°29'30''N	1°26'30''O
Station 2	Ile de Lahonce	43°29'80''N	1°23'10''O
Station 3	Aval Ile de Broc	43°29'75''N	1°21'85''O
Station 4	Aval Ile de Berenx	43°30'15''N	1°20'30''O
Station 5	Le Sablot	43°30'23''N	1°18'52''O
Station 6**	Urt Amont	43°30'N	1°17'15''O

* stations échantillonnées uniquement lors de la campagne 1997/1998

** station échantillonnée uniquement lors de la campagne 1996/1997

Afin de rendre l'échantillonnage efficace en vue d'une estimation de biomasse, nous avons échantillonné les flux de civelles en migration sur une station fixe de l'Adour. Cet endroit correspond à un lieu de passage obligatoire des poissons qui migrent vers l'amont (présence d'un chenal unique). Le recueil de données a été effectué à un endroit où la largeur du fleuve est plus étroite qu'ailleurs et dans une ligne droite pour éviter un comportement particulier des poissons dû à des différences de courants liés à la configuration du lit du fleuve.

Les stations sélectionnées se situent également dans une zone où l'activité de pêche est présente et qui est localisée à peu près au milieu de la zone maritime.

Durant la campagne 1998/1999 l'échantillonnage s'est déroulé au niveau du lieu-dit Bezin (figure 35) et durant la saison 1999/2000 juste à l'aval de l'île de Bérenx. Cette station présente le même avantage que la précédente mais, à cet endroit, le fleuve est plus étroit ce qui facilite la prospection.

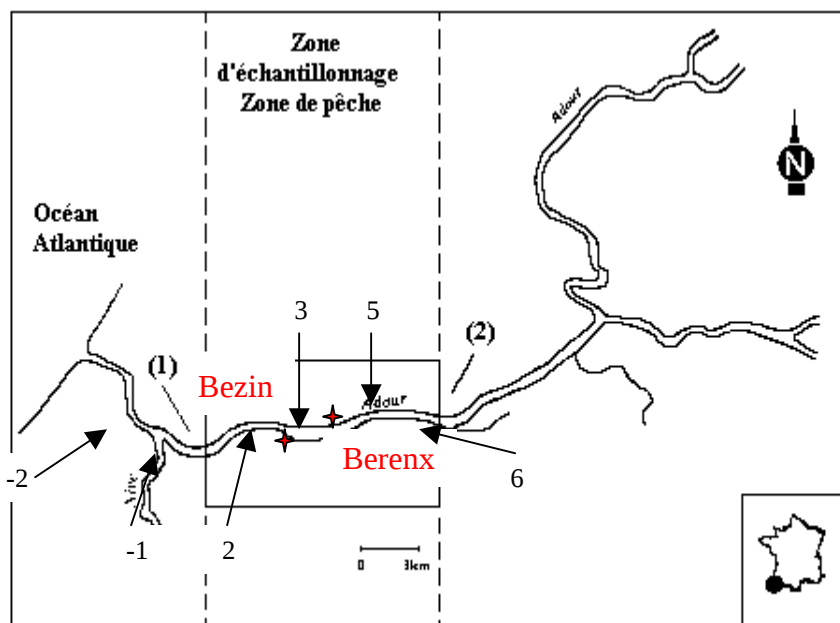


Figure 35 - Zones d'échantillonnage à poste fixe durant la campagne 1998/99 et celle de 1999/2000.

³ Une position cartographique détaillée et un profil bathymétrique des stations d'échantillonnage sont donnés en annexe 3.

¹⁹ Global Positionning System.

Tableau 24– Récapitulatif des traits effectués et du matériel biologique récolté par campagne scientifique

Saison	Nb de trait	Pds tot fd (g)	Nb fond	Pds tot surf (g)	Nb surf	Total sortie
96-97	212	539,9		219,2		5
97-98	694	957,1	2321	609,0	1358	28
98-99	270	278,4	880	619,5	1941	16
99-00	207	942,9		1174,7		10
00-01	225	199,4	599	420,8	1221	11

5.1.3 Plan d'échantillonnage et constitution des données.

Le protocole d'échantillonnage suivi est détaillé par de Casamajor (1998). Les données utilisées sont issues de prélèvements par pêche effectués approximativement du début à la fin du flot, la nuit uniquement puisque les civelles ont un comportement lucifuge.

Trois transects successifs sont prospectés (figure 36) : l'un près de la rive droite (RD), l'autre au milieu du fleuve (M) et le dernier près de la rive gauche (RG). Chacun donne lieu à 5mn de pêche à contre-courant.

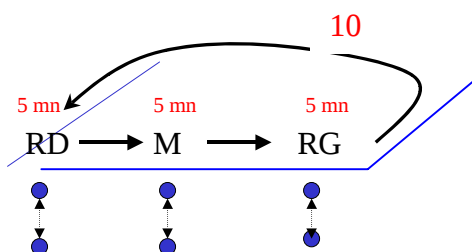


Figure 36 – Positionnement spatio-temporel des prélèvements successifs effectués lors des différentes campagnes d'échantillonnage = 1 passage (donc environ 30 mn). (les • représentent les prélèvements)

Les prélèvements sont effectués simultanément en surface et en pleine eau sur chaque transect à l'aide de tamis circulaires de 0,65 m de diamètre, soit une surface de 0,33 m² (contre 1,13 m² pour un tamis professionnel de 1,20 m de diamètre).

Une densité de civelles (en g/100m³) est ensuite calculée en chaque point de prélèvement à partir du poids capturé et du volume d'eau filtrée lors de chaque trait de tamis qui, lui-même, est calculé à l'aide de relevés de sonde qui mesurent la vitesse de déplacement de l'engin durant le chalutage.

La configuration globale des prélèvements en largeur et en profondeur à chaque instant (figure 37) peut se schématiser comme suit :

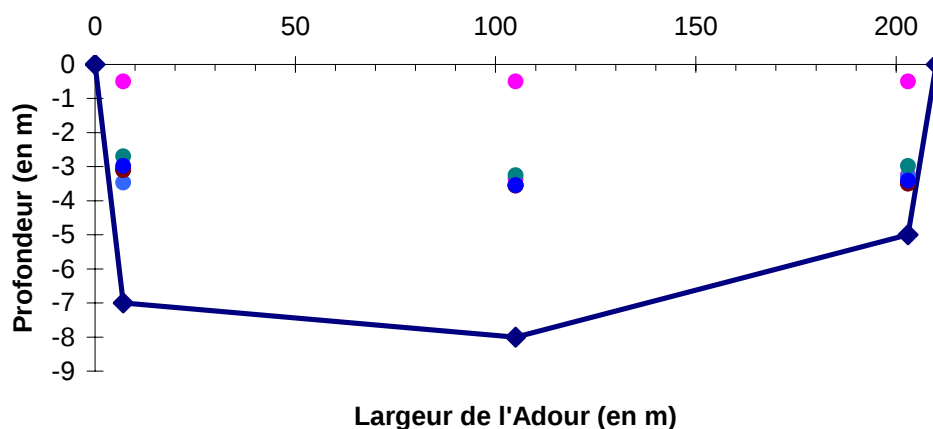


Figure 37 - Allure moyenne de la tranche d'eau et des prélèvements successifs effectués le 14/01/1999 au niveau de la station d'échantillonnage de Bezin (0 en abscisse = rive droite ; 0 en ordonnée = surface).

5.2 Première méthode d'estimation utilisée et étude de la variabilité de ces estimations.

L'objectif de ce travail consiste à estimer la quantité de civelles présente lors d'une sortie de pêche donnée qui se déroule pendant un cycle de marée montante nocturne uniquement. Nous fournirons également une échelle de variation des estimations proposées, correspondant à des intervalles de confiance pour chacune.

La démarche présentée ci-dessous se fonde sur différentes hypothèses de travail simplificatrices que nous sommes contraints de poser au vu du manque d'informations que nous avons en particulier sur l'aspect spatio-temporel du phénomène : les civelles se déplaçant vers l'amont en occupant toute la largeur du fleuve, pendant une période de temps déterminée. Ces deux paramètres sont difficiles à contrôler simultanément et posent séparément déjà des problèmes méthodologiques :

- Concernant la gestion du temps, le fait de se déplacer d'un transect à un autre en interrompant le chalutage fait que pendant ces déplacements nous avons des « périodes » d'ombre durant lesquelles le phénomène a continué d'évoluer, sans que nous ayons d'idée sur cette évolution. Nous sommes donc contraints à faire des « extrapolations » pour pouvoir combler ces vides temporels.
- Concernant 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 petite partie du fleuve est en effet échantillonnée et nous devons là aussi faire des hypothèses de travail pour pouvoir combler ces vides spatiaux.

La première étape dans l'élaboration d'une méthode de calcul des estimations de biomasse de civelles est l'identification des paramètres entrant dans la variabilité de celle-ci et de ceux liés la méthode de calcul des estimations elle-même. Deux grands types de paramètres ont été identifiés :

- Paramètres liés à la technique d'échantillonnage et à des facteurs extérieurs 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. Cela pour chaque point d'échantillonnage représenté sur la figure 37.
- 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.

On voit ainsi que d'éventuelles erreurs de mesure sur les valeurs de courant *in situ* se répercutent sur le calcul des densités de civelles et de ce fait sur la biomasse. Tous les modèles de répartition spatiale et d'extrapolation temporelle établis *a priori* influent de même sur le calcul de la biomasse. Il est, par conséquent, nécessaire d'évaluer et de quantifier la variabilité de ces paramètres pour ensuite en cerner l'impact sur les estimations de biomasse.

5.2.1. Etude du courant : évaluation de l'erreur de mesure de la vitesse du flot.

L'objectif est d'établir un modèle stochastique de variation de la vitesse du flot en un point, en fonction du temps et pour un jour donné.

On suppose 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.

Pour un jour donné, la vitesse du courant de flot $v_i(t)$ au niveau du i -ème transect est modélisée par

une équation de la forme :
$$v_i(t) = c_i \sin\left(\frac{\pi}{a}(t + b)\right) + \varepsilon,$$

où,

i est un indice qui désigne la position en largeur ($i=1=RD$, $i=2=M$ et $i=3=RG$),
 a représente la durée du flot,
 c_i représente l'intensité maximale de la vitesse de flot durant cette période,
 b représente l'heure de début du flot,
 t représente le temps,
 ε est l'erreur de mesure entre les données de terrain et le modèle sinusoïdal.

Un tel modèle permet de calculer, de façon continue, à chaque instant t la vitesse du courant. L'erreur de mesure de la vitesse du courant est donc égale à la variance de l'erreur ε dans le modèle ci-dessus.

5.2.2 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 en un point, en fonction de la vitesse du courant de flot, un jour donné. Les connaissances sur le comportement des civelles et l'observation des diagrammes densités par vitesse (cf. figure 38), nous ont conduit à une modélisation de la densité en fonction de la vitesse du flot. Nous allons procéder en deux étapes :

- **Etape 1 :** recalculer 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) ;
- **Etape 2 :** tenter d'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'hétéroscédasticité entre ces deux variables qui apparaissent sur le graphique ci-dessous nous amènent à considérer une transformation $\ln(.)$ (figure 39).

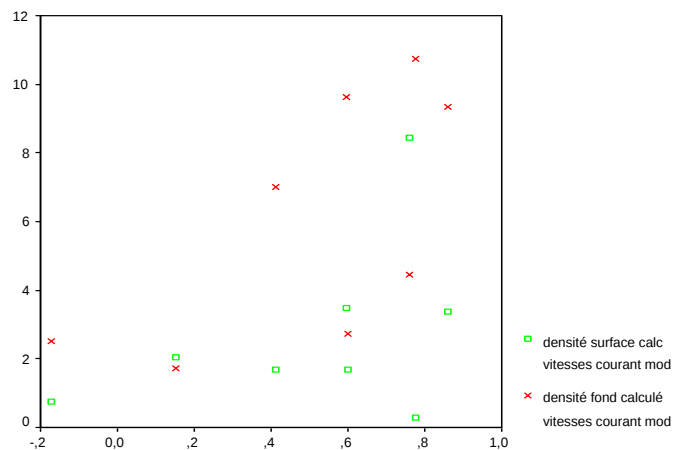


Figure 38 - Relation entre les densités surface et fond et la vitesse du courant modélisée pour la sortie du 09 décembre 1999.

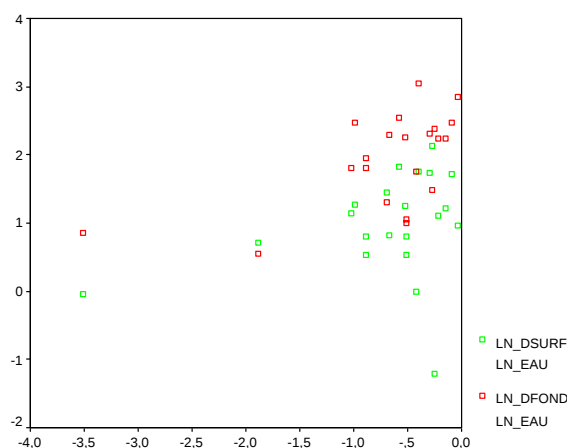


Figure 39- Relation entre les ln de densités surface et fond et la vitesse du courant modélisée pour la sortie du 09 décembre 1999.

Pour modéliser la dépendance entre ces deux variables (densités fond et surface recalculées d_{ij} et vitesse du courant modélisée v_i), nous utilisons le modèle linéaire suivant :

$$\ln[d_{ij}] = \alpha_{ij} \ln[v_i] + \beta_{ij} + \varepsilon_{ij},$$

où,

- i est un indice qui désigne la position en largeur ($i=1=RD$, $i=2=M$ et $i=3=RG$),
- j est un indice qui désigne la position dans la colonne d'eau ($j=1=surface$; $j=2=fond$),
- t représente le temps,
- ε_{ij} est l'erreur de modèle.

L'incertitude sur la densité de civelles est donc égale à la variance de l'erreur ε_{ij} dans le modèle ci-dessus. Sur la plupart des journées observées et des modèles utilisés, l'effet vitesse du courant a été trouvé significatif.

5.2.3. Estimations journalières de la biomasse et évaluation de la variabilité de ces estimations.

➤ Principe

Les études effectuées nous donnent la possibilité de connaître le courant de flot et la densité de civelles en des points fixés de la tranche d'eau et à temps continu, d'où une extrapolation temporelle facilitée. Le problème de l'interpolation spatiale dans la tranche d'eau à partir des six points de mesure sur lesquels on estime la densité de civelles, demeure cependant.

Ne connaissant pas les gradients horizontal et vertical de la densité, différentes hypothèses ont été envisagées. Concrètement, elles se sont traduites par l'extrapolation de chacune des six valeurs de densités à une zone de découpage de la tranche d'eau de surface variable. La figure 40 présente l'un de ces découpages .

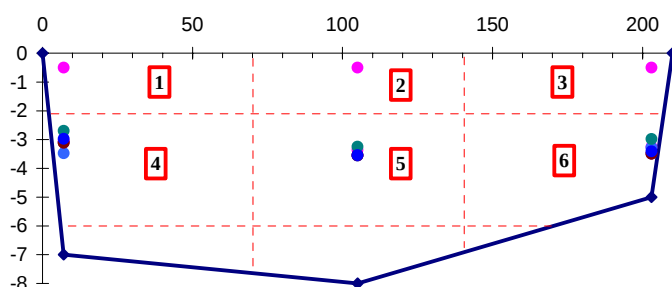


Figure 40 - Découpage (----) de la tranche d'eau en 6 zones de calcul et points de prélèvements ●.

Plutôt que d'utiliser comme bornes d'incertitude le minimum et le maximum sur les différents cas de découpage –approche très pénalisante étant donné les situations très extrêmes considérées- nous avons fait l'hypothèse bayésienne d'équiprobabilité des cas de figures envisagés.

Cette approche repose donc sur les approximations suivantes :

Hypothèse H1 : L'échantillonnage des 3 transects (RD, M et RG) a été considéré comme instantané au vu de la durée de l'échantillonnage global (de plusieurs heures). En fait, le passage d'un transect à l'autre a duré en moyenne 10mn, d'où une couverture de la section totale en 30mn. Toutefois, l'incidence de cette hypothèse est faible si l'on considère l'agrégation sur tout le flot.

Hypothèse H2 : Par manque d'informations, seules les zones numérotées de 1 à 6 sont prises en compte ; ce qui se passe très près du fond est ignoré (partie non numérotée). De plus, pour faciliter les calculs, nous avons considéré 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.

Dans les applications numériques qui vont suivre 9 différents découpages de la tranche d'eau ont été envisagés (tableau 25). Ils 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.

Tableau 25 - Découpages de la tranche d'eau testés.

Numéro du découpage	Découpage en largeur (en m)	Découpage en hauteur (en m) à partir de la surface	Niveau de gradient de civelles en largeur et en profondeur
1	40 / 130 / 40	1 / 5	Bord ++ ; surface +
2	50 / 110 / 50	1 / 5	Bord + ; surface +
3	60 / 90 / 60	1 / 5	Centre + ; surface +
4	70 / 70 / 70	1 / 5	Centre ++ ; surface +
5	40 / 130 / 40	1.5 / 4.5	Bord ++ ; surface et fond =
6	50 / 110 / 50	1.5 / 4.5	Bord + ; surface et fond =
7	60 / 90 / 60	1.5 / 4.5	Centre + ; surface et fond =
8	70 / 70 / 70	1.5 / 4.5	Centre ++ ; surface et fond =
9	40*130*40	2 / 4	Bord ++ ; fond +
10	50 / 110 / 50	2 / 4	Bord + ; fond +
11	60 / 90 / 60	2 / 4	Centre + ; fond +
12	70 / 70 / 70	2 / 4	Centre ++ ; fond +

Sous les hypothèses de travail ci-dessus, la formule utilisée permettant, pour chaque découpage, de proposer une estimation journalière de la biomasse de civelles passées dans la section du fleuve lors du flot est la suivante :

$$\hat{B} = \sum_{s=1}^6 \left[\int_{t_{\text{début}}}^{t_{\text{fin}}} d_s(t) v_s(t) dt \right] \times S_s$$

où,

s est un indice qui désigne la position dans la tranche d'eau (s=1=RD surface, s=2=M surface, s=3=RG surface, s=4=RD fond,...),
 $d_s(t)$ est la densité de civelles recalculées à l'aide des vitesses de courant corrigées,
 $v_s(t)$ est la vitesse du courant modélisée en fonction du temps,
 S_s est la surface de la zone considérée dans le découpage ci-dessus.

Vu la faible variation de la densité de civelles au cours du flot, nous effectuons le calcul ci-dessus en remplaçant en première approximation la densité $d_s(t)$ dans l'intégrale par la moyenne sur l'ensemble des passages notée $\bar{d}_s$ qui ne dépend donc plus du temps t . La formule précédente se simplifie alors de la façon suivante :

$$\hat{B} = \sum_{s=1}^6 \bar{d}_s \left(\int_{t_{\text{débüt}}}^{t_{\text{fin}}} v_s(t) dt \right) S_s = \sum_{s=1}^6 \bar{d}_s \times \frac{2}{\pi} \times c_s \times a \times S_s,$$

où, c_s et a sont des paramètres issus du modèle de courant : c correspond à l'intensité maximale et a à la durée du flot.

➤ Précision des estimations.

• **Calcul de la variance de l'estimation de biomasse pour un découpage de la tranche d'eau fixé :**

Calculer la précision de $\hat{B}$ revient à évaluer sa variance notée $V(\hat{B})$, ce qui, d'après la formule ci-dessus, se ramène à calculer la variance de $\hat{B}_s = \bar{d}_s \times 0.64 \times c_s \times a \times S_s$ notée $V(\hat{B}_s)$.

On utilise pour ce faire une formule sur le coefficient de variation qui est la suivante :

$$CV^2(\hat{B}_s) = CV^2(\bar{d}_s) + CV^2(c_s) + CV^2(a) + 2CV(\bar{d}_s, c_s) + 2CV(\bar{d}_s, a) + 2CV(c_s, a),$$

où, $CV(.)$ désigne le coefficient de variation de chaque quantité et $CV(.,.)$ un « coefficient de variation » calculé à partir de la covariance entre deux quantités.

On s'intéresse donc, d'après la formule ci-dessus, aux termes suivants :

1/ Pour l'estimation de $CV(\bar{d}_s)$, on fait l'hypothèse simplificatrice d'indépendance entre les K passages durant le flot et de constance de la variance du terme d'erreur dans le temps pour le modèle $\log[d_{ij}] = \alpha_{ij} \log[v_i] + \beta_{ij} + \varepsilon_{ij}$, d'où $V(\bar{d}_s) = \frac{1}{K} V(d_s)$. La variance de d_s peut être approchée en fonction de la variance de $\log(d_s)$ en appliquant une formule générale à $V(g(X))$, soit :

$$V(d_s) = \exp(2E(\log(d_s))) \times V(\log(d_s)) \left[1 - \frac{V(\log(d_s))}{4} \right].$$

Pour estimer $V(\log(d_s))$, les variances des résidus ont été cumulées (en tenant compte des degrés de liberté) sur l'ensemble des journées et des positions afin d'obtenir une estimation plus stable. Le passage à $CV(\bar{d}_s)$ se fait en divisant l'estimation de $[V(\bar{d}_s)]^{1/2}$ par $\bar{d}_s$. L'estimation ainsi obtenue est notée $\hat{CV}(\bar{d}_s)$.

2/ Les estimations de $CV(c_s)$, $CV(a)$ et $CV(c_s, a)$ sont obtenues en passant notamment par $V(c_s)$, $V(a)$ et $corr(c_s, a)$ évaluées dans les estimations des paramètres du modèle de courant établi avant et sont notées respectivement $\hat{CV}(c_s)$, $\hat{CV}(a)$ et $\hat{CV}(c_s, a)$.

3/ Les termes $CV(\bar{d}_s, c_s)$ et $CV(\bar{d}_s, a)$ seront négligés dans la suite. Dans la mesure où l'on raisonne ici en densité moyenne au cours du flot, on considère que ces deux termes sont de moindre importance par rapport aux autres.

Finalement, pour une position donnée s , on calcule l'estimation $\hat{V}(\hat{B}_s)$ de $V(\hat{B}_s)$ par la formule suivante :

$$\hat{V}(\hat{B}_s) = \left[\hat{CV}(\hat{B}_s) \times \hat{B}_s \right]^2,$$

et en cumulant toutes les positions, pour un découpage donné :

$$\hat{V}(\hat{B}) = \sum_{i=1}^6 \hat{V}(\hat{B}_s)$$

• **Calcul de la variance de l'estimation de biomasse en considérant l'ensemble des découpages de la tranche d'eau :**

Distinguons maintenant par un indice l , $l=1, \dots, 12$, les différents types de découpages considérés (cf. tableau 25) et soit $\hat{B}_{tot}$ l'estimation finale de la biomasse totale B_{tot} résultant de la prise en compte de tous ces découpages.

On applique l'approche bayésienne avec équiprobabilité des 9 découpages correspondant à des gradients de densité de civelles différents dans la tranche d'eau.

Soit S la variable aléatoire qui symbolise le découpage dans la tranche d'eau dont les valeurs possibles sont de probabilité $1/12$, on a :

$$E(B_{tot}) = E(E(B_{tot}/S)),$$

estimée par $\hat{B}_{tot} = \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} \hat{B}_l$ et dont la variance s'écrit :

$$V(\hat{B}_{tot}) = \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} V(\hat{B}_l) + \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} (E(\hat{B}_l) - E(\hat{B}_{tot}))^2,$$

et s'estime par :

$$\hat{V}(\hat{B}_{tot}) = \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} \hat{V}(\hat{B}_l) + \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} (\hat{B}_l - \hat{B}_{tot})^2,$$

où le premier terme découle des estimations présentées dans le point précédent.

• **Intervalle de confiance de l'estimation de biomasse journalière :**

Un intervalle de confiance à (environ) 95% de l'estimation de la biomasse journalière de civelles est donné par :

$$IC_{\approx 95\%}(\hat{B}_{tot}) = \left[\hat{B}_{tot} - 2 \times \sqrt{\hat{V}(\hat{B}_{tot})}; \hat{B}_{tot} + 2 \times \sqrt{\hat{V}(\hat{B}_{tot})} \right].$$

5.2.4. Estimations de la quantité de civelles : exemple traité – sortie du 9 décembre 1999.

➤ Evaluation de l'erreur de mesure de la vitesse du flot à l'aide d'une modélisation sinusoïdale.

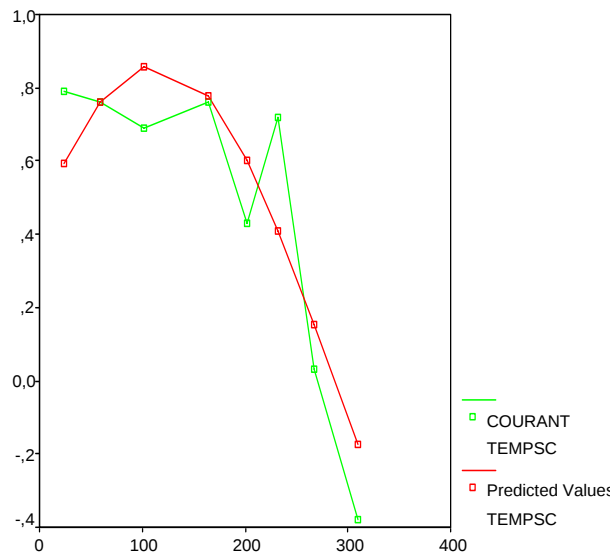


Figure 41 - Représentation de l'évolution de la vitesse du flot mesurée *in situ* en RD et de la vitesse modélisée en RD lors de la sortie de pêche du 09 décembre 1999.

Tableau 26 - modélisation du courant de flot lors de la sortie du 09 décembre 1999.

Nonlinear Regression Summary Statistics			Dependent Variable COURANT		
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square		
Regression	5	8,37244	1,67449		
Residual	19	,50776	,02672		
Uncorrected Total	24	8,88020			
(Corrected Total)	23	2,65818			
R squared = 1 - Residual SS / Corrected SS =			,80898		
Parameter	Estimate	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95 % Confidence Interval		
			Lower	Upper	
C1	,672208987	,084061869	,496265474	,848152501	
C2	,297456667	,116826552	,052935883	,541977452	
C3	,191455549	,117015400	-,053460498	,436371595	
A	346,45772595	22,886178984	298,55640282	394,35904908	
B	59,476987090	17,712809096	22,403651580	96,550322600	
Asymptotic Correlation Matrix of the Parameter Estimates					
	C1	C2	C3	A	B
C1	1,0000	-,6559	-,6788	-,2269	-,2090
C2	-,6559	1,0000	,4914	-,1166	-,1091
C3	-,6788	,4914	1,0000	-,0101	-,0026
A	-,2269	-,1166	-,0101	1,0000	,9386
B	-,2090	-,1091	-,0026	,9386	1,0000

La valeur du R^2 de 0.809 et la valeur de la variance du terme d'erreur (0.027) (tableau 26) nous révèlent que le modèle considéré s'ajuste très correctement aux données observées sur le terrain, ce qui est confirmé visuellement par la figure 42. Nous obtenons pour chaque paramètre du modèle, son estimation, la variance de cette estimation et un intervalle de confiance. D'où, le modèle d'évolution de la vitesse du

courant suivant : $v_i(t) = c_i \sin\left(\frac{\pi}{346.46}(t + 59.48)\right) + \varepsilon_i(t)$,

avec, $c_3 = 0.6722$ (intensité maximum du courant en RG), $c_2 = 0.9697$ (intensité maximum du courant M) et $c_1 = 0.8637$ (intensité maximum du courant RD).

➤ Evaluation de l'erreur de mesure sur les relevés de densités de civelles *in situ*.

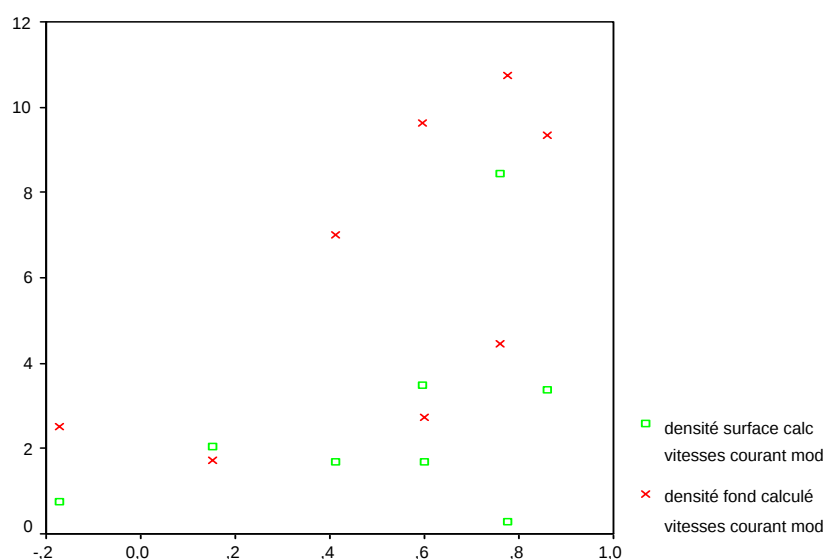


Figure 42 - Représentation de l'évolution de la densité de civelles recalculées en fonction de la vitesse de courant modélisée en RD pour la sortie du 09 décembre 1999.

On voit sur la figure 42 que la liaison entre les densités fond ou surface et le courant semble plus complexe qu'une simple relation linéaire. D'où, la transformation logarithmique des variables qui se traduit par un modèle de « type puissance » sur les variables brutes, ce qui semble mieux convenir sur cet exemple, au vu des résultats numériques présentés au tableau 27.

Tableau 27 - Qualité de l'ajustement

Récapitulatif du modèle^b

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Durbin-Watson
1	,760 ^a	,577	,493	,5249	2,863

a. Valeurs prédites : (constantes), LN_EAU

b. Variable dépendante : LN_DFOND

ANOVA^b

Modèle	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Signification
1 Régression	1,881	1	1,881	6,829	,047 ^a
Résidu	1,377	5	,275		
Total	3,259	6			

a. Valeurs prédites : (constantes), LN_EAU

b. Variable dépendante : LN_DFOND

Coefficients^a

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Signification	Corrélations		
	B	Erreur standard	Bêta			Corrélation simple	Partielle	Partie
1 (constante)	3,123	,439		7,119	,001			
LN_EAU	1,276	,488	,760	2,613	,047	,760	,760	,760

a. Variable dépendante : LN_DFOND

La valeur du coefficient R^2 révèle que le modèle linéaire sur le logarithme des variables semble convenir : l'analyse de variance nous montre un effet significatif du logarithme du courant avec un coefficient non nul. Le modèle obtenu est le suivant :

$$\ln(\text{densité_fond}_{RD}(t)) = 1.276 \times \ln(\text{vitesse_courant}_{RD}(t)) + 3.123 + \varepsilon_{RD}(t).$$

Nous disposons de trop peu de points pour approfondir une étude dans ce sens. Cependant, une étude entreprise sur toutes les localisations (RD, M et RG) et pour les densités surface et fond, nous amène à une estimation de la variance moyenne de l'erreur du modèle de 0.58², que nous interprétons comme l'erreur de calcul de la densité par rapport au courant.

➤ Estimations journalières de la biomasse et évaluation de la variabilité de ces estimations lors de la saison de migration 1999/2000.

En appliquant, cette méthode de calcul de la biomasse totale journalière explicitée sur un exemple précédemment, nous arrivons aux résultats suivants pour les différentes saisons de pêche :

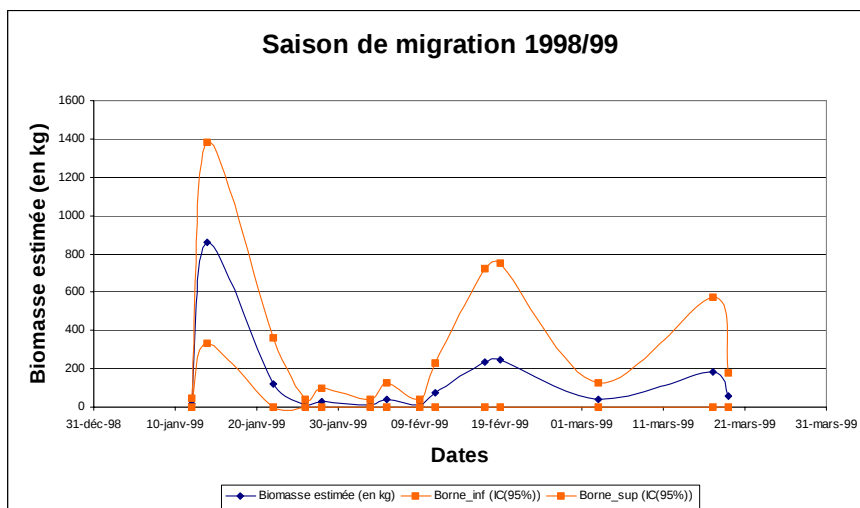


Figure 43 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et des intervalles de confiance lors de la saison de migration 1998/1999.

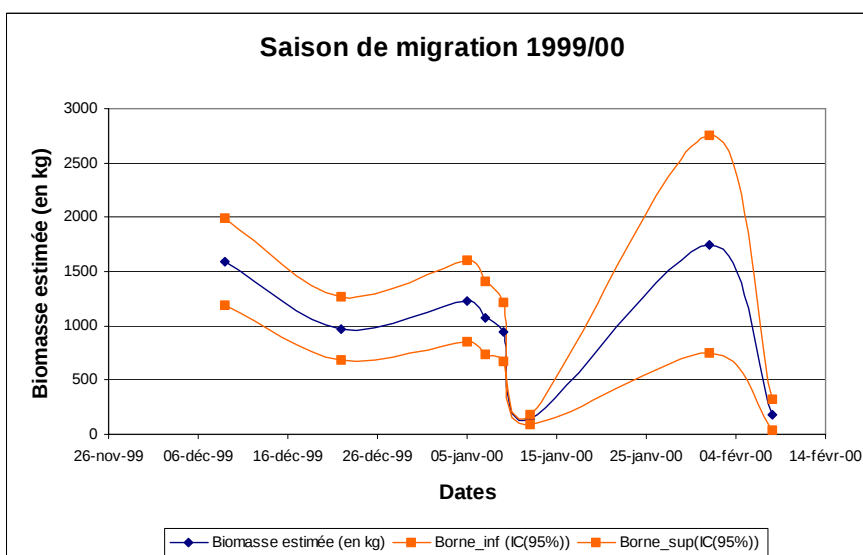


Figure 44 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et des intervalles de confiance lors de la saison de migration 1999/2000.

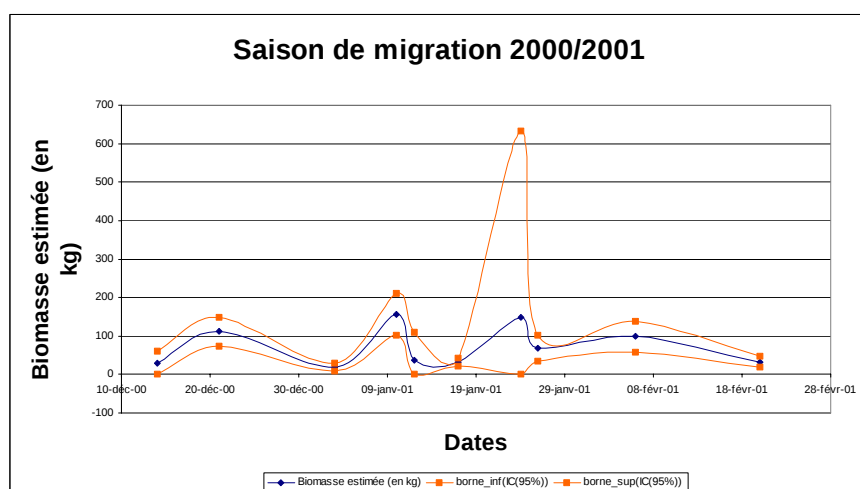


Figure 45 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et des intervalles de confiance lors de la saison de migration 1999/2001.

Les estimations proposées n'ont pas été faites sur les mêmes périodes d'une saison de pêche à l'autre et les courbes représentent le phénomène lissé. Il manque des points d'observations entre les points de mesure pour confirmer l'allure mensuelle réelle du phénomène. Les comparaisons entre les variations d'abondance sur une saison de pêche ne peuvent donc être effectuées par cette méthode⁴.

5.2.5. Comparaison avec les captures des pêcheurs professionnels de l'Adour .

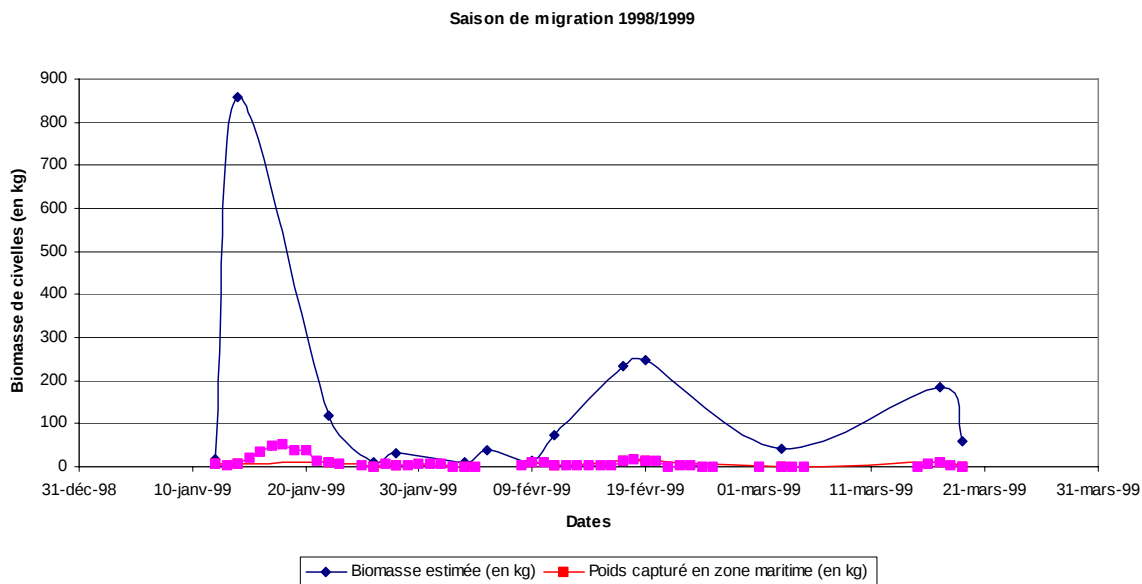


Figure 46 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et du poids de civelles capturé par la pêche professionnelle en zone maritime : saison de migration 1998/1999.

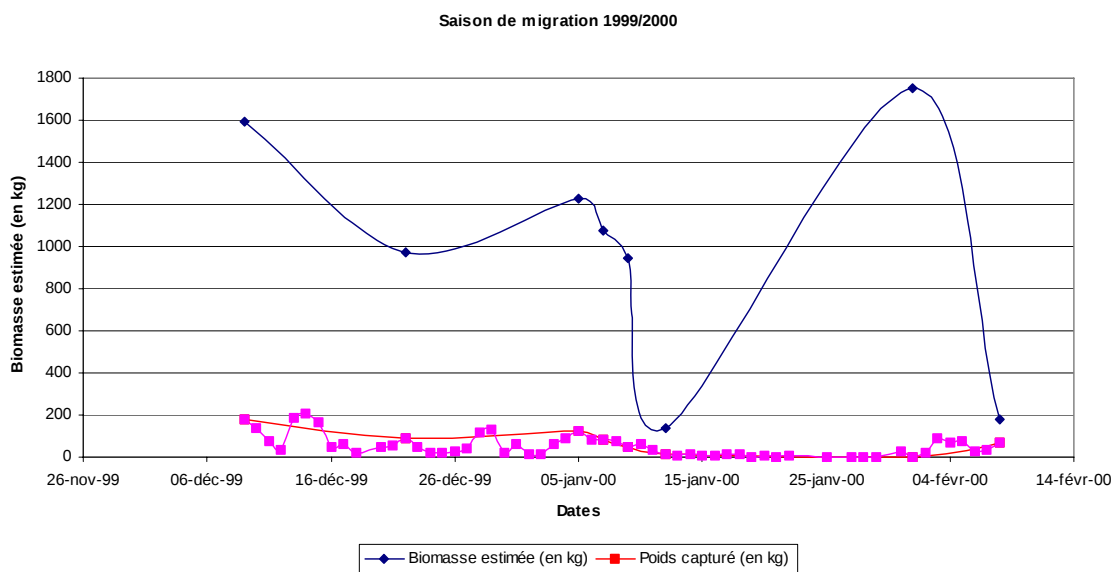


Figure 47 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et du poids de civelles capturé par la pêche professionnelle en zone maritime : saison de migration 1999/2000.

