



Association
Interdépartementale
des Pêcheurs
Professionnels du
Bassin de la Loire

Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : état des connaissances et développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage.

Rapport final

Acou Anthony, Boisneau Catherine & Feunteun Eric

CRESCO, Dinard - Muséum National d'Histoire Naturelle

Juin 2009

Etude Financée par Electricité de France



ANGUILLES-OUVRAGES

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE-DEVELOPPEMENT



www.onema.fr

ADEME



www.ademe.fr



www.france-hydro-electricite.fr



www.edf.fr



www.shem.fr



www.cnr.tm.fr

Depuis plusieurs décennies, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) présente de nets signes de déclin de son abondance sur l'ensemble de son aire de répartition (Dekker, 2004). Elle fait aujourd'hui partie des espèces menacées et au vu des bilans la situation est aujourd'hui devenue critique. Plus qu'un facteur en particulier, c'est une multiplicité de facteurs qui sont à l'origine de cette diminution continue. Il est donc essentiel de réduire significativement les pressions qui pèsent sur le stock (pêche et aspects environnementaux), mais aussi d'intervenir sur les obstacles à sa libre circulation qui constituent l'un des principaux facteurs limitant son aire de répartition en milieu continental avec des blocages à la montaison et des dommages lors de la dévalaison (dommages et mortalités suite au passage au travers des turbines).

Afin de restaurer le stock d'anguille, l'Union européenne a pris des mesures de protection au travers du règlement CE n° 1100/2007 du 18 septembre 2007. Ce règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguilles a défini un objectif d'atteindre un taux d'échappement de géniteurs équivalent à 40% de la biomasse « pristine » (état naturel sans pression anthropique impactant le stock).

Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire ainsi que le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche ont été chargés de mettre en place un Plan de Gestion national pour la reconstitution du stock d'anguilles comportant des mesures sur les différents facteurs de mortalités anthropiques. Ce plan a été présenté par la France le 17 décembre 2008 et approuvé par la Commission européenne le 15 février 2010. Afin de mener à bien ce Plan de Gestion, un Comité National Anguille a été mis en place, ainsi que plusieurs groupes de travail thématiques, dont le groupe de travail « Ouvrages ».

Le groupe de travail « Ouvrages » a rendu un rapport validé par le Comité National le 9 janvier 2008. Celui-ci a conclu notamment à l'intérêt de la mise en œuvre d'un programme de Recherche et de Développement qui a pour objectif la mise en œuvre d'un certain nombre d'actions visant à acquérir une meilleure connaissance du comportement et des rythmes de dévalaison de l'anguille, à évaluer l'impact des aménagements hydroélectriques à la dévalaison (mortalités dans les turbines et impacts cumulés des aménagements sur un axe donné), à développer et évaluer de nouvelles techniques visant à réduire les mortalités dans les turbines (prises d'eau ichtyocompatibles, turbines ichtyophiles, biomoniteurs, barrières comportementales).

Dans ce contexte 18 actions communes de Recherche et Développement sur le franchissement des ouvrages par l'anguille européenne durant leur migration de montaison et d'avalaison ont été engagées en 2008, 2009 et 2010, actions qui ont fait l'objet d'un accord cadre signé le 8 décembre 2008 par les principaux acteurs : Electricité de France, France Hydroélectricité, GDF-SUEZ, la Compagnie Nationale du Rhône, la Société Hydroélectrique du Midi (regroupés au sein de l'UFE : Union Française de l'Electricité), l'ADEME et l'ONEMA.

La présente étude est issue de cet accord-cadre et constitue l'action n°16 de ce programme R&D.

Acou A., Boisneau C. & Feunteun E. 2009. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : état des connaissances et développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage. Rapport du Muséum National d'Histoire Naturelle, CRESCO, Dinard.

Cette étude a été réalisée par la Muséum National d'Histoire Naturelle (Département Milieux et Peuplements Aquatiques, UMR 7208 BOREA, CRESCO Dinard). La direction a été assurée par Eric Feunteun (Professeur MNHN) assisté d'Anthony Acou (Ingénieur de Recherche) avec la collaboration de l'Université de Tours (Catherine Boisneau, Maître de Conférences) et de l'Association Interdépartementale des Pêcheurs Professionnels du bassin de la Loire AIPPBLB (Philippe Boisneau) et d'EDF (Régis Thévenet et François Travade).

Cette étude a été financée par Electricité de France (EDF).

Nous tenons à remercier vivement David Cairns pour son aide concernant l'indice de luminosité, Patrick Rocher et Philippe Duhamel de l'Institut des Mécaniques Célestes et Calculs des Ephémérides pour nous avoir facilité l'accès aux données astrales, et enfin à Olivier Despretz (Directeur du Service d'Eau et d'Assainissement d'Angers Loire Métropole) et Christian Bergé qui nous ont aimablement permis de récupérer les données journalières de turbidité mesurée sur la Loire à l'usine des traitements de eaux des Ponts de Cé sur une période de 20 années.

*« VENT DU NORD, JE DORS
VEND D'EST, JE FAIS LA SIESTE... »*

SOMMAIRE DU RAPPORT

1. Introduction générale	8
2. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : mise au point d'une base de données bibliographiques et état des connaissances	11
2.1. Base de données bibliographiques	11
2.1.1. Source et collecte des références	11
2.1.2. Mots clés utilisés pour la sélection des références	11
2.1.3. Archivage des références	11
2.1.4. Les genres concernés	12
2.1.5. Bilan des thématiques abordées	13
2.2. Synthèse bibliographique	14
2.2.1. Argenture et facteurs environnementaux	15
2.2.2. Période de migration (échelle saisonnière)	17
2.2.3. Patrons de migration et facteurs environnementaux impliqués	20
2.2.4. Rythme migratoire à l'échelle nyctémérale	23
2.2.5. Bilan des modèles de prédiction des périodes de migration	25
2.2.5.1 basés sur les paramètres environnementaux	25
2.2.5.2 basés sur l'activité migratoire d'anguilles en captivité	27
2.2.5.3 basés sur la modélisation du comportement de migration	27
2.3 Conclusion	28
3. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles à partir des données environnementales : développement d'un modèle opérationnel sur la Loire	31
3.1. Introduction	31
3.2. Matériels et méthodes	32
3.2.1. Site d'étude : le bassin versant de la Loire	32
3.2.2. Technique de pêche	34
3.2.3. Les données de captures d'anguilles argentées	34
3.2.4. Les variables environnementales	35
3.2.4.1. Les variables météorologiques	35
3.2.4.2. Les variables hydrologiques	36
3.2.4.3. L'indice de luminosité	36
3.2.4.4. Les types de temps	37
3.2.4.5. Bilan et caractéristiques des variables environnementales	38
3.2.5. Analyses préalables	41
3.2.5.1 Facteurs qui influencent la stratégie de pêche	41
3.2.5.2 Sélection des variables environnementales	42
3.2.5.3 Prédiction du départ de la migration	45
3.2.6. Modélisation des CPUE	46
3.2.6.1 La variable dépendante	46
3.2.6.2 Les variables indépendantes	46
3.2.6.2.1 Les variables météorologiques (types de temps et indice de luminosité)	46
3.2.6.2.2 Les variables hydrologiques (débit et turbidité)	47
3.2.6.2.3 La variable temporelle (numéro de la semaine)	47
3.2.6.2.4 Intégration dans les modèles	47
3.2.6.3 Delta distribution	50
3.2.6.4 Modèles de présence/absence	50
3.2.6.5 Modèles de CPUE relatives positives	51
3.2.7. Analyse de sensibilité (« Leave One Out »)	52
3.2.8. Diagnostic et qualité du modèle	53
3.2.9. Test de la prédiction sur les 20 années « test »	53
3.2.10. Recherche du meilleur compromis entre échappement des anguilles argentées et perte de production	54