⁴ Seul un modèle composite intégrant des informations provenant de diverses sources judicieusement choisies et réparties : captures par unité d'effort de la pêche professionnelle ; conditions hydroclimatiques qui influent sur le comportement des civelles dans la tranche d'eau et donc sur leur vulnérabilité aux engins de pêche qui écrèment la plupart du temps la partie superficielle de la colonne d'eau ; dénombrement ponctuel suivant la méthodologie précédemment décrite et effectué au cours de marées réparties selon des sous-strates temporelles calquées sur le schéma général d'arrivée des flux de civelles en estuaire, est susceptible de fournir une estimation saisonnière de la biomasse entrante dans un bassin versant. Ce modèle est à l'étude, mais sort du cadre de ce projet.

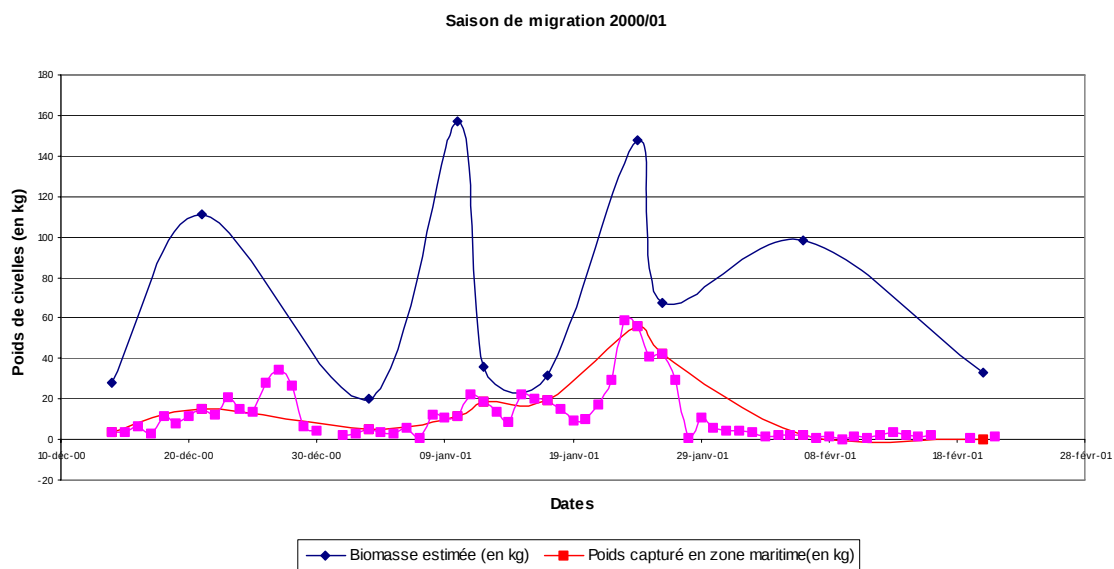


Figure 48 - Représentation de l'évolution de la biomasse estimée de civelles et du poids de civelles capturé par la pêche professionnelle en zone maritime : saison de migration 2000/2001.

Ce qui apparaît nettement sur les représentations conjointes des biomasses ponctuelles et des captures journalières pour les trois saisons de pêche considérées dans cette étude est l'absence de lien entre la variabilité des captures et celle des biomasses. Cela n'est en rien surprenant si on se reporte au comportement migratoire de la civelle dans la colonne d'eau et à l'action des facteurs hydroclimatiques sur celui-ci (cf § 3 et 4). Dans ces conditions, la capture n'est pas uniquement liée à l'accessibilité du flux (présence sur le lieu de pêche en abondance), mais aussi à sa vulnérabilité à l'engin de pêche (positionnement du flux près de la surface).

5.2.6. Evaluation du taux d'exploitation.

Les calculs de biomasse estimée ci-dessus nous permettent d'avoir une idée du taux d'exploitation de la civelle en faisant le rapport de la quantité de civelles pêchée par la pêche professionnelle dans la zone maritime sur la biomasse estimée, ramené en %. Nous obtenons ainsi un taux d'exploitation estimé pour certaines sorties de pêche en zone maritime. Les intervalles de confiance de la biomasse ne sont pas pris en compte et nous ne proposons donc pas un intervalle de confiance des taux d'exploitation. Nous nous contenterons de donner des paramètres statistiques (moyenne et médiane) des séries d'observations collectées et leur variabilité (tableau 28).

Tableau 28 - Variabilité et ordre de grandeur des taux d'exploitation observés en zone maritime de l'estuaire de l'Adour.

Taux d'exploitation estimé	Saison 1998/99	Saison 1999/00	Saison 2000/01
Moyen	16%	13%	30%
Médian	6%	9%	26%
Min au cours de la saison	1%	5%	2%
Max au cours de la saison	76%	38%	61%

Le taux d'exploitation moyen estimé varie en moyenne de 13% à 30%. Le taux médian est relativement faible si on le compare au taux moyen fortement influencé par les valeurs extrêmes. Ce taux d'exploitation ne représente pas une estimation de la valeur saisonnière car l'échantillonnage n'a pas été stratifié selon les conditions climatiques qui influent fortement sur la capturabilité (cf. § 5.2.4 et 5.2.5).

La variation des taux d'exploitation observée est importante et montre le caractère aléatoire de ce type de pêche même lorsque les biomasses en civelles sont disponibles sur les lieux de pêche. Notons toutefois que les taux particulièrement élevés sont toujours liés à des estimations de biomasse très faibles.

L'estimation de ces biomasses très faibles est sujette à caution car il se pose le problème de la puissance d'échantillonnage des outils de prélèvement lorsque les densités sont particulièrement basses (réalité du zéro de densité ?).

5.2.7. Robustesse de la méthode : sensibilité au découpage de la tranche d'eau.

Les résultats obtenus indiquent que la façon dont le découpage est effectué, a peu d'influence sur le résultat final (figure 49). Les coefficients de variation estimés par le modèle statistique sont de l'ordre de 10 à 20 % suivant les campagnes qui ont été testées. Le tableau 29 donne un exemple de résultats pour la sortie du 9 décembre et pour différents découpages de la tranche d'eau. On peut déduire de cette analyse que la méthode d'estimation proposée est peu sensible à la variation du gradient de densités dans la colonne d'eau et à l'allure de la transition entre la couche superficielle et la couche profonde.

Tableau 29 - estimation ponctuelle de biomasse suivant le découpage pour la journée du 9 décembre 1999.

Découpage	largeur	hauteur	Estimation ponctuelle de biomasse	Coefficient de variation	Min	Max
1	40*130*40	1*5	1737	0,124	1307	2167
2	50*110*50	1*5	1686	0,114	1300	2071
3	60*90*60	1*5	1634	0,107	1284	1984
4	70*70*70	1*5	1582	0,103	1256	1908
5	40*130*40	1,5*4,5	1643	0,119	1253	2033
6	50*110*50	1,5*4,5	1593	0,110	1244	1942
7	60*90*60	1,5*4,5	1543	0,103	1227	1860
8	70*70*70	1,5*4,5	1493	0,099	1198	1789
9	40*130*40	2*4	1549	0,113	1198	1900
10	50*110*50	2*4	1501	0,105	1186	1815
11	60*90*60	2*4	1453	0,098	1167	1738
12	70*70*70	2*4	1405	0,095	1139	1670

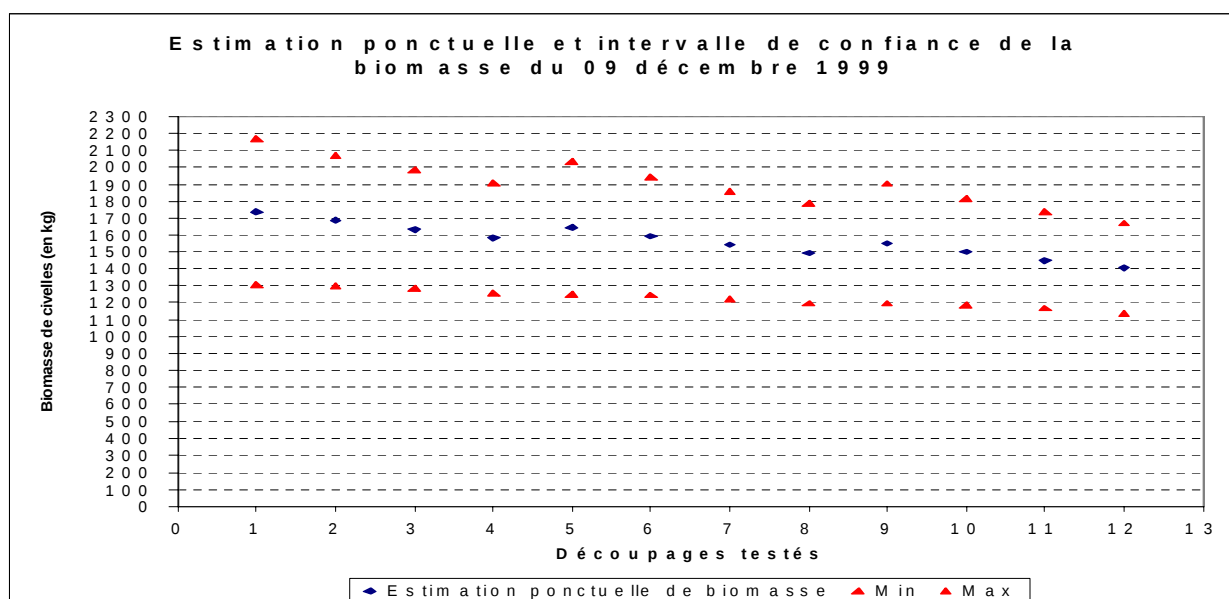


Figure 49– Influence du découpage sur l'estimation de la biomasse par marée et son intervalle de confiance (d'après Bru et Lejeune 2001).

5.2.8. Conclusions et perspectives.

Les résultats présentés constituent une approche simple dans l'estimation des flux migratoires de civelles et peuvent donner lieu à certaines critiques dont les principales sont les suivantes :

➤ Concernant le modèle densité / courant :

La vitesse du courant contient un aléa (cf. § 5.2.1) 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, 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 explicatif. Nous l'avons cependant 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 qui est notre objectif principal (dans le cas où il n'y a pas d'hétéroscédasticité flagrante pour ce terme).

➤ 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. 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.

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 de second ordre 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).

5.3. 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 .

5.3.1. 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.

5.3.2. 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 § 5.1. 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 et selon le protocole de récolte schématisé à la figure 35.

5.3.3. 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 :

a) 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.

b) L'estimation de $B(t_j)$ par une simple règle de trois et telle que :

$$\frac{B(t_j)}{V(t_j)} = \frac{P(t_j) + Pf(t_j)}{v(t_j) + vf(t_j)} \quad \text{n'est pas satisfaisante car nous ne connaissons pas } B(r_j) \text{ qui correspond à}$$

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. § 3). 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) ;
- $E(X)$ l'espérance mathématique d'une variable aléatoire X ;
- $\nabla(u)$ (resp. $\text{div}(u)$) 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 :

$$(1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x, y, z, t) - \text{div}(u_c \times c(x, y, z, t)) + \nabla(K \times \nabla c(x, y, z, t)) = 0$$

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 :

$$\begin{aligned} \nabla(u_c \times c(x, y, z, t)) &= \frac{\partial}{\partial x}(u_c \times c(x, y, z, t)) + \frac{\partial}{\partial y}(u_c \times c(x, y, z, t)) + \frac{\partial}{\partial z}(u_c \times c(x, y, z, t)) \text{ et} \\ \nabla(K \times \nabla c(x, y, z, t)) &= \\ \frac{\partial}{\partial x}(K_x \times \frac{\partial}{\partial x}(c(x, y, z, t))) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \times \frac{\partial}{\partial y}(c(x, y, z, t))) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \times \frac{\partial}{\partial z}(c(x, y, z, t))) \end{aligned}$$

avec $K = (K_x, K_y, K_z)$, vecteur des coefficients de diffusion dans les trois directions x,y,z .

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 longitudinalement⁵ par le courant. Leurs vitesses $u_c(x,y,z,t)$ 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 :

$$\frac{\partial c}{\partial t}(x, t) - \frac{\partial}{\partial x}(u_c(x, t)c(x, t)) = \frac{\partial}{\partial t}W(t, x) + \frac{\partial}{\partial x}W(x, t)$$

⁵ Elles peuvent, comme nous l'avons mentionné au § 3, avoir un comportement migratoire actif dans la colonne d'eau suivant les conditions d'éclairement.

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 négative⁶.

➤ 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

$$\begin{aligned} \text{volume d'eau échantillonné} &= (\text{vitesse bateau} + \text{vitesse courant}) * \text{durée du transect} * \text{surface} \\ &\quad \text{du filet} \\ &= \text{vitesse surface} * \text{durée du transect} * \text{surface du filet} \end{aligned}$$

La figure 50 donne un exemple de l'évolution des concentrations de civelles observées au cours d'une sortie expérimentale le 9 décembre 1999.

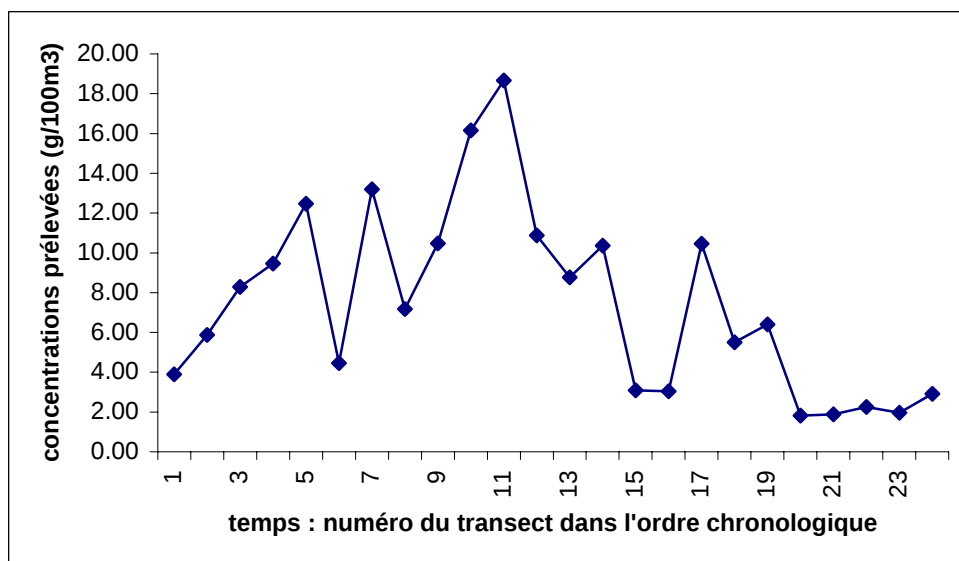


Figure 50 – Variation de la concentration de civelles en g/100m3 observée durant un cycle de marée et selon les transects numérotés de 1 à 24

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 $t_i + ds$; V_b : vitesse du bateau.

⁶ En fait inférieure à un seuil de -0,2 à 0,3 m/s.

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 :

$$dm = \pi \times R^2 \times c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds. \text{ D'où le poids total capturé pendant un transect :}$$

$$\text{masse totale} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} dm = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \pi \times R^2 \times c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds$$

$$\text{Le volume total filtré est donné par } \int_{t_i}^{t_{i+1}} \pi \times R^2 \times (vb + u(x(s), s)) ds$$

La concentration mesurée $C_{\text{modèle}}(t_i)$ est alors modélisée par le quotient *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 .**

5.3.4. 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 :

$$(\hat{\phi}, \hat{K}) = \arg \min_{\phi, K} \sum_{i=1}^N w_i \times (C_{\text{mes}}(i) - C_{\phi, K}(i))^2, \text{ les nombres } w_i \text{ étant les poids de la régression.}$$

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 stationnaires⁷.

Au vu des données, les fonctions paramètres ϕ sont choisies parmi les fonctions gaussiennes c'est à dire des fonctions du type :

$$\phi_{ampli, pente, axe, seuil}(x) = ampli \times \exp(-(pente \times (x - axe))^2) + seuil$$

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 $(f_i, i=1, \dots, N)$ que nous

appelons **jacob** par $jacob(i, n) = \frac{\partial f_i}{\partial (coeff(n))}$ pour $i = 1, \dots, N$ 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 $jacob$.

$$\text{L'estimateur de } \sigma^2 \text{ est donné par } \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (c_{modèle}(i) - c(i))^2}{N-1}.$$

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 $\hat{\sigma}^2 \times inv(F)$ 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 : $\hat{\sigma}^2 \times inv(\hat{F})$, $\hat{F}$ étant l'analogue de la matrice F pour les valeurs estimées des paramètres.

➤ 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 :

$$C_{modèle}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right) / \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} (vb + u(x(s), s)) ds \right) \text{ et}$$

$$masse(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_{i+1}} c(x(s), s) \times (vb + u(x(s), s)) ds \right)$$

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 $x : 18000 - v_b \times ds$, 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 :

⁷ dans le cas général, ce sont des processus spatio-temporels à indices discrets, par exemple ARMA spatio-temporels.

$$vr = \frac{\text{longueur du transect}}{\text{temps fin de remplacement} - \text{temps début de remplacement}}$$

$$d'où \text{massep}(t_i) = \left(\int_{t_i}^{t_i+tr} c(x(s),s) \times (vb + u(x(s),s)) ds \right)$$

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 $(\nabla p(\phi^*))^T \times V \times (\nabla p(\phi))$.

$$\nabla p(\phi^*) = \left(\frac{\partial p}{\partial \phi_1}, \frac{\partial p}{\partial \phi_2}, \dots, \frac{\partial p}{\partial \phi_N} \right) \text{ au point } \phi^*. P_\phi - P_{\phi^*} \text{ a pour matrice de variance asymptotique}$$

$\sigma^2 \times \text{inv}(F)$. 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 :

$$\sigma^2 \times (\nabla p(\phi))^T \times \text{inv}(F) \times (\nabla p(\phi)).$$

5.3.5 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 discrétiser l'équation aux dérivées partielles que nous rappelons :

$$(1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial}{\partial x}(u_c(x,t)c(x,t)) = 0 \text{ (on choisit de considérer le bruit nul).}$$

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 $[0, T] \times [0, L]$

$$(1-1) \quad \frac{\partial c}{\partial t}(x_i, t_j) \approx \frac{c(x_i, t_{j+1}) - c(x_i, t_j)}{t_{j+1} - t_j} \text{ et}$$

$$(1-2) \quad \frac{\partial}{\partial x}(u(x_i, t_j)c(x_i, t_j)) \approx \frac{u(x_{i+1}, t_j)c(x_{i+1}, t_j) - u(x_i, t_j)c(x_i, t_j)}{dx}$$

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 et

$$\text{telle que : } c(x_i, t_{j+1}) = c(x_i, t_j) + \frac{dt}{dx} \times (u_c(x_{i+1}, t_j) \times c(x_{i+1}, t_j) - u_c(x_i, t_j) \times c(x_i, t_j))$$

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 t_{debut} et t_{fin} . 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 remplacement) et la masse élémentaire prélevée, puis on ajoute cette masse au nombre $masse(i)$ qui désigne la masse prélevée au $i^{\text{ème}}$ transect ou bien à $massep(i)$ dans le cas d'un remplacement du bateau. A la fin de la simulation de la marée, on calcule la biomasse totale qui est égale à P_ϕ en faisant la somme de toutes les composantes de $masse(i)$ et de $massep(i)$.⁸

5.3.6. 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 rappellera que *conc(i)* est la concentration calculée par le modèle pour un vecteur *coeff* donné pour le transect i et tel que $\text{jacobi}(i,n) = \frac{\partial \text{conc}(i)}{\partial (\text{coeff}(n))}$

Pour estimer ces dérivées partielles, on en calcule une approximation. Par exemple, supposons qu'on veuille calculer $\frac{\partial \text{conc}(1)}{\partial (\text{coeff}(1))}$

$$\frac{\partial \text{conc}(1)}{\partial (\text{coeff}(1))} \approx \frac{\text{conc}(1) \text{ pour les paramètres } (\text{coeff} + \delta) - \text{conc}(1) \text{ pour le paramètre } (\text{coeff})}{\delta_n}$$

⁸ Calculs regroupés dans la procédure appelée *calculmasse*.

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 $F = \text{jacobi}^T \times \text{jacobi}$, puis F_{inv} par appel de la procédure *invers*.

Pour calculer la variance de la biomasse, il faut calculer le gradient du *poids total* 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 $\text{grad} = \left(\frac{\partial \text{poids total}}{\partial \text{coeff}(1)}, \dots, \frac{\partial \text{poids total}}{\partial \text{coeff}(4)} \right)$

La variance estimée $\sigma^{\wedge 2}$ est stockée dans la variable *sigmacarré*. La variance du poids est obtenue par la relation : $\text{variancepoids} = \text{sigmacarré} \times (\text{grad}^T * \text{jacobi} * \text{grad})$ où * est désigne un produit matriciel.

5.3.7. Résultats : estimation des biomasses, exemple pour la saison de pêche 1999 – 2000.

Les résultats obtenus sont synthétisés au tableau 30 et les figures 51 à 58 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 (cf § 2), 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 (cf § 6) 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 3D de civelles (cf § 8) dès que l'on pourra disposer d'un modèle hydrodynamique adéquat.

Tableau 30 : Estimation de la biomasse de civelles pour certaines des campagnes d'évaluation 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)

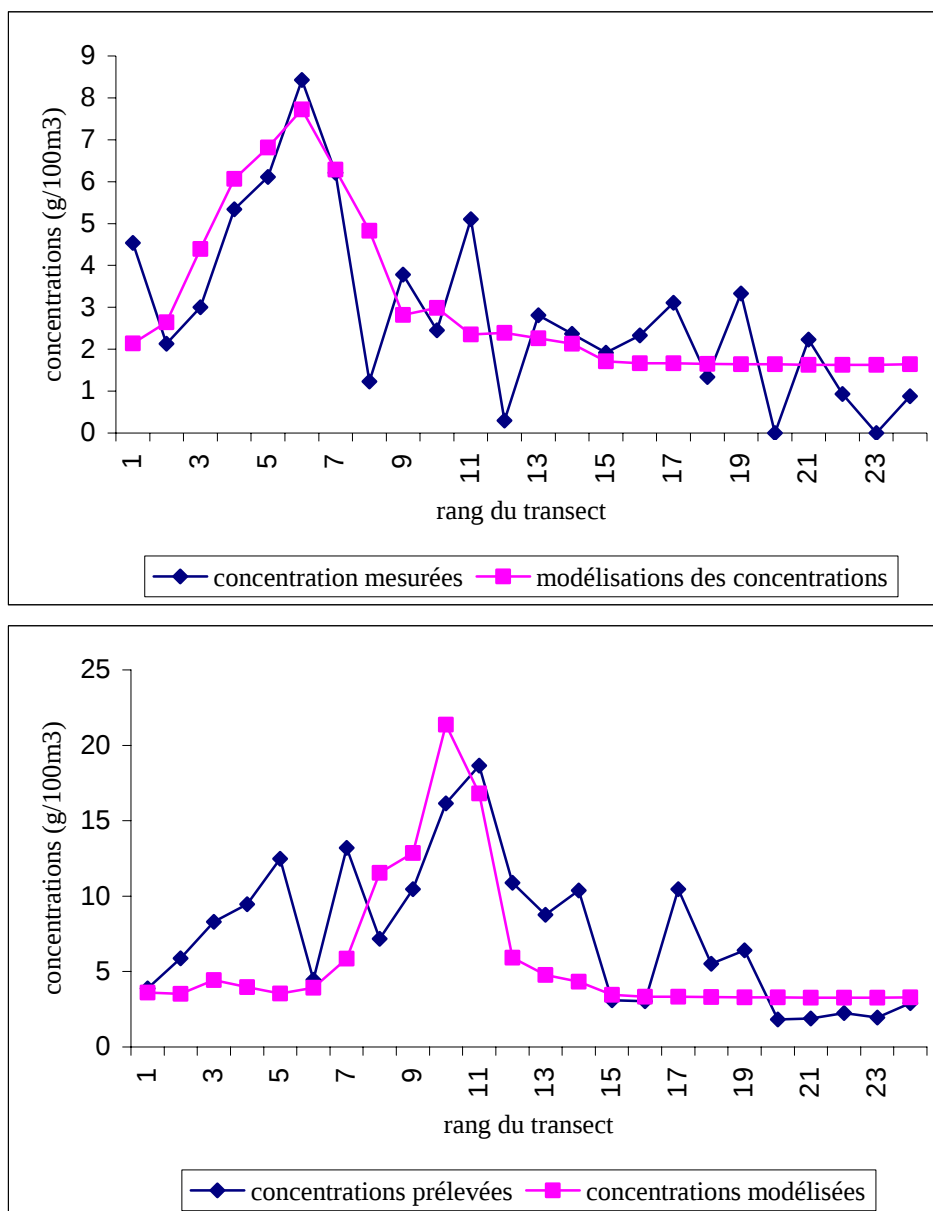


Figure 51 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 9 décembre en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

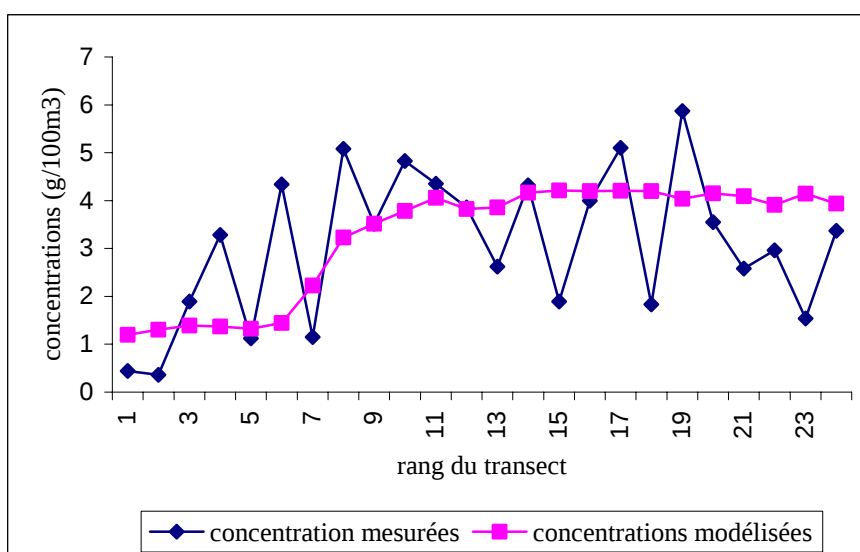
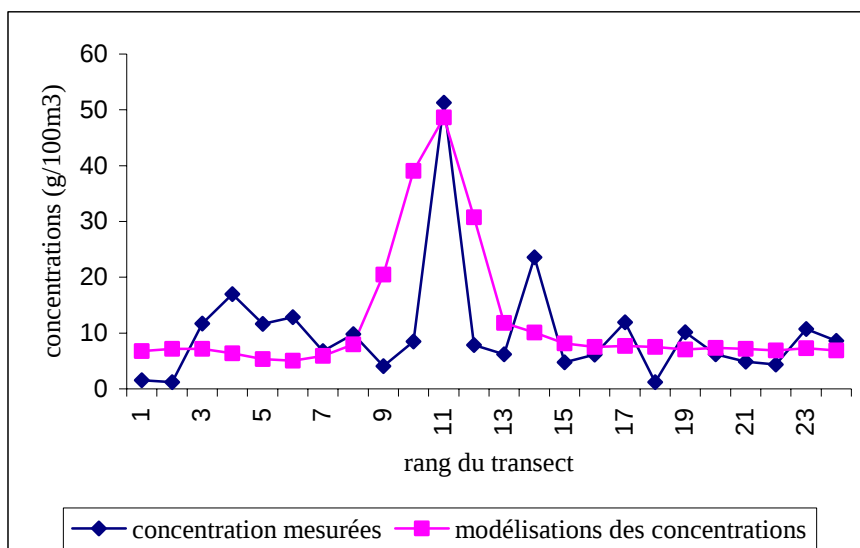


Figure 52 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 22 décembre en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

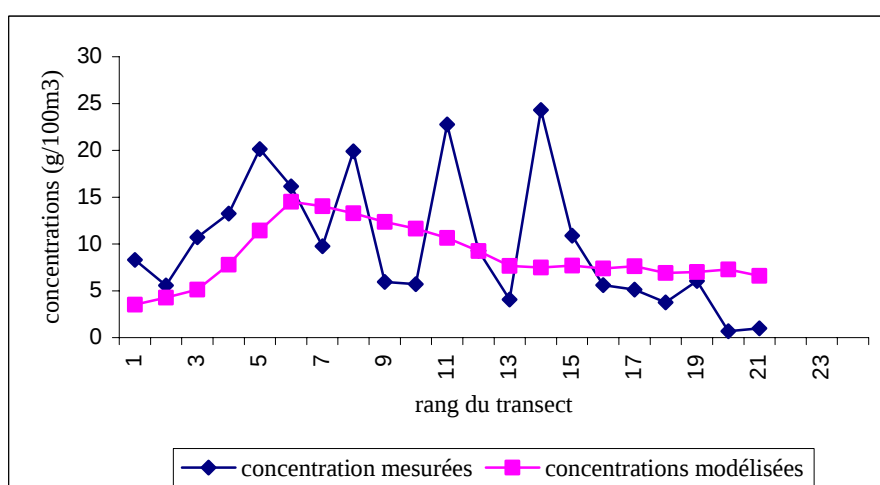


Figure 53 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 5 janvier au fond

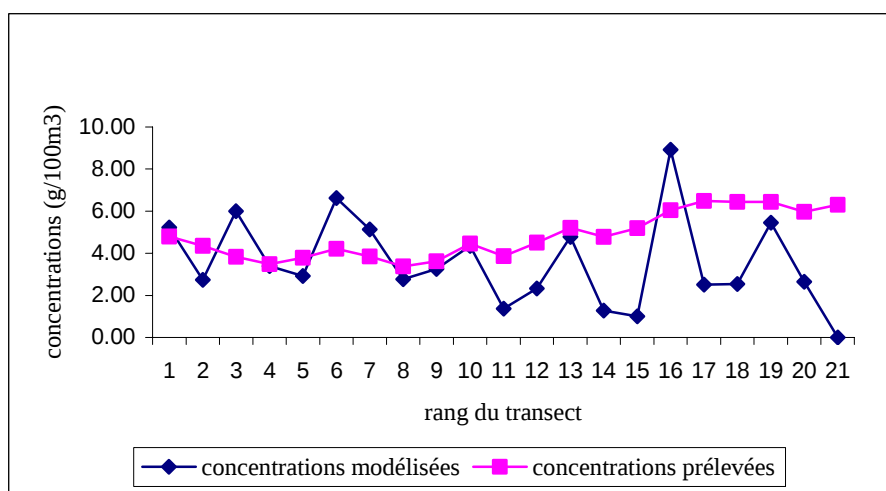
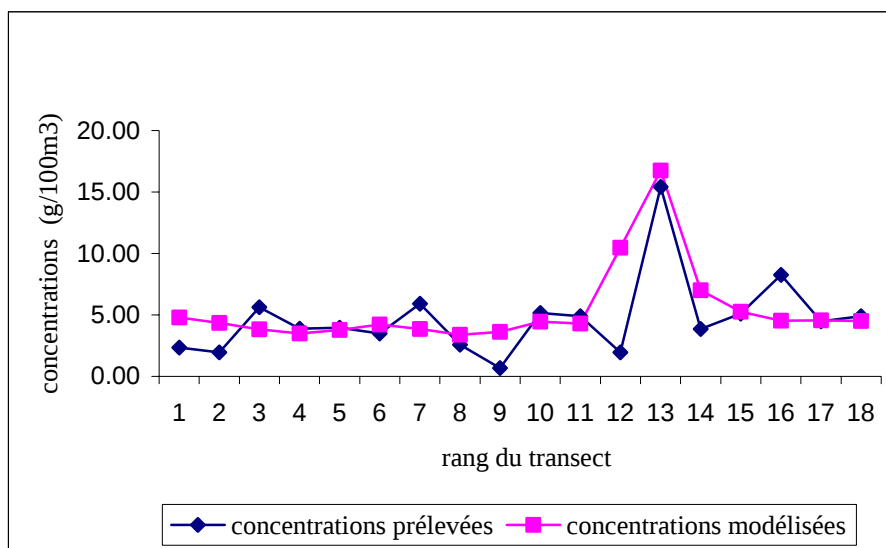


Figure 54 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 7 janvier en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

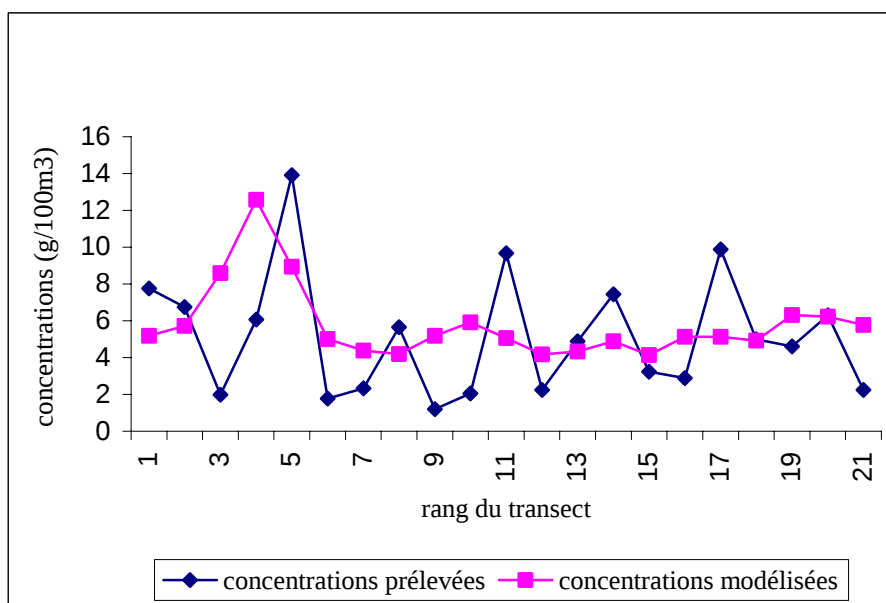


Figure 55 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 8 janvier au fond

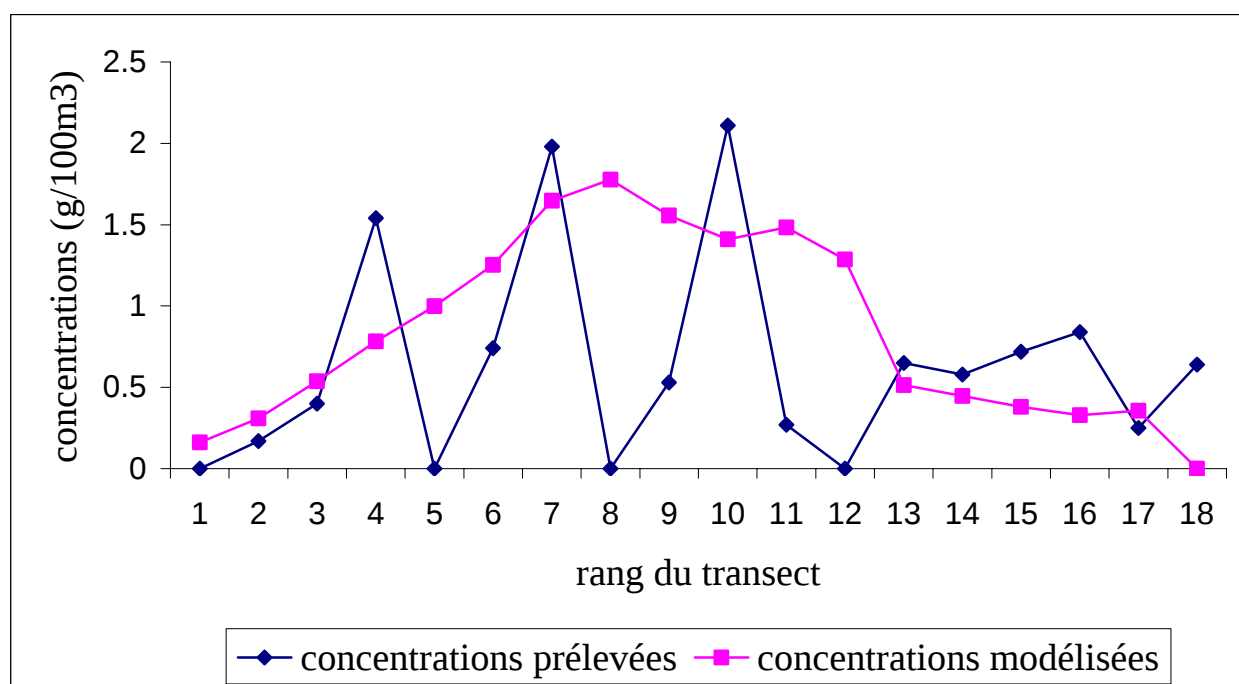
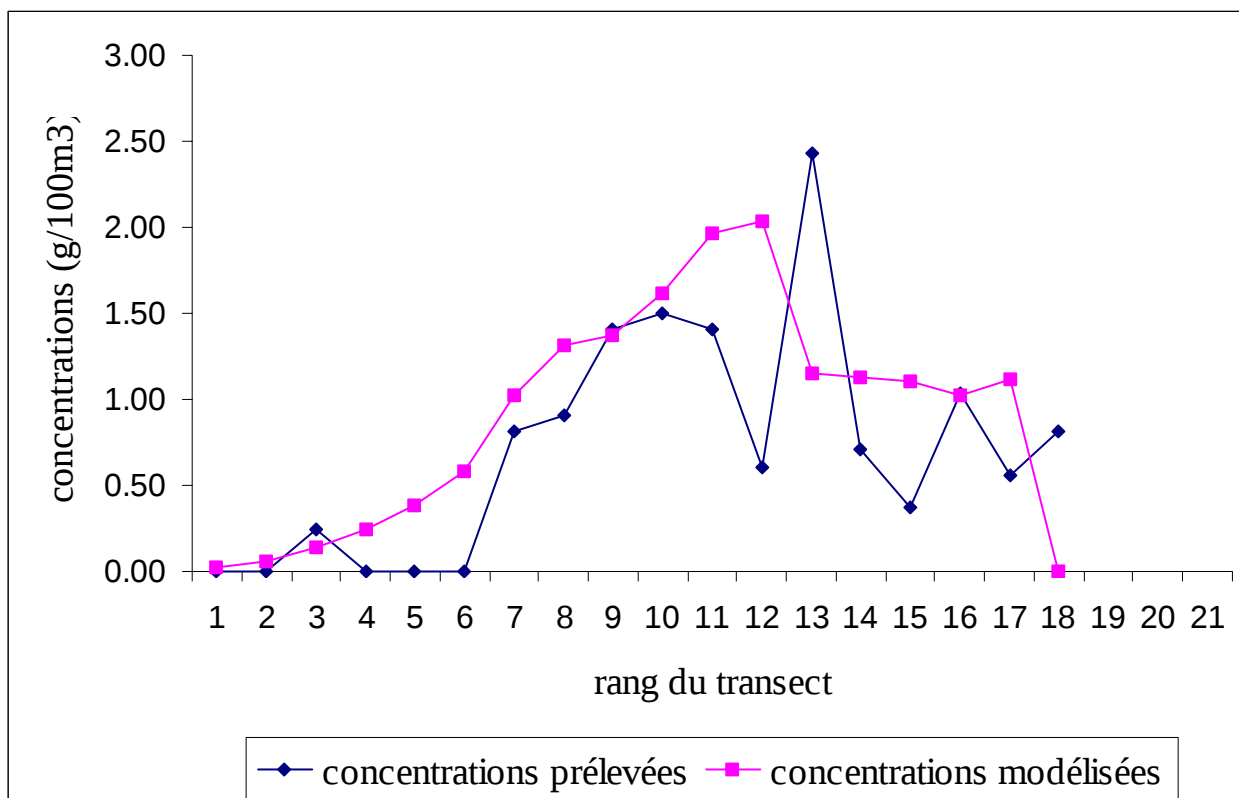


Figure 56 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 12 janvier
en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