3.2.11.	Gain obtenu par les gestionnaires grâce à l'utilisation du modèle	55
3.3.	Résultats	56
3.3.1.	Analyse des captures et stratégies de pêche	56
3.3.1.1	Variabilité des CPUE	56
3.3.1.2	Variabilité des stratégies de pêche	57
3.3.1.3	Occurrence des sorties manquantes	57
3.3.1.4	Les CPUE de la pêcherie 5 : la nouvelle variable dépendante	61
3.3.2	Le type de temps : une variable météorologique synthétique	63
3.3.3	Déterminisme environnemental du $J_{5\%}$	66
3.3.4	Modélisation des CPUE relatives d'anguilles argentées	67
3.3.4.1	Analyse de sensibilité « Leave One Out »	67
3.3.4.2	Modèle binomial (présence/absence) :	67
3.3.4.3	Modèle log-normal (CPUE relatives >0)	70
3.3.4.4	Analyse des résidus	73
3.3.5	Prédiction des captures sur 20 années « test »	74
3.3.6	Maximisation du compromis échappement/perte de production	77
3.3.7	Gain obtenu par les gestionnaires	79
3.4	Discussion - Conclusion	82
4.	Références bibliographiques	91
ANNEXE 1		97
ANNEXE 2		103
ANNEXE 3		124
ANNEXE 4		125

Liste des Figures

Figure 1 : Proportion des genres de poissons étudiés dans les publications référencées.	13
Figure 2 : Répartition des thématiques (en %) abordées dans la base de données bibliographique.....	13
Figure 3 : Argenture et migration, des interactions multiples entre organisme et facteurs environnementaux	16
Figure 4: Dates médianes de migration de l'anguille argentée européenne en fonction du gradient latitudinal.....	19
Figure 5: Localisation des pêcheries au guideau et des principales stations de mesure des variables environnementales.	33
Figure 6 : Schéma d'un guideau en pêche.....	34
Figure 7 : Evolution des CPUE d'anguilles argentées de la pêche 3 (saison 1997) en fonction de l'indice de luminosité et des phases lunaires.	37
Figure 8 : Présentation des 8 types de temps.	39
Figure 9 : Distribution des CPUE (nombre d'anguilles par nuit de pêche et par engin) observées entre 1987 et 2006 par pêche.....	56
Figure 10 : Statistique des stratégies de pêche pour chaque pêche.....	57
Figure 11 : Boîte à moustaches représentant l'occurrence des sorties manquantes des 4 pêcheries en fonction des années et du numéro de la semaine.....	59
Figure 12 : Boîte à moustaches représentant l'occurrence des sorties manquantes des 4 pêcheries en fonction des classes de débit et des phases lunaires.	60
Figure 13 : Evolution hebdomadaire des CPUE cumulées moyennes (\pm e.t.) de la série chronologique P5 entre les années 1987 à 2006 (courbe bleue).	62
Figure 14 : Valeurs propres associées à chaque dimension de l'ACM contruite à partir de 8 variables explicatives et de la variable illustrative	63
Figure 15 : ACM sur les données environnementales : représentation des individus (N = 2760 jours).....	63
Figure 16 : Représentation des modalités actives et illustratives.....	64
Figure 17: Evolution interannuelle du $J_{5\%}$ calculé sur la série de la pêche 5.....	66
Figure 18 : Occurrence modélisée selon les coefficients du modèle 1, des anguilles argentées en fonction de la classe de turbidité et du numéro de la semaine	69
Figure 19 : Boîtes à moustaches représentant la médiane, les 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartiles et l'intervalle des CPUE relatives log-transformées (%) en fonction des modalités des facteurs sélectionnés dans le modèle 1 selon la procédure <i>stepAIC</i>	72
Figure 20 : Analyse des résidus obtenus pour le modèle 1.	73
Figure 21: Analyse comparative des pics observés et prédits de trois années « test » pour lesquelles les prédictions vérifiées étaient maximale, moyenne et minimale.	75
Figure 22 : Evolutions moyennes de l'échappement en anguilles argentées réalisé et du nombre de jours d'arrêt de turbine observées en fonction du niveau des valeurs seuils utilisées (de 5,0 à 0,05%) simulées pour toutes les années « test » et pour les années testées par les modèles à architecture finale.....	78
Figure 23: Distributions des plages d'arrêt de turbine obtenues après simulations sur l'ensemble de la période d'étude et basées sur les valeurs seuils de 0,6% à 0,2%.	79
Figure 24 : Courbes des CPUE relatives observées classées par année dans un ordre décroissant sur la période 1987-2006.....	80
Figure 25 : Courbe moyenne \pm e.t. et courbe cumulée des CPUE observées classées dans un ordre décroissant sur la période 1987-2006.	81

Liste des Tableaux

Tableau 1: Résumé des études analysant les facteurs environnementaux susceptibles d'influencer le comportement de dévalaison chez <i>Anguilla</i>	22
Tableau 2 : Résumé des études analysant l'activité migratoire des anguilles argentées à l'échelle horaire.....	24
Tableau 3 : Caractéristiques générales des séries chronologiques des quatre pêcheries observées sur la période d'étude (de la saison 1987 à 2006).	35
Tableau 4 : Caractéristiques générales des variables environnementales mesurées au moins une fois par jour entre le 1 ^{er} Octobre et le 15 Février des années 1987 à 2007	40
Tableau 5 : Matrice des corrélations des variables environnementales continues (moyennes journalières) mesurées entre le 1 ^{er} Octobre et 15 Février des années 1987 à 2006.....	43
Tableau 6 : Caractéristiques des variables discrètes utilisées pour réaliser l'ACM et proportions des jours (pour un total de 2760 jours) où les modalités ont été observées.....	44
Tableau 7. Moyennes des variables indépendantes mesurées et utilisées pour la modélisation des captures d'anguilles argentées.	49
Tableau 8: Description des vingt combinaisons de 19 années (périodes d'apprentissage) utilisées pour la modélisation des CPUE relatives d'anguilles argentées et années test pour réaliser la prédiction.	52
Tableau 9 : Résultats des régressions logistiques sur l'occurrence des sorties manquantes. ..	58
Tableau 10 : Caractéristiques par année de la série chronologique de la pêche 5.	61
Tableau 11 : Contribution de chaque variable explicative à la création des axes 1 et 2 de l'ACM.	65
Tableau 12 : Facteurs sélectionnés par les vingt modèles pour expliquer les variabilités d'occurrence (modèle binomial) et des CPUE positives (modèle log-normal) d'anguilles argentées de la pêche 5.....	68
Tableau 13 : Facteurs sélectionnés par la procédure <i>stepAIC</i> du modèle 1 pour expliquer la variabilité de l'occurrence des anguilles argentées ($CPUE_{i,0/1}$).	69
Tableau 14 : Résultats du GLM sur les CPUE relatives positives ($CPUE_{i+}$) du modèle 1.	71
Tableau 15 : Taux de prédictions vérifiées, sous-prédictions et sur-prédictions estimés sur la totalité des années « test ».	76

1. Introduction générale

La population de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) est depuis une vingtaine d'années en régression constante sur l'ensemble de son aire de répartition qui s'étend de l'Afrique du Nord à l'Europe du Nord.

Dans le but de restaurer le stock d'anguille européenne, le conseil des ministres européens a adopté récemment un règlement (CE n°1100/2007 du 18/09/2007) qui prévoit un échappement minimum de 40% des futurs géniteurs, un repeuplement des cours d'eau européens et que chaque Etat membre élabore un Plan de Gestion de l'anguille. Ce plan de gestion doit présenter les actions et mesures de gestion des pêcheries et hors pêcheries destinées à améliorer l'environnement et la qualité des trois écophases, civelles, anguilles jaunes et anguilles argentées. Chaque état doit notamment fournir une description des mesures de gestion qui seront mises en œuvre pendant la première année d'application du plan de gestion pour réduire la mortalité des autres facteurs que la pêche, notamment les turbines hydroélectriques, les pompes et les prédateurs. Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, en association avec le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche ont organisé le Plan de Gestion pour la reconstitution du stock d'anguilles à l'échelle française. Pour ce faire, ces deux ministères ont mis en place en 2007 plusieurs groupes de travail thématiques, dont le groupe de travail « Ouvrages » ainsi qu'un Comité National Anguille. Le groupe de travail « Ouvrages » a rendu des conclusions validées par le Comité National Anguille le 9 Janvier 2008. Celles-ci ont conclu notamment à l'intérêt de la mise en œuvre d'un programme de Recherche et de Développement (R&D) qui a pour objectif d'étudier et comprendre le comportement des anguilles et l'impact des ouvrages sur la migration et la mortalité de celles-ci.

Un accord cadre entre l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), 5 entreprises d'hydroélectricité, dont l'EDF, et l'Agence de l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME), a été conclu en 2008 afin de mettre en œuvre un programme de R&D ayant pour objectif d'étudier et de comprendre le comportement des anguilles et l'impact des ouvrages sur la migration et la mortalité de celles-ci.

En effet, parmi les multiples facteurs de raréfaction identifiés (surexploitation, dégradation des habitats, parasitose, modifications océaniques, etc.), la présence d'obstacles qui entravent la libre circulation de l'espèce dans les cours d'eau est invoquée. Les obstacles à la migration et en particulier les aménagements hydroélectriques impactent fortement la population d'anguilles à deux périodes clefs de leur cycle biologique continental :

- au cours de leur migration anadrome parce que les obstacles sont généralement infranchissables pour ces jeunes anguilles
- au cours de la migration d'avalaison parce que le transit des anguilles argentées dans les turbines engendrent des mortalités importantes (entre 20% et 100%) en raison de leur grande taille (entre 40 cm et plus d'un mètre).

S'il est possible de restaurer les voies de migration des jeunes anguilles (civelles et anguillettes) par l'aménagement de passes spécifiques dont l'efficacité est grandissante, parvenir à réduire les mortalités d'anguilles argentées dans les turbines apparaît plus problématique. Pour limiter le transit des anguilles argentées dans les turbines, l'aménagement de grilles au niveau des canaux d'alimentation associé à la mise en place

d'exutoire de dévalaison qui offre une voie de migration moins « létale » des anguilles migrantes sont généralement envisagés. L'efficacité de ces aménagements reste à ce jour très limitée dans la mesure où la majorité des anguilles n'empruntent pas cette voie, probablement pas assez attractive, et cherchent à passer entre les grilles de prise d'eau. Une option a donc consisté à adopter des grilles à barreaux d'espacement inférieurs à 2 cm, ce qui engendre sur certaines centrales des problèmes importants d'entretien et de maintenance des ouvrages (colmatage, perte de production, etc.) ainsi que des risques de mortalité par placage sur les grilles si les vitesses d'écoulement dépassent 50 cm/s (Travade F., données non publiées). Ainsi, plusieurs types de dispositifs, adaptés spécifiquement à la configuration des usines, doivent être élaborés. Pour EDF, la conception de prises d'eau et de turbines « ichtyocompatibles » (i.e. qui limitent les mortalités de poissons) est devenue une urgence en matière de R&D sur de nombreux sites (e.g. sur le Gave de Pau). En attendant que ces nouvelles technologies soient opérationnelles et face à la pression européenne croissante pour traiter ces problèmes de mortalité dans les turbines, seul un arrêt de turbinage en période de migration semble à ce jour réellement efficace.

Aussi l'EDF a souhaité confier au Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes Côtiers (CRESCO) du Muséum National d'Histoire Naturelle, une étude dont l'objectif *in fine* est de développer un modèle opérationnel de prédiction des périodes de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales. Ce modèle servira d'aide à la gestion des centrales hydroélectriques en permettant à EDF de cibler plus efficacement les arrêts de turbinage qui seraient envisagés et de trouver le meilleur compromis entre échappement d'anguilles argentées et arrêt de turbinage. En préalable, il convient de constituer une base de données bibliographiques puis de faire un bilan et une analyse critique des modèles de dévalaison développés jusqu'à ce jour chez les différentes espèces d'anguilles ou poissons migrateurs. La première partie de ce rapport est une revue bibliographique qui synthétise tous les travaux qui se sont intéressés de près ou de loin au déterminisme environnemental de la migration d'avalaison des anguilles argentées. Dans la seconde partie, un modèle de prédiction des pics de migration des anguilles argentées développés sur la Loire est présenté.

Partie 1

Prédiction des pics de dévalaison des
anguilles argentées à partir des
données environnementales :

**Mise au point d'une base de
données bibliographiques et
état des connaissances**

2. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : mise au point d'une base de données bibliographiques et état des connaissances

2.1. Base de données bibliographiques

La base de données a pour objectif de référencer les travaux qui s'intéressent aux relations entre facteurs environnementaux et migration d'avalaison ainsi qu'aux modèles qui permettent de prédire les périodes de migration. Les références sélectionnées concerneront pour l'essentiel l'anguille européenne, mais les travaux portant sur d'autres espèces d'anguilles, d'autres poissons migrateurs (saumons, aloses, etc.) ou non (gardons, etc.) seront également intégrés. Cette base de données n'est sans doute pas exhaustive mais il est vraisemblable que les travaux les plus pertinents y figurent. Enfin, elle sera alimentée pendant toute la durée de l'étude. Ainsi, le nombre de références incluses dans la base de données à ce jour constitue un nombre minimum.