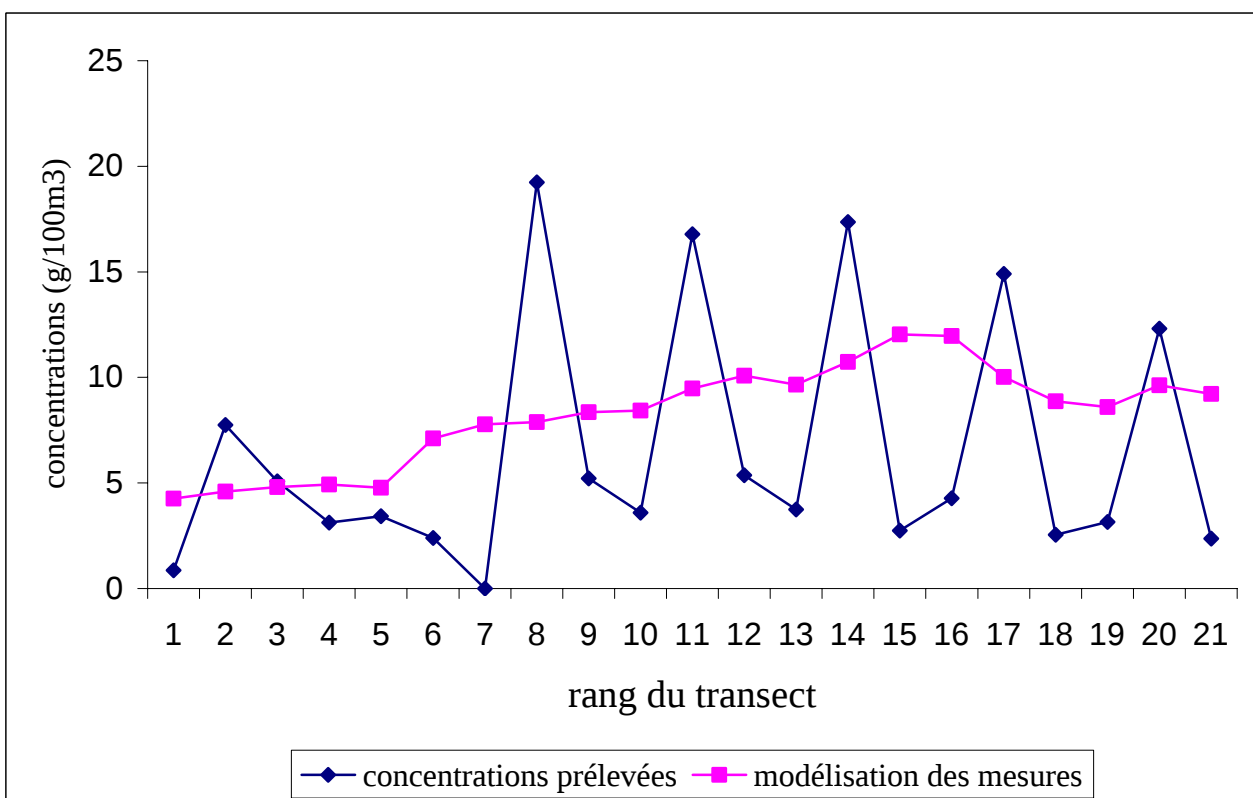
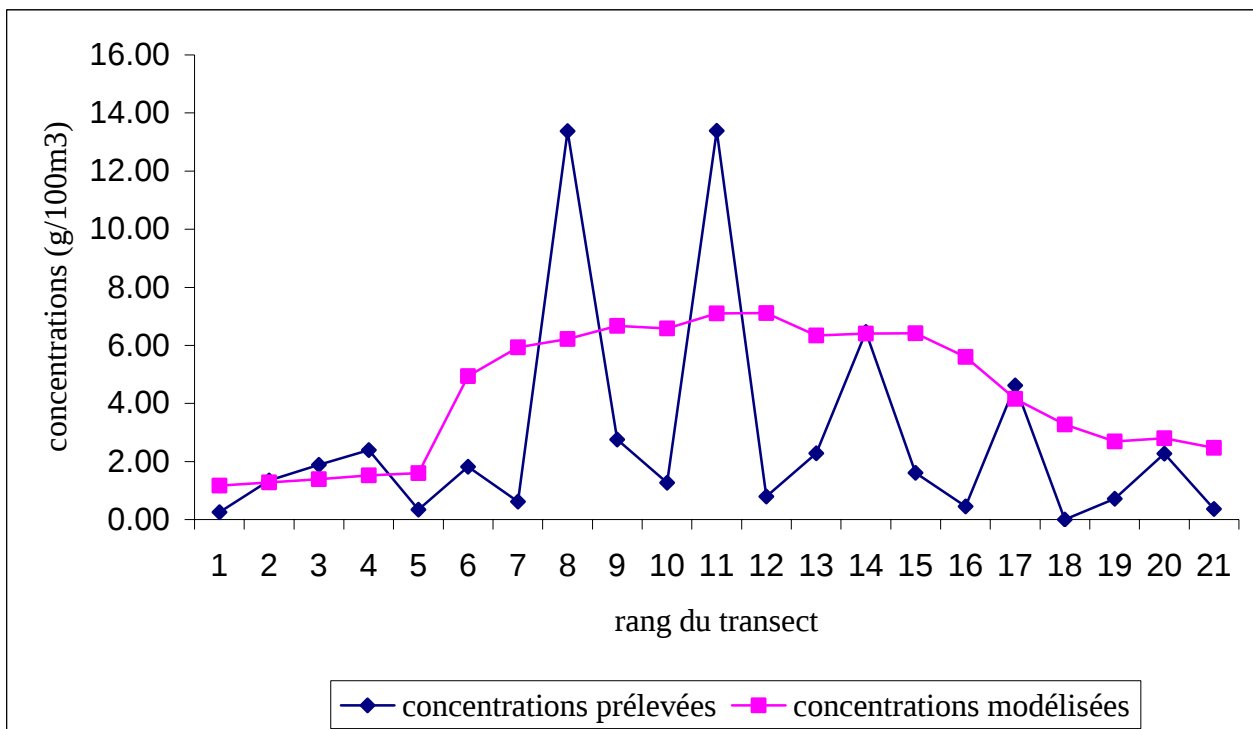


Figure 57 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 1^{er} Février
en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

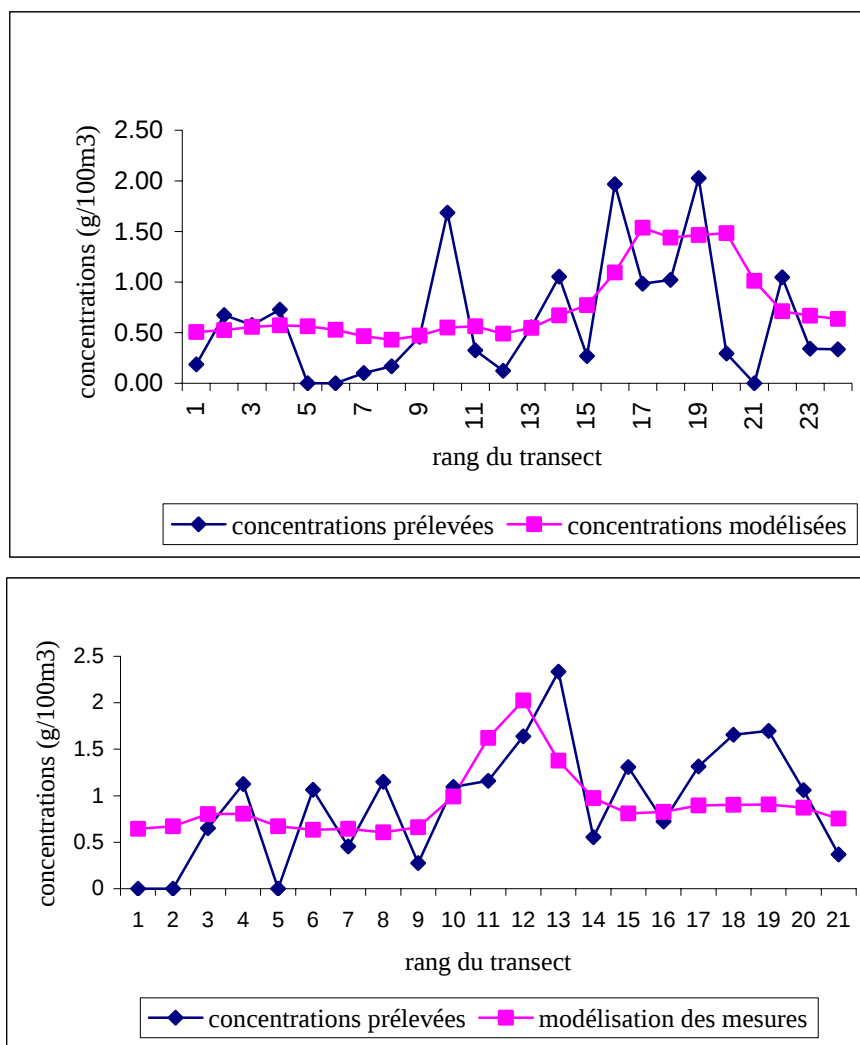


Figure 58 – Concentrations prélevées et modélisées pour la sortie du 8 février en surface - graphe supérieur et au fond - graphe inférieur.

Nous voyons que dans la plupart des cas, l'écart type asymptotique n'excède pas la biomasse estimée (cf tableau 30), 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 2d 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.

5.4. 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 30 du § 5.3.7 .

Le tableau 31 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 § 5.3.3. (rubrique Modèle statistique) : « 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 31 – Comparatif des estimations de biomasse données par les 2 méthodes (§ 5.2 et 5.3)

Date	Biomasse (1 ^{ère} méthode) en kg	Biomasse (2 ^{ème} méthode) en kg
9 décembre	1568 (199)*	694
22 décembre	1042 (147)	1249
5 janvier	1299 (190)	51(uniquement fond)
7 janvier	1099 (170)	849
8 janvier	976 (148)	585
12 janvier	136 (26)	128
1 février	1754 (501)	894
8 février	177 (72)	172

*(écart-type) ; pour la deuxième méthode il n'existe pas de calcul global de l'écart type.

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. Cette situation est simulée au § 8.3.

6.1. Etablissement de la carte bathymétrique du bas-estuaire.

La bathymétrie précise de l'estuaire de l'Adour et plus particulièrement de la partie qui est soumise à l'influence de la marée dynamique permet d'améliorer de manière importante la simulation des vitesses observées à différents moments du cycle de marée et pour différentes valeurs du débit du fleuve. De ce fait, des informations existantes relevées par la subdivision hydraulique de la DDE 64 et lors des campagnes de prospection acoustiques par l'IFREMER à l'aide d'un sondeur bathymétrique couplé à un positionneur géographique de précision submétrique ont été rassemblées pour dresser une carte bathymétrique en 3D de la partie estuarienne de l'Adour. Les figures 59 et 60 donnent un aperçu en 2D et 3D de la bathymétrie d'une partie de l'estuaire inférieur. Pour de plus amples renseignements concernant le traitement bathymétrique on se reportera à l'annexe 5 du rapport.

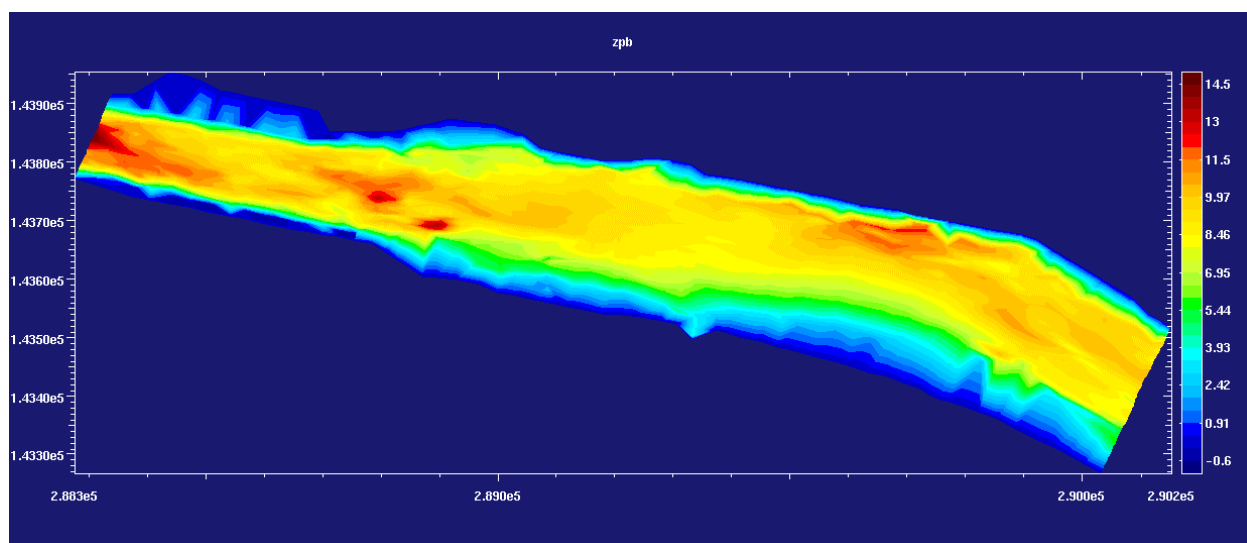


Figure 59 – Vue de la bathymétrie en 2D d'une partie du chenal de l'Adour avec échelle des profondeurs (les valeurs négatives sont au-dessus du niveau 0 NGF) –document UPPA

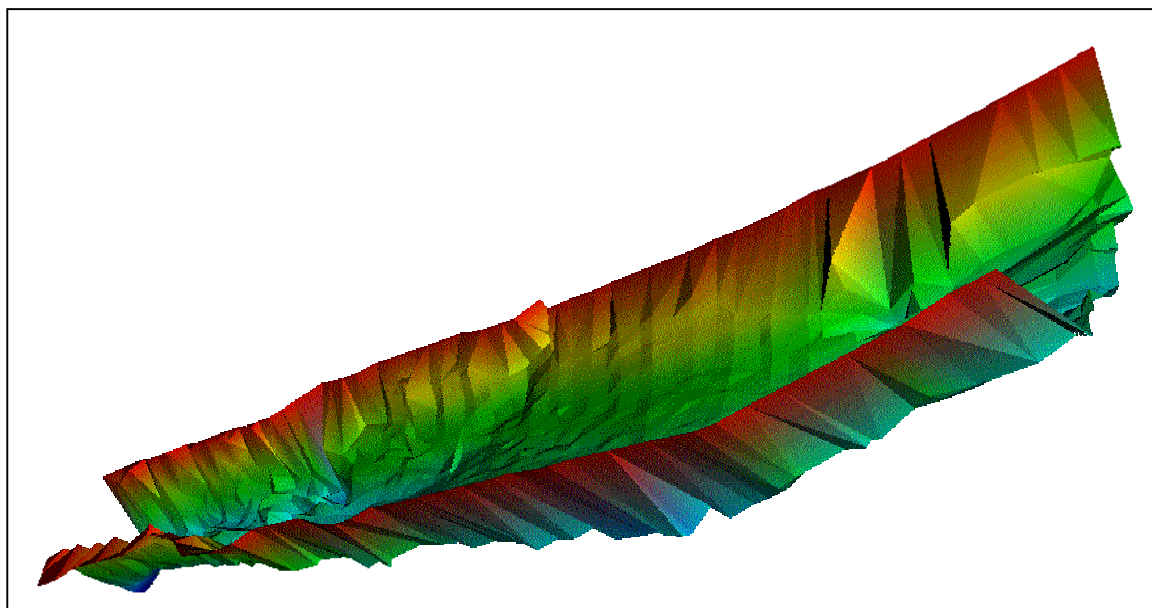


Figure 60 – Vue en 3D de la même portion du chenal de l'estuaire de l'Adour.- document UPPA

6.2. Etablissement du modèle hydrodynamique.

Les modèles comportementaux nécessitent la connaissance préalable de certaines grandeurs physiques comme la vitesse du courant, la température de l'eau ou la salinité. Le but de ce travail est de fournir des estimations de ces grandeurs obtenues par des méthodes numériques. Pour cela, des données de terrain sont nécessaires.

La zone de simulation étant étendue, nous avons décidé de découper le fleuve en trois zones. Sur une première zone, allant de l'embouchure jusqu'à la limite de la marée saline, un modèle 3D sera mis en oeuvre. Il n'est pas nécessaire pour simuler le comportement des civelles dans la zone d'échantillonnage et ne sera pas évoqué dans le cadre de ce projet. Plus en amont, deux modèles 2D (vertical et horizontal) fourniront une estimation suffisamment précise de la vitesse. Pour finir, dans le reste du domaine, nous utiliserons un modèle 1D.

Avant de pouvoir écrire le code de résolution pour ces trois zones, il est indispensable de connaître les équations du modèle physique. Ces équations sont dérivées du modèle de Navier Stokes en introduisant des moyennes sur les directions transversale et verticale et sur une section du fleuve. Pour l'instant seul le modèle 2D horizontal et le modèle 1D (proposé par P. Lasure) ont été mis en oeuvre (cf. § 6.2.1 et § 6.2.2). Les autres modèles sont en cours de développement. Notons que le champ d'application a été quelque peu élargi, pour permettre la prise en compte de phénomènes d'inondation et de transport de polluants.

6.2.1. Cas du modèle unidimensionnel.

Les investigations ont été faites, au préalable, à partir d'un modèle unidimensionnel. La base mathématique du modèle est constituée par les équations du mouvement et de la continuité en eau. Le modèle a été adapté au cas de l'Adour.

Nous avons pris des mailles de 200 mètres. La maille 1 représente la limite aval c'est-à-dire la mer. Pour chaque maille, la section et le périmètre mouillé de la rivière sont calculés en fonction du niveau marin. Dans le cas d'un canal à berge verticale, la section ne dépend que de la largeur et de la profondeur. Par contre, dans le cas le plus général, quand le profil est accidenté, la section doit être calculée pour différentes hauteurs d'eau.

Equation du mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gu^2}{R_h^{4/3} St} + Nh \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

u : Vitesse de courant (m/s)

g : Gravité

ζ : Elévation de la surface libre (m)

St : Coefficient de frottement de Strickler (m²/s)

Nh : Viscosité turbulente (m²/s)

R_h : Rayon hydraulique (m)

Equation de continuité

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial \sigma u}{\partial x} = 0$$

σ : section mouillée (m²)

u : vitesse (m)

La section mouillée est reliée à l'élévation du niveau marin par une relation :

$$\sigma = f(\zeta)$$

Dans le cas d'un canal à berge verticale :

$$\sigma = B * (H + \zeta)$$

ζ : Elévation de la surface libre (m)

B : largeur du canal (m)

H : Profondeur du canal (par rapport au zéro des cartes marines).

Afin d'améliorer la prévision de la vitesse de propagation de la marée dans l'estuaire, nous avons également intégré la bathymétrie de l'Adour dans sa partie basse. La figure 61 montre l'amélioration apportée par l'incorporation des données bathymétriques fines (cf. § 6.1.). Les validations effectuées à l'aide d'un courantomètre donnent des résultats simulés proches des valeurs relevées sur le terrain.

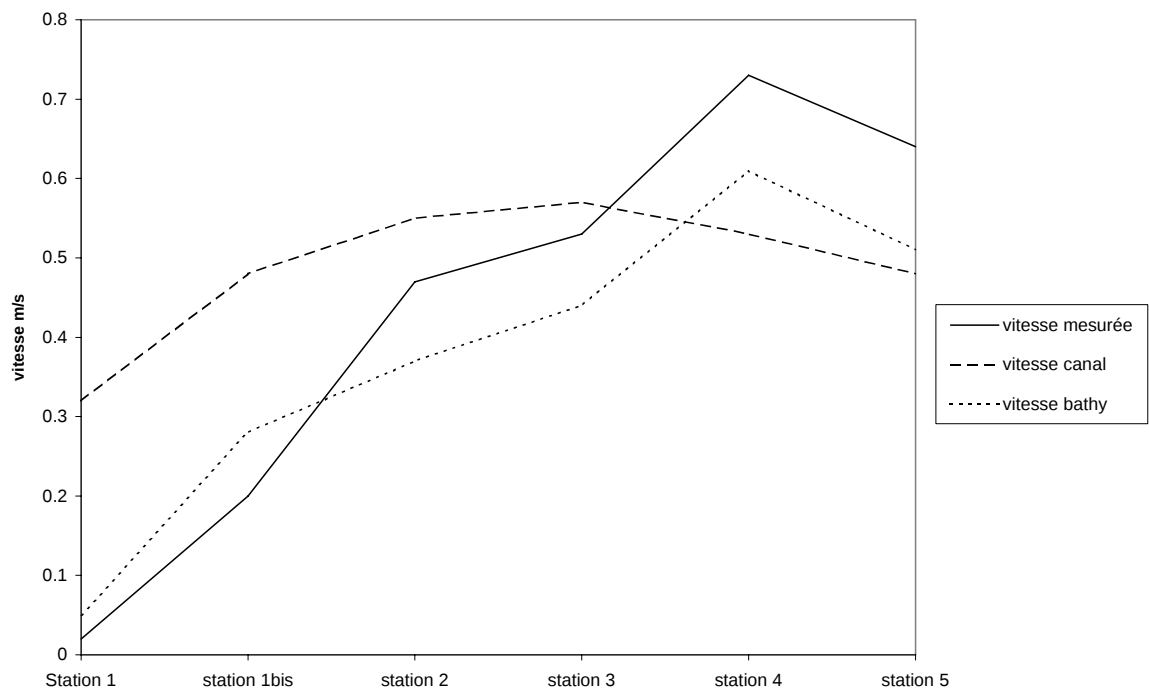


Figure 61 - Comparaisons des vitesses de courant mesurées sur le terrain avec celles calculées par le modèle hydrodynamique quand l'Adour est assimilé à un canal (vitesse canal) et avec prise en compte de la bathymétrie (vitesse bathy) - (22 juillet 1998 – débit : 95,41 m³/s – coeff : 83 – BM : 10h20 – PM : 16h40).

➤ Simulation des conditions moyennes de propagation et d'une situation de blocage hydrologique.

La figure 62 décrit les résultats d'une simulation faite le 28 janvier 1997 dans des conditions de débit moyen (361 m³/s) et de coefficient de marée moyen (72). Les vitesses positives correspondent au sens aval - amont. L'échelle des abscisses indique la distance en km depuis l'embouchure de l'Adour. Le point de départ de la simulation est l'étale de basse mer qui se situe à 2 heures du matin.

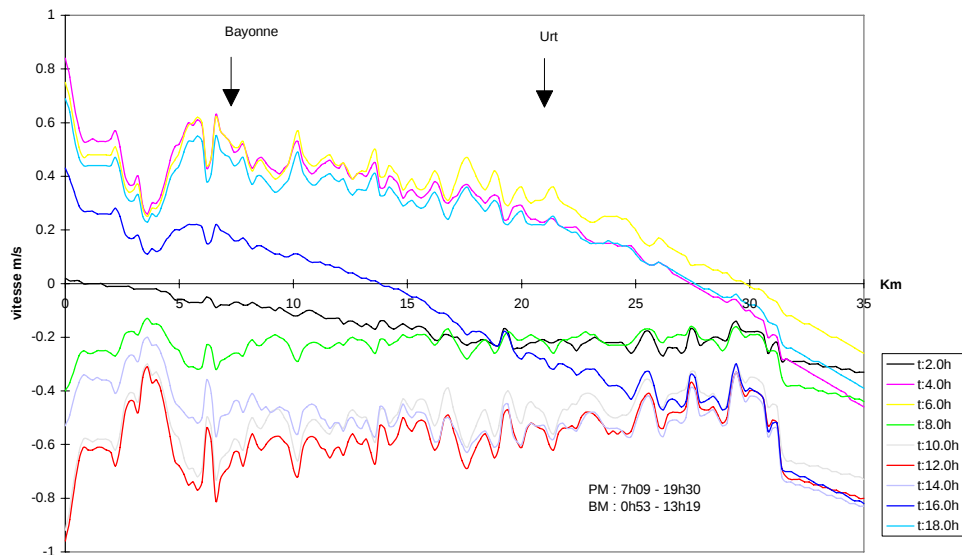


Figure 62 - Simulation des vitesses de courant en conditions de débit et de coefficient de marée moyens en fonction du temps (28 janvier 97 – débit : $361 \text{ m}^3/\text{s}$ – coefficient de marée : 72)

On constate qu'au moment de l'étale de basse mer (courbe noire, $t : 2.0\text{h}$), le courant est descendant dans la totalité de l'estuaire. Deux heures après (courbe rouge, $t : 4.0\text{h}$), il s'est inversé dans l'ensemble de la zone maritime (limite amont Urt). La civelle peut être ainsi véhiculée en amont par le courant. Après 6 heures du matin (courbe verte, $t : 8.0\text{h}$), la renverse de courant se fait brutalement et les vitesses atteintes dans tout l'estuaire ne permettent plus la migration des civelles vers l'amont.

La figure 63 montre les résultats d'une simulation faite le 20 janvier 1998 en conditions de crue. Le débit du fleuve est important ($1249 \text{ m}^3/\text{s}$) et le coefficient de marée est faible (43).

On remarque que les vitesses de courant sont toujours négatives. Le courant est toujours dirigé vers l'aval quelles que soient l'heure de la marée et la position dans l'estuaire. Il n'y a jamais de propagation de la marée dynamique vers l'amont.

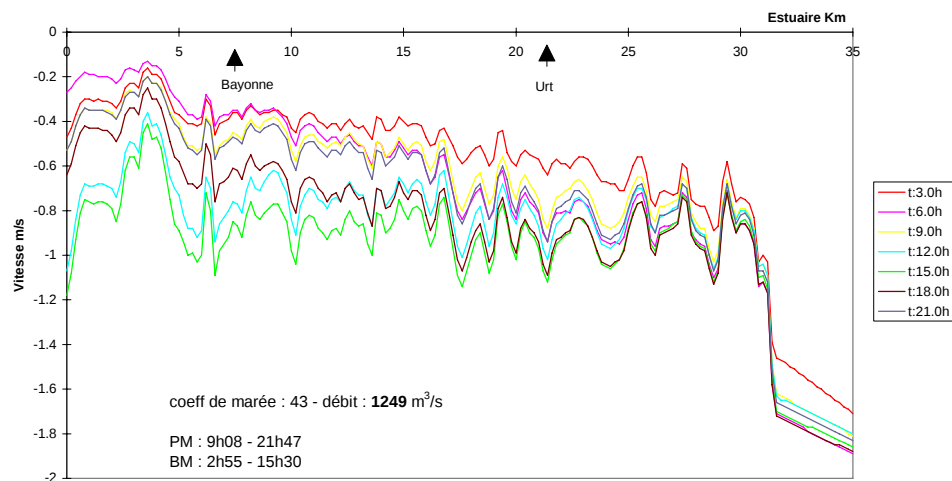


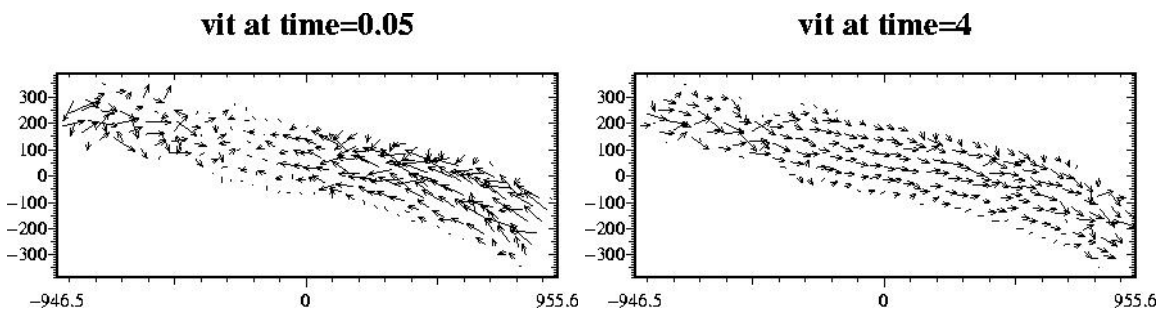
Figure 63 - Simulation des vitesses de courant en conditions de crue et de faible coefficient de marée en fonction du temps (20 janvier 98 – débit : $1249 \text{ m}^3/\text{s}$ et coefficient de marée : 43).

6.2.2. Cas du modèle bidimensionnel

On présente dans cette partie le code de calcul qui permet de simuler l'hydrodynamique de l'Adour. La partie préalable de traitement de la bathymétrie étant effectuée, on dispose alors des fichiers de maillage et de bathymétrie nécessaires à l'exécution du code. Les noms de ces fichiers sont spécifiés dans un jeu de données qui contient d'autres renseignements comme la valeur des différents paramètres physiques, le début et la durée de la simulation, ou les dates de sorties graphiques. Le code génère des fichiers de sorties graphiques permettant de représenter les différentes grandeurs qui nous intéressent aux instants souhaités. Pour cela, on utilise des outils de représentation comme Plotmtv, Gnuplot ou Vtk (cf. annexe 5).

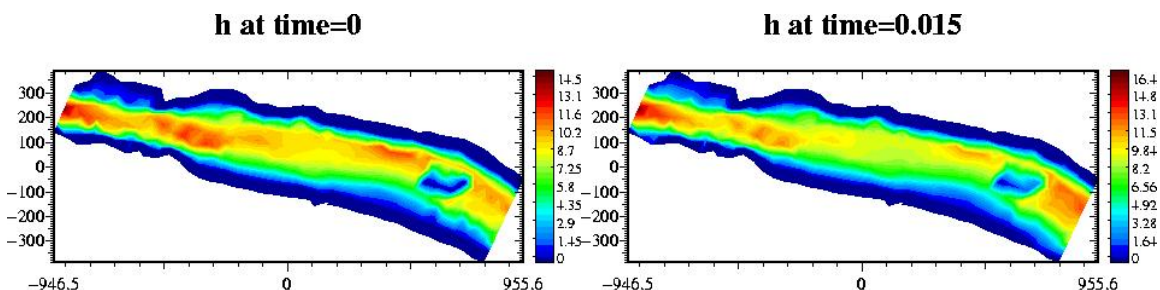
➤ Résultats fournis par le simulateur

En guise d'exemple, on donne ci-dessous la représentation du champ de vitesses pour une simulation effectuée sur une zone de l'estuaire inférieur et à deux instant différents :



Ainsi ces images mises à la chaîne l'une derrière l'autre permettent de créer des animations. D'autres grandeurs, comme la hauteur d'eau, peuvent être représentées. on peut également superposer un champ scalaire et un champ vectoriel pour obtenir sur un même dessin la vitesse et la hauteur d'eau.

Les sorties permettent également de visualiser la hauteur d'eau ainsi que le montre cet exemple à deux instants différents.



➤ Description du modèle physique

Notations :

Symboles	Définitions	Type
g	gravitation	Constante scalaire
	viscosité dynamique	Constante scalaire
	vitesse angulaire de la terre	Scalaire
W	vitesse du vent en norme	Scalaire
Z_p	Côte du fond	Scalaire
V	vitesse du courant	Vecteur
u	1 ^{ère} composante de la vitesse	Scalaire
v	2 ^{ème} composante de la vitesse	Scalaire
h	hauteur d'eau	Scalaire
	angle vent/surface du fleuve	Constante Scalaire

On rappelle tout d'abord les équations intervenant dans le modèle physique retenu ici. Il s'agit du modèle de Saint-Venant, où les inconnues sont la hauteur d'eau et les moyennes sur la colonne d'eau des composantes transversale et longitudinale de la vitesse. On notera par h la hauteur d'eau en faisant attention à ne pas confondre cette inconnue avec le paramètre de discrétisation que l'on note également h et qui représente la longueur du plus grand côté des triangles du maillage. Nous avons choisi de prendre en compte aussi bien la force de Coriolis que la force du vent.

L'équation de conservation de la masse s'écrit dans ce contexte :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(hV) = 0.$$

La conservation de la quantité de mouvement nous assure que (2):

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \text{div}(huV) - \gamma \Delta u = -gh \frac{\partial (Z_p + h)}{\partial x} - gh J_1 - 2h \omega \sin(\phi) v + kW^2 \cos \psi,$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t} + \text{div}(hvV) - \gamma \Delta v = -gh \frac{\partial (Z_p + h)}{\partial y} - gh J_2 + 2h \omega \sin(\phi) u + kW^2 \sin \psi.$$

où $J = \lambda |V| \sqrt{8gh^*}$, h^* le rayon hydraulique équivalent et λ le coefficient de frottement.

A ce système d'équation aux dérivées partielles, nous devons rajouter des conditions aux limites et des conditions initiales. Pour ce qui concerne les conditions initiales, nous démarrons la simulation 24 heures avant l'heure réelle du début, en imposant la hauteur d'eau donnée par la bathymétrie et une vitesse nulle.

Les conditions aux limites sont fixées d'une part par le coefficient de marée en aval (pour un instant donné, on est en mesure de calculer la hauteur d'eau au niveau du port) et d'autre part, on se donne le débit en amont. De plus, sur les frontières amont et aval, on impose une condition de type Fourier sur les composantes de la vitesse ie du type $\frac{\partial u}{\partial n} = au$, $\frac{\partial v}{\partial n} = av$.

De plus, le domaine de résolution que l'on considère étant le lit mineur du fleuve, on fixe $u=0$ dans la partie où il n'y a pas d'eau. Cette extension du domaine de résolution nous permet de simuler des problèmes d'inondation, comme cela a été signalé précédemment. Pour des raisons de commodités, on introduit un paramètre α indiquant les zones qui sont inondées et donc sur lesquelles nous devons effectuer la résolution. Ce paramètre α est solution de l'équation de transport : $\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \alpha \cdot \nabla V = 0$.

Notons que la détermination de α constitue pour chaque pas de temps la première étape de la résolution.

➤ Semi-discrétisation en temps

On décrit dans cette partie la stratégie utilisée pour discrétiser en temps les équations du modèle présenté ci-dessus. On utilise une technique de pas fractionnaires.

On suppose que l'on connaît $h^{n-1/2}$; la fonction $h^{n+1/2}$ est la solution de l'équation (3):

$$\frac{h^{n+1/2} - h^{n-1/2}}{\Delta t} + \text{div}(h^{n-1/2} \vec{V}^n) = 0$$

équation (4)

$$\begin{aligned} & h^{n+1/2} \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} + \text{div}(h^{n+1/2} u^{n+1} \vec{V}^n) - \gamma \Delta u^{n+1} \\ &= -gh^{n+1/2} \frac{\partial(Z_p + h^{n+1/2})}{\partial x} - \lambda \frac{h^{n+1/2}}{8h^*} u^{n+1} \sqrt{(u^n)^2 + (v^n)^2} - 2h^{n+1/2} (\omega \sin \phi) v^n + kW^2 \cos \psi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & h^{n+1/2} \frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t} + \text{div}(h^{n+1/2} v^{n+1} \vec{V}^n) - \gamma \Delta v^{n+1} \\ &= -gh^{n+1/2} \frac{\partial(Z_p + h^{n+1/2})}{\partial x} - \lambda \frac{h^{n+1/2}}{8h^*} v^{n+1} \sqrt{(u^n)^2 + (v^n)^2} + 2h^{n+1/2} (\omega \sin \phi) u^n + kW^2 \sin \psi \end{aligned}$$

Cette semi-discrétisation étant effectuée, on va maintenant expliquer la technique de discrétisation en espace.

➤ Discrétisation en espace

On considère un maillage T_h de Ω constitué de quadrangles et/ou de triangles. On construit alors les médianes de chaque élément de T_h et on obtient alors un volume de contrôle autour de chaque noeud de la triangulation. La triangulation duale de T_h , composée des volumes de contrôle, est notée T_h^* . On désignera dans tout ce qui suit, par T un élément quelconque de T_h et par $K_i, i=1,2,...,n_v$ les volumes de contrôle. Ce qui signifie que n_v représente également le nombre de noeuds de la triangulation T_h . Ces noeuds sont notés $a_i, i=1,...,n_v$. On considère alors l'espace de dimension finie suivant :

$M_h = \{ u_h \in C^0(\Omega), \forall T \in T_h, u_h|_T \in P(T) \}$, où $P(T)$ est l'espace $P_1(T)$ si T est un triangle, $Q_1(T)$ si T est un parallélogramme, ou bien l'espace des fonctions polynômiales pseudo- Q_1 , si T est un quadrangle non parallélépipédique. C'est dans ce premier espace que l'on cherchera une approximation des vitesses. Pour ce qui concerne la hauteur d'eau, compte tenu de son caractère hyperbolique, nous lui affectons l'espace :

$$H_h = \{ h_h \in L^2(\Omega), \forall K_i \in T_h^*, h_h|_{K_i} \in P_0(K_i) \}.$$

On notera alors h_i la valeur prise par h_h sur le volume K_i . De même, pour toute fonction $u_h \in M_h$, le réel u_i désignera la valeur $u_h(a_i)$.

Notons que la fonction $Z_p + h^{n+1/2}$ qui intervient dans les équations (3) et (4) représente la côte de la surface libre du fleuve. En conséquence, on peut supposer que celle-ci est suffisamment régulière pour que son interpolé $\pi_h(Z_p + h^{n+1/2})$ dans M_h ait un sens.

➤ Discrétisation en espace de l'équation de continuité

Les fonctions $h_h^{n-1/2}$ et V_h^n étant supposées connues dans H_h et M_h respectivement, par intégration de l'équation (2) sur chaque volume, on détermine la fonction $h_h^{n+1/2}$, solution explicite de

$$\forall i=1,...,n_v, \quad h_i^{n+1/2} = h_i^{n-1/2} - \Delta t m e s K_i \sum_{j=1}^{n f_i} h_{i,j}^{n-1/2} \int_{F_{i,j}} \vec{V}_h^n \cdot \vec{n}_{ij} d\sigma.$$

$n f_i$ représente le nombre de faces du volume K_i , $F_{i,j}$ la $j^{\text{ème}}$ face de K_i , $\vec{n}_{ij}$ le vecteur

normal unitaire extérieur à K_i le long de la $j^{\text{ème}}$ face de K_i . Le terme $h_{ij}^{n-1/2}$ est défini quant à lui par :

$$h_{i,j}^{n-1/2} = \begin{cases} h_i^{n-1/2} & \text{si } \int_{F_{i,j}} \vec{V}_h^n d\sigma > 0, \\ h_{i,j,\text{ext}}^{n-1/2} & \text{si } \int_{F_{i,j}} \vec{V}_h^n d\sigma < 0, \end{cases}$$

où le réel $h_{i,j,\text{ext}}^{n-1/2}$ représente soit une valeur imposée sur la face F_{ij} de K_i si celle ci est sur le bord de Ω , soit la valeur prise par $h_h^{n-1/2}$ sur le volume voisin de K_i admettant F_{ij} pour face. La fonction $h_h^{n+1/2}$ étant déterminée, on l'injecte dans les équations (3) et (4) afin de déterminer les vitesses u et v .

➤ Discrétisation en espace des équations 3 et 4

Là encore, on suppose que V_h^n est un vecteur connu dont chacune des composantes est une fonction de M_h . On intègre comme au paragraphe précédent, l'équation (3) sur chaque volume de contrôle K_i . On définit alors la fonction $u_h^{n+1} \in M_h$ solution de :

$$\begin{aligned} & \forall i=1, \dots, nv \\ & h_i^{n+1/2} \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \text{mes} K_i + \int_{K_i} \text{div}(h_h^{n+1/2} u_h^{n+1} \vec{V}_h^n) - \gamma \Delta u_h^{n+1} dx \\ & = -gh_i^{n+1} \int_{K_i} \frac{\partial(\pi_h(Z_p + h^{n+1/2}))}{\partial x} dx - \left(\frac{\lambda h_i^{n+1/2}}{8h^*} u_i^{n+1} \sqrt{(u_i^n)^2 + (v_i^n)^2} \right. \\ & \left. 2h_i^{n+1/2} \omega \sin(\phi) v_i^n + kW_i^2 \cos(\phi) \right) \text{mes} K_i. \end{aligned}$$

Remarquons que le terme $\frac{\lambda h_i^{n+1/2}}{8h^*} u_i^{n+1} \sqrt{(u_i^n)^2 + (v_i^n)^2} \text{mes} K_i$ ne fait que rajouter le coefficient

$$\frac{\lambda h_i^{n+1/2}}{8h^*} \sqrt{(u_i^n)^2 + (v_i^n)^2} \text{mes} K_i \text{ sur la diagonale de la matrice du système.}$$

Explicitons maintenant les termes $\int_{K_i} \text{div}(h_h^{n+1/2} u_h^{n+1} \vec{V}_h^n) - \gamma \Delta u_h^{n+1} dx$ et $\int_{K_i} \frac{\partial(\pi_h(Z_p + h^{n+1/2}))}{\partial x} dx$. Si l'on procède à des intégrations par parties sur ces deux intégrales, elles deviennent respectivement : $\int_{\partial K_i} h_h^{n+1/2} u_h^{n+1} \vec{V}_h^n \cdot \vec{n} - \gamma \frac{\partial u_h^{n+1}}{\partial n} d\sigma$ et $\int_{K_i} \pi_h(Z_p + h^{n+1/2}) n_1 dx$.

- Le terme $\int_{\partial K_i} h_h^{n+1/2} u_h^{n+1} \vec{V}_h^n \cdot \vec{n} d\sigma$ est alors traité par décentrage amont comme pour l'équation de continuité.
- Le terme $\int_{\partial K_i} \frac{\partial u_h^{n+1}}{\partial n} d\sigma$: on écrit que $\int_{\partial K_i} \frac{\partial u_h^{n+1}}{\partial n} d\sigma = \sum_{j=1}^{nf_i} \int_{\partial F_{i,j}} \frac{\partial u_h^{n+1}}{\partial n} d\sigma$. Chaque face F_{ij} est incluse dans un élément du maillage T_h sur lequel u_h est polynômiale. On peut prendre alors une formule d'intégration pour calculer $\int_{\partial F_{i,j}} \frac{\partial u_h^{n+1}}{\partial n} d\sigma$. (une formule au point milieu est suffisante et même exacte dans la plupart des cas).
- Le terme $\int_{K_i} \pi_h(Z_p + h^{n+1/2}) n_1 dx$ est traité comme le précédent. On utilise pour cela l'approximation constante par morceaux de $h^{n+1/2}$ obtenue au paragraphe précédent.