2.1.1. Source et collecte des références

Une sélection des publications a été réalisée après examen (i) des bases de données ASFA, Current Contents (Agriculture, Biologie, Environnement) et Pascal et des (ii) plateformes de revues scientifiques telles que Blackwell Synergy, Ovid, Science Direct, Nature, Wiley Intersciences, Kluwer. Ces plateformes référencent et mettent à disposition en ligne des articles au format numérique (PDF) dont la date de publication est relativement récente (< 10 ans environ). Lorsque les références étaient trop anciennes et/ou non disponibles en ligne, des demandes tirées à part ont été adressées directement aux auteurs (environ une cinquantaine) par courrier électronique. De la même façon, nous nous sommes procurés les références de thèses de doctorat auprès des bases de données Docthèses. Enfin, nous avons sollicité bon nombre de collègues et organismes (scientifiques et gestionnaires) pour obtenir de la littérature grise (DEA, rapports techniques, rapports de stages, etc.).

2.1.2. Mots clés utilisés pour la sélection des références

Les principaux mots clés qui ont été utilisés pour orienter la sélection des publications dans les bases de données et différentes plateformes sont les suivants :

fish(es), migratory fish(es), Anguilla, Salmo, Oncorhynchus
seaward migration(s), catadromous migration(s), timing, migration period(s)
model(s), peak prediction, peak forecasting, environmental factor(s)

A ce jour, ce sont près de 360 documents qui ont été sélectionnés.

2.1.3. Archivage des références

Toutes les références sélectionnées ont été archivées dans un logiciel spécialement conçu pour cette tâche (Endnote, version 6.0).

Dans ce logiciel, chaque document a été référencé classiquement selon :

- son type : publication scientifique, acte de colloque, thèse de doctorat, etc.
- ses caractéristiques : auteur(s), année, titre, journal, volume, page, etc.
- des mots-clés : un index des mots clés intégrés dans la base de données est figuré en annexe 1 de ce document
- un résumé : un effort particulier a été effectué pour qu'une grande majorité (>90%) des références comprennent un résumé

et deux champs complémentaires,

- version papier (O/N) : qui précise si la référence est disponible ou non en version papier
- PDF (O/N) : qui précise si la référence est disponible ou non en format électronique (fichier PDF). Ce format permet une diffusion plus large des références

Enfin, pour faciliter la consultation de la base, les documents ont été regroupés en 7 thèmes,

- thèmes :
 - *dam impact*
 - *downstream and spawning migration*
 - *environmental factor (glass eel, elver & yellow)*
 - *evolution, diadromy*
 - *life-history & habitat*
 - *management, conservation, model & stock*
 - *quality of spawners: parasitology, ecotoxicology & anthropogenic impacts.*

La base bibliographique Endnote ainsi que les références au format papier (260) ou électronique (280) sont disponibles et diffusables.

2.1.4. Les genres concernés

Les travaux référencés dans la base de données s'intéressent à 8 genres différents de poissons. Les plus représentés sont le genre *Anguilla* et dans une moindre mesure le genre *Salmo* (Figure 1).

Au sein du genre *Anguilla*, l'anguille européenne est l'espèce la plus largement représentée (59,5%), suivie des anguilles américaine (17,3%), japonaise (9,9%) et australienne (*A. australis* et *A. dieffenbachii* ; 6,2% et 4,5% respectivement). Enfin, les autres espèces (e.g. *A. reinhardtii* et *A. marmorata*) comptent pour environ 2% des documents qui s'intéressent à ce genre.

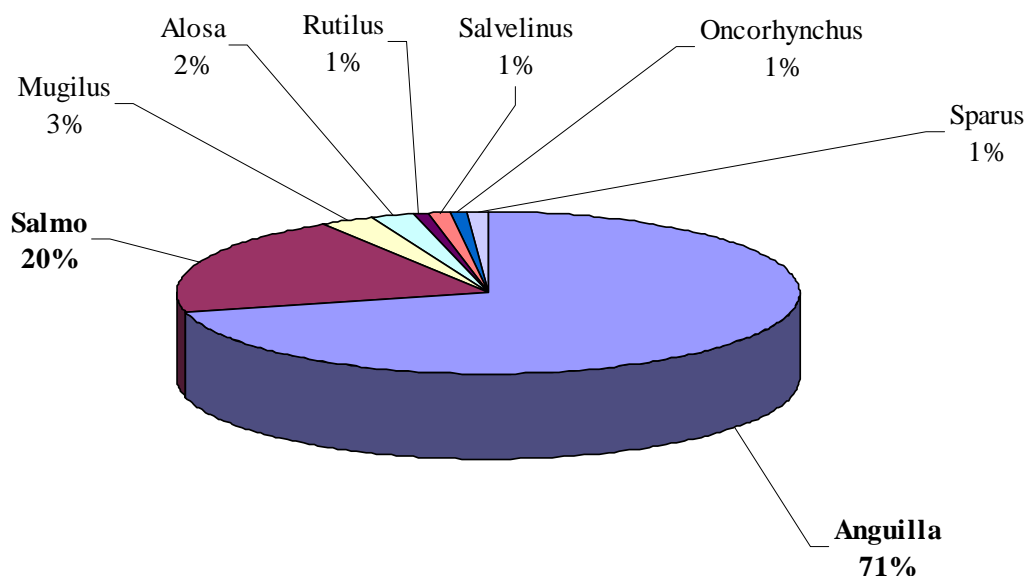


Figure 1 : Proportion (en %) des genres de poissons étudiés dans les publications référencées.

2.1.5. Bilan des thématiques abordées

La répartition des thématiques observées dans la base de données est présentée dans la Figure 2. Les travaux qui s'intéressent à la prédiction des périodes de migration (qui appartiennent à la fois aux thématiques « downstream and spawning migration » et « management, conservation, model & stock ») sont peu nombreux. On en compte moins d'une dizaine dont la majorité sur l'anguille et le reste sur les saumons.

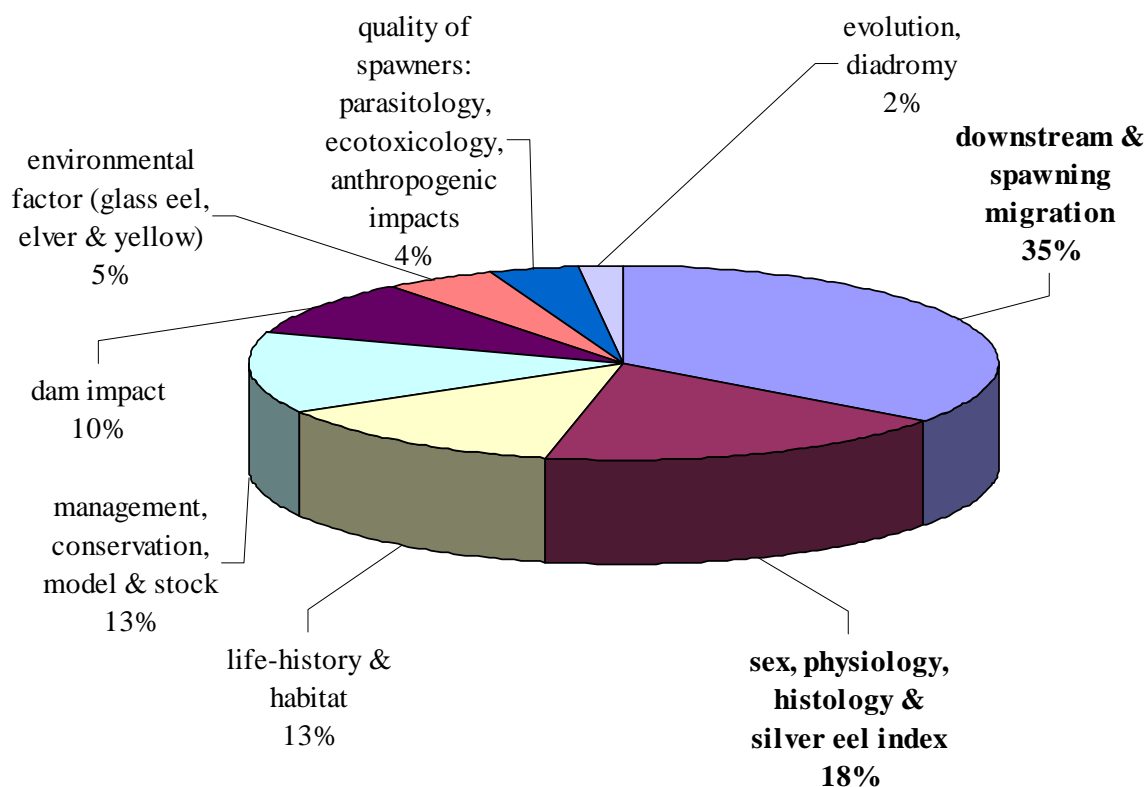


Figure 2 : Répartition des thématiques (en %) abordées dans la base de données bibliographique.

2.2. Synthèse bibliographique

Le passage des anguilles argentées migrantes au niveau de centrales hydroélectriques et autres barrages est devenu un sujet fondamental pour les gestionnaires en raison du déclin d'un grand nombre d'espèces d'anguilles depuis quelques années (Haro et al. 2000a,b). En raison de leur grande taille, les mortalités d'anguilles argentées liées à leur transit dans les turbines sont généralement importantes. Cependant, les mortalités varient beaucoup en fonction des caractéristiques des turbines et du mode de gestion des centrales (Monten 1985 ; Larinier et Dartiguelongue 1989 ; Hadderingh et Baker 1998). Pour des turbines de type Kaplan, les mortalités peuvent être supérieures à 25% et les blessures occasionnées concernent près de 50% des petites anguilles argentées (22-83 cm ; Berg 1986) voire même 100% pour les plus grandes (≥ 70 cm, Monten 1985).

L'aménagement de grilles au niveau des canaux d'alimentation ou les systèmes d'exutoire qui ont pour vocation de diminuer les mortalités par turbinage sont à ce jour relativement efficaces mais pas applicables à toutes les usines. Une solution envisagée et préconisée par le plan de gestion européen est donc de suspendre les opérations de turbinage et provoquer des surverses pendant les périodes d'avalaison. Parce que les caractéristiques des périodes de dévalaison des anguilles sont encore à ce jour peu renseignées, seul un arrêt complet de turbinage sur une grande période (d'octobre à février soit 5 mois) serait réellement efficace. Cependant, pour des sites où la production hydroélectrique est importante, cette solution radicale représente une perte de production énorme (150 jours de perte de production). Ainsi, une meilleure connaissance des facteurs environnementaux qui favorisent la migration d'avalaison permettrait de cibler les périodes pour lesquelles les événements migratoires sont les plus probables.

Pour les espèces tempérées incluant les espèces atlantiques (*A. anguilla* et *A. rostrata*) et néo-zélandaises (*A. australis* et *A. dieffenbachii*), la période d'intensité maximale de la migration d'avalaison a généralement lieu au cours de la seconde moitié l'année quand la température de l'eau décroît (Todd 1981 ; Haraldstad et al. 1985 ; Hvidsten 1985 ; Vollestad et al. 1986 ; Haro 1991 ; Boubée et al. 2001 ; Cullen & McCarthy 2003 ; Acou et al. 2008 ; Durif & Elie 2008). Cependant, les périodes de migration sont très variables entre les sites et entre les années au sein des sites (Vollestad et al. 1994). Une grande part de cette variabilité spatiotemporelle des périodes de migration est imputable aux variations des facteurs environnementaux qui agissent à la fois sur l'état physiologique du poisson via le système neuroendocrinien pendant l'argenture et sur la migration elle-même. Il existe donc des interactions importantes entre l'organisme et les facteurs environnementaux qui peuvent agir à plusieurs échelles temporelles au cours de l'argenture et de la migration elle-même (Figure 3).

L'objectif de cette revue est d'une part d'analyser l'influence des facteurs environnementaux et leurs variabilités temporelles (saisonnière, journalière et nyctémérale) sur l'argenture et la migration d'avalaison. D'autre part, un bilan et une analyse critique des travaux qui se sont intéressés à la prédiction des périodes de migration des anguilles argentées (européennes et autres espèces) mais aussi d'autres espèces, seront réalisés.

2.2.1. Argenture et facteurs environnementaux

L'argenture est l'ultime métamorphose qui prépare l'anguille à la migration de reproduction grâce à tout un ensemble de modifications morphologiques et physiologiques qui marquent la limite entre deux étapes caractérisées par des modes de vie et des environnements très différents. Ces transformations débutent bien avant la migration elle-même et sont à ce titre anticipatrices (Fontaine 1994). Elles débutent au printemps bien avant les manifestations externes qui n'apparaissent qu'à la fin de l'été et à l'automne et aboutissent à la dévalaison sous l'effet de facteurs exogènes (Figure 3).

A son terme, les anguilles argentées prêtes à entreprendre leur migration d'avalaison sont caractérisées par une livrée très contrastée, sombre sur la partie supérieure (brun-noir) et claire sur la partie abdominale (blanc argenté). La peau (Bertin 1951) et plus particulièrement le derme (Pankhurst 1982) s'épaississent et la longueur des nageoires augmente (Lee 1979 ; Durif 2003). On observe aussi un accroissement général des organes des sens, c'est le cas de la ligne latérale qui se différencie (Zacchéi & Tavolaro 1988 ; Acou et al. 2005), de l'épithélium olfactif (Sorensen & Pankhurst 1988 chez *A. rostrata*) et surtout de l'œil (Fontaine 1994 ; Pankhurst 1982). De nombreuses hormones interviennent également dans le déterminisme de l'argenture de l'anguille dont l'insuline, le cortisol et les hormones thyroïdiennes (Fontaine, 1994), ce qui suggère une hyperactivité des glandes interrénales et de la thyroïde (Fontaine, 1975). L'argenture donne lieu à une modification des cellules à chlorure (Na^+/K^+) dans les branchies, comparable à la smoltification des Salmonidés. Prototypique du poisson amphihaline, l'anguille semble néanmoins pouvoir maintenir le même équilibre osmotique intérieur qu'elle soit en eau douce ou en mer (Fontaine, 1994).