➤ Description du code

Dans un premier temps, on va décrire chronologiquement les différentes étapes de la résolution. On

donnera par la suite, la structure du programme en décrivant les principales classes d'objets utilisées.

Lecture des données

Cette première étape consiste en une lecture sur fichiers : différents paramètres physiques, description de la bathymétrie, du maillage et listes des points se trouvant sur les bords (berges, limites aval, limites amont).

Reconstruction de la topographie

La bathymétrie ainsi que la cote du fond sont données en des points de mesures qui ne correspondent pas nécessairement aux sommets du maillage utilisé pour la résolution. On doit donc avant de commencer la résolution interpoler ces grandeurs aux sommets du maillage. Cela permet également de donner une représentation graphique du lit de la rivière.

- **Début de la boucle en temps**

Détermination du paramètre

On détermine ici la partie du lit mineur qui est recouverte d'eau. Par la suite, les équations ne seront résolues que sur le domaine où $\eta = 1$.

Prise en compte des conditions de bord

A partir de la date et de l'heure correspondant à ce pas de temps, la hauteur d'eau est calculée en aval (prise en compte du coefficient de marée) tandis qu'en amont un débit est imposé.

Résolution de l'équation de conservation

La vitesse étant celle obtenue au pas de temps précédent, on résout l'équation de conservation ce qui nous permet de calculer la hauteur d'eau h .

Résolution de l'équation du mouvement

Cette résolution se fait en deux étapes. Chacune de ces deux étapes correspond au calcul d'une composante de la vitesse. On calcule tout d'abord la première composante de la vitesse. Pour cela, on utilise la hauteur d'eau h calculée à l'étape précédente et la deuxième composante de la vitesse du pas de temps précédent. On détermine ensuite la deuxième composante de la vitesse en utilisant la première composante que l'on vient de calculer.

Sorties graphiques

Dans le cas où le pas de temps correspond à un instant pour lequel l'utilisateur désire avoir une sortie graphique, un fichier de résultats est créé contenant les valeurs des inconnues à cet instant. Ce fichier permet à l'aide d'outils graphiques d'avoir des représentations de ces solutions.

- **Fin de la boucle en temps**

Le programme a été écrit en langage orienté objet sur la plate forme de développement *Diffpack*. Nous avons eu besoin de créer 4 nouvelles classes d'objets:

La classe **Sonde** qui consiste en une description de la bathymétrie. Elle permet notamment de calculer la cote du fond aux sommets d'un maillage de calcul.

La classe **CondLimite** qui est un outil de gestion des conditions aux limites. Elle contient une description des bords (berges, limites aval et amont) et permet de calculer, à un instant donné, les conditions aux limites à affecter aux différents points du bord.

La classe **VolFin** qui contient une description de la méthode de discrétisation par volumes finis. En lui fournissant le maillage de calcul et les paramètres physiques, cette classe renvoie par l'intermédiaire de

ses fonctions membres, la valeur des termes de transport et de diffusion intervenant dans les équations du modèle.

La classe **Mod2D** : l'ensemble des équations du modèle est résolu par des appels aux différentes fonctions de cette classe. Cette classe contient un objet des trois classes précédentes et gère les informations qu'elles fournissent.

6.2.3. Evolution des modèles 1D et 2D.

On présente dans ce chapitre les derniers résultats obtenus dans le cadre du projet de simulation de l'hydrodynamique de l'Adour. Pour ce qui concerne le code de calcul, on décrit les récents développements qui sont venus le compléter, en expliquant les nouvelles possibilités actuelles ou futures que cela peut offrir. D'un point de vue de la modélisation, nos efforts ont porté sur l'obtention à partir de la modélisation tridimensionnelle, de modèles mono et bidimensionnels (vertical et horizontal). Contrairement aux modèles de Saint-Venant utilisés habituellement dans ce genre d'étude, nous cherchons ici à éviter des hypothèses trop fortes sur la géométrie du fleuve ou sur les variations de certaines grandeurs physiques, comme la pression. Les modèles obtenus dans cette étude permettent de s'affranchir notamment de l'hypothèse communément faite, de pression hydrostatique. On n'impose donc pas ici que la pression varie linéairement avec la profondeur. Dans un premier temps et de manière à bien comprendre les raisons d'une telle étude, nous détaillons les techniques et les hypothèses sur lesquelles reposent les équations du modèle de Saint-Venant. L'annexe 6 à ce rapport donne les détails techniques et les fondements théoriques de la modélisation effectuée.

➤ Les modèles de Saint-Venant (rappels)

Les modèles de Saint-Venant sont issus du système de Navier-Stokes. Nous rappelons ce système d'équations aux dérivées partielles :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 & \text{sur } \Omega & (1) \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{u} = \mathbf{g} & \text{sur } \Omega & (2) \end{cases}$$

où Ω est le domaine d'étude (tridimensionnel ici), $\mathbf{u}=(u_1, u_2, u_3)$ représente le vecteur vitesse, p la pression et enfin $\mathbf{g}$ la gravité, μ la viscosité et ρ la densité du fluide.

L'équation :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

décrit la propriété d'incompressibilité du fluide tandis que l'équation (2) n'est autre que l'écriture de la loi de conservation de la quantité de mouvement. A ces deux équations, on rajoute des conditions de bords, sur les frontières amont et aval, mais également sur le fond (condition d'imperméabilité et de frottement), ainsi que des conditions initiales.

Pour obtenir les équations de Saint Venant à partir de ce système, on fait 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. De plus, pour se ramener à un problème uni et bi-dimensionnel, on intègre les équations de Navier-Stokes sur une section et sur la hauteur d'eau respectivement. On introduit alors comme nouvelles inconnues en vitesses les valeurs moyennes $\underline{u_1}$, $\underline{u_2}$ et $\underline{u_3}$ de u_1 , u_2 et u_3 sur une section, respectivement une hauteur d'eau. Pour pouvoir remplacer complètement les composantes de la vitesse par leurs moyennes dans l'équation (2), il faut pouvoir écrire que :

$$\underline{\mathbf{u}} \cdot \nabla \mathbf{u} = \underline{\mathbf{u}} \cdot \nabla \underline{\mathbf{u}} ,$$

(c'est à dire que la moyenne du produit est le produit des moyennes), ce qui, sauf cas particulier, est faux. Pour compenser cette erreur on introduit alors au second membre un terme de friction, également appelé tension de Reynolds, qui consiste à dire que l'erreur commise est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne. Le terme introduit au second membre est donc du type :

$$c \, \|\underline{\mathbf{u}}\| \, \underline{\mathbf{u}} ,$$

où c est un coefficient de frottement que l'on estime de manière expérimentale en fonction des caractéristiques du fleuve. Notons que l'équation d'incompressibilité moyennée nous donne l'équation, dite en h ou σ , suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(h \underline{\mathbf{u}}) = 0,$$

dans le cas 2D et dans le cas 1D

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \text{div}(\underline{\mathbf{u}} \sigma) = 0,$$

où σ est la section mouillée du fleuve. Dans le cas unidimensionnel, les équations de Saint-Venant sont obtenues uniquement dans le cas d'un canal, (bien qu'elles soient souvent utilisées dans un cadre plus général) et ne prennent pas en compte les courbures du fleuve ou ses variations bathymétriques. Notons enfin que le modèle de Saint-Venant bidimensionnel se place dans un plan horizontal et que sa version dans un plan vertical n'existe pas.

➤ Obtention des nouveaux modèles

Nous allons dans ce qui suit, détailler l'obtention des modèles mono et bidimensionnel qui ont été mis en œuvre dans les codes de calculs.

Tout comme pour les modèles de Saint-Venant ci-dessus, les modèles physiques mis en œuvre dans le simulateur, sont issus des équations de Navier-Stokes.

A ces équations qui traduisent la conservation de la masse d'eau et celle de la quantité de mouvement, nous ajoutons des conditions aux limites. Ces conditions permettent de prendre en compte la marée en aval, le débit entrant en amont et au niveau des affluents, les frottements engendrés par les rugosités du lit du fleuve et le vent au niveau de la surface de l'eau.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \underline{\mathbf{u}} \cdot \underline{\mathbf{n}} = 0, \quad \mu \text{curl} \underline{\mathbf{u}} \times \underline{\mathbf{n}} + C_B \underline{\mathbf{u}} = \underline{\mathbf{0}} & \text{sur le fond (frottements)} \\ p = p_a, \quad \mu \text{curl} \underline{\mathbf{u}} \times \underline{\mathbf{n}} = \underline{\mathbf{w}} \text{ en surface} & (\text{vent}) \\ \underline{\mathbf{u}} \cdot \underline{\mathbf{n}} = k_M, \quad \mu \text{curl} \underline{\mathbf{u}} \times \underline{\mathbf{n}} = \underline{\mathbf{0}} \text{ en amont} \\ \underline{\mathbf{u}} \cdot \underline{\mathbf{n}} = k_V, \quad \mu \text{curl} \underline{\mathbf{u}} \times \underline{\mathbf{n}} = \underline{\beta} V \text{ en aval} \end{array} \right.$$

De manière à permettre la gestion de l'élévation (et de l'abaissement) du niveau des eaux, nous considérons que le domaine de résolution Ω est constitué par le lit majeur du fleuve. Il est alors nécessaire d'introduire un paramètre que l'on notera α , qui nous indique à chaque instant, le domaine réellement occupé par les eaux. Pour cela, on pose :

$$\alpha(x, y, z, t) = 1 \quad \text{si à l'instant } t, \text{ le point } (x, y, z) \text{ est dans l'eau,}$$

et

$$\alpha(x, y, z, t) = 0 \quad \text{sinon.}$$

On a donc si (x, y, z) est à chaque instant la position d'une particule d'eau, $\alpha(x, y, z, t) = 1$, ce qui implique que

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \underline{\mathbf{u}} \cdot \nabla \alpha = \frac{d\alpha}{dt} = 0.$$

Cette dernière relation, lorsque nous passons à une modélisation uni ou bidimensionnelle, nous permet d'obtenir des équations similaires aux équations en « h » et « σ » décrites ci-dessus, mais dans un cadre plus général.

C'est une approche quelque peu différente qui a été utilisée pour obtenir les modèles utilisés ici. Cette approche est basée sur la formulation variationnelle du système de Navier-Stokes ; c'est à dire qu'on utilise une formulation équivalente à celle donnée ci-dessus obtenue en multipliant chacune des équations du système par une fonction et en intégrant sur le domaine .

On obtient à l'instant $(n+1)\Delta t$ le système suivant

$$(1) \begin{cases} \text{trouver } \mathbf{u}^{n+1}, p^{n+1} \text{ tels que} \\ \text{Pour tout } \mathbf{v}, A(\mathbf{u}^{n+1}, \mathbf{v}) + B(p^{n+1}, \mathbf{v}) = F(\mathbf{v}) \\ \text{et tout } q, B(q, \mathbf{u}^{n+1}) = 0 \end{cases}$$

où les formes A, B et C s'exprime à l'aide d'intégrales.

Pour obtenir des modèles bidimensionnels, on va chercher un champ de vitesse dans un ensemble de fonctions particulier. Pour le cas bidimensionnel horizontal, on cherchera un vecteur vitesse, tel que :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1(x, y) \\ u_2(x, y) \\ u_3(x, y) \end{pmatrix}, \text{ et } u_3 = (u_1, u_2) \cdot \nabla Z_B.$$

où Z_B est la fonction décrivant les variations du fond.

On fait donc l'hypothèse que le vecteur vitesse ne dépend que des coordonnées x et y . La troisième composante de la vitesse peut alors être calculée en fonctions des composantes 1 et 2, en tenant compte de la condition d'imperméabilité du fond.

Pour les autres cas, on utilise la même technique, en supposant que la vitesse est fonction de s (abscisse curviligne) et z pour le modèle bidimensionnel vertical et seulement de s pour le modèle unidimensionnel. Pour ces deux modèles, on utilise un repère curviligne, lié à la géométrie, qui permet de prendre en compte les courbures du fleuve.

Notons que contrairement aux équations de Saint-Venant on conserve, d'une part la pression comme inconnue (aucune hypothèse de pression hydrostatique n'est faite ici), d'autre part les trois composantes de la vitesse (deux composantes sont des inconnues à part entière et la troisième composante est fonction des deux autres).

➤ Méthode numérique

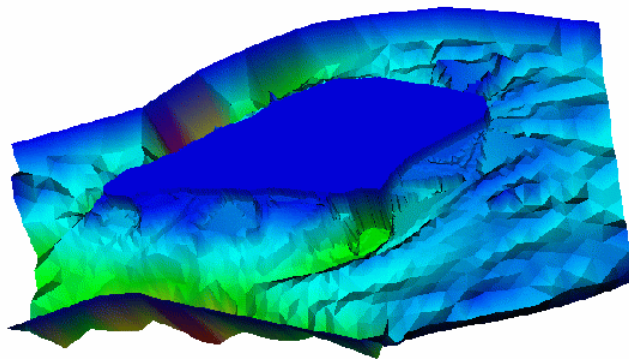
Le domaine de résolution est recouvert par un ensemble de triangles (maillage) et on suppose que chacune des inconnues recherchées est continue et polynomiale sur chaque triangle. Comme chaque fonction polynomiale peut être déterminée par ses valeurs en un nombre fini de points, la résolution du problème se ramène à chercher la valeur des inconnues en des points bien précis. Les ensembles de polynômes dans lesquels sont cherchées les inconnues et donc l'ensemble des points de calcul pour chaque inconnue, sont liés par des relations qui garantissent l'existence et l'unicité d'une solution et ne doivent donc pas être choisis au hasard. On cherchera par exemple, la pression et la hauteur d'eau aux sommets des triangles et la vitesse aux sommets des triangles ainsi qu'au barycentre de chaque triangle.

6.2.4. Couplage des codes 2D horizontal et 1D.

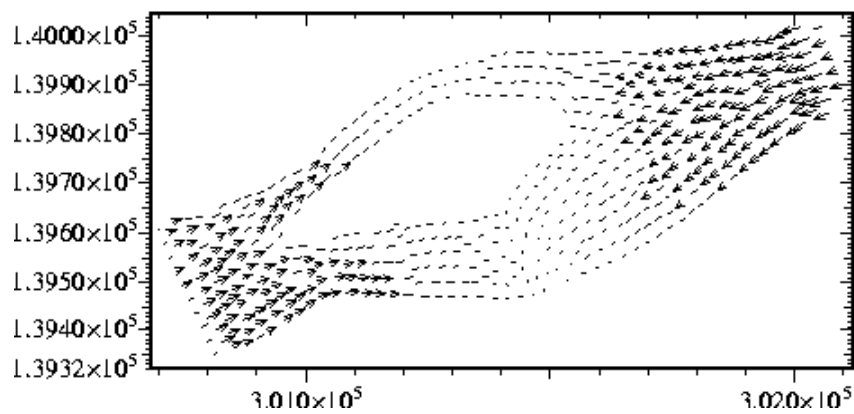
L'amélioration la plus significative apportée au code est sans aucun doute, l'intégration du modèle 1D et son couplage avec le modèle 2D horizontal.

Compte tenu de la longueur de la zone d'étude, il est difficile avec une taille de maille acceptable, d'effectuer des simulations 2D sur la totalité du domaine. Cela entraînerait des coûts de calcul rédhibitoires. Pour éviter ce problème, le code permet à l'utilisateur de définir une ou plusieurs zones bidimensionnelles, à partir du fichier de données bathymétriques. Dans la partie du fichier correspondant aux coordonnées des points de la berge, on introduit des balises pour préciser la ou les portions à traiter en deux dimensions. Le reste du domaine est alors considéré comme unidimensionnel. Cela impose bien sûr de définir des raccords entre les différents sous-domaines de résolution. En d'autres termes, le code adapte et transmet au domaine 2D les informations fournies par le domaine 1D et vice versa. Nous présentons par exemple, les résultats d'une simulation correspondant à une zone qui contient l'île de Broc.

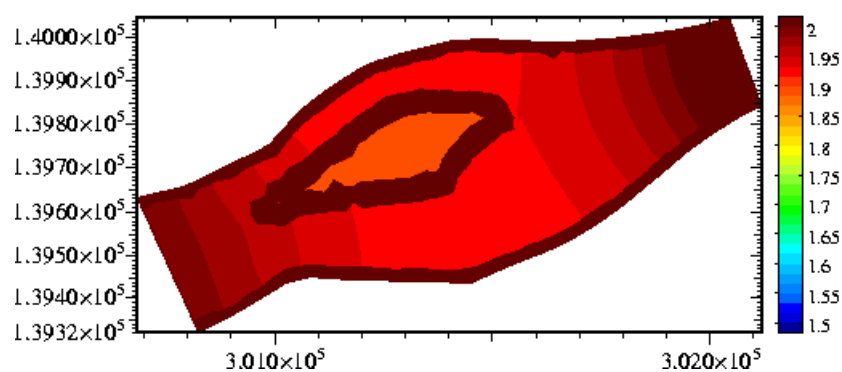
Dans la première figure, la bathymétrie de la zone reconstruite à partir des mesures bathymétriques est représentée.



Dans les planches qui suivent, nous donnons un exemple de résultats fournis par le code.



Vitesses à un instant donné



Niveau à un instant donné

Notons que les deux codes (1D et 2D) ayant été créés de manière indépendante, nous avons développé une interface permettant à ces deux programmes de communiquer entre eux. De plus, des modifications du modèle 1D ont été nécessaires pour permettre la prise en compte des îles et des affluents.

6.2.5. Estimateur *a posteriori* et code 2D vertical.

De manière à aider l'utilisateur dans la définition des zones qu'il conviendra de traiter en 1D, 2D ou 3D, une étude d'estimateur *a posteriori* a été entreprise. L'idée de cette méthode est relativement simple. On commence par effectuer sur un domaine donné un calcul mono-dimensionnel. Une fois la résolution terminée, nous calculons à partir de la solution obtenue, une certaine quantité que l'on appelle estimateur et qui nous renseigne sur l'erreur commise par rapport à une résolution 2D ou 3D. Si l'erreur estimée est trop importante, cela signifie qu'un modèle 1D est insuffisant et qu'il est nécessaire de passer à une résolution 2D ou 3D pour améliorer les résultats.

Un premier test d'estimateur a été effectué dans le cas d'un couplage de modèles 1D et 2D vertical. Cela a bien sûr nécessité le développement d'un code 2D vertical. Dans un canal, nous simulons la remontée d'aval en amont d'une onde de marée. La résolution est dans un premier temps mono-dimensionnelle. Un estimateur d'erreur entre les modèles 1D et 2D vertical est ensuite calculé. Sur les zones où l'estimateur donne une erreur trop importante, une résolution en 2D est alors effectuée.

Dans la figure 64, nous présentons les résultats obtenus. Pour quatre instants de calcul, nous donnons les valeurs de l'estimateur tout le long du canal. Comme nous pouvions le prévoir les valeurs maximales de l'estimateur suivent le front d'onde.

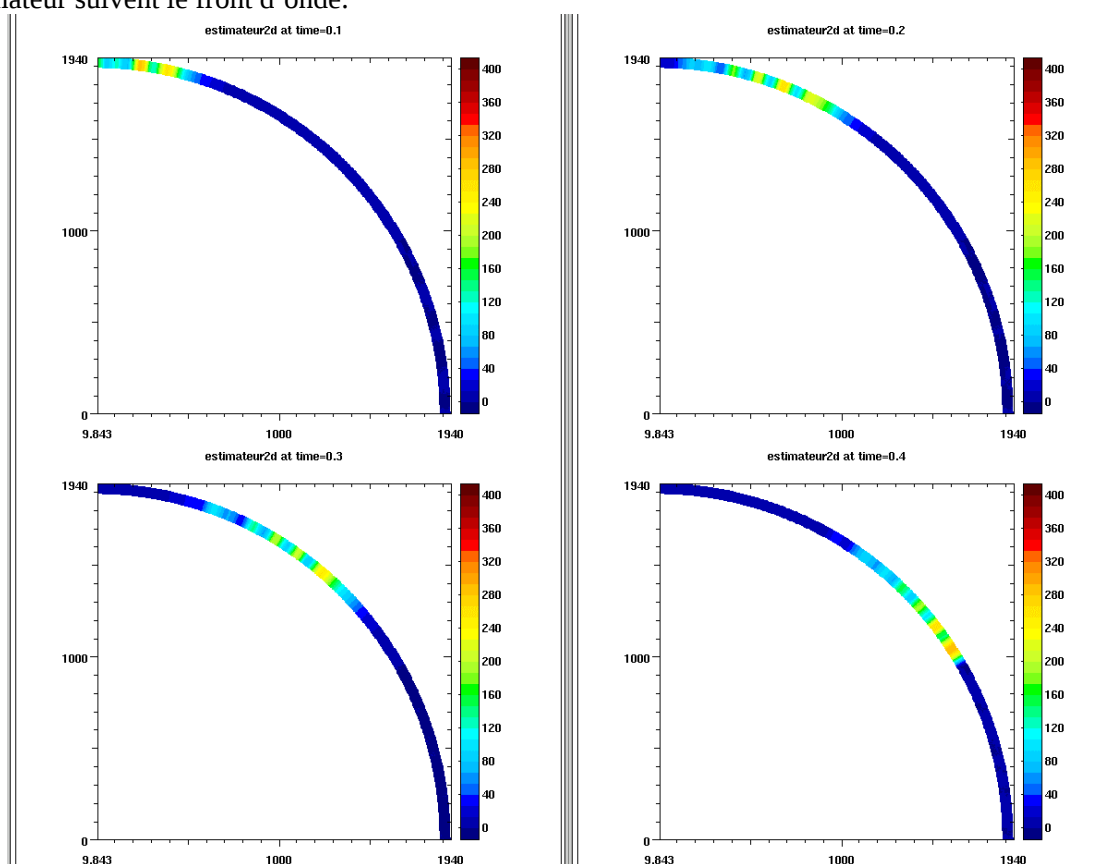


Figure 64 - Estimateur à quatre instants de calcul

Nous présentons ensuite les vitesses aux mêmes instants dans un plan médian vertical (figure 65). Ces vitesses ont été calculées à partir des modèles 1D et 2D vertical couplés. On rappelle que le modèle 1D permet de reconstruire une vitesse dans tout le plan vertical ; ce qui explique la possibilité d'obtenir une représentation globalement 2D alors que le modèle 2D n'est en réalité utilisé que dans une zone qui bouge au cours du temps et qui est définie à l'aide de l'estimateur ci-dessus.

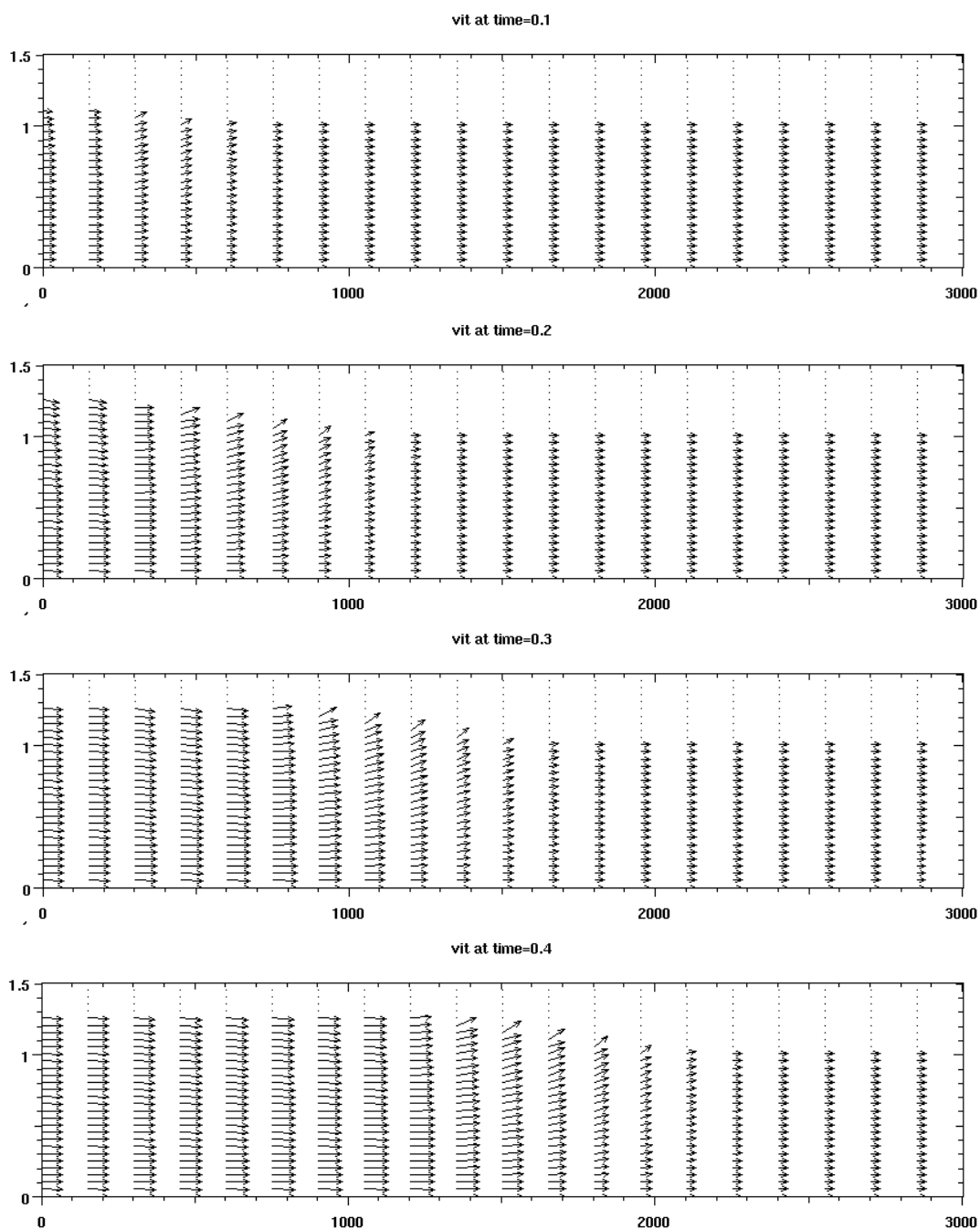


Figure 65 – Reproduction des vitesses simulées à quatre instants de calcul dans le plan médian vertical.

Signalons que ces modèles fournissent des vitesses tridimensionnelles, ce qui permet par exemple, de reconstruire des vitesses dans un plan horizontal comme le montre la figure 66 ci-dessous :

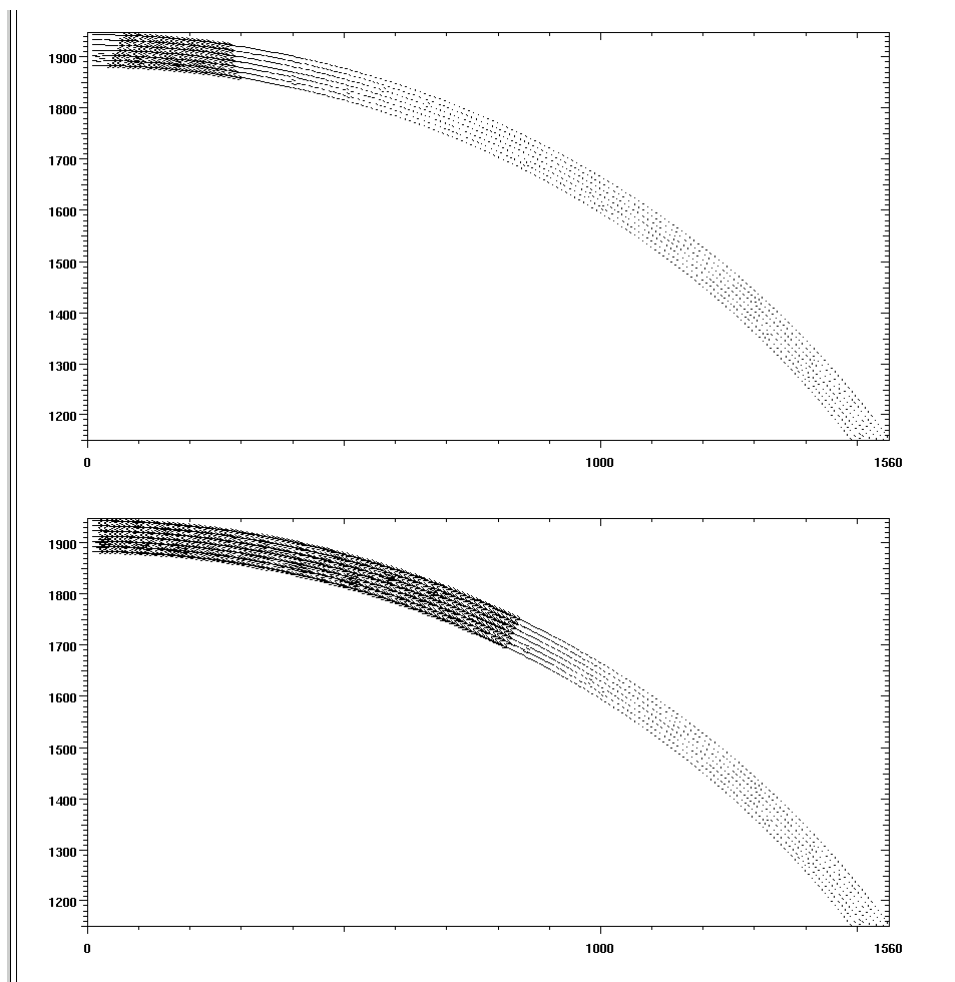


Figure 66 – Reproduction des vitesses simulées dans le plan horizontal

Bien que l'exemple ci-dessus soit très simple, le code 2D vertical a été développé de manière à traiter des cas réalistes. Il pourra donc être intégré rapidement au simulateur traitant le cas de l'Adour.

6.2.6. Conclusions et perspectives.

Nous disposons à l'heure actuelle d'un code de calcul permettant de simuler l'hydrodynamique de l'Adour par couplage des deux modèles 2D horizontal et 1D curviligne. Une phase de calage et de calibration, qui consiste à ajuster les paramètres du modèle par rapport à la réalité physique du fleuve a été entamée et les premiers résultats sont fournis au § 7.

Pour ce qui concerne le code 2D horizontal, celui-ci a été développé et testé sur quelques cas d'école. Afin de le rendre utilisable dans le cadre de l'Adour, il est nécessaire auparavant, d'extraire des données bathymétriques, certaines informations qui serviront de données d'entrée au code 2D vertical. De plus, une interface devra être développée pour permettre au code d'accéder à ces données. A peu de choses près, ces données et cette interface sont similaires à celles que nécessite le code 1D et une partie du travail a donc déjà été réalisée.

Nous rappelons que les modèles mis en œuvre ici sont issus d'une étude théorique que nous avons menée et qui permet d'obtenir un cadre de validité plus général.

Le développement du code 3D vient juste de débiter. Lorsque celui-ci sera opérationnel, se posera le problème de la définition des zones de résolution (1D,2D,3D). L'intégration d'estimateurs *a posteriori* apportera alors une aide précieuse. Une étude théorique a déjà permis de définir des estimateurs d'erreur entre les modèles 1D et 2D et le modèle 3D supposé être optimal. Des premiers tests encourageants ont été réalisés dans le cas d'un canal et d'une modélisation 1D-2D verticale. Le développement de ce type de modèle dépasse le cadre de ce projet et ne sera pas développé dans ce contexte.

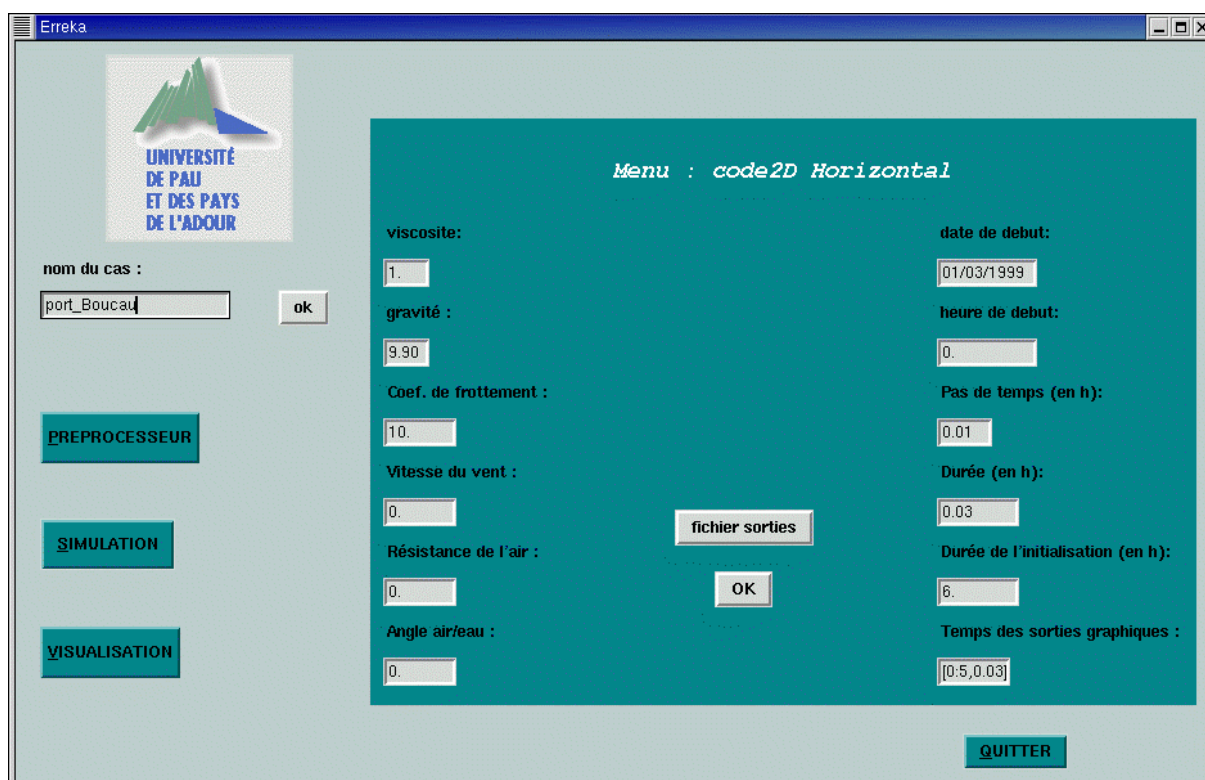
7. CALIBRATION DU MODELE DE CIRCULATION ESTUARIENNE

Pour le modèle unidimensionnel, ces calibrations ont été effectuées (cf. figure 61, § 6.2.1). Il reste cependant à faire une évaluation de la performance du modèle unidimensionnel permettant de prendre en compte les courbures du fleuve et également de tester le modèle 2D horizontal qui permet d'estimer la variabilité des vitesses dans la section transversale (donnée qui a son importance pour expliquer la distribution préférentielle des civelles d'une rive à l'autre dans ou après une section de méandres).

7.1. Interface utilisateur.

La simulation de l'hydrodynamique d'un fleuve nécessite au préalable un nombre important de mesures bathymétriques. Sur toute la longueur du fleuve à traiter, tous les 40-50 m environ, un bateau muni d'appareils de mesures traverse la largeur du fleuve et fournit la profondeur à intervalle de temps régulier. Simultanément, un système GPS associe à cette profondeur, la position exacte du bateau (cf annexe 7). On dispose ainsi d'un fichier contenant plusieurs milliers de lignes où sont répertoriées les coordonnées des points et la profondeur correspondante. A ces mesures bathymétriques, on rajoute des points de berges qui vont définir la géométrie de la rivière ainsi que les données concernant les dénivelés. Toutes ces mesures sont ensuite stockées dans un fichier qui ne peut, de par sa taille, être traité à la main. Des outils informatiques sont alors nécessaires pour reconstruire la géométrie du fleuve et générer le maillage nécessaire aux méthodes d'approximations numériques. Cette étape constitue le préprocesseur du simulateur. Une fois les calculs effectués, on utilise des outils pour extraire des résultats, les informations qui nous intéressent et créer des images qui nous permettent d'interpréter la réponse fournie par le code. Cette dernière partie s'appelle le post-processing. Sans une interface graphique, l'utilisation globale du simulateur nécessiterait la connaissance préalable de tous ces outils et serait longue et fastidieuse.

Pour notre application, l'interface que nous avons développée, a été baptisée « Erreka » (rivière en Basque). L'image ci-dessous représente la fenêtre principale de l'interface graphique.



7.2. Calibration du modèle.

Avant de pouvoir obtenir des résultats de simulation qui collent à la réalité, il est indispensable de procéder à une calibration des coefficients de frottements (c'est à dire à une estimation de ces coefficients). Pour cela, nous disposons de mesures de courants effectuées à des postes fixes pendant plusieurs heures. Pour chacun de ces postes fixes nous prenons, comme domaine bidimensionnel pour notre simulation, une

zone qui contient le point. De manière à éviter les problèmes numériques liés au couplage entre les modèles 1D et 2D. La zone 2D est donc définie de manière à ce que notre point fixe se trouve approximativement au centre de la zone. Nous effectuons alors une série de simulations correspondant à la date et à la période horaire pendant laquelle ont été effectuées les mesures. En fonction de la réponse fournie par le code nous augmentons ou diminuons le coefficient de frottement, jusqu'à obtenir une vitesse de courant correcte proche des mesures. Compte tenu du fait que la vitesse calculée est une moyenne sur la hauteur d'eau, des mesures de courant ont été effectuées à différentes hauteurs et nous comparons les vitesses calculées à la moyenne de ces mesures. Bien sûr, il n'y a aucune raison pour que le coefficient de frottement reste constant tout au long du fleuve, mais à moins d'un changement brutal dans le lit de la rivière, on peut s'attendre à une certaine continuité dans la valeur de ces coefficients.

Nous présentons ci-dessous deux exemples de calibration.

➤ Exemple 1 de calibration

Le premier exemple de calibration correspond à une zone de deux kilomètres de long située à son origine à deux kilomètres de l'embouchure. Le point fixe de mesure se trouve à environ trois kilomètres de l'embouchure. La période qui nous intéresse débute à 13 h et se termine à 15h. La date correspondante est le 29 juillet 1998 (basse mer à 10h05-pleine mer à 16h19).

Le maillage utilisé pour cette calibration est représenté à la figure 67 ; ce qui nous donne aussi la géométrie de cette portion du fleuve.

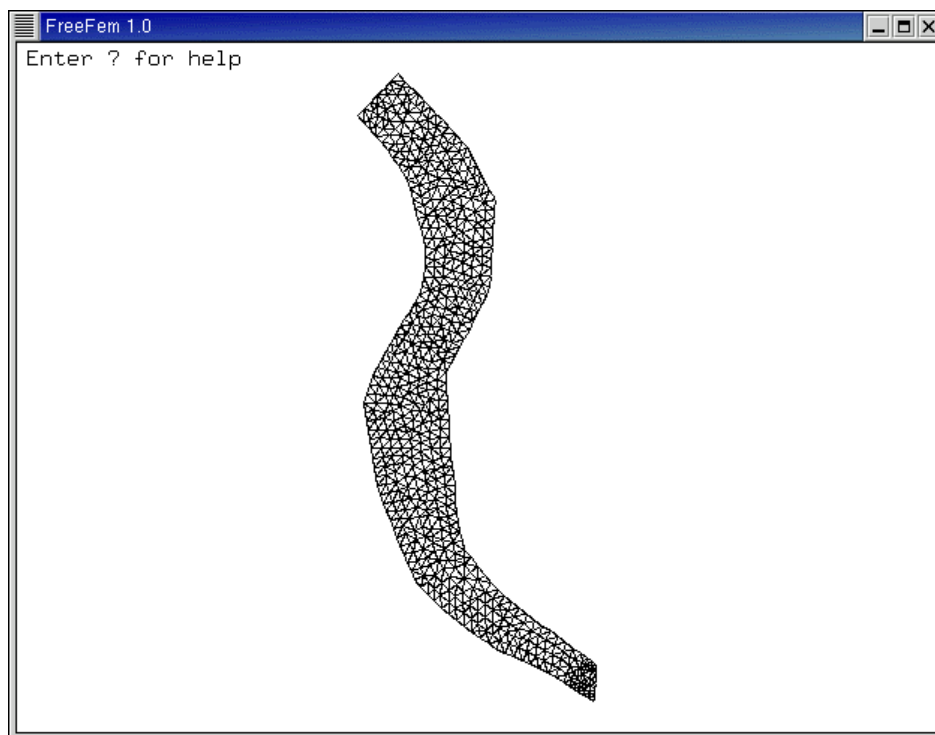


Figure 67 – maillage de calcul utilisé pour la calibration du premier exemple.

Pour un coefficient de frottement de 0.023, les variations pour les vitesses mesurées et calculées (en m/s et suivant le temps en heures) sont données en figure 68.