Les mâles se métamorphosent à des tailles (< 450 mm) et âges (entre 3 et 14 ans) plus faibles que ceux des femelles (> 450 mm ; entre 6 et 18 ans) probablement parce que leur fertilité n'est pas liée à leur taille et qu'ils ont tout intérêt à migrer le plus tôt possible, contrairement aux femelles (Vollestad 1992 ; Svedang et al. 1996). Cette importante variabilité des tailles et âges à l'argenture suggère qu'il n'existe pas de taille ou âge seuil pour débiter l'argenture. Ainsi, aucun facteur interne (âge, taille) ou environnemental n'a à ce jour été clairement désigné comme initiateur de la métamorphose (EELREP 2005). Seuls Vollestad et al. (1986) ont émis l'hypothèse que la température de l'eau pouvait contrôler à long terme cette période de préparation physiologique de la migration. A notre connaissance, cette hypothèse n'a pas été confirmée à ce jour.

Vollestad (1992) en comparant les âges et tailles à l'argenture d'anguilles issues de différents sites européens et d'Afrique du Nord a précisé les relations entre la latitude de l'habitat de croissance et les caractéristiques des anguilles argentées. D'une part, les âges moyens à l'argenture des mâles et des femelles sont fortement conditionnés par les taux de croissance individuels et par conséquent sont corrélés avec la latitude et la longitude. D'autre part, les tailles moyennes à l'argenture n'étaient pas liées aux taux de croissance mais corrélées à la longitude et à la distance à la frayère, et non à la latitude. Ainsi, la latitude (étant considérée comme un indice de la distance à la zone de reproduction) du site de croissance et sa position dans le bassin versant semblent être des facteurs qui contrôlent la période de l'argenture. Les processus biologiques impliqués dans l'ajustement du temps de résidence dans les hydrosystèmes intègrent probablement les taux de mortalité cumulés, la distance à la frayère et le taux de croissance dans les différents habitats disponibles (Chisnall & Hayes 2001 ; Feunteun et al. 2003).

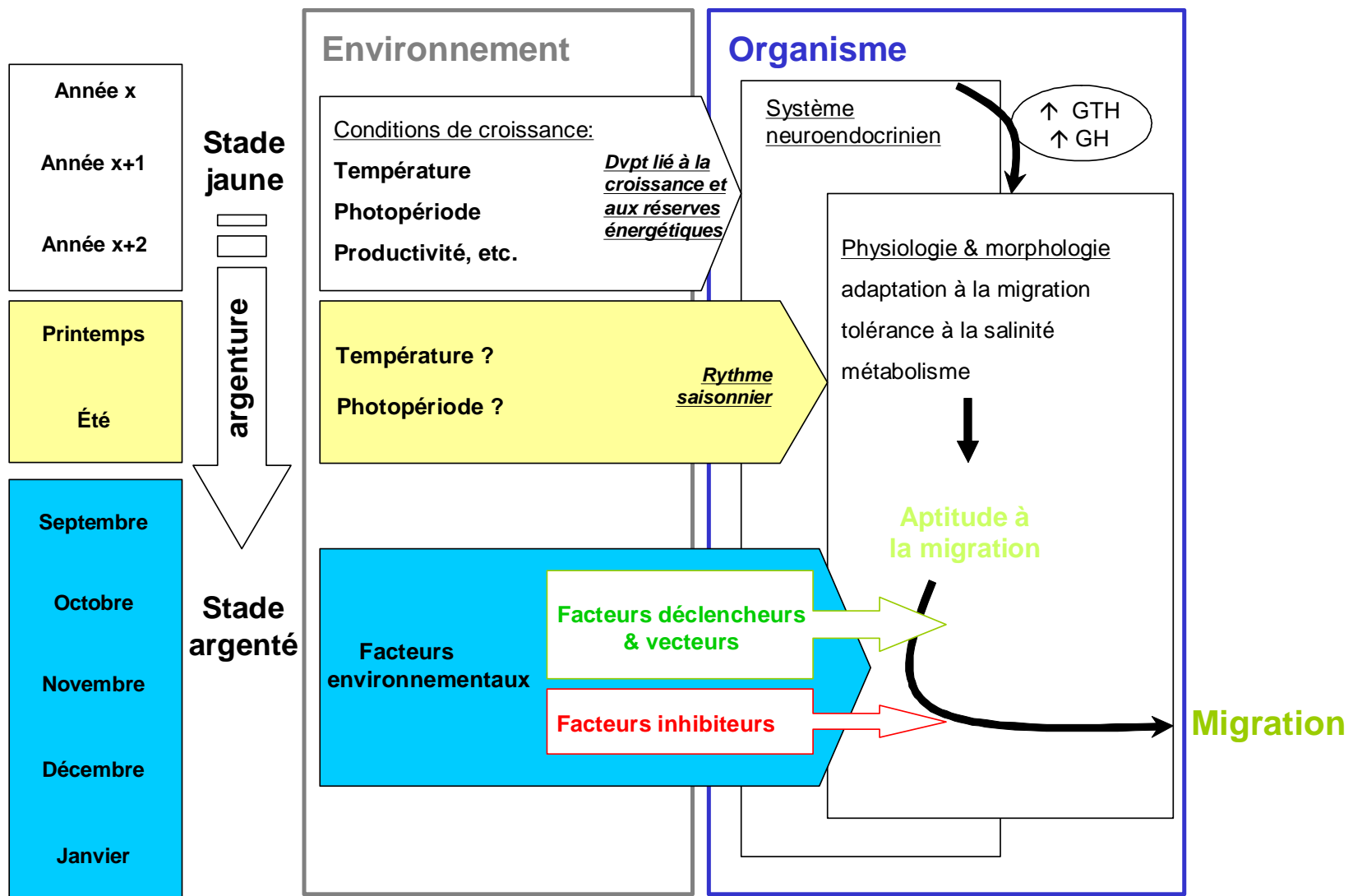


Figure 3 : Argenture et migration, des interactions multiples entre organisme et facteurs environnementaux (adapté de McCormick & Hansen, 1997). GTH : gonadotropine ; GH : hormone de croissance.

2.2.2. Période de migration (échelle saisonnière)

S'il est communément admis que l'intensité migratoire des anguilles argentées est maximale pendant la deuxième moitié de l'année entre Août et Décembre, celle-ci est cependant observable toute l'année (Tesch 1977 ; Deelder 1984 ; Hvidsten 1985 ; Vollestad et al. 1986). Des migrations ont en effet été observées en juillet jusqu'au printemps, en particulier lorsque les conditions climatiques n'ont pas été favorables à l'automne et qu'elles le sont en hiver et au printemps (Frost 1950 ; Deelder 1984 ; Hvidsten 1985 ; Lobon-Cervia et Carrascal 1992 ; Wickström et al. 1996 ; Holmgren et al. 1997 ; Feunteun et al. 2000).