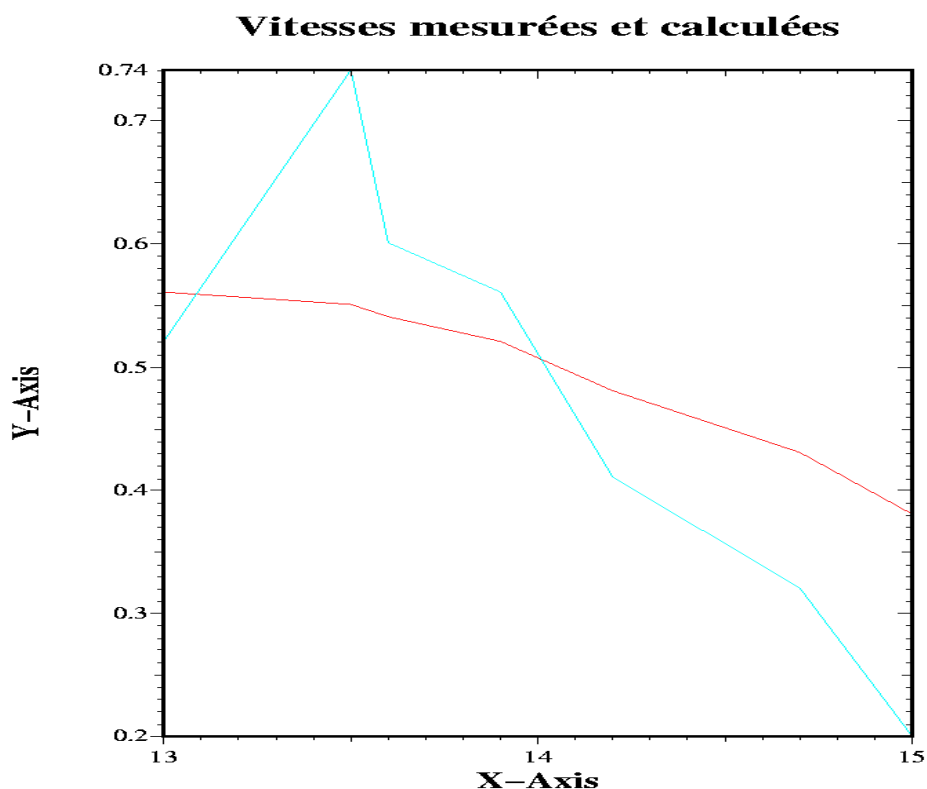


Figure 68 – Variation conjointe dans le temps (axe des X) des vitesses mesurées et calculées (axe des Y) en un point fixe. (La courbe en bleu représente les vitesses mesurées tandis que la rouge correspond aux vitesses calculées).

Notons qu'il n'est pas facile d'effectuer une calibration sur la base d'un point fixe. D'une part, les mesures de vitesses n'ont été faites que sur 3 m de profondeur alors que la profondeur au point de mesure est de plus de neuf mètres. De plus, la variation de la cote de la surface libre est comme une onde qui se déplace le long du fleuve. L'erreur d'approximation numérique faite lors du calcul de la hauteur d'eau a pour effet d'étaler et d'aplatir cette onde. Les variations des vitesses que l'on obtient alors numériquement devancent donc les variations réelles, et sont moins brusques. Cela peut expliquer les différences notées sur la figure 68. La solution pour limiter ce phénomène est bien sûr, d'augmenter la précision du calcul en diminuant la taille des mailles des modèles 1D et 2D, mais cela entraînera un coût de calcul supplémentaire.

La figure 69 représente les vitesses obtenues à 15h sur une portion de la zone. Il s'agit ici d'une visualisation dans un plan horizontal qui montre bien l'hétérogénéité bidimensionnelle des vitesses calculées dans l'axe longitudinal et dans la section transversale.

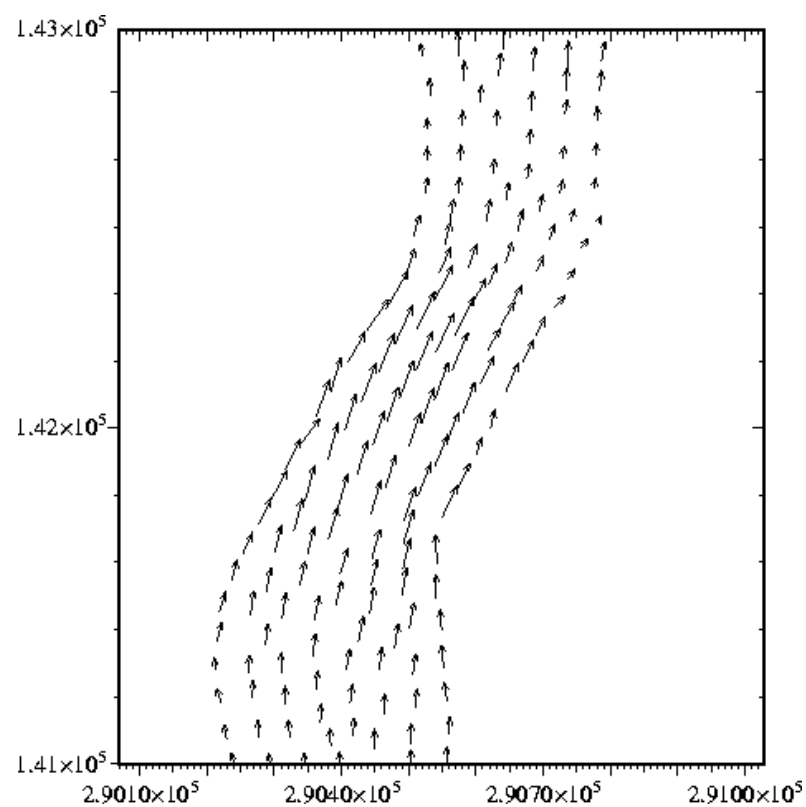


Figure 69 – représentation bidimensionnelle des vitesses dans une sous- portion du fleuve maillée selon la figure 67

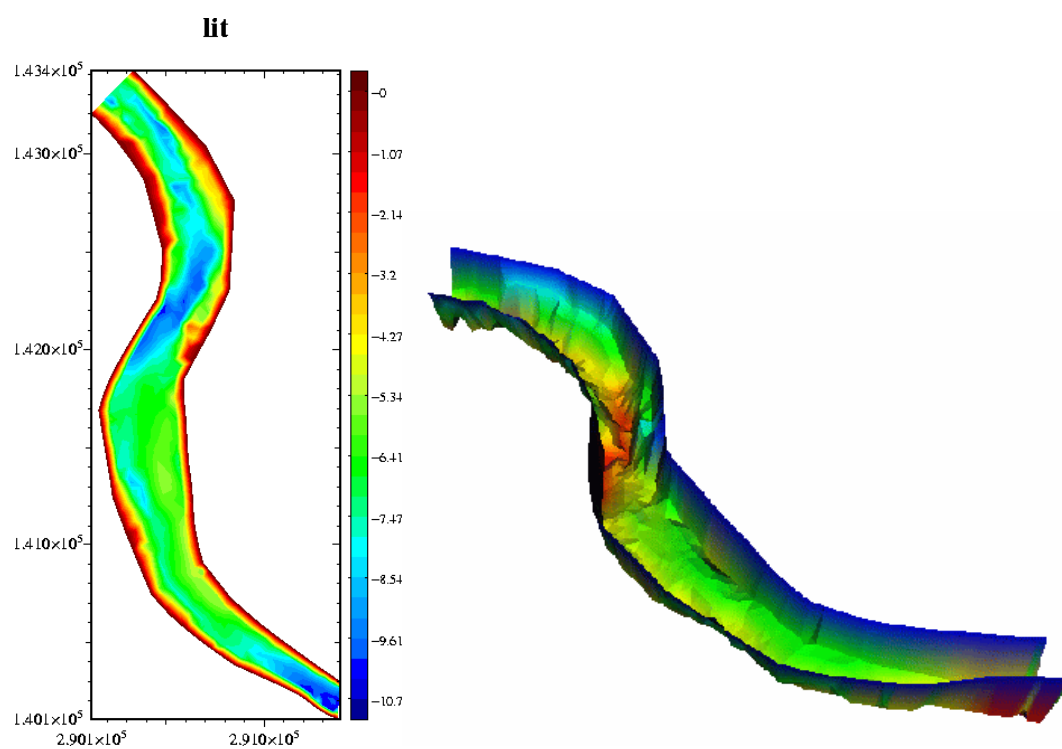


Figure 70 – visualisations 2D et 3D de la bathymétrie de la portion étudiée pour la calibration du modèle.

➤ Exemple 2 de calibration.

Le point fixe se trouve à 6 km de l'embouchure. Les mesures ont été effectuées le 06 août 1998, de 12h à 15h. (BM : 10h19 -PM :16h05). Au début de la période de simulation, les courants commencent à s'inverser.

Le maillage utilisé dans le calcul ainsi que la géométrie de la partie traitée sont représentés en figure 71.

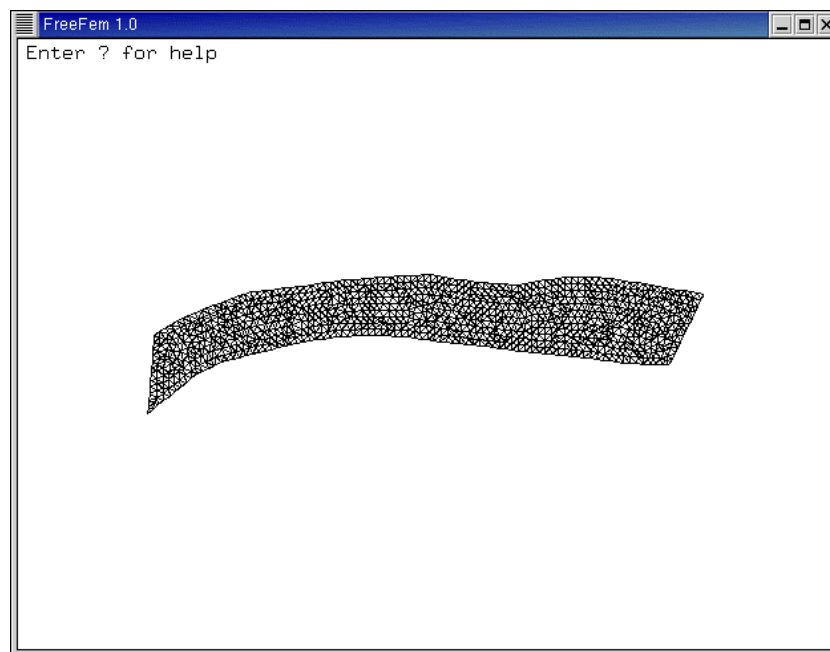


Figure 71 – Représentations du maillage et de la géométrie traités pour l'exemple 2

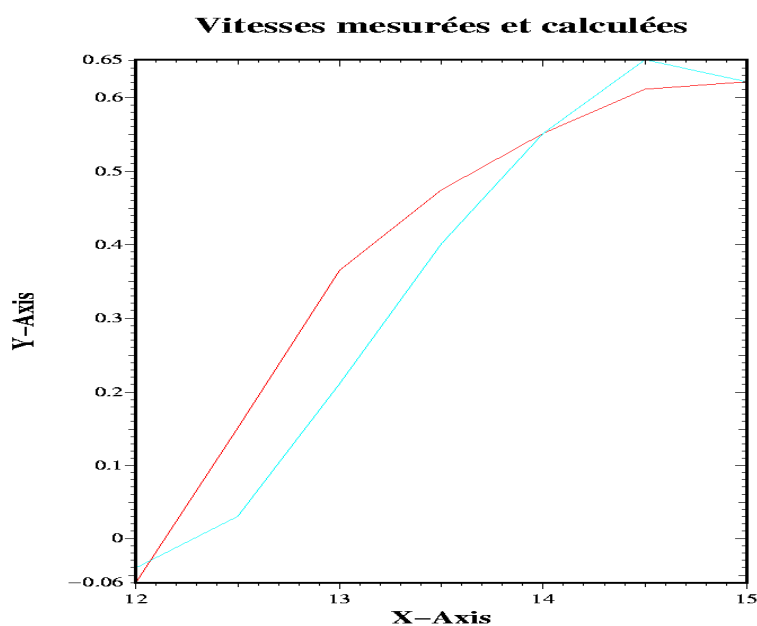


Figure 72 – Variation conjointe dans le temps (axe des X) des vitesses mesurées et calculées (axe des Y) en un point fixe (La courbe en bleu représente les vitesses mesurées tandis que la rouge correspond aux vitesses calculées).

Ces résultats ont été obtenus avec un coefficient de frottement de 0.021. Ici, l'approximation semble être meilleure. De même, dans l'exemple 1, les variations en vitesse se font avant dans la simulation et de manière moins franche. On remarque notamment que l'inversion des vitesses simulées a lieu 20 minutes avant pour le simulateur par rapport à la réalité.

On représente à la figure 73 la bathymétrie de la portion traitée (2D et 3D vue de l'aval).

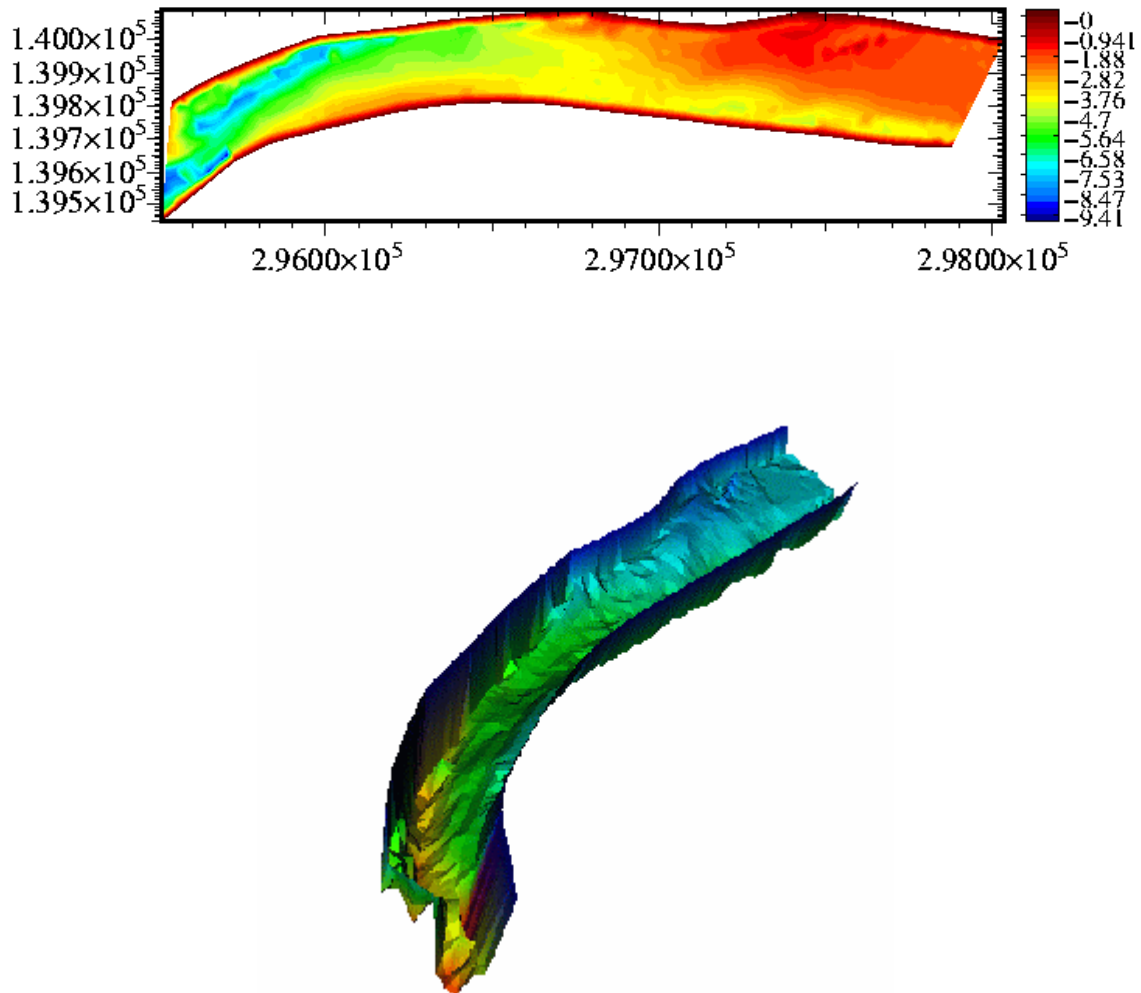


Figure 73 – visualisations 2D et 3D de la bathymétrie de la portion étudiée pour la calibration du modèle dans l'exemple 2.

Dans les figures 74, 75 et 76 ci-dessous, on représente la vitesse calculée autour du point de mesure, avant et après l'inversion des courants.

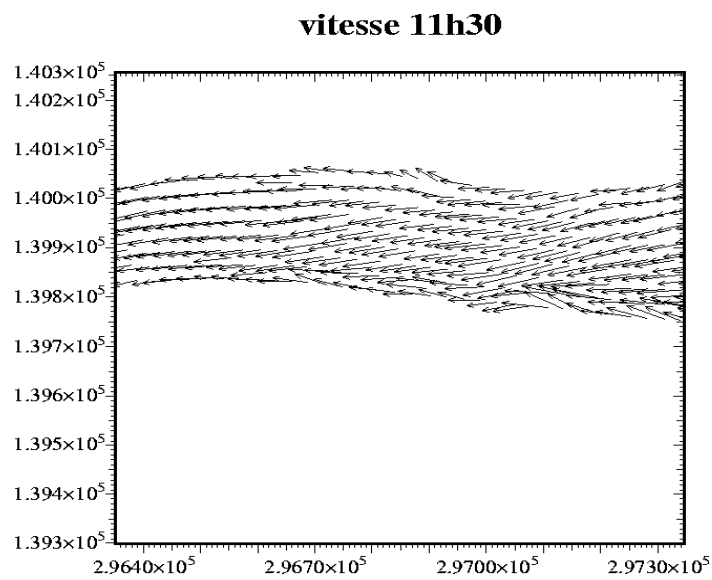


Figure 74 – Valeurs des vitesses autour du point de mesure

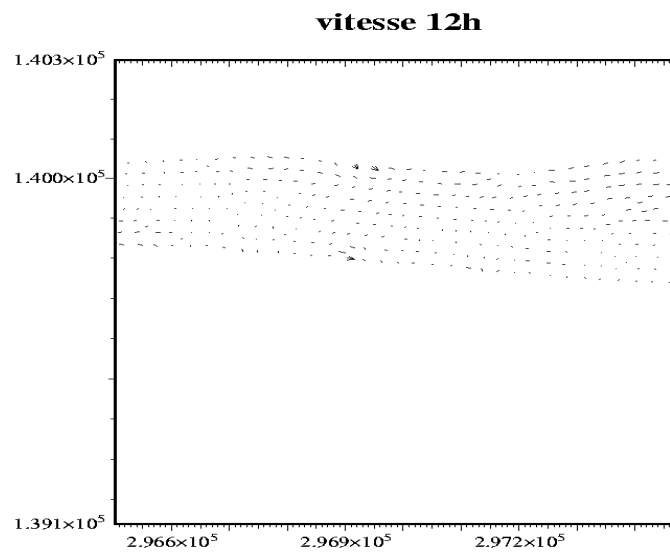


Figure 75 – Valeurs des vitesses avant l'inversion des courants

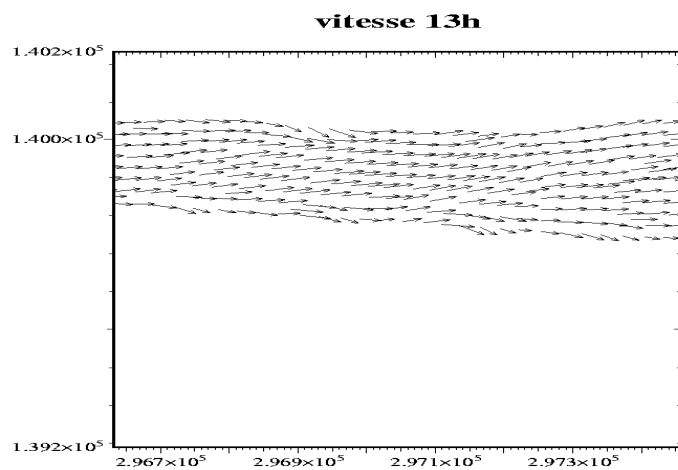


Figure 76 – valeurs des vitesses après l'inversion des courants

La figure 77 donne les niveaux d'eau au début, en milieu et en fin de simulation. Les berges sont visualisées par une bordure marron.

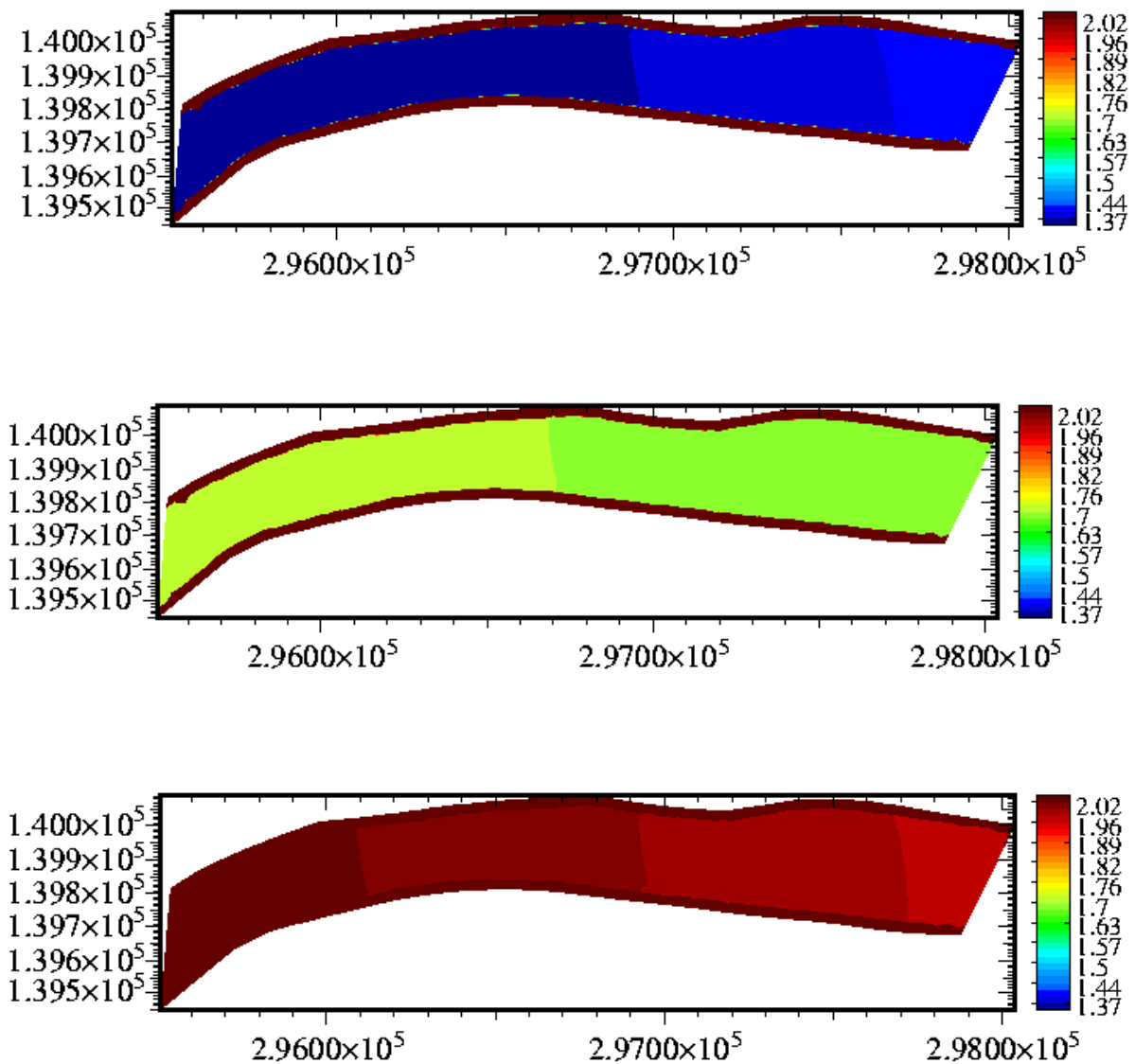


Figure 77 – visualisation des niveaux d'eau en début, au milieu et en fin de simulation

8. SIMULATION DES DEPLACEMENTS DES CIVELLES DANS LA PARTIE NON STRATIFIEE DE L'ESTUAIRE : RESULTATS PRELIMINAIRES DE L'ETUDE THEORIQUE DU MODELE COMPORTEMENTAL DANS LE CADRE DETERMINISTE

8.1. Description du modèle comportemental.

Le modèle, que nous proposons, décrit la variation instantanée de la densité de civelles présentes en un point fixé quelconque de la rivière sous l'influence des facteurs suivants : courants, luminosité et turbidité, et comportement de la civelle. Le modèle est constitué de trois groupes d'équations :

1. Les équations des courants : 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 (cf. § 6.2.1) ;
2. 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 ;
3. 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. Dans la phase considérée, on suppose que l'individu ne s'alimente pas. Dans cette première phase de notre étude, le point iii) n'a pas été traité. Nous détaillons les points i) et ii).

i) Mouvement horizontal : L'équation de la civelle est basée sur les hypothèses suivantes. La civelle cherche à remonter la rivière. Elle le fait, dans une première phase où elle ne se nourrit pas, de manière passive, en se laissant porter par les courants montants produits par la marée. On admet donc qu'elle se laisse entraîner horizontalement quand le courant est dirigé de l'aval vers l'amont (type « flot »). Elle se laisse encore entraîner par un faible courant du type « débit » (sens amont – aval). Quand le courant se renforce dans le sens « débit », c'est à dire, croît en valeur absolue (ou, amplitude) en restant dirigé vers l'aval, la civelle se dirige vers le lit de la rivière. Elle a donc un mouvement descendant dans la colonne d'eau, d'autant plus marqué qu'elle se trouve loin du fond et que le courant horizontal est fort. Dans cette situation, le mouvement de la civelle est donc la résultante de deux actions : celle du courant qui l'entraîne vers l'aval et la sienne propre qui l'entraîne aussi rapidement que possible vers le fond où en s'enfouissant dans le sédiment, elle se met à l'abri du courant. Au cours de sa descente vers le fond de la rivière, la civelle va normalement être confrontée à un courant dont l'amplitude diminue. Le modèle unidimensionnel ne permet pas de représenter la probable hétérogénéité du courant dans la colonne, et en particulier le phénomène de couche limite au fond de la rivière. Cette hétérogénéité porte non seulement sur l'amplitude du courant mais aussi sur sa direction. Au fond de la rivière, le courant est le plus souvent dirigé vers l'aval, quand il n'est pas tourbillonnaire. Il est possible de prendre en compte la variation en amplitude en multipliant la composante horizontale du vecteur courant (ici, le courant lui-même) par une quantité qui dépend de la profondeur et qui diminue quand la profondeur augmente. Le phénomène de couche limite au fond fait que, en principe, le courant de débit persiste jusqu'au fond. C'est ce qui explique, en partie, que la civelle cherche à pénétrer dans le sédiment. Il semblerait donc légitime de considérer la zone où se meut la civelle comme constituée de deux compartiments : la colonne d'eau proprement dite où la civelle est soumise à l'action du courant et le sédiment où le courant n'a pas d'action. On pourrait alors décrire la dynamique de la civelle pendant tout intervalle de temps durant lequel le courant est un débit d'amplitude supérieure à un certain seuil comme le passage du compartiment « colonne d'eau » au compartiment « sédiment » où elle reste tant que le courant garde les mêmes caractéristiques. Pour modéliser cet échange, on peut d'abord simplifier la représentation du sédiment en l'assimilant à un point, le point qui définit le fond de la rivière dans les cartes bathymétriques. On évalue le flux entrant dans le sédiment en considérant que, en l'absence d'action du courant horizontal à ce niveau, la seule cause de variation de la densité de civelles en un point du fond est celle due aux échanges avec la colonne d'eau : négligeant alors la diffusion verticale (supposée de nature comportementale) ainsi que la diffusion horizontale. En modélisant la vitesse de plongée sous la forme de la somme d'une vitesse minimale fixe et d'un terme de correction dépendant de la position dans la colonne qui est d'autant plus important que l'on est loin du fond et qui est nul sur le fond, le taux de variation

instantanée (le flux de civelles dans le sédiment) est donc égal au produit de la densité de civelles arrivant au bas de la colonne (avant leur passage dans le sédiment) par la valeur absolue de la vitesse minimale de déplacement vertical. En intégrant cette quantité entre deux instants successifs pendant lesquels le débit est resté supérieur à la valeur seuil, on obtient la densité de civelles qui se sont enfouies dans le sédiment dans cette période, densité exprimée en nombre de civelles par unité de longueur de rivière. Quand, à l'inverse, le courant devient un flot ou que le débit devient inférieur au seuil, les civelles sortent du sédiment et vont dans la colonne d'eau.

La dynamique du retour dans la colonne d'eau n'est, à notre connaissance, pas décrite dans la littérature. Des documents filmés existent toutefois, à partir desquels on peut imaginer plusieurs scénarios: retour progressif, les civelles regagnant la colonne les unes à la suite des autres, retour aléatoire ; le plus simple, qui ne reflète pas nécessairement la réalité est de supposer que le retour est instantané et se produit en un point de la longueur de la rivière dès que les conditions sont réalisées en ce point. Cette hypothèse est modélisée sous la forme d'un terme source introduit dans l'équation de la civelle, terme qui, idéalement, est une distribution spatio-temporelle répartie sur la courbe formée des points représentant le franchissement en chaque point du fond de la rivière où cela se produit au moment où le seuil est franchi.

Dans notre modèle, le compartiment « sédiment » a été ignoré. On a supposé sans plus de précision que le courant horizontal est nul au fond de la rivière et que dans la période transitoire où le courant passe de « flot » à « débit », après que le seuil ait été franchi, le déplacement horizontal est négligeable par rapport au déplacement vers le fond de la rivière, et est donc annulé. Cette approximation se justifie quand on considère les rapports entre les grandeurs respectives : distance parcourue horizontalement pendant la période où la civelle fait verticalement le trajet depuis un point de la colonne d'eau jusqu'au fond, c'est à dire, au plus quelques mètres, comparée à la longueur de la zone-atelier, qui est de quelques kilomètres. En ramenant les dimensions verticale et horizontale au même ordre de grandeur, les dérivées par rapport à la variable horizontale sont multipliées par un petit coefficient. On notera que dans cette opération, les termes de diffusion horizontale sont multipliés par le carré de ce petit coefficient. Dans une perspective d'étude visant à dégager les caractéristiques du mouvement vertical, cette approximation paraît donc légitime.

Autres aspects du mouvement horizontal : le transport horizontal a été modélisé comme étant proportionnel au courant (unidimensionnel et horizontal). Mais qu'en est-il exactement ? Des observations en laboratoire indiquent que les civelles se déplacent à contre-courant. S'il en est ainsi, le déplacement résultant sera la différence entre la vitesse du courant et celle de la civelle : cette différence donne un mouvement net dans le sens opposé au courant, quand la vitesse du courant est inférieure à celle de la civelle. Par conséquent, elles remontent la rivière, quand le courant est un débit, pourvu que la vitesse du courant soit inférieure à leur vitesse propre. Elles s'enfouissent quand elle est supérieure à leur vitesse propre. Au contraire, elles vont descendre la rivière quand le courant est un flot, d'amplitude inférieure à leur vitesse propre, mais se laisseront entraîner vers l'amont quand la vitesse du flot dépasse leur vitesse propre.

ii) Mouvements dans la colonne d'eau : le déplacement vertical est la résultante de deux actions. Un mouvement vers le fond pour échapper aux courants de débit quand la vitesse dépasse la vitesse propre des civelles ou lorsque l'indice d'éclairement dépasse une valeur seuil. Un mouvement dispersif, aléatoire, activé quand le courant est soit de « type flot », soit de « type débit » de vitesse inférieure à celle des civelles et que l'indice d'éclairement est inférieur à la valeur seuil. Ces deux mouvements alternent au cours du temps et de l'alternance du flot et du jusan, au gré aussi de la succession des périodes de plus ou moins grande turbidité et de luminosité.

Cette alternance est régie par les variations du courant et de l'indice d'éclairement, elles-mêmes calculées par intégration des modèles de circulation et de turbidité. Ceux-ci sont déterminés à partir des données sur le niveau de la rivière à l'aval et en amont et des valeurs sur la teneur en boue des eaux en amont et sur les dépôts de sédiments provenant des berges, ainsi que celles sur l'éclairement. Dans l'hypothèse où ces données sont accessibles, la résolution des équations est parfaitement déterministe, les données jouant le rôle de termes forçants. Dans le cas où l'on suppose que tout ou partie des données est aléatoire, cas des données météorologiques ou de turbidité par exemple, l'alternance des périodes où la civelle s'enfouit dans le sédiment ou simplement descend au bas de la colonne d'eau et des périodes où elle se déplace dans toute la colonne d'eau se décrit comme un processus stochastique.

L'équation dite « des civelles » présente, du point de vue mathématique, des difficultés qui rendent sa résolution théorique problématique. Il y a le fait que l'équation change de type. Elle passe du parabolique du second ordre à l'hyperbolique du premier ordre. Elle change de type de manière abrupte, les coefficients

varient de manière discontinue par rapport à l'espace et au temps. Notre attention s'est focalisée sur deux questions :

1. Positivité des solutions : la turbidité et la densité de civelles sont des fonctions à valeurs positives ou nulles. C'est une conséquence de l'interprétation de ces fonctions, mais, mathématiquement, la positivité doit être démontrée. Il n'y a aucun argument trivial qui permette de l'affirmer sans une étude préalable qui a été faite. Essentiellement, la positivité ne pose problème que dans le cas parabolique et elle se démontre en appliquant une technique classique d'estimation de la partie négative des solutions.
2. Existence de solutions stationnaires : le régime stationnaire est celui qui s'établit après le régime transitoire. Ceci peut notamment suivre la survenue d'un événement inhabituel, en général intense et peu durable. Les perturbations du régime stationnaire sont, dans notre cas, une marée d'ampleur exceptionnelle ou des pluies catastrophiques. Quand, au cours d'une période assez longue, aucun événement exceptionnel ne survient, il s'établit un régime périodique, rythmé par le cycle des marées. Si l'on suppose qu'en même temps les dépôts de toutes sortes, boues et matières domestiques ou déchets organiques divers, arrivent à un taux à peu près constant de l'amont et des berges, alors l'indice d'éclairement va aussi suivre un cycle qui est celui de la lumière. La situation est en fait beaucoup plus compliquée pour l'indice d'éclairement, car il est aussi affecté par la couverture nuageuse et par le cycle lunaire. En simplifiant, en première approximation, considérons que les forçages physiques soient tous périodiques, et même constants. Nous avons montré que des conditions aux limites (de la zone atelier) constantes entraînent l'existence d'une solution constante en temps, mais variable en espace, de l'équation des courants. Ce premier résultat fait appel à des outils mathématiques non triviaux (théorie du degré topologique). A noter que l'équation du courant est en réalité un système dont les inconnues sont le courant et la section mouillée. En introduisant un courant stationnaire dans l'équation de la turbidité, on obtient une équation dont les coefficients ne dépendent que de l'espace et pour laquelle on établit aisément l'existence d'une solution stationnaire. L'indice d'éclairement se calcule ensuite explicitement. La recherche de solutions stationnaires de l'équation des civelles est une question beaucoup plus délicate, du fait que l'équation prend plusieurs formes suivant les valeurs du courant et de l'indice d'éclairement. Les résultats obtenus jusqu'ici ne sont que préliminaires et partiels.

8.2. Résultats numériques simplifiés.

Des essais numériques ont été faits, avec des valeurs différentes des paramètres et coefficients, qui montrent l'évolution au cours du temps de la distribution des civelles dans les différents compartiments. Ils mettent en évidence le rôle du point de renverse des courants ($x = \hat{X}$ ou encore front de migration longitudinal) séparant la partie aval, d'un côté, où le courant est dirigé vers l'amont et les civelles restent dans la colonne d'eau et sont transportées vers l'amont, et de l'autre côté, la partie amont où le courant est dirigé vers l'aval et les civelles plongent vers le fond. Ces différents types de migration peuvent être résumés dans le tableau suivant (sous réserve que $\hat{X}$ et $\hat{Z}$ existent) :

	$x > \hat{X}$	$x < \hat{X}$
$z > \hat{Z}$	Migration sur le fond	Migration vers le fond et enfouissement dans le sédiment
$z < \hat{Z}$	Migration dans toute la colonne d'eau	Migration vers le fond et enfouissement dans le sédiment

Ces essais ont été faits en utilisant des modèles explicites et stationnaires des fonctions « intensité du courant horizontal » (réduit à sa composante longitudinale) et « intensité lumineuse dans la colonne d'eau ». Il est ainsi possible de calculer explicitement l'abscisse du front de migration longitudinal $\hat{X}$ ainsi que l'ordonnée du seuil de dispersion verticale $\hat{Z}$. Nous présentons ci-dessous trois jeux de simulations mettant

en lumière l'influence que peuvent avoir le taux d'entrée dans l'estuaire des civelles et le coefficient de mortalité. La donnée initiale a été choisie constante uniformément dans tout le domaine, ici ramené au carré de côté 2. Chaque figure représente la répartition des individus dans ce domaine tous les cinquièmes de temps d'observation, la première figure représentant la répartition à l'instant initial.

A la figure 78, on peut constater qu'il apparaît une frontière verticale ($x = 1,06$) représentant le front de migration longitudinal où viennent s'agglutiner les civelles provenant de l'aval au cours du temps, sans toutefois franchir cette frontière. A droite de celle-ci les individus, comme le laissait présager le précédent tableau, rejoignent progressivement le fond du domaine, il n'y a aucun mouvement de migration longitudinal. Ce même phénomène est visible à gauche de la frontière verticale au-dessus de la courbe $z = \hat{Z}$ qui se dessine petit à petit. Ainsi des individus semblent se regrouper dans la zone où $u = \hat{u}$ et $E = \hat{E}$.

A la figure 79 suivante, on a doublé arbitrairement le taux d'entrée dans l'estuaire des civelles. L'allure graphique globale semble identique à celle visualisée à la figure 78 puisque les courbes $x = \hat{x}$ et $z = \hat{Z}$ sont inchangées. L'intérêt réside dans la mise en évidence d'une couche de civelles de densité croissante au cours du temps qui s'établit à proximité de la couche $z = \hat{Z}$ à gauche du front de migration longitudinale.

Ainsi, si cette couche ($z = \hat{Z}$) rejoint la surface, par exemple la nuit ou lors d'une forte turbidité de l'eau, les civelles se retrouveront dans la zone exploitée par les pêcheurs. On peut aussi remarquer que c'est peut être cette accumulation d'individus lors de mauvaises conditions de migration longitudinale qui forment les concentrations de civelles dès que les conditions hydrologiques deviennent favorables à leurs migrations vers l'amont.

Dans la figure 80, le taux de mortalité a été doublé par rapport à celui de la figure 79. A l'instar des commentaires fait sur la figure 79, la répartition des individus y est identique, mais en densités plus faibles. Le taux d'entrée n'est pas suffisant pour régénérer le domaine, surtout celui qui se situe à droite du front de migration qui ne reçoit pas de nouveaux individus provenant de la zone de gauche.

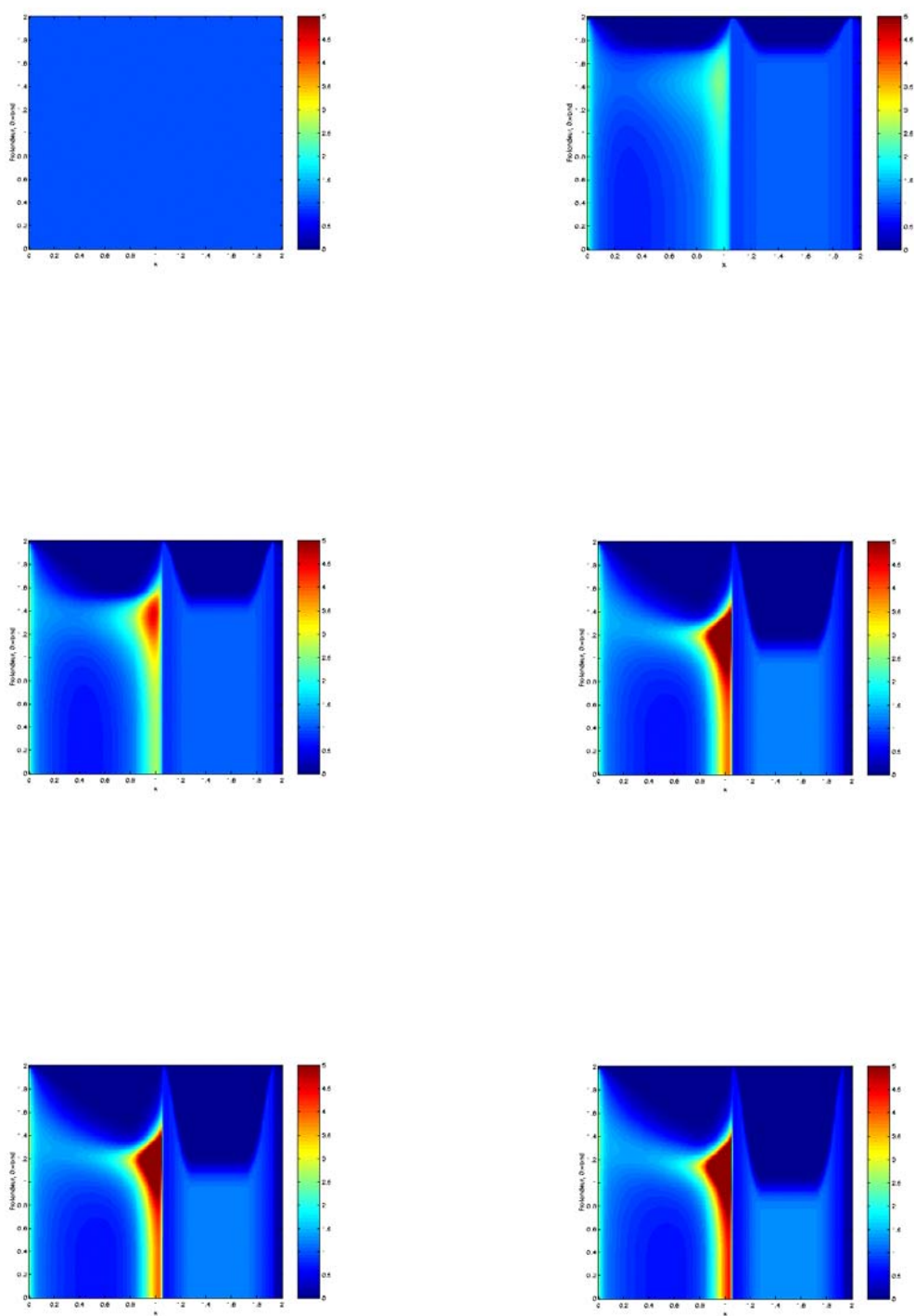


Figure 78 - Répartition des civelles au cours du temps (répartition initiale représentée dans le graphe supérieur gauche).

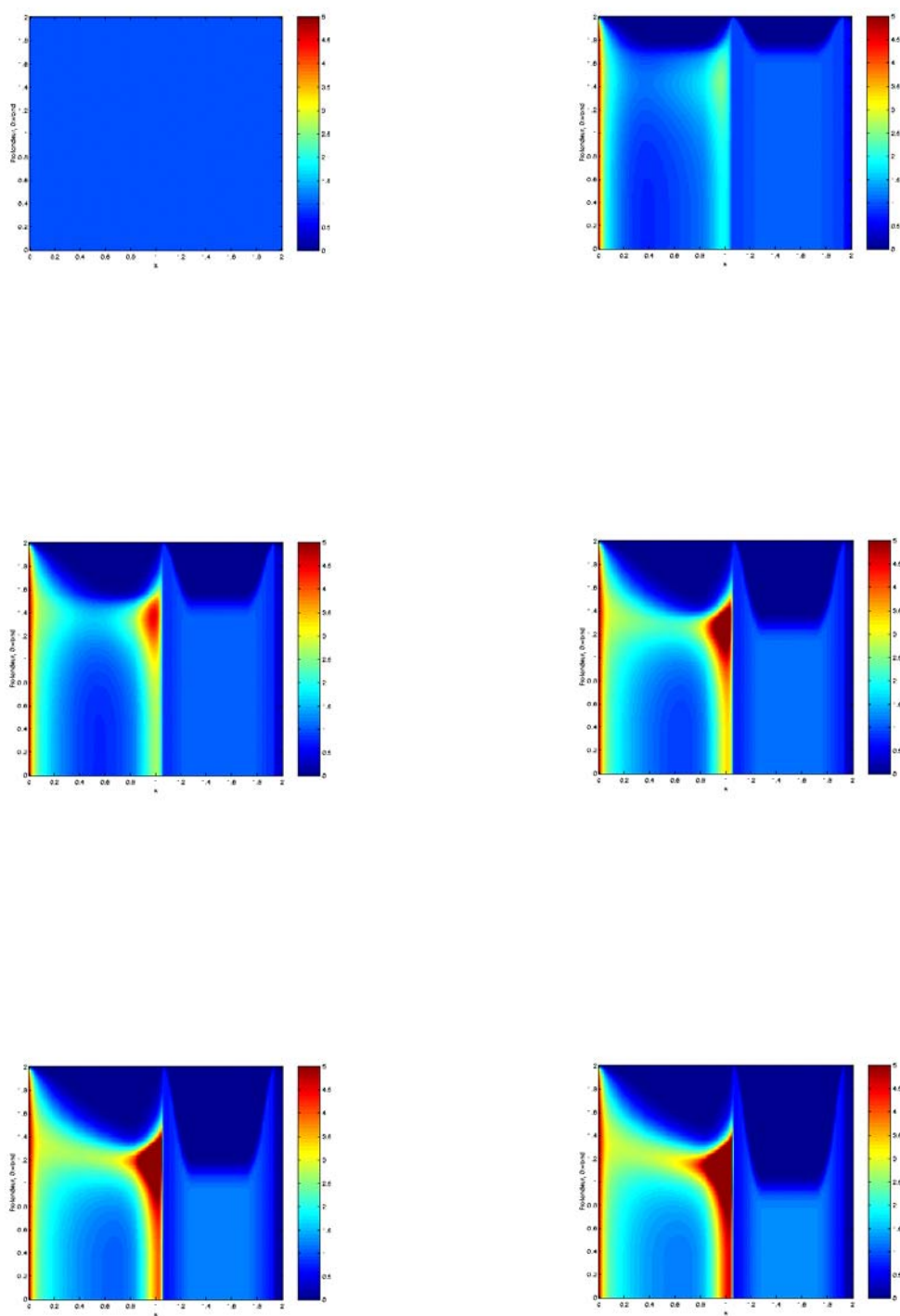


Figure 79 - Répartition des civelles au cours du temps, avec un taux d'entrée double de celui de la figure 78.

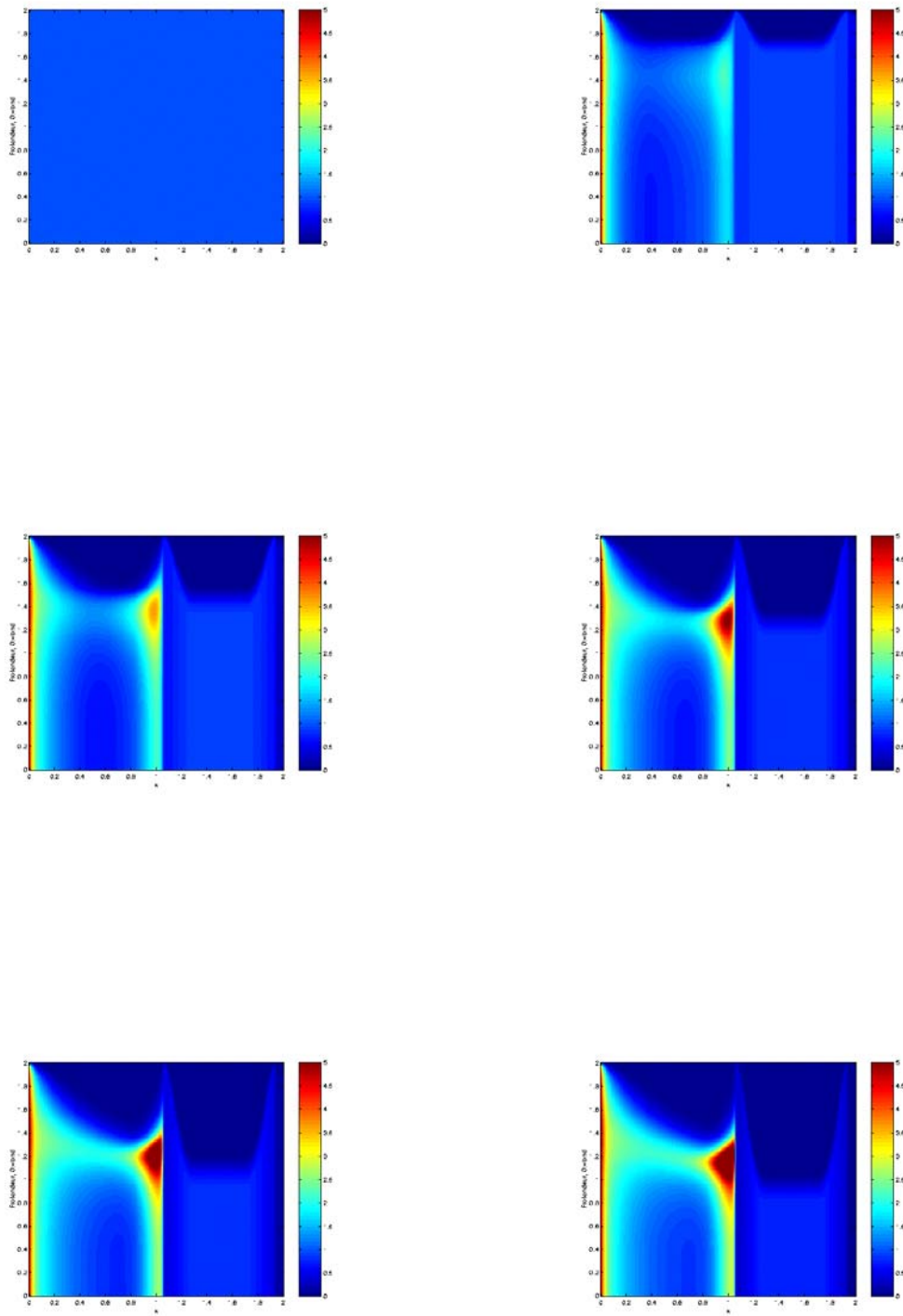


Figure 80 - Répartition des civelles au cours du temps avec un taux de mortalité double de celui de la figure 79.

8.3. Simulation comportementale en estuaire.

Le modèle comportemental est décrit dans ses grandes lignes au § 8.1. Nous rappellerons qu'il utilise les résultats du modèle hydrodynamique unidimensionnel qui permet de simuler la trajectoire d'une particule soumise à 2 contraintes majeures : la particule se plaque au fond dès que le courant est dirigé vers l'aval avec une vitesse supérieure à 0,3 m/s. Elle reste au fond tant que le jour n'a pas décliné ou se dirige vers le fond dès que le jour est naissant, même si le flot se propage dans l'estuaire. Si le flot se poursuit après la naissance du jour, elles migrent sur le fond à la vitesse de la propagation du flot. Ce modèle n'intègre pas la contrainte sur la dispersion des civelles dans la colonne d'eau liée à la variabilité de la turbidité.

Pour initialiser la simulation, on injecte au départ une densité de civelle de 50 g/100 m³ à l'embouchure (ce qui semble cohérent avec les observations effectuées plus en amont lors des campagnes de prélèvement) et toutes les 6 heures cette concentration est réinjectée 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.

8.3.1. Présentation de la visualisation des résultats.

Les simulations du déplacement des civelles sont présentées comme suit :

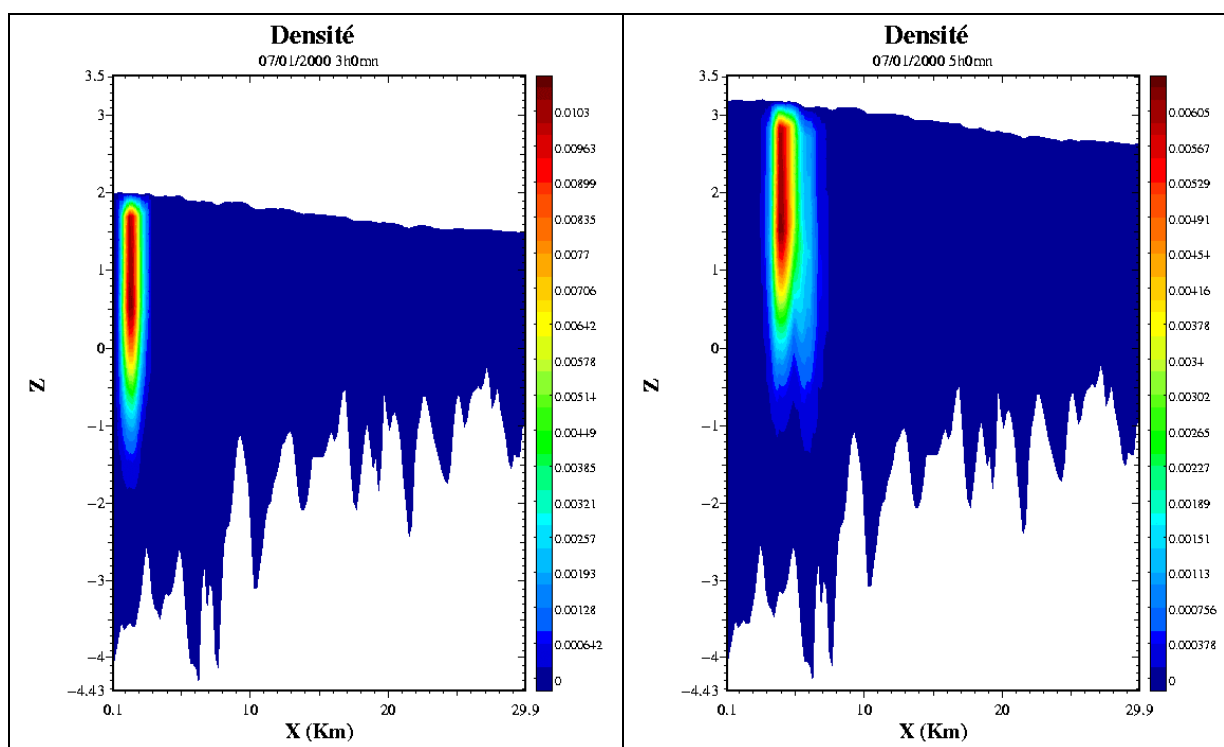


Figure 81 - Simulation de l'évolution d'une concentration de civelles dans l'estuaire en fonction du temps.

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. Un exemple est donné à la figure 81 pour 2 périodes différentes (3 heures et 5 heures du matin pour les conditions hydrologiques du 7 janvier 2000).

Une autre représentation est fournie à la figure 82. Dans ce dernier cas, on représente les densités sur deux niveaux de profondeur l'un en surface et l'autre en pleine eau (vers 3 m de profondeur). Pour ce type de graphique, la difficulté d'interprétation des résultats survient lorsque la profondeur est inférieure à 3 m (en période de basse mer, certains endroits de l'Adour ont des fonds de 1,5 m à 2m). Dans ces conditions

particulières (période de jusant), la visualisation graphique signale des densités de civelles à 3 mètres qui en fait sont plaquées sur le fond et non présentes dans la colonne d'eau (artefact graphique).

L'aide au positionnement des civelles par rapport au front de la marée dynamique est donnée par un autre type de graphe qui représente une sortie du modèle hydrodynamique en une dimension (figure 83). Dans ce cas on visualise pour certaines heures la variation des vitesses selon l'axe longitudinal de l'estuaire.

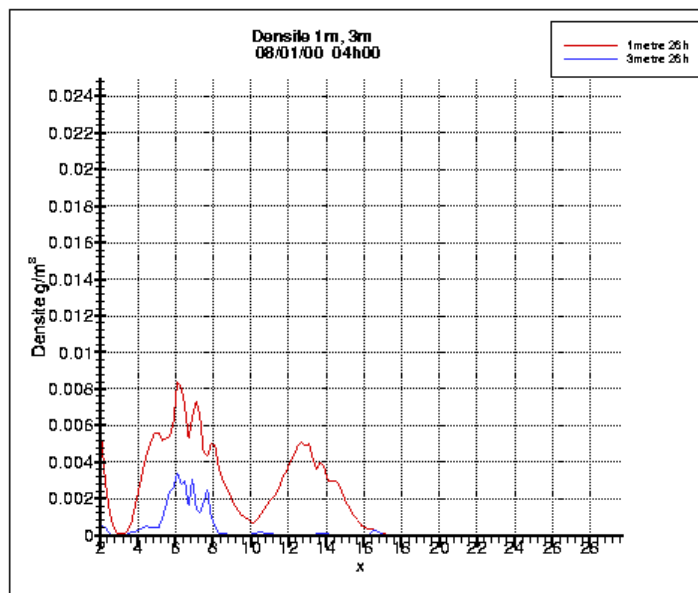


Figure 82 - Evolution des densités de civelles dans l'estuaire à un instant donné (courbe rouge 1 m, courbe bleu 3 m).

On regarde la dispersion des densités dans l'estuaire en fonction du temps et des conditions de courant. Les vitesses de courant à un instant donné sont issues de la simulation du modèle 1D (figure 83).

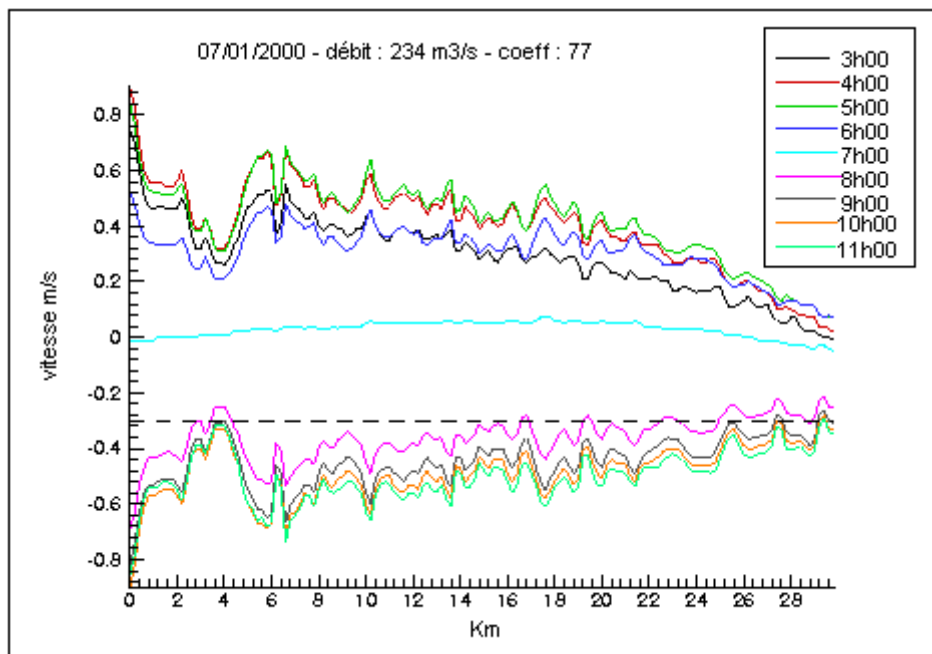


Figure 83 - Simulation des vitesses de courant le 07/01/2000 dans l'estuaire.

Des simulations de l'avancée de plusieurs flux de civelles ont été menées avec des conditions hydrodynamiques différentes.

8.3.2. Premier exemple de simulation : conditions hydrodynamiques moyennes.

La simulation débute le 07/01/2000 jusqu'au 09/01/2000. Les conditions hydrodynamiques sont données au tableau 32.

Tableau 32– Caractéristiques hydrodynamiques pour la première simulation

	07/01/2000	08/01/2000	09/01/2000
Débit m ³ /s	234	220	207
Coeff de marée	77	79	79
Basse Mer	10h53 23h05	11h27 23h38	- 12h01
Pleine Mer	4h42 17h00	5h16 17h33	5h50 18h06

Les figures 84 et 85 montrent l'évolution dans le temps de plusieurs cohortes de civelles. Le 1^{er} groupe a été injecté dans le modèle le 07/01/2000 à l'embouchure à 2 heures du matin, le 2^{ème} groupe 6 heures après et ainsi de suite. Leurs évolutions dans l'estuaire sont visualisées les 2 jours suivants : le 08/01/2000 et le 09/01/2000.

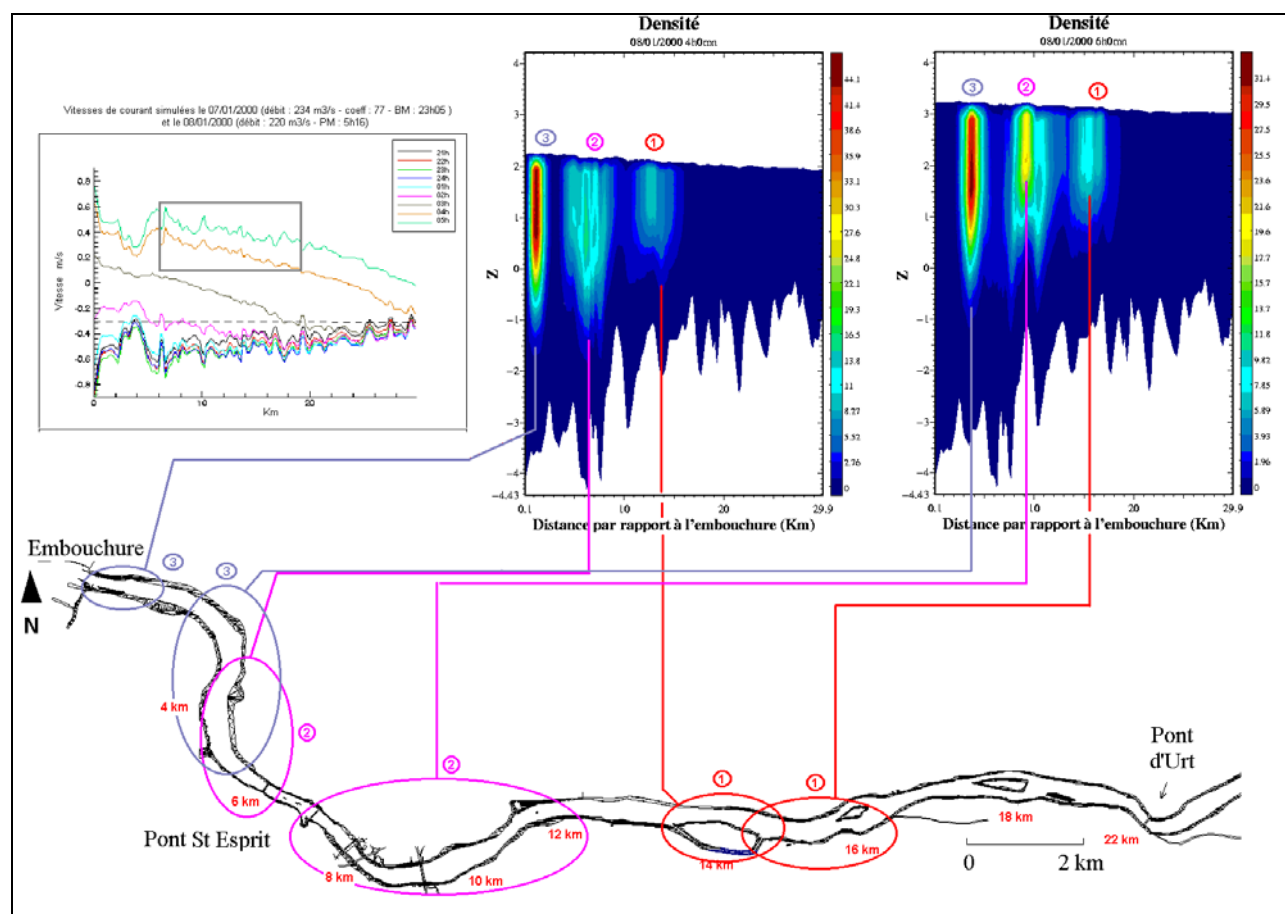


Figure 84 - Evolution de plusieurs cohortes de civelles (densité en g/100 m³) dans l'estuaire de l'Adour le 08/01/2000 à 4h et 6h (débit : 220 m³/s – coeff : 79 – PM : 5h16). Concentration de départ 50 g/100 m³.

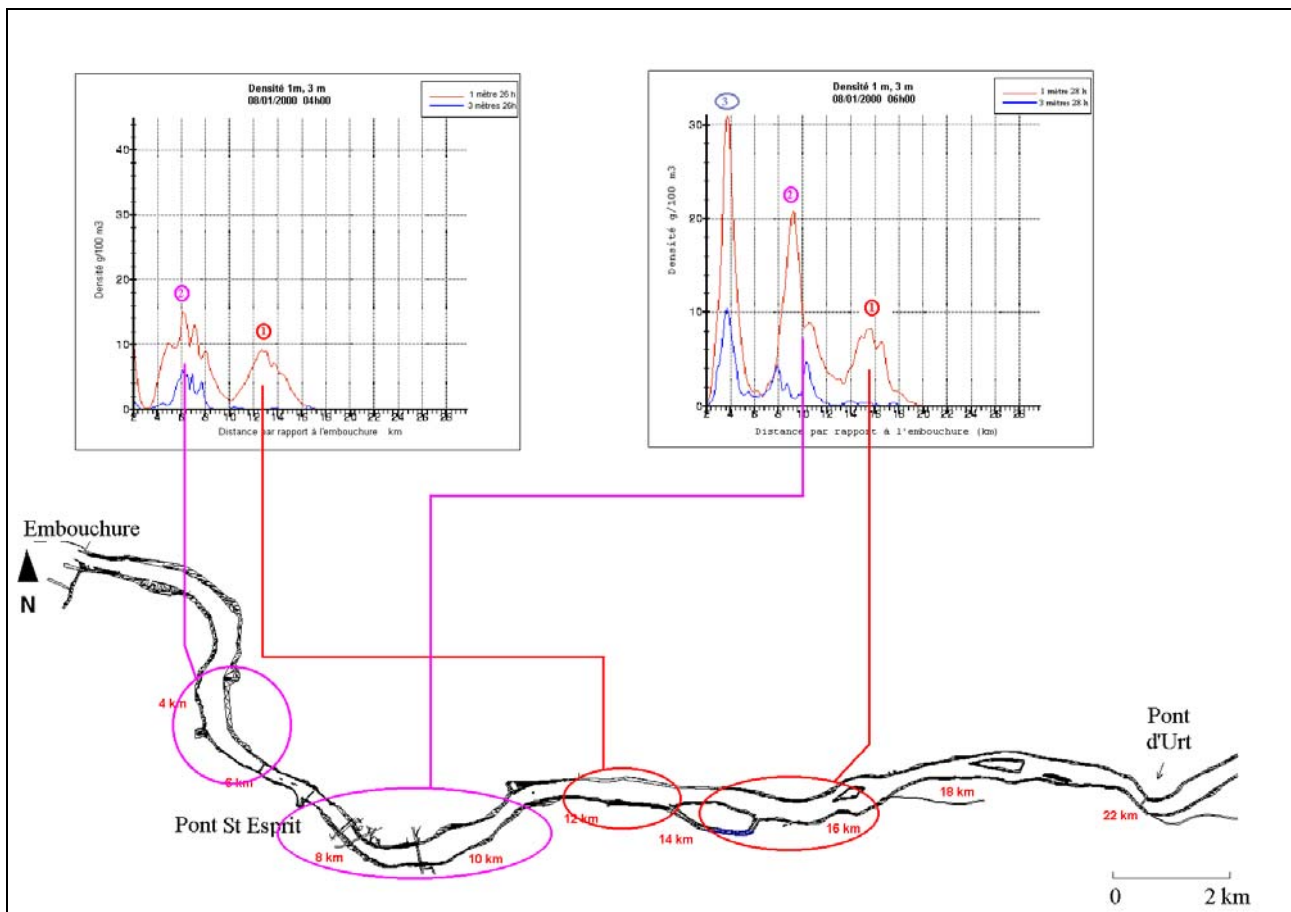


Figure 85- Evolution de plusieurs cohortes de civalles (densité en $\text{g}/100 \text{ m}^3$) dans l'estuaire de l'Adour le 08/01/2000 (débit : $220 \text{ m}^3/\text{s}$ – coeff : 79 – PM : 5h16). Concentration de départ $50 \text{ g}/100 \text{ m}^3$.

Le 08/01/2000, les conditions hydrodynamiques sont favorables à la migration. Le sous graphe des vitesses de la figure 84 montre que les civalles à ces heures, sont derrière le front de marée dynamique.

On visualise ainsi sur les figures 84 et 85 la propagation et la dispersion des civalles dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- le groupe ① injecté dans l'estuaire le 07/01/2000 à l'embouchure à 2h du matin au moment du flot se retrouve au bout de 26 heures (figure 85) entre 12 km et 14 km de la mer. Cela correspond à une migration portée durant deux phases de flot nocturne et une phase de flot diurne durant laquelle les civalles migrent sur le fond à la vitesse moyenne du courant de flot. Deux heures plus tard, c'est-à-dire à 6h du matin lors de l'étape de marée montante, elles se trouvent entre 14 km et 16 km.
- Le groupe ② injecté dans l'estuaire le 07/01/2000 à l'embouchure à 8h du matin au moment du jusant se trouve bloqué jusqu'à la reprise du flot vers 11h30. On le retrouve le 08/01/2000 à 4 h en plein flot, entre 4 et 6 km. Deux heures après, lors de l'étape de marée montante, on le situe entre 8 et 12 km.

Le 09/01/2000, nous continuons à suivre les groupes de civalles injectés à partir du 07/01/2000 (tableau 33). A la figure 86, nous présentons uniquement les images des simulations du 09/01/2000 à 3h00, 4h00 et 5h00 du matin.

Tableau 33 - Evolution des différents groupes de civelles injectés dans l'estuaire entre le 07/01/2000 et 09/01/2000.

Date	Nombre de groupes	heure	marée	éclairage	observations
07/01/2000	1	2h00	flot	nuit	Migration pleine eau
07/01/2000	2	8h00	jusant	jour	Blocage sur le fond
07/01/2000	3	14h00	flot	jour	Migration sur le fond
07/01/2000	4	20h00	jusant	nuit	Blocage
08/01/2000	5	2h00	flot	nuit	Migration pleine eau
08/01/2000	6	8h00	jusant	jour	blocage
08/01/2000	7	14h00	flot	nuit	Migration pleine eau
08/01/2000	8	20h00	jusant	nuit	blocage
09/01/2000	9	3h00	flot	nuit	Migration pleine eau (figure 86)
09/01/2000	9	4h00	flot	nuit	apparition du 9 ^{ème} groupe de civelles isolé des précédents (figure 86)
09/01/2000	9	5h00	flot	nuit	Mélange des premiers groupes de civelles dès que l'on s'éloigne de l'embouchure (figure 86)

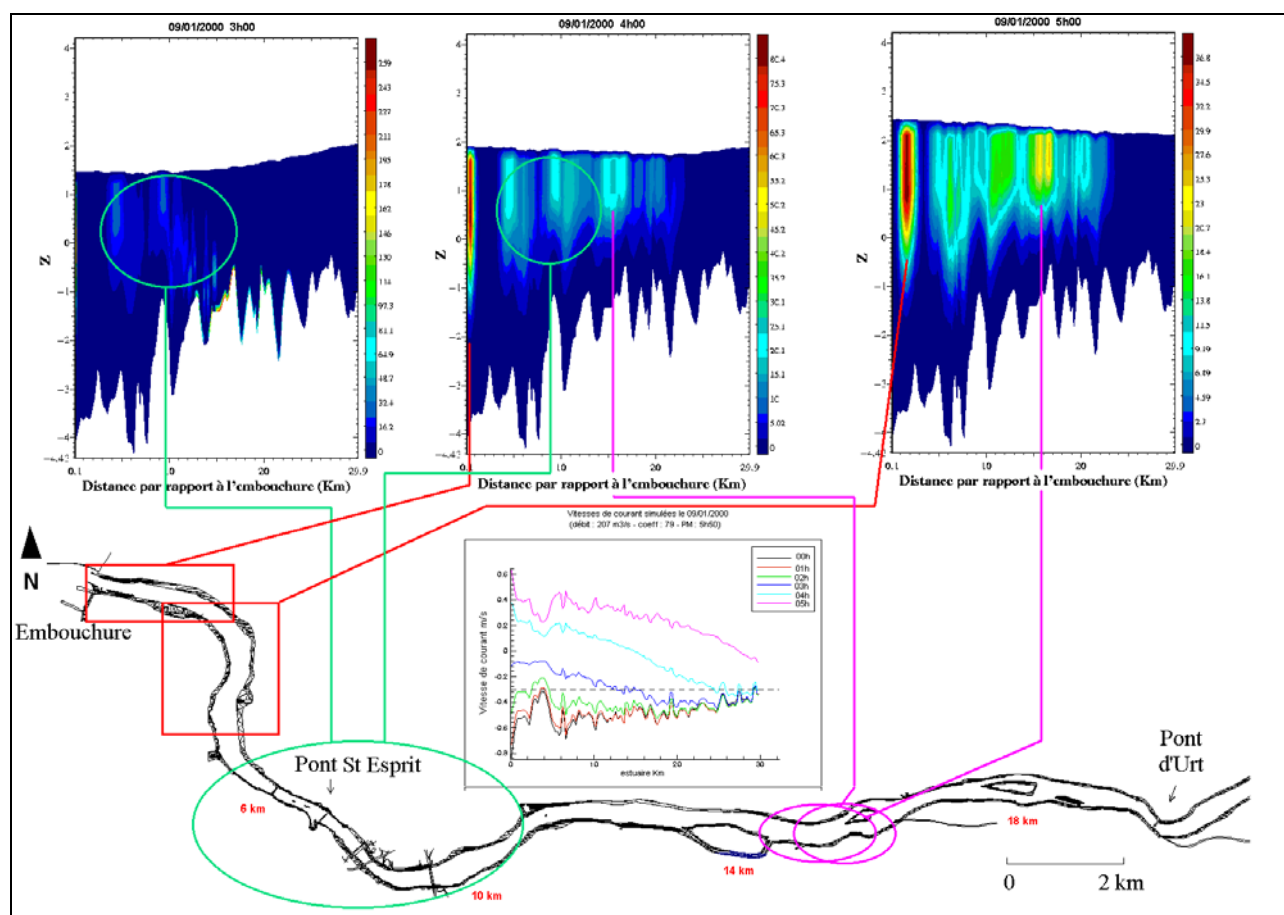


Figure 86 - Evolution des cohortes de civelles le 09/01/2000 de 3h00 à 5h00 (débit : 207 m³/s – coeff : 70 – PM : 5h50).

Les simulations présentées dans la figure 86 permettent de visualiser l'agrégation des groupes de civelles. Ce mélange est d'autant plus visible que l'on s'éloigne de l'embouchure.

8.3.3. Deuxième exemple : conditions hydrodynamiques marquées (fort coefficient de marée associé à un débit stable)

Les simulations débutent le 19/01/2000 jusqu'au 21/01/2000. Les conditions hydrodynamiques sont données au tableau 34.

Tableau 34- Conditions hydrodynamiques lors de la deuxième simulation.

	19/01/2000	20/01/2000	21/01/2000
Débit m ³ /s	160	142	144
Coeff de marée	77	89	99
Basse Mer	8h40-21h03	9h35-21h54	10h26-22h42
Pleine Mer	2h32-15h04	3h25-15h56	4h15-16h45

Une première concentration (50 g/100 m³) est injectée le 19/01/2000 à l'embouchure suivie d'une deuxième concentration, 6 heures plus tard et ainsi de suite. On regarde leurs évolutions le 20 janvier et le 21 janvier 2000.

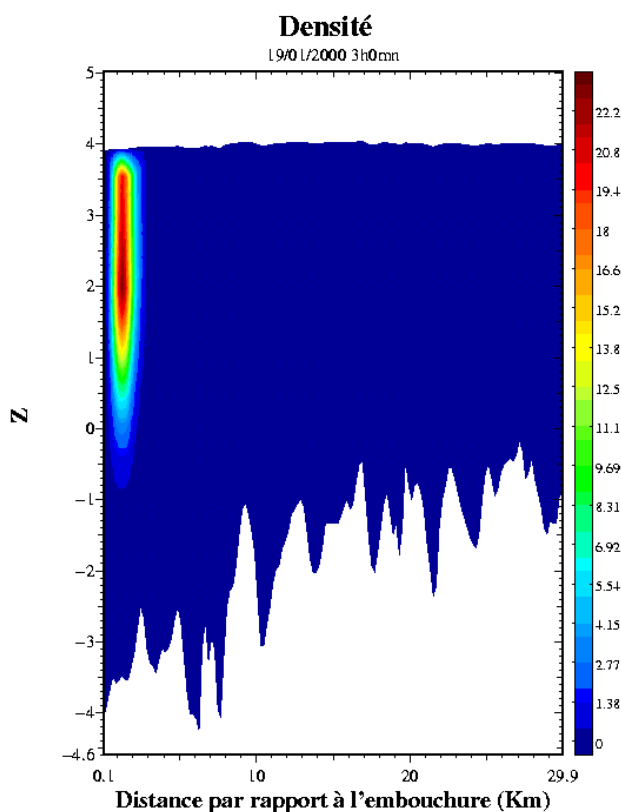


Figure 87- Evolution du 1^{er} groupe de civelles le 19/01/2000 3h00

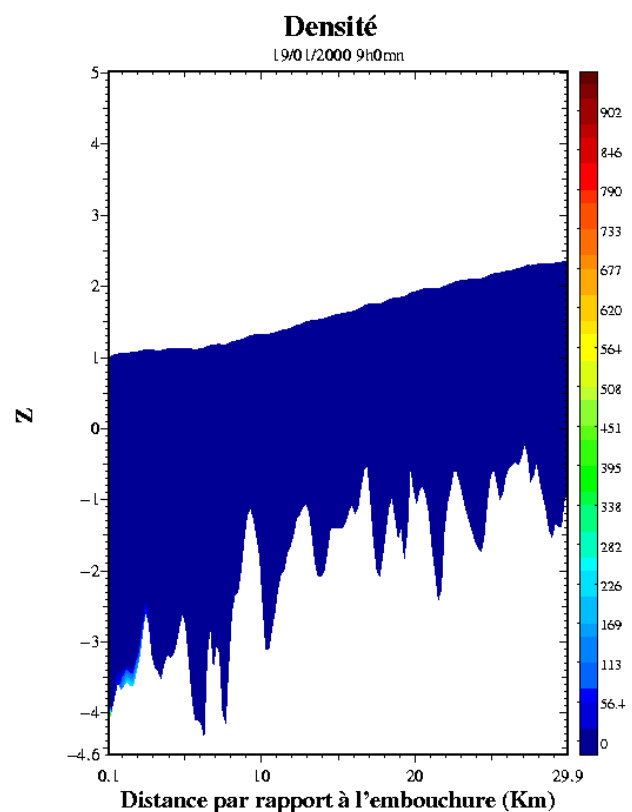


Figure 88- Blocage du groupe ① sur le fond le 19/01/2000 9h00

Le 19/01/2000, un premier groupe de civelles est injecté dans l'estuaire à une concentration de 50 g/100 m³ à 2h00. Dans la figure 87, on visualise le 1^{er} groupe de civelles à l'étale de pleine mer (à 3h00) juste avant la renverse du courant. Les civelles sont présentes dans toute la colonne d'eau.

A 9h00, on se trouve dans une phase de jusant. Il y a un blocage des civelles sur le fond avec l'apparition d'un 2^{ème} groupe à l'embouchure qui n'est pas encore visible (Figure 88).

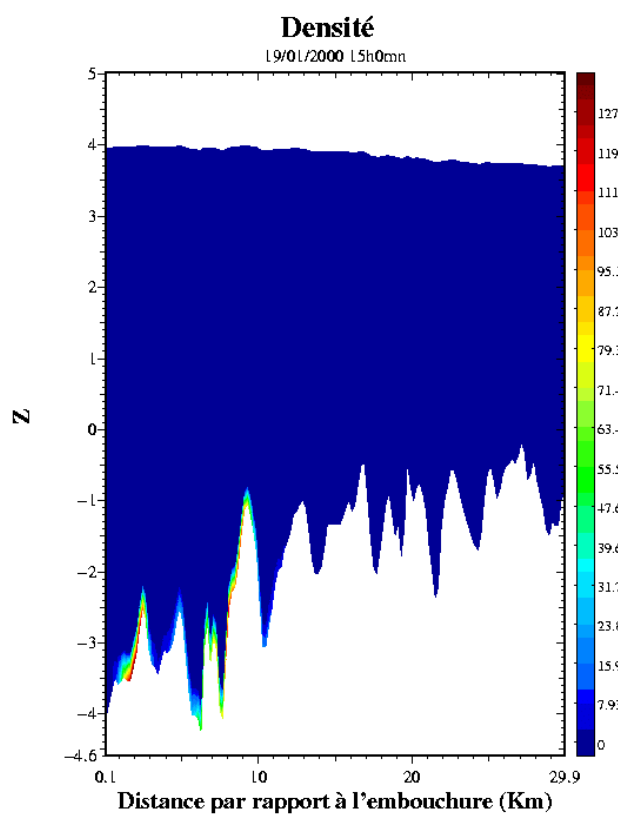


Figure 89- Blocage des groupes de civelles sur le fond le 19/01/2000 à 15h00.