A l'échelle de son aire de répartition, une grande variabilité spatiale des périodes de dévalaison est observée avec des périodes globalement plus précoces dans les plus hautes latitudes (de Août à Octobre) par rapport aux sites les plus méridionaux (de Novembre à Décembre) (Figure 4). Ce résultat est cohérent avec la synthèse réalisée par Haro (2003) pour l'anguille américaine *A. rostrata* qui montrait également une relation positive claire entre la précocité de la période de migration et la latitude (intervalle : 49°N - 32°N) des sous populations d'anguilles considérées. Ce résultat est probablement le fruit d'adaptations locales des anguilles argentées aux variations environnementales à l'échelle de ce gradient latitudinal. Compte tenu des écarts importants de latitude entre les sites les plus distants (entre la Norvège et le Sud de la France), l'influence de facteurs environnementaux qui varient de façon saisonnière et à une large échelle spatiale comme la température de l'eau ou la photopériode peut expliquer ces tendances. Mais ces variables étant très corrélées, il est difficile d'en discerner l'influence propre sur la période de migration (Vollestad et al. 1986). En tout cas, il est probable que l'augmentation de ces deux variables au printemps contrôle et synchronise l'argenture et la migration d'avalaison des anguilles (Vollestad et al. 1986) comme cela a été montré chez les salmonidés (Wedemeyer et al. 1980).

A l'échelle d'un site, il existe également une grande variabilité interannuelle de la période de migration comme en témoigne l'amplitude importante des intervalles totaux de la migration (Figure 4). Grâce à une étude synchronique (10 ans) de la migration d'avalaison dans une rivière norvégienne (Imsa), Vollestad et al. (1986) ont montré que la température influençait significativement le départ de la migration. En effet, 65% de la variabilité du début de la migration (période obtenue quand 5% des captures cumulées annuelles d'anguilles argentées sont réalisées) étaient expliquées par ce facteur, avec des départs de migration plus précoces les années où les températures étaient les plus basses en été (Vollestad et al. 1986). Cependant, la température n'expliquait pas la suite de la migration (25%, 50%, etc. des captures cumulées), suggérant que d'autres facteurs environnementaux comme le débit de la rivière influençaient les captures une fois que la migration avait débuté (Vollestad et al. 1994). Enfin, la photopériode n'expliquait aucune variation interannuelle des captures d'anguilles argentées, cette variable étant identique chaque année pour une même date.

Ainsi, il apparaît que le couple température/photopériode contrôle fortement la variabilité des périodes de migration de l'anguille argentée à l'échelle de son aire de répartition. A l'échelle d'un site, la température semble influencer la variabilité interannuelle d'une partie (le début) de ces périodes de migration. Cependant, les périodes de migration et leurs variabilités temporelles ne peuvent être prédites sur la base de la situation géographique seule (Tesch 1977). En effet, les périodes de migration peuvent être sensiblement décalées entre des sites proches spatialement - c'est-à-dire soumis à la même photopériode et avec des régimes thermiques peu différents - mais qui se distinguent par leur taille et surtout de leur niveau d'aménagement. Des études de radiopistage ont clairement montré que face à un obstacle, le

comportement migratoire des anguilles argentées était altéré ; il pouvait se manifester par un arrêt temporaire voire définitif de la migration ou encore de retours vers les zones amonts (Haro et al. 2000a ; Durif et al. 2003 ; Behrmann-Godel & Eckmann 2003). Ce comportement, quoique très variable en fonction des individus, de la configuration des obstacles et des conditions environnementales locales, engendre évidemment des retards de migration notamment au niveau des centrales hydroélectriques, où les anguilles évitent de franchir les ouvrages et peuvent passer un temps considérable à chercher une voie de passage secondaire (Haro et al. 2000a). Des délais de migration peuvent également être observés quand les anguilles migrent à travers des lacs naturels (Vollestad et al. 1986) ou des retenues de barrages (Haro et al. 2000a). Par exemple, une analyse de la migration d'avalaison réalisée dans le Frémur, un bassin versant aménagé de l'ouest de la France (référence 9 ; Figure 4), a mis en évidence l'influence prépondérante d'une retenue d'eau potable sur les patrons saisonniers de la période de dévalaison. En effet, dans ce bassin versant les anguilles n'accèdent aux zones aval que lorsque le niveau d'eau de cette retenue majeure est supérieure à la cote de surverse du barrage. Cette situation n'est souvent obtenue que tard dans la saison, provoquant un retard de plusieurs mois de la période de migration (Feunteun et al. 2000 ; Acou et al. 2008).

Enfin, les périodes de migration ne coïncident pas toujours entre les mâles et les femelles (Todd 1981 ; Deelder 1984). Généralement, les mâles et les plus petites femelles migrent plus tôt dans la saison que les grandes femelles (Haraldstad et al. 1985). Toutefois, ce résultat est probablement plus lié à une distribution spatiale des sexes dans les bassins versants. En effet, les plus grandes femelles sont généralement dominantes dans les zones de tête de bassin versant alors que les mâles sont majoritaires dans les zones aval (Haraldstad et al. 1985 ; Vollestad 1992).