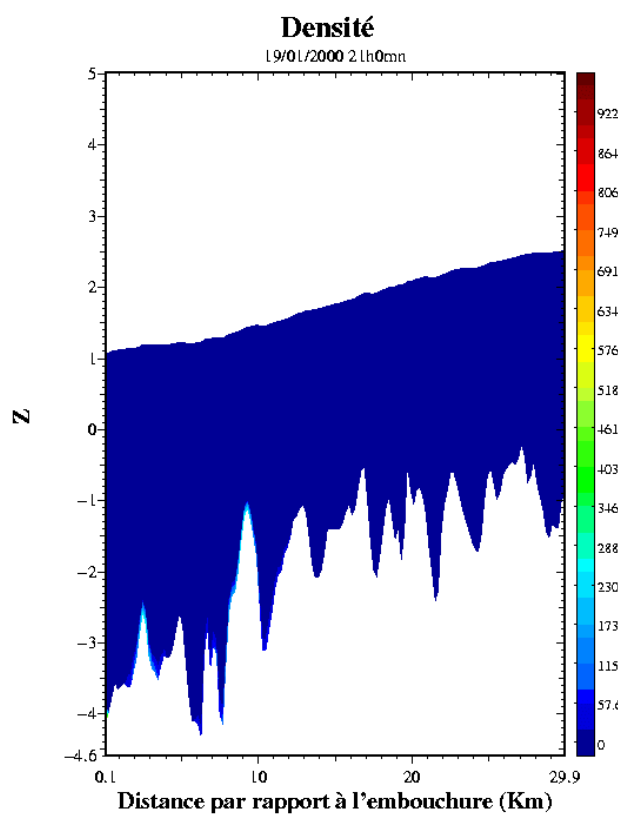


Figure 90- Blocage des groupes de civelles sur le fond le 19/01/2000 à 21h00.

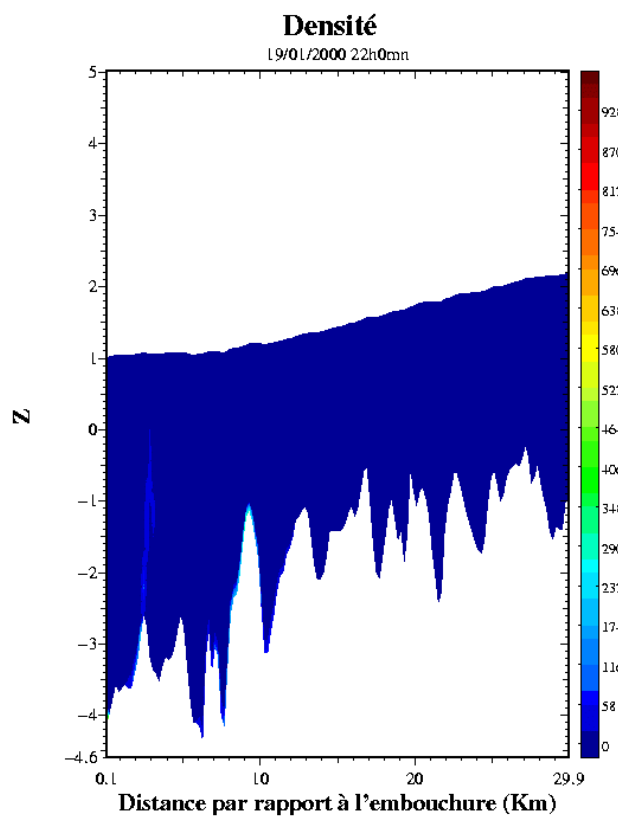


Figure 91- Migration des civelles dans la colonne d'eau lors de la reprise du flot le 19/01/2000 à 22h.

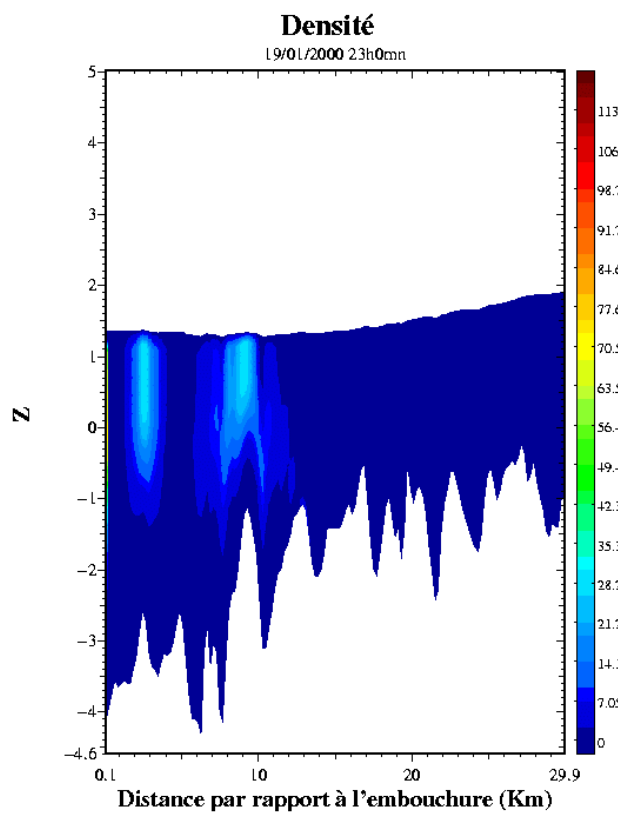


Figure 92- Reprise de la migration des civelles lors du flot le 19/01/2000 à 23h.

Le 19/01/2000 à 15h00, le 3^{ème} groupe de civelles est rentré dans l'estuaire (figure 89). On se trouve en période de flot. Les 3 groupes migrent sur le fond à la vitesse moyenne de l'avancée de la marée c'est-à-dire entre 0,4 m/s et 0,6 m/s suivant la position dans l'estuaire.

A 21h00, le 4^{ème} groupe s'est présenté à l'embouchure mais se trouve bloqué comme les autres puisque l'on est dans une phase de jusant (figure 90).

A 22h00, Le 4^{ème} groupe n'est pas encore visible et le 3^{ème} groupe décolle du fond puisque les conditions hydrodynamiques sont de nouveau favorables (début de flot) (figure 91).

A 23h00, le 4^{ème} groupe de civelles devient visible en pleine eau à 3km. Le 3^{ème} groupe est bien décollé entre 3 et 4 km. Les deux premiers groupes sont mélangés et se situent entre 6 et 11 km (figure 92).

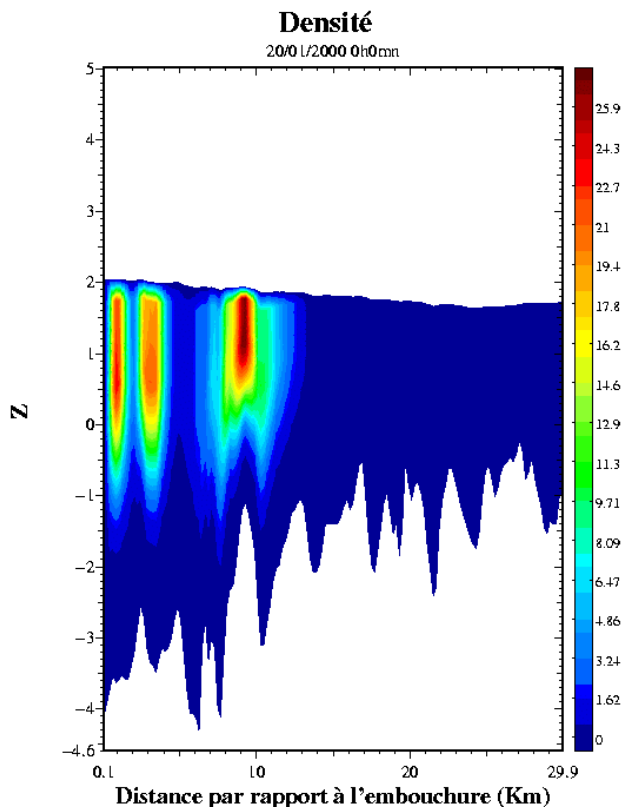


Figure 93- Migration des groupes de civelles dans la colonne d'eau le 20/01/2000 à 00h.

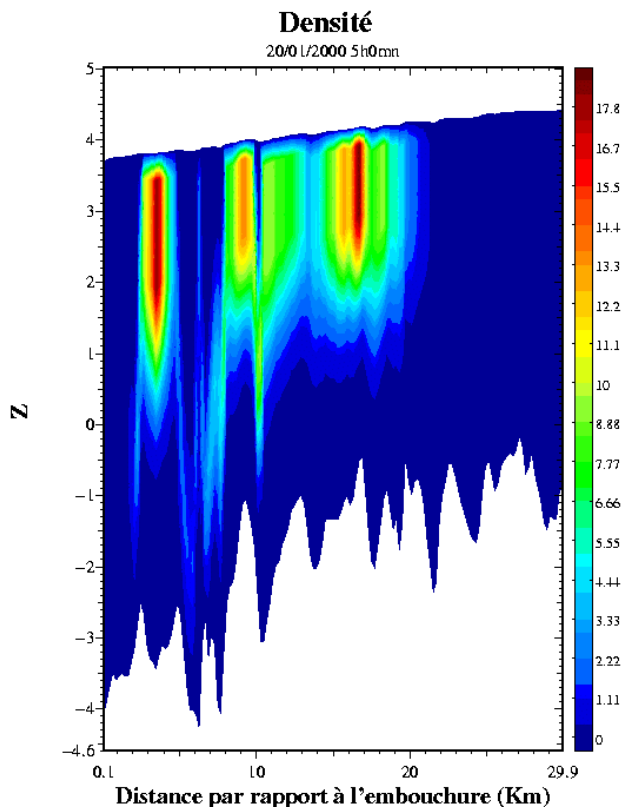


Figure 94- Début de mélange des groupes de civelles le 20/01/2000 à 5h00.

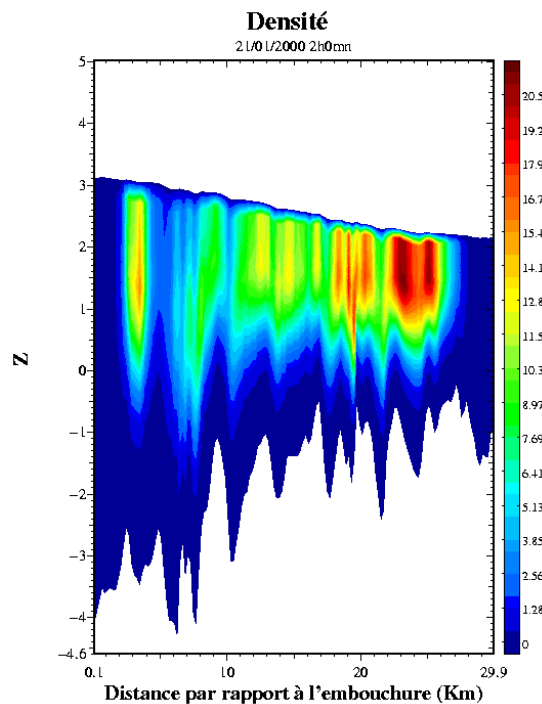


Figure 95- Forte concentration des civelles en fin de zone maritime le 21/01/2000 à 2h00.

Le 20/01/2000 à 0h00, les 4 groupes sont bien visibles en pleine eau avec une agrégation des groupes 1 et 2 qui se situent entre 8 et 11 km (figure 93).

Le 20/01/2000 à 5h00, on a 5 groupes présents dans l'estuaire. On constate que les 4 premiers groupes commencent à se mélanger. Le 5^{ème} restant est encore isolé (figure 94).

Le 21/01/2000 à 2h00, on a 8 groupes de civelles présents qui sont mélangés avec une forte concentration en fin de zone maritime vers 25 km (figure 95). Ce phénomène physique d'agrégation (recrutement de plusieurs groupes) correspond à l'accroissement des densités que l'on a observé par échantillonnage derrière la progression de la marée dynamique (figure 96).

Evolution des densités de civelles de l'aval vers l'amont - campagne 96/97

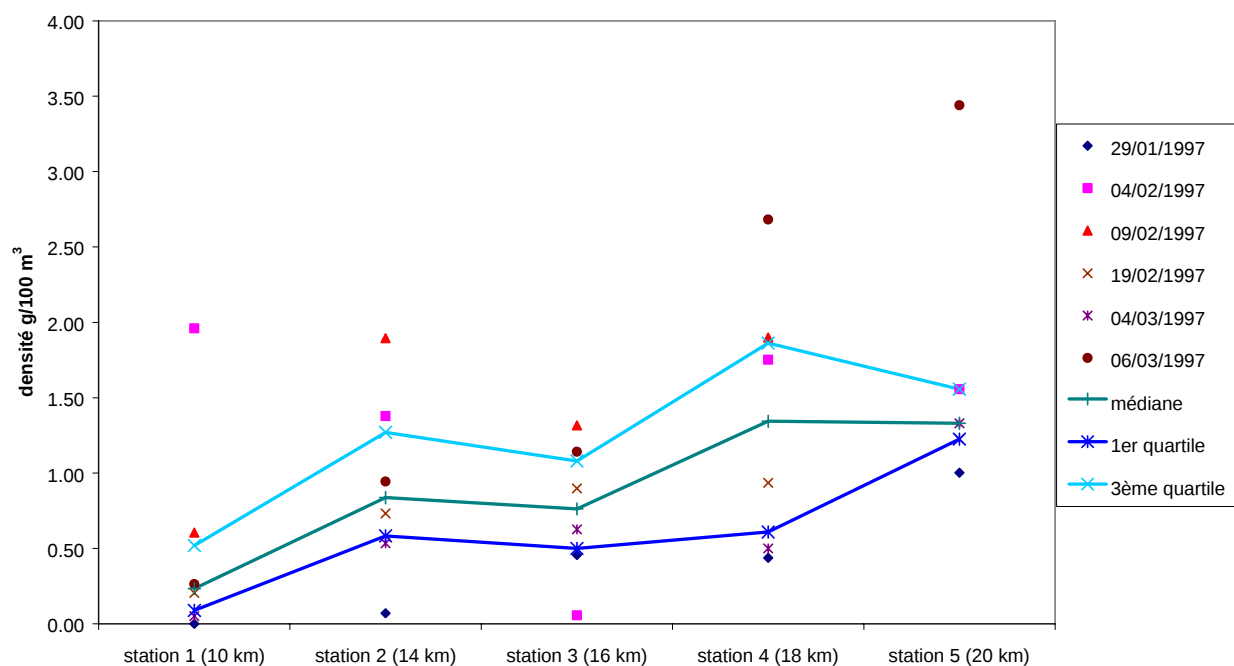


Figure 96- Evolution des densités de civelles de l'aval vers l'amont – campagne 96/97.

8.4. Conclusion et perspectives.

En dépit de sa simplicité apparente, le modèle de migration est suffisamment compliqué pour que son étude théorique et numérique pose problème. La fonction de courant joue le rôle d'un terme forçant qui introduit, dans l'équation de la dynamique de population, des coefficients dépendant du temps. Cela devient un peu plus simple si l'on travaille avec un courant stationnaire, c'est à dire, constant en temps, ou asymptotiquement stationnaire, mais le courant est lui-même forcé par la marée qui est tout au plus périodique. On peut toutefois décomposer la période étudiée en intervalles de temps suffisamment courts pour considérer que, dans chacun de ces intervalles, le régime est quasi stationnaire. C'est cette idée qui nous a conduit à chercher des solutions stationnaires de l'équation du courant. L'existence d'une solution de cette équation a été établie, au prix de l'utilisation d'un théorème mathématique. On arrive alors à une équation pour la dynamique des civelles dans laquelle le seul terme forçant non stationnaire est le terme source de flux des civelles à la frontière aval du domaine. La résolution théorique de l'équation des civelles se présente sous des formes différentes suivant la position, avec des relations de transmission à la frontière de deux régions différentes. La résolution numérique passe d'abord par celle de l'équation du courant par l'équipe des hydrodynamiciens du projet. On résoudra ensuite l'équation de la turbidité, puis celle des civelles qui deviennent des équations paraboliques linéaires, dont les coefficients sont calculés en fonction des vitesses du courant. La résolution numérique a été faite en utilisant un modèle plausible de fonction de courant et donne des résultats en accord avec l'intuition.

Dans¹, R.Lecomte-Finiger et R.Prodon montrent que la civelle ne se pose pas sur n'importe quel fond mais qu'elle a une préférence pour des substrats plutôt granuleux où elle s'enfouit. Le mouvement de la civelle vers le fond doit donc être décomposé en deux phases : une première phase au cours de laquelle elle se rapproche du fond et arrive dans la couche limite du fond, à l'abri du courant, suivie d'une deuxième phase de recherche du substrat approprié. Dans cette phase, elle doit d'une part chercher à estimer la nature du substrat, sans le voir, la visibilité au fond étant certainement très réduite sinon nulle, et d'autre part elle doit estimer son degré d'occupation par d'autres civelles : les deux processus s'apparentent à une marche aléatoire en 2D, qui conduit à une équation de diffusion dégénérée, avec le coefficient de diffusion dépendant de la granularité du substrat et de la densité de la population et s'annulant en tout point où les caractéristiques du substrat sont celles préférées par la civelle et la densité de population est nulle. Le déplacement sur le fond à la recherche du sédiment préféré pourrait expliquer en partie la dérive latérale des civelles vers les berges. L'effet net de ce mécanisme peut être testé par résolution numérique du modèle.

¹ R.Lecomte-Finiger et R.Prodon « Eco-éthologie : étude expérimentale du comportement fouisseur de la civelle (*Anguilla anguilla*, L.) : le choix d'un substrat », C.R.Acad.Sci.Paris, t.289, série D, 1979, pp.741-743.

9.1. Zone d'étude.

Le bassin versant de l'Adour couvre une superficie de 16 960 km², sur quatre départements : Gers, Landes, Pyrénées atlantiques et Hautes-Pyrénées. Il s'étend sur deux grands domaines très contrastés, le domaine montagnard pyrénéen et le piémont aquitain. Les différentes formations géologiques, schistes, calcaires et granites au sud, flysch à l'ouest du Gave d'Oloron, molasses sur les coteaux à l'est et au nord du gave d'Oloron, sables sur la partie landaise de la rive droite de l'Adour et nappes alluviales du quaternaire, lui confèrent une grande diversité d'un point de vue hydrologique et morphologique.

Les rivières du bassin de l'Adour offrent toutes les nuances entre le régime pluvial, pour lequel la pluviométrie agit directement sur les débits, et le régime nival qui subit les effets de la rétention d'eau hivernale sous forme de neige. Les gaves, en particulier le gave de Pau, présentent le caractère nival le plus accusé. L'Adour, avec un massif plus réduit et sous l'influence de ses affluents, adopte un régime pluvial plus rapidement. Les autres rivières, dont le bassin d'alimentation est en plaine, présentent un caractère pluvial accusé.

Les différents régimes hydrologiques des rivières du bassin de l'Adour sont les suivants :

- ✓ Nive : le régime est pluvial, mais les étiages sont relativement soutenus par la forte pluviométrie de la côte basque sous influence océanique.
- ✓ Gaves : le régime nival est très marqué, avec des étiages tardifs et soutenus.
- ✓ Saison : il se distingue des Gaves par des étiages particulièrement sévères.
- ✓ Affluents rive gauche de l'Adour, Arros et partie gersoise du bassin de la Midouze : les régimes pluviaux sont contrastés, avec des étiages accusés et précoces.
- ✓ Midouze et affluents landais : les débits spécifiques sont très faibles avec des étiages très soutenus. Les sables landais assurent un effet tampon en absorbant les premières pluies d'hiver et en réalimentant les rivières en été.
- ✓ Adour : alimenté par son bassin versant montagnard dans le département des Hautes-Pyrénées, l'Adour voit son régime rapidement modifié par les apports de ses affluents des coteaux. L'Adour moyen subit peu l'influence de la fonte des neiges, les étiages y sont précoces et relativement marqués. Le régime de l'Adour est ainsi sous l'influence de ses affluents successifs.

Le régime des rivières de la partie montagnarde est de type torrentiel. Très marqué dans les hautes vallées, il évolue en rivières rapides s'écoulant dans des plaines étroites et dont la pente est assez forte dans les vallées principales.

Les rivières du piémont se répartissent sur les différentes formations géologiques citées ci-dessus. Dans ces matériaux, les rivières ont creusé de larges vallées, étagées en terrasses par le dépôt des alluvions du quaternaire. Midouze mise à part, les lits actuels s'inscrivent dans ces terrasses. Situés sur des alluvions peu consolidés, ils sont fragiles et très sensibles aux travaux d'aménagement ou aux extractions de granulats dans le lit mineur, qui ont souvent conduit à leur approfondissement. C'est particulièrement le cas sur le gave de Pau, en aval de Pau, et sur l'Adour, en aval de Tarbes. Ce phénomène a nécessité la mise en place de nombreux seuils de stabilisation qui se sont ajoutés aux aménagements anciens (irrigation gravitaire, alimentation de moulins) ou plus récents (équipements hydroélectriques dès le début du XX^{ème} siècle).

Cinq grandes catégories morphologiques peuvent être identifiées, avec une répartition spatiale relativement bien définie :

- ✓ lits torrentiels en montagne,
- ✓ lits de plaine à fond mobile sur les coteaux molassiques,
- ✓ lits divagants fréquents dans la partie moyenne de l'Adour et des gaves (zones de saligues),
- ✓ lits d'érosion, en particulier dans le bassin de la Midouze et sur de courts secteurs d'affleurement de roche mère,
- ✓ lits à barthes dans les parties aval des cours d'eau principaux.

9.2. Subdivision du bassin versant dans le cadre de l'étude réalisée.

Pour apprécier l'impact du facteur « bassin versant » dans l'analyse statistique descriptive, le bassin de l'Adour a été divisé en six sous-bassins (annexe 9) :

- ✓ BV1 : Adour en amont du bec des gaves et affluents rive gauche (6 260 km²).
- ✓ BV2 : Midouze (3 155 km²).
- ✓ BV3 : gave de Pau et gaves réunis (2 800 km²).
- ✓ BV4 : gave d'Oloron (2 630 km²).
- ✓ BV5 : Bidouze – Joyeuse (1 085 km²).
- ✓ BV6 : Nive (1 030 km²).

Pour simplifier le traitement informatique des données, l'Adour en aval du bec des Gaves a été rattaché aux sous-bassins Bidouze – Joyeuse et Nive. Cela n'a aucune influence sur l'analyse car aucune donnée exploitable n'est disponible sur cette portion.

9.3. Echantillonnage des anguilles : technique de prospection et nature des données.

Les échantillons d'anguilles sont obtenus par pêche électrique, sur des stations représentatives des différents faciès de la rivière. Deux modes opératoires sont utilisés :

- ✓ Sondage en un seul passage sur la station.
- ✓ Inventaire en plusieurs passages successifs (généralement deux).

Lorsqu'au moins deux passages successifs sont réalisés, avec une efficacité de pêche constante, il est possible d'estimer la densité d'anguilles sur la station prospectée. La méthode retenue est celle dite de « De Lury » (annexe 10).

Les données utilisées pour l'analyse ont deux origines :

- ✓ pêches « toutes espèces » réalisées par le Conseil Supérieur de la Pêche depuis 1977,
- ✓ pêches du Réseau Anguille de MIGRADOUR suivi depuis 1998.

Les résultats sont renseignés dans la base de donnée « Inventaires Piscicoles » mise en place en 1996 par l'antenne de Pau de la Délégation Régionale Midi-Pyrénées Aquitaine du Conseil Supérieur de la Pêche. Toutefois, les données antérieures à la création de la base n'ont été que partiellement saisies. L'ensemble des informations nécessaires à l'analyse descriptive n'étant pas informatisé, il a été nécessaire de reprendre la totalité des archives papier disponibles pour actualiser la base et valider les données.

Pour être considérée comme exploitable, chaque pêche électrique doit répondre aux conditions suivantes :

- ✓ Localisation précise sur la rivière, pour calculer les distances à la mer et à la source, et pour déterminer la zonation piscicole de Huet (Truite, Ombre, Barbeau ou Brème).
- ✓ Surface pêchée connue, pour calculer la densité en fonction du nombre d'anguilles estimé sur la station.
- ✓ Données individuelles poissons disponibles pour chaque passage (effectifs et tailles), en particulier pour pouvoir estimer les densités d'anguilles lorsque la méthode De Lury n'est pas applicable à un inventaire (majorité des cas). Le premier passage a alors été considéré comme un simple sondage.

9.4. Estimation des densités d'anguilles : méthode de calcul utilisée et description du fichier de données.

L'efficacité de la pêche électrique est fonction de plusieurs facteurs : types de courant et tension, conductivité et température de l'eau, taille de la rivière et expérience de l'équipe de pêche.

Les inventaires satisfaisant aux conditions d'application de la méthode De Lury ont servi de base pour déterminer l'efficacité moyenne de capture des anguilles lors du premier passage de pêche. Afin de tenir compte de la dépendance de cette efficacité vis à vis du milieu prospecté, elle a été calculée pour

chacune des zonations piscicoles de Huet (*). Ces efficacités ont ensuite été appliquées aux sondages et aux premiers passages des inventaires ne respectant pas les conditions d'application de la méthode De Lury (annexe 10 pour des compléments d'information).

- ✓ Zone Brème Barbeau : efficacité moyenne de 67,5 % (écart type de 15,1 %).
- ✓ Zone Ombre : efficacité moyenne de 64,9 % (écart type de 12,3 %).
- ✓ Zone Truite : efficacité moyenne de 76,4 % (écart type de 8,2 %).

La précision de ces estimations est suffisante pour l'analyse statistique, réalisée après regroupement en classes des différents facteurs.

En l'absence de données témoins pour estimer l'efficacité moyenne des pêches électriques réalisées en bateau, sur des secteurs profonds dans la partie aval des rivières principales du bassin de l'Adour, n'ont été conservées que les pêches réalisées à pied.

Le fichier se présente sous la forme d'un tableau de 15 colonnes et de 1161 lignes (annexe 11). Les données englobent une période de 25 ans, de 1977 à 2001, le nombre annuel de pêches variant de 6 (1977) à 81 (1990). Elles sont réparties sur l'ensemble de l'année avec une prépondérance en mai – juin et septembre – novembre.

La liste des champs du fichier est la suivante :

- ✓ BV : sous-bassin versant de l'Adour.
- ✓ CRIV : code rivière (référence BD Carthage).
- ✓ CSTA : code station (référence CSP).
- ✓ Long. : longitude (référence WGS 84).
- ✓ Lat. : latitude (référence WGS 84).
- ✓ NUMOPERA : code opération de pêche (référence CSP).
- ✓ AN : année de la pêche.
- ✓ MOIS : mois de la pêche.
- ✓ HUET : zonation piscicole de HUET (4 classes).
- ✓ MER : distance à la mer de la station pêchée.
- ✓ CONF : distance à la confluence de la station pêchée.
- ✓ SOUR : distance à la source de la station pêchée.
- ✓ DENS : densité d'anguilles (effectif pour 100 m² de rivière).
- ✓ PT12 : proportion d'anguilles de taille inférieure à 30 cm.
- ✓ PT3P : proportion d'anguilles de taille supérieure à 30 cm.

Au total, 1161 opérations de pêche exploitables ont été extraites de la base de données du CSP. Ces pêches correspondent à 776 stations, elles même réparties sur 165 rivières différentes. Un fichier descriptif des stations est proposé en complément du fichier utilisé pour l'analyse (annexe 12). Il précise de manière plus explicite la localisation de ces dernières (rivière, lieu-dit et commune du point de pêche).

9.5. Méthode d'analyse statistique retenue.

Les données sont traitées par analyse multivariée afin de mettre en évidence les variations de répartition spatiale et temporelle de densité. L'outil statistique utilisé est l'AFCM (Analyse Factorielle des Correspondances Multiples)¹. Cette méthode exploratoire puissante permet un traitement global de variables quantitatives et qualitatives à partir d'un tableau disjonctif complet.

¹ On trouvera les fondements de cette méthode chez Benzecri J.P. et coll. (1979) – L'analyse des données (Tome 2 : l'analyse des Correspondances) – Eds Dunod Paris et chez Foucart T. (1985) Analyse Factorielle (programmation sur micro-ordinateur) – Eds Masson, Paris.

(*) correspond à ce que Huet avait défini comme règle des pentes : « Dans un territoire biogéographique déterminé, les eaux courantes de même importance quant à la largeur et à la profondeur et possédant des pentes comparables ont des caractères biologiques et spécialement des populations piscicoles analogues ». Huet, M. - Traité de Pisciculture, Bruxelles, Eds de Wyngaert (1960).

Les données brutes (annexe 11) ne peuvent pas être directement traitées par l'AFCM. Ce tableau doit être homogénéisé de façon à transformer toutes les variables en p variables qualitatives prenant respectivement k modalités. Lors de la création des classes, il s'agit d'éviter de donner, par construction, des poids différents aux variables prises en compte. Pour cela, lors du codage des données, il est conseillé de faire en sorte que :

- ✓ toutes les variables actives aient à peu près le même nombre de modalités,
- ✓ les effectifs à l'intérieur des classes soient équilibrés.

Les classes définies pour l'analyse sont présentées dans l'annexe 13. Pour la structure en taille de la population d'anguilles, les classes adoptées initialement étaient celles proposées par Lambert (1999) (tableau 35). Cependant, afin de limiter le nombre de variables actives dans l'analyse, seules deux classes ont été conservées :

- ✓ les anguilles de petite taille [50,300[nommées T1,
- ✓ les anguilles de grande taille [300,1200[nommées T2.

Tableau 35– Classes de tailles pertinentes pour l'interprétation des résultats de pêches électriques effectuées en France et en milieu dulçaquicole (Lambert, 1999)

Classes de tailles	Correspondances écologiques
[50,150]	Civelle et jeune anguille jaune de 1 été
]150,300]	Anguille jaune non sexuellement différenciée d'au moins 2 ans
]300,450]	Anguille mâle jaune argenté, femelle jaune
]450,600]	Anguille femelle jaune ou argentée, anguille mâle présentant un retard dans sa migration génésique
]600,1200]	Anguille femelle qui présente un retard pour sa migration génésique et dont la sédentarisation est possible

Le nombre d'anguilles par classe de tailles étant exprimé en proportion (de la population totale capturée lors de la pêche), chacun de ces groupes T1 et T2 est ensuite divisé en 4 modalités correspondant à une gamme de proportion (par exemple T13 : de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ de l'échantillon constitué d'anguilles de taille T1). Les pêches au cours desquelles le nombre d'anguilles capturées a été nul ainsi que celles dont les données « Taille » ne sont pas renseignées, n'ont pas été prises en compte dans le calcul des classes pour la variable « Taille ». C'est pourquoi, pour cette variable, l'effectif est de 434 (annexe 13) au lieu de 1161 (soit 37.38 % de l'effectif total).

Pour la variable « Huet », le faible nombre de pêches effectuées dans la zone à Brème crée un fort déséquilibre des effectifs entre les classes. La capacité d'accueil² pour l'anguille entre cette zone et celle à Barbeau peut être considérée comme sensiblement équivalente. Ces deux zones sont donc regroupées sous une seule modalité « HU34 ».

9.6. Représentations cartographique et temporelle.

L'objectif principal de cette représentation est d'apporter un soutien visuel à l'analyse statistique multivariée. Une contrainte a donc été imposée : le regroupement des données en conservant les mêmes périodes. Nous espérons ainsi faciliter la description de la distribution de l'anguille sur le bassin de l'Adour, d'un point de vue spatial et temporel.

Chaque point sur les cartes représente une station pêchée, associée à une classe de densité d'anguilles par un code couleur (4 classes, plus l'information « absence d'anguille »). Lorsqu'une même station est pêchée plusieurs fois sur une même période de temps, la moyenne des observations lui est affectée.

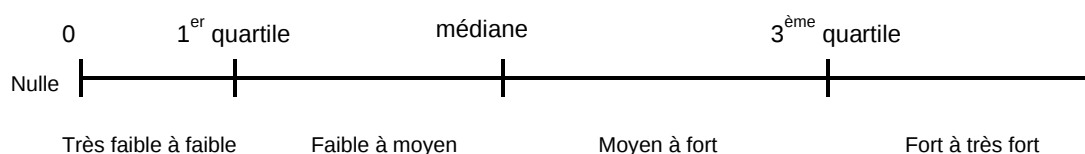
² au sens le plus restrictif car surtout basée sur le couple pente-largeur de la zone piscicole étudiée.

Afin de pouvoir comparer la variable densité à des dates différentes, les classes ont été définies sur l'ensemble des inventaires piscicoles (1977 à 2001).

L'anguille est capable de coloniser tous les biotopes. Toutefois, la capacité d'accueil de ces milieux n'est pas la même en tout point du bassin versant. Pour tenir compte de ce facteur, les classes de densités ont été définies pour chaque type de zonation piscicole de Huet (Brème-Barbeau, Ombre et Truite).

Une première classe « nulle » donne l'information « absence d'anguille ». La distribution des densités non nulles étant asymétrique, une discrétisation en classes de même effectif a été adoptée. Cela permet d'obtenir un classement des densités en éliminant le poids des valeurs extrêmes et de comparer ainsi les distributions entre zonations piscicoles différentes. Il faut toutefois garder à l'esprit que sont confrontés par cette méthode des ordres et non les valeurs proprement dites.

En plus de la classe « nulle », 4 classes (« très faible à faible », « faible à moyen », « moyen à fort », « fort à très fort ») délimitées par le premier quartile, la médiane et le troisième quartile des distributions sont définies. Les valeurs de ces limites de classe varient en fonction du type de zonation piscicole.



Zone Brème-Barbeau :

- ✓ 1^{er} quartile : 0,47 individus sur 100 m².
- ✓ Médiane : 1,45 individus sur 100 m².
- ✓ 3^{ème} quartile : 4,00 individus sur 100 m².

Zone Ombre :

- ✓ 1^{er} quartile : 0,46 individus sur 100 m².
- ✓ Médiane : 1,34 individus sur 100 m².
- ✓ 3^{ème} quartile : 4,00 individus sur 100 m².

Zone Truite :

- ✓ 1^{er} quartile : 0,25 individus sur 100 m².
- ✓ Médiane : 0,67 individus sur 100 m².
- ✓ 3^{ème} quartile : 1,86 individus sur 100 m².

Les cinq périodes utilisées par l'analyse statistique multivariée sont reprises. Le classement des densités étant réalisé sur la totalité des pêches (1977 à 2001), le même nombre de codes couleur signalant la présence d'anguilles, sur l'ensemble des cinq cartes, est obtenu par construction. La classe de densité nulle joue ici un rôle uniquement informatif. Les densités nulles sont exclues lors de la formation des classes car elles représentent à elles seules plus de la moitié des observations.

L'évolution de la distribution des codes couleur signalant la présence d'anguilles entre les différentes cartes nous informe sur la variation temporelle des densités d'anguilles. Comme pour la représentation spatiale, seuls des ordres sont comparés et non des valeurs.

9.7. Résultats.

9.7.1. Répartition des densités d'anguilles à l'échelle de la rivière.

Afin de définir les variations de densité pouvant exister en fonction de la localisation sur la rivière, une première Analyse Factorielle des Correspondances Multiples est effectuée (AFCM1). Elle a pour variables actives le sous-bassin versant (BV), la zonation de Huet (HU), la distance à la mer (MER), la distance à la source (SOU) et la densité d'anguilles (DEN). Les années (AN) et les trimestres (TR) sont ajoutés en variables supplémentaires.

Le pourcentage cumulé des valeurs propres sur les 5 premiers axes est de 56.85 % (tableau des valeurs propres en annexe 14). Au vu de ce résultat, l'analyse se limitera à l'étude de ces cinq axes.

D'après l'analyse des contributions relatives à l'inertie expliquée par les axes (annexe 14), la variable « Densité » contribue majoritairement à la formation des axes 1 et 4 (30.3 et 35.7 de l'inertie expliquée par ces axes). Les variables « Huet », « Mer » et « Source » contribuent respectivement à la formation des axes 5 (43.4 %), 2 et 3 (32.2 %, 41 %), et 4 et 5 (18.2 %, 18.1 %).

Afin de mettre en évidence les relations entre la densité et la position dans le bassin versant, les espaces factoriels créés par les axes 1, 2, 3 et 1, 4, 5 seront donc étudiés.

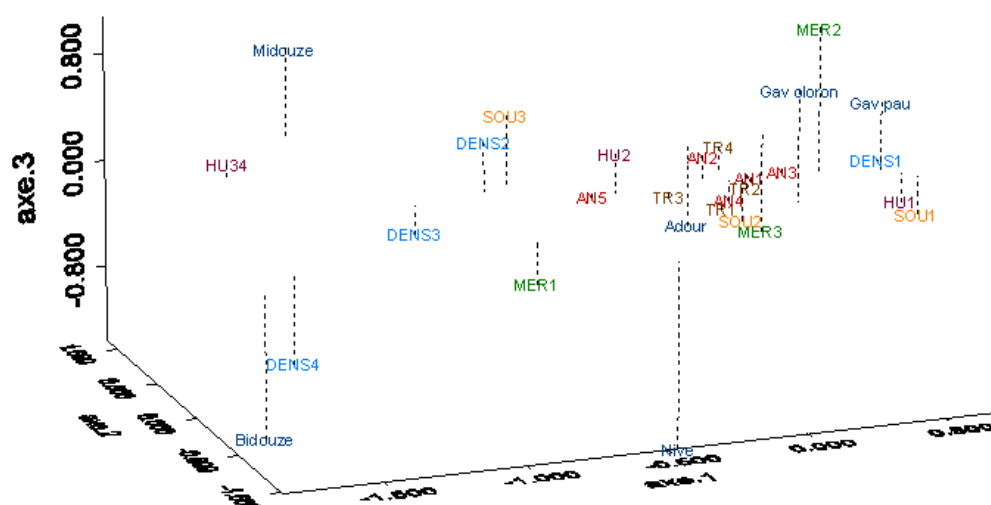


Figure 97- Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 2 et 3 définis par l'AFCM1

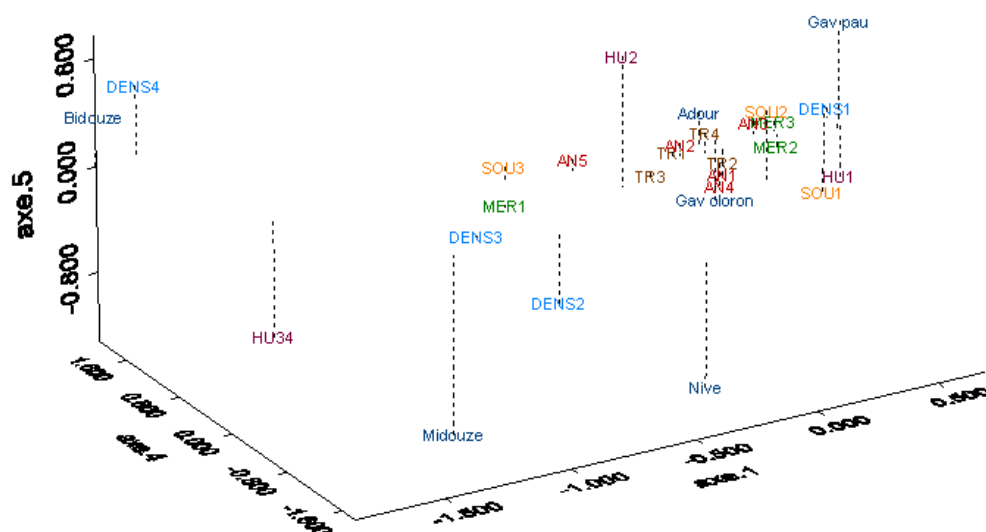


Figure 98 - Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 4 et 5 définis par l'AFCM1

Les figures 97 et 98 montrent une relation entre la densité et la position sur le bassin. En effet, les fortes densités sont liées aux zones Barbeau-Brème de Huet (DEN4 proche de HU34), aux distances à la source importantes (SOU3) et aux distances à la mer faibles (MER1). Les densités nulles (DEN1) sont *a contrario* liées à la zone à Truite (HU1), aux distances à la source faibles (SOU1) et à une distance à la mer importante (MER3).

Toutes ces relations sont confirmées par l'analyse des tableaux de Burt (annexe 14). Le deuxième tableau de Burt permet également de voir que les liens entre les variables sont forts mais pas absolus. Ainsi, pour les variables « Densité » et « Huet », si 81.6 % des pêches effectuées dans la zone à Truite (HU1) ne présentent pas d'anguille (DEN1), seulement 67.5 % des pêches sans anguille (DEN1) se situent en zone à Truite (HU1).

La répartition des densités se fait donc selon un gradient décroissant de l'aval vers l'amont.

9.7.2. Répartition des densités d'anguilles à l'échelle des sous-bassins versants.

La variable « Bassin versant » contribue respectivement à la formation des axes 2, 3, 4 et 5 (48.5 %, 39.9 %, 39 % et 32.2 % de l'inertie expliquée par ces axes) (Tableau de contribution des variables à la formation des axes annexe 14). Les mêmes espaces factoriels que précédemment seront utilisés pour définir les relations entre la densité et les sous-bassins versants. L'analyse de l'espace factoriel 1,2 et 3 (figure 97) montre une relation entre la densité d'anguilles et les sous-bassins versants. Le sous-bassin Bidouze correspond à des fortes densités (DEN4). Le sous-bassin gave de Pau est caractérisé par des densités nulles (DEN1). Les sous-bassins de l'Adour et du gave d'Oloron, quant à eux, ont tendance à se positionner entre les densités nulles (DEN1) et faibles (DEN2). Le sous-bassin de la Midouze occupe une position assez proche des densités faibles (DEN2) tout en étant légèrement attiré par les densités moyennes (DEN3). Enfin, le sous-bassin de la Nive est relativement isolé dans la figure 97, mais se rapproche toutefois des densités moyennes (DEN3).

Les relations observées sur la figure 97 se retrouvent dans l'espace factoriel formé par les axes 1,4 et 5 (figure 98). L'analyse de cet espace permet de bien mettre en évidence que les liens entre variables définis précédemment ne sont pas absolus. C'est par exemple le cas pour les variables « distance à la mer » (MER) et « distance à la source » (SOU). Sur les axes 1,2 et 3, ces variables semblaient fortement liées mais sur les axes 1,4 et 5, elles ne se situent pas dans le même espace factoriel. Ce résultat est logi-

que dans la mesure où la proximité de la source n'est pas nécessairement synonyme d'éloignement à la mer.

L'analyse du deuxième tableau de Burt (annexe 14) permet de voir que la Nive n'a pas été pêchée dans les zones Barbeau-Brème (*HU34*) et que la Midouze ne l'a pas été dans la zone à Truite (*HU1*). Ce déséquilibre des effectifs entre les modalités permet donc de comprendre la position particulière de ces deux bassins dans les espaces factoriels étudiés.

Afin d'approfondir l'analyse, il paraît judicieux de traiter séparément les modalités Barbeau – Brème et Truite – Ombre.

➤ Analyse de la zone Barbeau-Brème

Le gave de Pau ne présente qu'un nombre très faible de pêches pour la zone Barbeau-Brème. Il est donc prudent de ne pas l'intégrer au traitement statistique car il risquerait de déséquilibrer l'analyse en tant « qu'élément rare ».

Les variables actives prises en compte pour cette Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM2) sont la densité, la distance à la source, la distance à la mer et le bassin versant. Les années et les trimestres sont introduits comme variables supplémentaires. Seuls les cinq premiers axes seront conservés puisqu'ils extraient 68.83 % de l'inertie totale (annexe 15). L'analyse des contributions des variables à la formation de ces axes montre une bonne représentation des densités (*DEN*) et des bassins versants (BV) sur les axes 1,4 et 5 (contributions relatives des variables aux axes, annexe 15). L'espace factoriel créé par ces trois axes est représenté sur la figure 99.

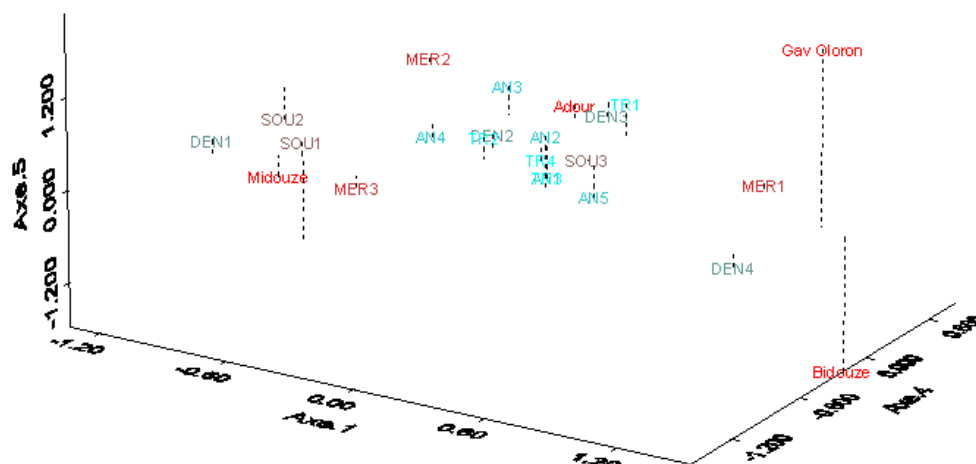


Figure 99 - Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 4 et 5 définis par l'AFCM2

L'analyse de ce graphique montre une différence de répartition des densités en fonction des bassins versants. Les densités les plus fortes (*DEN4* ; 5 à 141 ang / 100 m²) sont observées sur les sous-bassins de la Bidouze et du gave d'Oloron. L'Adour, quant à lui, est plutôt lié aux densités moyennes (*DEN3* ; 1 à 5 ang / 100 m²). Enfin la Midouze est plus proche des densités nulles à faibles (0.001 à 1 ang / 100 m²).

Toutes ces relations sont confirmées par l'étude des tableaux de Burt (annexe 15) qui permet d'affiner les analyses. Pour le sous-bassin versant Bidouze, pour 52.6% des pêches effectuées les densités d'anguilles sont fortes mais sur l'ensemble des pêches présentant des peuplements de densités fortes, seulement 33.3 % se situent dans le sous-bassin versant de la Bidouze.

➤ Analyse de la zone Truite-Ombre

Les pêches effectuées dans les zones à Truite et à Ombre de Huet sont analysées par Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM3) (variables actives : Huet, densité, distance source et mer et bassin versant ; variables supplémentaires : années et trimestres). L'analyse peut se limiter à celle des cinq premiers axes (58.23 % de l'inertie totale). Au vu des contributions relatives à la formation des axes par les variables, l'analyse graphique s'effectuera sur les espaces factoriels 1, 2, 4 et 1, 4, 5 (figures 100 et 101).

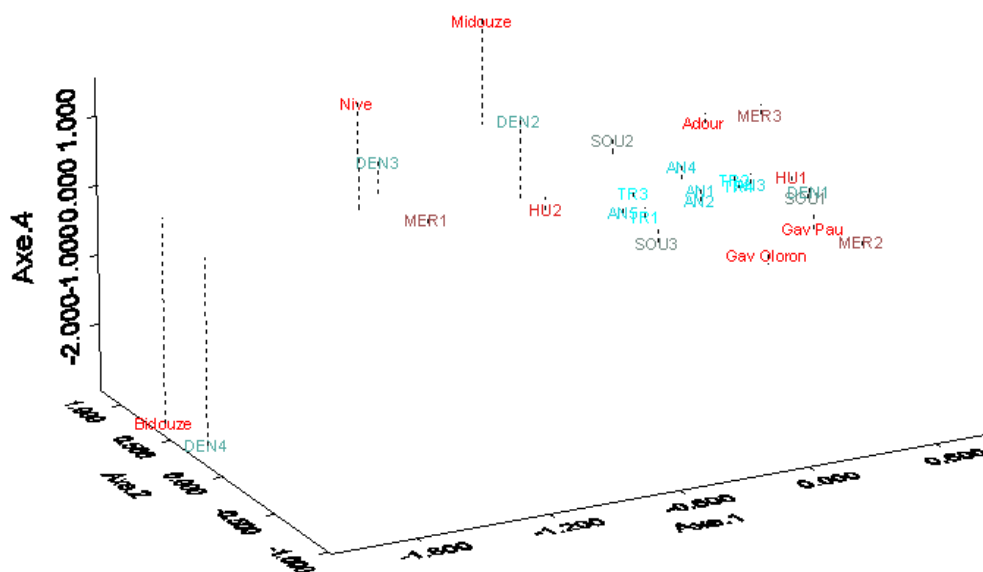


Figure 100 -Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 2 et 4 définis par l'AFCM3

Pour les zonations Truite et Ombre, le sous-bassin de la Bidouze présente la plus forte densité d'anguilles (position proche de *DEN4*). Le sous-bassin versant de la Nive semble lié à *DEN3* (densité moyenne). Celui de la Midouze présente une position intermédiaire entre *DEN2* (dont il est proche) et *DEN3* (densités faibles à moyennes). Le sous-bassin du gave de Pau est fortement en relation avec *DEN1* (absence d'anguille). Le sous-bassin de l'Adour est lui aussi proche de *DEN1*, mais s'en éloigne légèrement par rapport à celui du gave de Pau (densités un peu plus élevées sur le sous-bassin de l'Adour, mais encore proche de 0). Enfin, le sous-bassin du gave d'Oloron se situe entre *DEN1* et *DEN2* (densités très faibles à faibles).

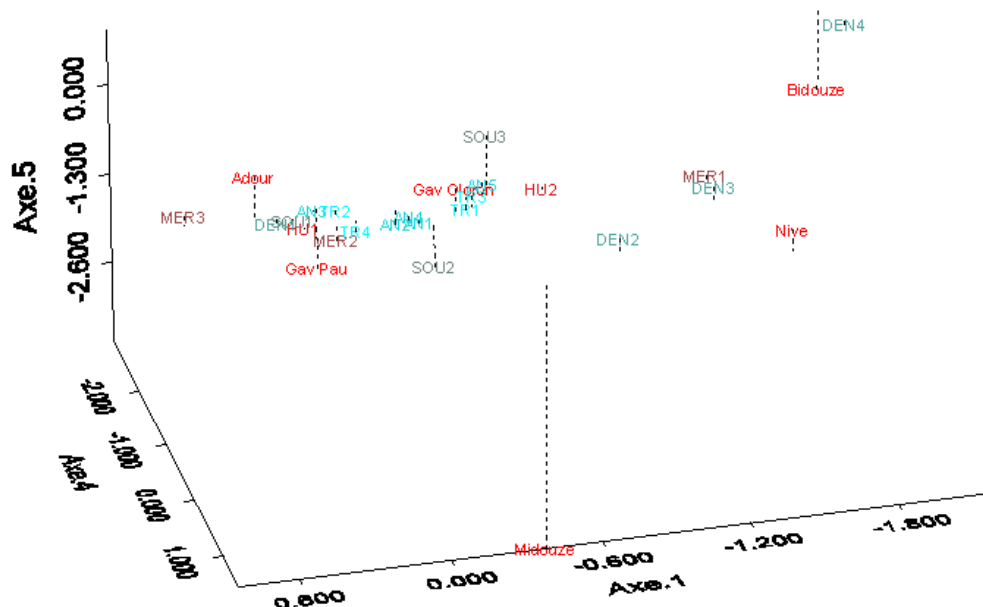


Figure 101- Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 4 et 5 définis par l'AFCM3

L'analyse des tableaux de Burt (annexe 16) confirme les résultats précédents. Elle montre aussi que la répartition des pêches entre les deux zonations (Truite et Ombre) est assez équilibrée pour les sous-bassins de l'Adour (BV1), de la Bidouze (BV5), du gave d'Oloron (BV4) et du gave de Pau (BV3). En revanche, cette répartition est déséquilibrée pour le sous-bassin de la Nive (BV6 ; 78.2 % des pêches dans la zone à Truite) et pour le sous-bassin de la Midouze (BV2 ; 100 % des pêches dans la zone à Ombre). Malgré la différence de répartition des pêches entre ces deux sous-bassins, les densités d'anguilles capturées sont plus fortes sur le sous-bassin Nive que sur le sous-bassin Midouze.

9.7.3. Synthèse concernant les densités observées sur les différents sous-bassins.

Nous pouvons synthétiser les observations effectuées comme suit :

- ✓ bassin de la Bidouze : densités fortes sur l'ensemble de son linéaire ;
- ✓ bassin de la Nive : densités moyennes sur les zones à Truite et Ombre ; absence de données pour les zones à Barbeau et Brème ;
- ✓ bassin de la Midouze : densités nulles à très faibles sur les zones à Barbeau et Brème et faibles à moyennes sur les zones à Truite et Ombre ;
- ✓ bassin du gave d'Oloron : densités importantes sur les zones à Barbeau et Brème qui diminuent fortement (densités faibles) sur les secteurs amonts (Truite et Ombre) ;
- ✓ bassin de l'Adour : densités moyennes sur les zones à Barbeau et Brème devenant très faibles à nulles sur les zonations Truite et Ombre ;
- ✓ bassin du gave de Pau : nombre de pêches trop faible sur les zones à Barbeau et Brème pour pouvoir définir une tendance ; densités nulles à très faibles sur les parties amont (zonation Truite et Ombre).

9.7.4. Répartition des structures de tailles d'anguilles à l'échelle du bassin.

Afin de connaître la répartition des classes de taille dans la rivière, une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples est effectuée en ajoutant aux variables actives précédemment utilisées la variable « taille » (AFCM4). Seule la variable « année » est conservée en variable supplémentaire.

Il s'agit d'étudier la répartition des proportions d'anguilles par classe de tailles sur le bassin versant de l'Adour pour les pêches ayant des captures non nulles.

Les résultats de cette analyse sont présentés en annexe 17. D'après le tableau des contributions relatives à la formation des axes, l'espace factoriel créé par les axes 1,3 et 4 donne une bonne représentation des variables « densité » et « taille ». Sur la figure 102, les modalités *T11* (proportion nulle d'anguilles de petite taille) et *T24* (forte proportion d'anguilles de grande taille) sont proches des modalités *HU1* (zone à Truite) et *SOU1* (proximité de la source). En revanche, *T14* (forte proportion d'anguilles de petite taille) et *T21* (proportion nulle de grosses anguilles) sont proches de *HU34* (zones Barbeau et Brème).

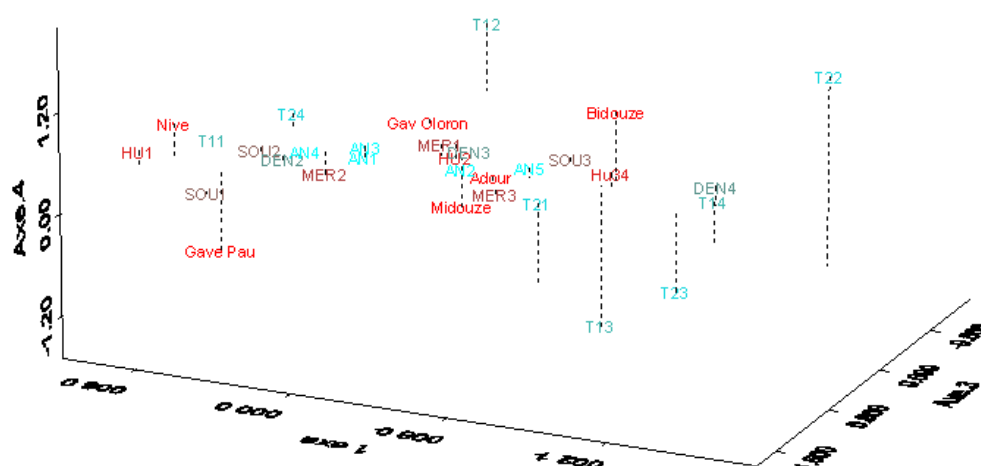


Figure 102- Représentation des variables dans l'espace factoriel créé par les axes 1, 3 et 4, définis par l'AFCM

Les proportions d'anguilles de petite taille diminuent donc de l'aval vers l'amont. Ces anguilles de petite taille sont absentes des zones les plus éloignées de la mer où l'on ne retrouve principalement que des anguilles de grande taille. En revanche, les petites anguilles sont majoritairement présentes dans les zones proches de la mer. Dans ces parties situées en aval, les anguilles de grande taille sont toutefois présentes en quantité moyenne.

➤ Evolution temporelle des densités

Sur la figure 102, les périodes *AN1*, *AN2*, *AN3* et *AN4* sont toujours regroupées au centre de l'espace vectoriel représenté. Seule la modalité *AN5* (1997-2001) se dégage légèrement et tend à se rapprocher des densités fortes (*DEN4*). Ces résultats montrent donc une augmentation des densités pour les années 1997-2001.

La figure 103 permet de bien visualiser cette tendance. La médiane des densités pour l'année 1977 est de l'ordre de 3 individus pour 100 m². Cette valeur chute pour devenir proche de 0 individu par 100 m² durant la période 1978-1996. Les densités augmentent ensuite progressivement entre 1997 et 2001.

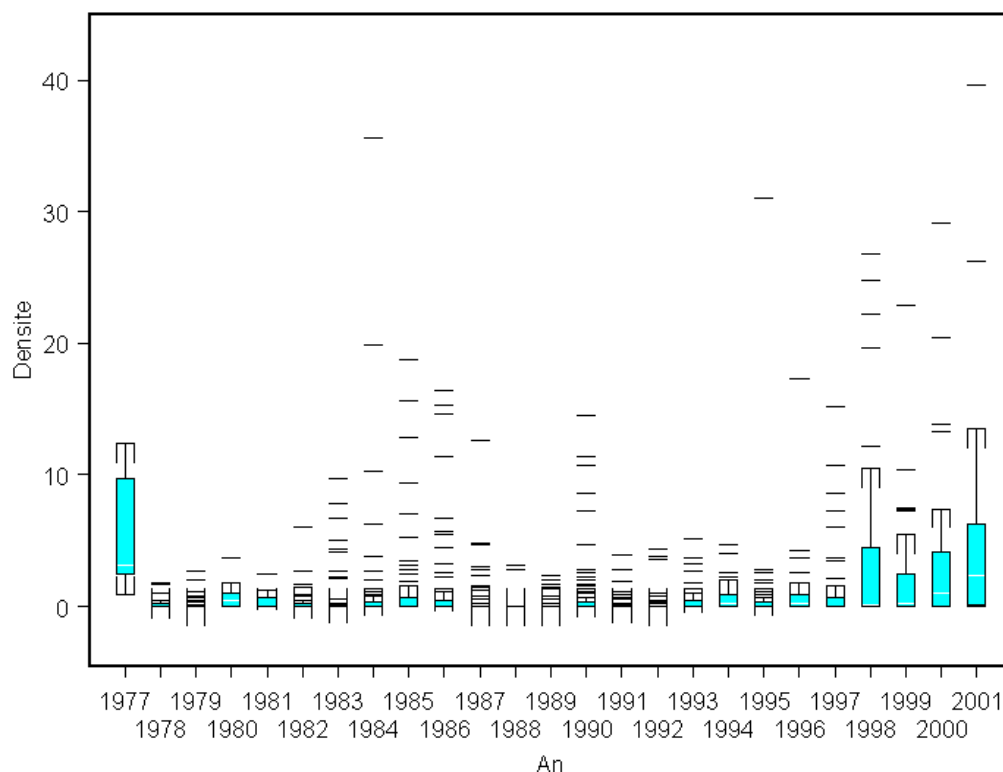


Figure 103- Répartition des densités d’anguilles par année pour l’ensemble du bassin Adour (les valeurs extrêmes sont exclues afin de diminuer l’échelle)

Les sous-bassins du gave d’Oloron et de l’Adour suivent la tendance générale avec une augmentation des effectifs d’anguilles sur la période 1997-2001 (annexe 18). Pour les sous-bassins Nive, Bidouze et Midouze, les densités sont relativement stables durant toute la période étudiée (1977-2001). Enfin, sur le sous-bassin du gave de Pau, les médianes, en général proches de zéro, augmentent ponctuellement en 1988 ainsi que sur la période 1992-1997 (annexe 18).

Les résultats des campagnes de pêches 2000 et 2001 réalisées dans le cadre de cette étude, traduisent sur l’ensemble du bassin Adour une augmentation des densités entre ces deux années (figure 103). Cette augmentation se retrouve sur les sous-bassins de la Midouze, du gave d’Oloron (de manière très marquée) et de l’Adour (annexe 18). Les densités sont en revanche assez stables sur la Nive, la Bidouze et le gave de Pau.

Depuis 1998, un réseau de suivi des populations d’anguilles par pêches électriques a été mis en place par l’association Migradour en collaboration avec le CSP. Ces pêches étant ciblées sur l’anguille, les secteurs pêchés sont assez homogènes et ne sont pas représentatifs de la diversité des habitats. Les pêches spécifiques anguilles ont donc été écartées afin de voir si elles n’étaient pas à l’origine de l’augmentation des densités sur la période 1997-2001. Bien que moins flagrante, l’augmentation ces dernières années est toujours observée (figure 104).

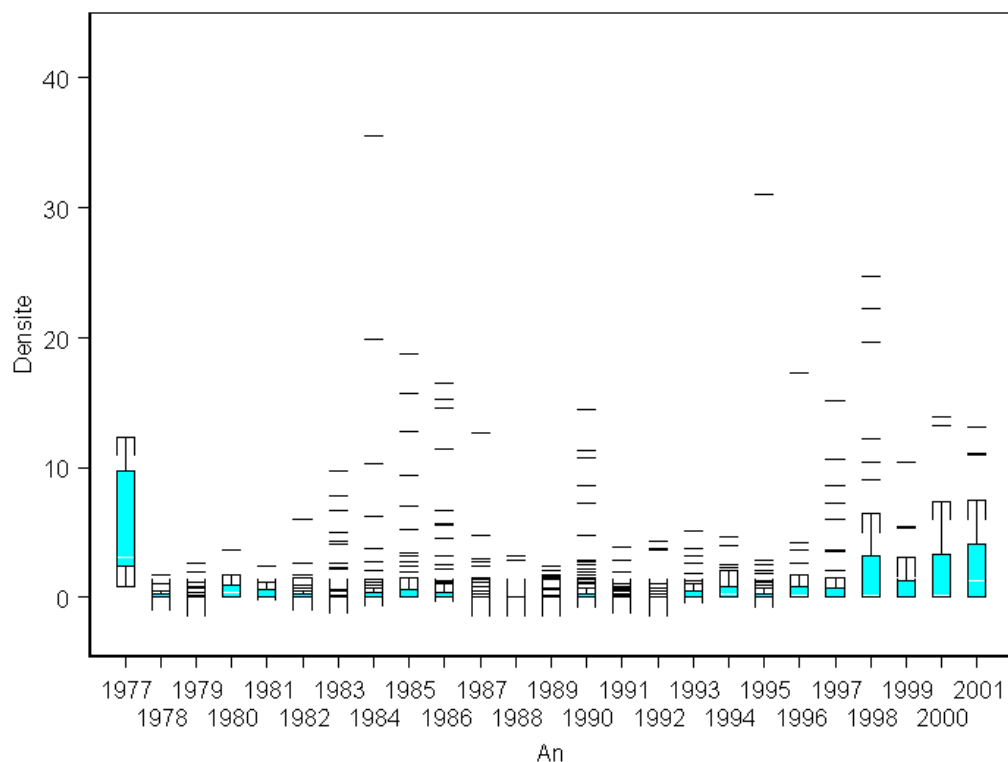


Figure 104- Représentation des densités d’anguilles par année sur l’ensemble du bassin Adour après élimination des pêches du Réseau Anguille (les valeurs extrêmes sont exclues afin de diminuer l’échelle)

Les AFCM effectuées ne mettent pas en évidence de fortes variations de densité entre les trimestres (les variables sont souvent groupées autour de l’origine). Seuls les trimestres *TR1* et *TR3* ont légèrement tendance à se rapprocher des densités fortes (figure 105).

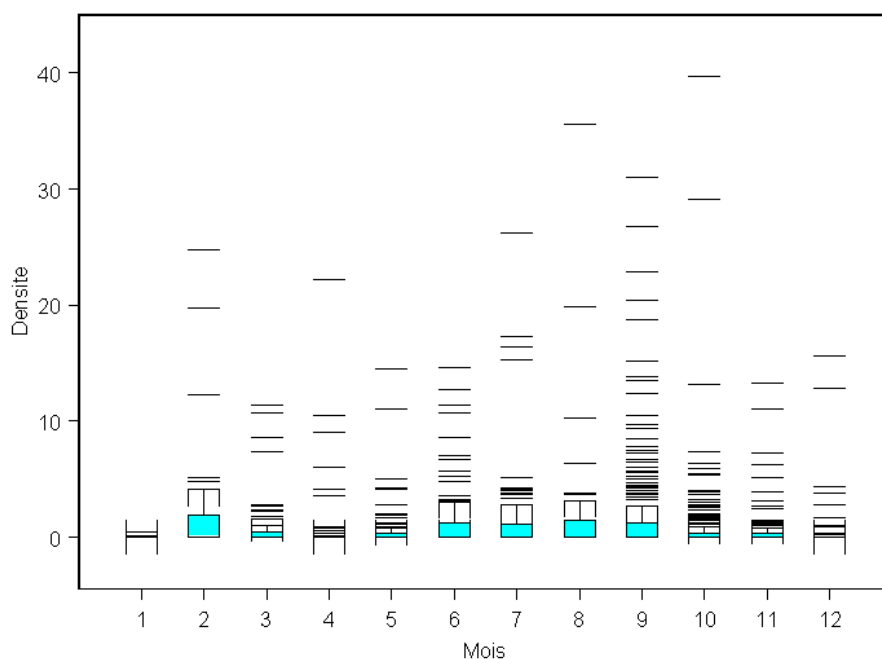


Figure 105- Représentation des densités d’anguille par mois sur l’ensemble du bassin Adour (les valeurs extrêmes sont exclues afin de diminuer l’échelle)

9.7.5. Evaluation du taux d'anguilles argentées.

Depuis 1998, dans le cadre du Réseau Anguille, des données biométriques complémentaires sont relevées sur les anguilles afin de caractériser leur niveau d'argenture. Il s'agit des diamètres horizontal (Dh) et vertical (Dv) de l'œil, mesurés en mm. Ces mesures permettent de calculer l'index oculaire (IO) selon la formule de Pankhurst (Dufour et *al.*, 1998) :

$$IO = \left[\frac{(Dh + Dv)}{4} \right]^2 * \frac{3.14}{L}$$

Cet index semble un bon critère externe de caractérisation de l'argenture et serait donc représentatif de la maturité sexuelle des anguilles. D'après Dufour (Dufour et *al.*, 1998), une taille supérieure ou égale à 50 cm associée à un IO supérieur à 10 permet de caractériser une femelle argentée. Les résultats obtenus sur les quatre années d'études sont mentionnés au tableau 36

Tableau 36– Proportions d'anguilles argentées déterminées par la méthode de l'indice oculaire.

Année	Nombre d'anguilles échantillonnées	Nombre d'anguilles argentées
1998	68	1
1999	892	2
2000	837	3
2001	1133	6

9.7.6. Répartition spatiale des densités d'anguilles.

La répartition spatiale des densités se visualise sur chacune des cartes de la période 1 à 5 prises individuellement (annexe 19, cartes 1 à 5). Les cartes des périodes 1 (1977 – 1983) et 5 (1997 – 2001), pour lesquelles les stations pêchées sont réparties de manière homogène sur la zone de colonisation de l'anguille, apportent un support intéressant pour la visualisation des résultats de l'analyse multivariée.

➤ Répartition des densités à l'échelle de la rivière

Trois grandes tendances se dégagent sur le bassin de l'Adour :

- ✓ Sous-bassins Nive et Bidouze : la répartition des densités d'anguilles est relativement homogène sur l'ensemble des deux bassins. Les observations de densités faibles ou nulles sont très proches de leurs sources respectives.
- ✓ Sous-bassins Gaves et Adour : les densités se distribuent selon un gradient décroissant plus ou moins accentué de l'aval vers l'amont. Une coupure nette est perceptible sur le gave de Pau, une vingtaine de kilomètres en aval de la ville de Pau. Le fleuve Adour présente toutefois une particularité sur un tronçon compris entre les confluences de la Midouze et de l'Arros ; une diminution des densités, par rapport aux secteurs amont et aval, semble y être observée.
- ✓ Sous-bassin de la Midouze : il se singularise des autres par un gradient décroissant de densités de l'amont vers l'aval.

➤ Répartition des densités à l'échelle des sous-bassins

Les sous-bassins de la Nive et de la Bidouze présentent tous deux une grande majorité de stations qui se situent, en terme de rangs, parmi les densités les plus fortes.

Le sous-bassin de la Midouze, malgré le gradient de densité observé, se situe plutôt dans une classe moyenne.

Les distributions des sous-bassins Adour et gave d'Oloron sont similaires, avec un gradient progressif qui s'étend de densités « fortes à très fortes » en aval, à « nulles » en amont. Ces deux bassins sont associés par l'analyse statistique (variable « bassin versant » de AFCM1). En terme de surfaces, les zones de faibles densités sont majoritaires.

Le sous-bassin du gave de Pau se différencie des deux précédents par une transition brutale densités « moyennes à très fortes » – densités « nulles » en aval de Pau. La plus grande partie du linéaire présente ainsi des densités nulles.

➤ Evolution temporelle

L'évolution temporelle des densités se visualise par la distribution des classes (codes couleurs) entre les différentes cartes. Pour l'aspect temporel, les cartes sont ainsi liées et indissociables. Cette observation étant peu aisée lorsque les cartes se multiplient, elle a été représentée graphiquement sur la figure 106.

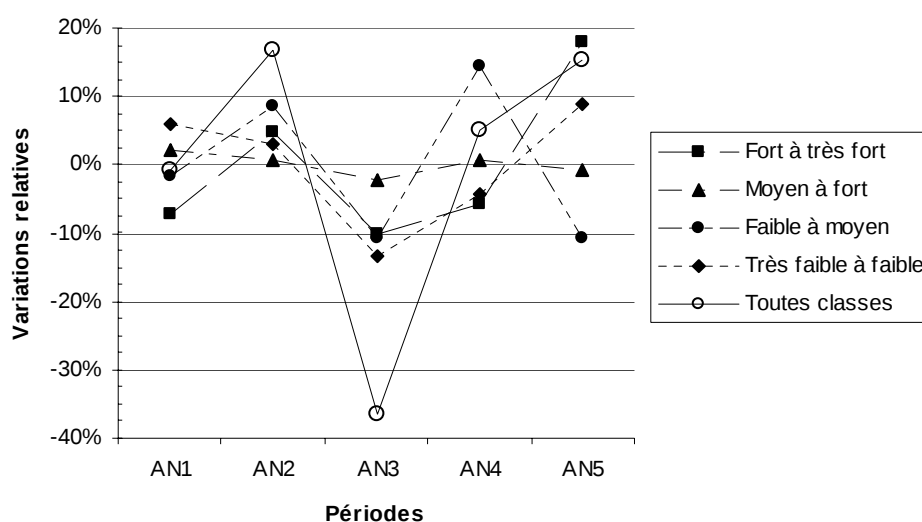


Figure 106 - Variations relatives des classes de densités de l'Anguille par période (1977 – 2001).

L'analyse cartographique ne porte que sur les stations où la présence de l'anguille est signalée. La classe « absence d'anguille » est purement informative. Le facteur « Toutes classes » de la figure 106 est représentatif du nombre de pêches ayant une densité non nulle d'anguilles pour chaque période considérée. La contrainte imposée pour la définition des périodes induit ainsi un poids différent dans la représentativité de chaque période. Un autre biais est de plus introduit par le fait que les pêches ne sont pas réparties de manière homogène sur l'ensemble du bassin entre les différentes périodes. Ce manque d'homogénéité agit à la fois sur la représentativité des différents sous-bassins versants, sur la distribution des pêches en terme de distance à la mer (facteur ayant une action forte sur les densités observées) et sur la distribution entre les différentes zonations piscicoles.

En termes de rangs, l'évolution temporelle des densités observées lors de l'analyse statistique se retrouve ici. La période 5 (1997 – 2001) correspond aux densités les plus fortes et la période 3 (1988 – 1991) aux densités les plus faibles (l'effet de la classe « fort à très fort » est prépondérant, la classe « moyen à fort » étant relativement stable). Les périodes 1 (1977 – 1983) et 4 (1992 – 1996) sont assez similaires en terme de densités, tandis que la période 2 (1984 – 1987) se situe en deuxième position.

9.8. Discussion et synthèse.

9.8.1. Limites méthodologiques : contraintes sur la répartition des stations d'inventaires utilisée dans l'analyse.

Les analyses ont été effectuées sur la totalité des pêches exploitables extraites de la base de donnée du Conseil Supérieur de la Pêche. Sur la période considérée, de 1977 à 2001, ces stations se répartissent de manière homogène sur l'ensemble du bassin de l'Adour. Seules les parties à l'aval des rivières principales, qui ne peuvent être pêchées qu'en bateau, ne sont pas représentées.

Il convient toutefois de souligner que ces campagnes d'inventaires n'ont pas fait l'objet d'une stratégie d'échantillonnage orientée vers le suivi d'une espèce particulière. Elles ont été menées en fonction des missions confiées au Conseil Supérieur de la Pêche durant les 25 dernières années. Par un découpage temporel en cinq périodes d'effectifs égaux, nous espérons conserver une distribution homogène des stations pour chacune de ces périodes. En fait, l'homogénéité de la distribution des stations sur le bassin n'est pas respectée entre les différentes périodes. Hormis la période 1 (1977 – 1983) relativement homogène (annexe 19, carte 1), toutes les autres cartes mettent en évidence des particularités.

- ✓ Période 2 (1984 – 1987) : les parties aval du sous-bassin Nive (BV6) et moyenne du sous-bassin Adour (BV1) sont sous représentées (annexe 19, carte 2),
- ✓ Période 3 (1988 – 1991) : l'effort de pêche a porté prioritairement sur les parties amont des gaves et de l'Adour, particulièrement sur des zones non colonisées par l'Anguille (annexe 19, carte 3),
- ✓ Période 4 (1992 – 1996) : toutes les zones aval du bassin de l'Adour (Nive, Bidouze, gaves et Adour) sont sous représentées (annexe 19, carte 4),
- ✓ Période 5 (1997 – 2001) : la répartition des pêches est homogène sur l'ensemble de la zone de colonisation de l'anguille, au détriment des zones non colonisées peu représentées (annexe 19, carte 5).

9.8.2. Répartition spatiale des densités d'anguilles.

➤ Répartition des densités en anguille à l'échelle de la rivière

Les résultats obtenus mettent en évidence un gradient de répartition à l'échelle de la rivière. Les densités d'anguilles décroissent et les tailles des individus augmentent de l'aval vers l'amont. Ces résultats sont similaires aux données bibliographiques disponibles (Elie et Rigaud, 1984 ; Legault, 1987 ; Chancerel, 1994 ; Lambert et Rigaud, 1999). Cependant, l'origine de ce phénomène n'a pas encore été expliquée et plusieurs hypothèses peuvent être avancées (Lambert, 1999) :

- ✓ soit une colonisation progressive du bassin au fur et à mesure de la saturation de la capacité d'accueil ;
- ✓ soit une répartition homogène en fonction des types d'habitats disponibles quelle que soit la position dans le bassin versant, les habitats favorables étant moins nombreux (en surfaces en eau correspondantes) en tête de bassin d'accueil ;
- ✓ soit par une répartition « programmée » en fonction du profil physiologique des individus notamment.

L'absence de données scientifiques sur la nature de la distribution continentale de l'espèce il y a cinquante ans (époque où l'abondance semblait plus importante), ne permet pas d'estimer l'accentuation éventuelle de l'ampleur de la décroissance aval-amont. Cependant, les densités en anguille observées au cours de la première période (fin des années soixante-dix) et qui correspondent à des recrutements en civelle du début ou du milieu des années soixante-dix ne semblent pas supérieures à celles que l'on a constatées récemment au cours de la période 1997-2001 (cf. figures 103 et 104).

➤ Répartition des densités à l'échelle des sous-bassins versants

Les résultats obtenus mettent en évidence une hétérogénéité des densités observées entre les sous-bassins versants. Le facteur prépondérant de cette différence semble être la distance à la mer. En effet, les sous-bassins courts dont les sources sont les plus proches (Nive, Bidouze) de la mer présentent les plus fortes densités. Ces dernières s'y répartissent de façon homogène sur l'ensemble du linéaire (l'ampleur de la diminution aval-amont est faible). En revanche, les sous-bassins dont les sources sont très éloignées de la mer (Adour et Gaves) présentent des densités moyennes faibles. Mais, sur ces bassins, les densités ne sont pas réparties de manière homogène ; en effet, on retrouve des densités importantes sur les parties aval qui diminuent rapidement en s'éloignant de la mer (l'ampleur de la diminution amont-aval est très marquée). A cette implantation géographique des sous-bassins par rapport à l'embouchure de l'Adour peuvent s'ajouter des facteurs spécifiques à chacun qu'il est utile de détailler :

✓ **Sous bassins Nive et Bidouze :**

Les cartes mettent en évidence des classes de densités équivalentes (densités fortes) pour ces deux sous-bassins. Les AFCM effectuées montrent, quant à elles, une différence entre les densités d'anguilles sur ces deux bassins. La différence entre ces résultats provient de la façon dont sont traitées les données pour chaque méthode. En effet, l'analyse cartographique exprime une gamme de densités définie en fonction de la capacité d'accueil du milieu afin de pouvoir comparer des habitats différents. En revanche, les classes de densités définies pour l'AFCM concernent uniquement la valeur numérique des densités et ne prennent pas en compte la capacité d'accueil du milieu où est effectuée la pêche. Le sous-bassin de la Nive est caractérisé par des densités fortes pour une zone à Truite Ombre tandis que le sous-bassin de la Bidouze est caractérisé lui aussi par des densités fortes, mais pour une zone Barbeau-Brème. La capacité d'accueil étant supérieure pour les zones Barbeau-Brème, il est normal que les résultats des analyses statistiques fassent apparaître des valeurs de densités numériquement plus élevées sur le sous-bassin Bidouze. Les fortes abondances observées sur ces deux sous-bassins s'expliquent principalement par leur proximité à la mer. Leur différence de capacité d'accueil potentielle semble être atténuée par deux facteurs. D'une part, l'absence d'obstacles infranchissables sur le sous-bassin de la Nive rendant accessible la totalité du linéaire (tous les barrages sont équipés de passes à poissons) et d'autre part la présence en quantité importante de barrages partiellement franchissables sur le sous-bassin de la Bidouze (frein à la colonisation).

✓ **Sous-bassins des gaves de Pau, d'Oloron et de l'Adour :**

La décroissance marquée observée sur ces trois sous-bassins s'explique principalement par leur configuration géographique (longueur du linéaire). A celle-ci vient s'ajouter sur le gave de Pau la présence de nombreux obstacles difficilement franchissables (dès les parties basses) et d'un blocage complet à l'aval de Pau durant la période 1958-1995 (barrage d'Artix). Ces facteurs expliquent la rapide décroissance des densités observée sur le sous-bassin du gave de Pau. L'axe Adour présente lui aussi un nombre important d'obstacles difficilement franchissables, mais leur localisation préférentielle sur les zones amonts (Gers, Hautes Pyrénées) n'entrave pas la colonisation des parties basses et moyennes (sous-bassin Midouze, affluents rive gauche...). La discontinuité de densités observée sur l'Adour dans le secteur compris entre les confluences de la Midouze et de l'Arros pourrait s'expliquer par les étiages sévères enregistrés sur ce tronçon (régime pluvial très marqué).

✓ **Sous-bassin de la Midouze :**

Les résultats montrent l'existence d'un gradient inversé par rapport aux autres sous-bassins. Celui-ci s'explique par la dégradation chronique de la qualité de l'eau sur la partie en aval (rejets chimiques sur le Retjons et le Luzou), associée à des pollutions plus ponctuelles (rejets organiques).

9.8.3. Répartition temporelle des densités d'anguilles.

Les résultats traduisent une augmentation des densités sur les cinq dernières années. Il se pourrait cependant que cette augmentation soit due à un biais dans le choix des périodes étudiées plutôt qu'à une réelle augmentation des stocks d'anguilles en milieu fluvial. En effet, les cartes mettent en évidence une différence de répartition spatiale des pêches entre les périodes définies. La période 3 (1988-1991) est celle qui présente les densités les plus faibles. Or, pour cette période la majorité des pêches a été effectuée souvent sur les parties hautes des sous-bassins des Gaves et de l'Adour où les densités d'anguilles sont souvent nulles. En revanche, pour la période 5 (1997-2001), les pêches ont eu lieu principalement sur les zones aval et moyennes au détriment des parties hautes. Ce biais apparu au terme des premières analyses n'a pas permis, pour le moment, de conclure sur les évolutions des densités en anguille durant la période étudiée. Il semble indispensable de poursuivre l'analyse en effectuant, par exemple, un sous échantillonnage qui permette d'obtenir des classes aux effectifs équilibrés et dont la répartition spatiale est homogène.

Une répartition bimodale des densités est observée en fonction des saisons. Les trimestres 1 et 3 présentent les plus fortes densités. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette répartition :

- ✓ un comportement particulier de l'anguille qui modifierait la capturabilité de l'espèce à certaines périodes de l'année,
- ✓ une sélection différente des stations au cours de l'année. On démontrerait alors plus une variabilité de la pratique de pêche qu'un phénomène lié au comportement de l'anguille (ce qui semble le plus probable).

9.8.4. Caractérisation de l'argenteur.

Le nombre d'anguilles considérées chaque année comme argentées est très faible pour la période étudiée (1998-2001). La valeur seuil de l'indice oculaire utilisée a été fixé à 10. Un nombre important d'anguilles capturées lors des campagnes de pêche présente des indices oculaires compris entre 8 et 10. Cette valeur seuil de 10 ayant été définie pour le lac de Grand-Lieu et le bassin du Rhin, il semble nécessaire de la valider pour le bassin de l'Adour.