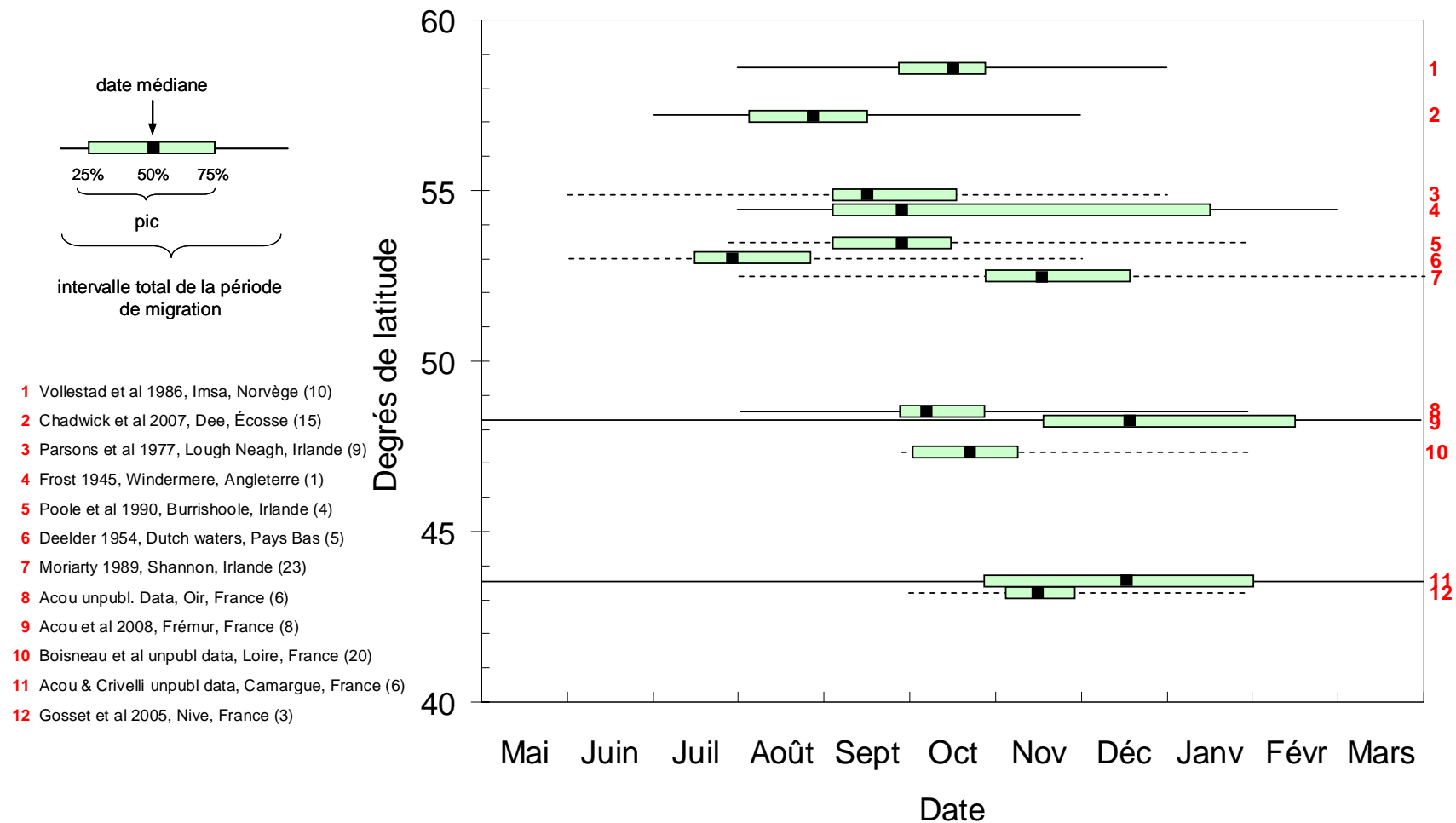


Figure 4: Dates médianes de migration de l'anguille argentée européenne en fonction du gradient latitudinal. Les dates médianes sont estimées à partir de travaux publiés dans la littérature et de suivis centrés sur la migration d'avalaison (références 8 et 11). L'intervalle total de la période de migration est figuré en trait plein quand les captures nulles sont mentionnées et en pointillé lorsqu'elles ne le sont pas. La durée du suivi (en années) est précisée entre parenthèses.

2.2.3. Patrons de migration et facteurs environnementaux impliqués

L'influence des facteurs environnementaux sur la migration d'avalaison est un sujet qui a été largement abordé dans la littérature sur principalement par le biais d'observations réalisées à des points fixes (pêcheries professionnelles ou stations de piégeage) généralement situées à l'aval des hydrosystèmes continentaux (e.g. Haraldstad et al. 1985 ; Poole & Reynolds 1990 ; Vollestad et al. 1994 ; Feunteun et al. 2000 ; Cullen et McCarthy 2003 ; Chadwick et al. 2007 ; Acou et al. 2008). Les patrons de migration observés au niveau de ces méthodes d'interception sont généralement caractérisés par des captures journalières irrégulières et intermittentes fortement couplées aux facteurs environnementaux (Tableau 1). Ces vagues migratoires correspondent à des départs de migration différés. En effet, comme une rivière est constituée de différents secteurs (nombreux lacs et retenues par exemple) qui réagiront différemment à des conditions du milieu, les anguilles argentées distribuées sur l'ensemble du bassin versant ne recevront pas les mêmes stimuli externes au même moment. De plus, ces mouvements d'avalaison relativement rapides peuvent être moins concentrés dans le temps quand les bassins versants sont grands ou aménagés (Haro 2003). Par exemple, la période de dévalaison varie entre quelques jours et deux semaines maximum sur un petit bassin versant vierge de tout barrage en Normandie (Oir, Acou A., comm. pers.) alors que dans la Loire, cette période peut durer jusqu'à 5 mois (cette étude).

Bien que les pics de migration soient observés au sein d'une gamme particulière de températures (Todd 1981 ; Vollestad et al. 1986) ou à l'occasion d'une chute rapide de température (Tableau 1), les anguilles argentées sont capables de migrer dans des gammes thermiques très larges. Elles varient entre 4°C et 14°C dans les pays scandinaves (Vollestad et al. 1994 ; Hvidsten 1985), entre 4°C et 23°C dans l'ouest de la France (Acou et al. 2008), entre 10°C et 16°C en Espagne (Lobon-Cervia et Carrascal 1992) ou en Virginie (Amérique du Nord) pour *A. rostrata* (Euston et al. 1997), > 11°C et entre 7°C et 19°C pour *A. australis* et *A. dieffenbacchi* selon les travaux réalisés par Boubée et al. (2001) et Todd (1981) en Nouvelle-Zélande respectivement. Il semble donc qu'il n'y ait pas de température seuil qui initie la migration d'avalaison comme cela a été suggéré par Haraldstad et al. (1985).

Parmi les facteurs environnementaux qui favorisent la migration d'avalaison, l'influence des crues engendrées par des épisodes pluvieux est prédominante pour les différentes espèces d'anguilles (Tableau 1). Les crues orientent et aident mécaniquement les anguilles à dévaler (Lowe 1952 ; Vollestad et al. 1986). Par ailleurs elles permettent aux anguilles argentées en phase de jeûne de limiter les dépenses énergétiques en influençant positivement la vitesse de migration (Deelder 1984 ; Vollestad et al. 1986). Cependant, il est probable que les véritables stimuli environnementaux soient des facteurs associés qui varient au cours des précipitations et des événements de crues comme la turbidité, la conductivité, des stimuli olfactifs (odeurs) ou des baisses de pression atmosphérique, plutôt que la crue elle-même (Haro 2003). D'autres facteurs comme l'augmentation de l'intensité lumineuse, qu'elle ait lieu le jour ou la nuit (de manière artificielle ou naturelle avec la pleine lune) inhibe clairement la migration (Tableau 1).

Tous ces facteurs sont susceptibles d'agir en synergie et surtout sont corrélés entre eux. En général, lors d'une crue causée par un événement pluvieux, le vent peut forcer, la température généralement chute, la conductivité baisse et la turbidité croît. Il est donc complexe de discerner l'influence spécifique d'un seul facteur. Les travaux de Durif (2003) basés sur des suivis de terrain couplés à une approche en conditions expérimentales permettent cependant d'isoler certains facteurs environnementaux et d'avoir une meilleure vision de ces relations

entre facteurs environnementaux et migration. Elle suggère que les fenêtres migratoires correspondent avant tout à des périodes où l'intensité lumineuse est la plus faible. La totalité des facteurs environnementaux classiquement considérés comme responsables de la migration (vent, dépression, nouvelle lune, crue, etc.) ont en effet pour conséquence une diminution de la luminosité, particulièrement celle perçue par l'anguille migrante dans son environnement aquatique. Chaque épisode correspond à une augmentation de la turbidité de l'eau et à une diminution de la conductivité. Selon elle, le débit agirait directement en tant que vecteur de migration et indirectement à travers l'augmentation de turbidité qu'il engendre. Ainsi, l'intensité des vagues de dévalaison dépendra de la synergie de ces paramètres importants pour le déclenchement et la persistance du phénomène (Durif 2003).

Tableau 1: Résumé des études analysant les facteurs environnementaux susceptibles d'influencer le comportement de dévalaison chez *Anguilla*.

Référence	Sp.	Facteurs environnementaux					Type d'expérience	Type de données
		Temp	Débit	Lune	Pluvio	Autre		
Lowe 1952	<i>A. anguilla</i>	A (-)	A (+)	A (+, noire)		↑ Lumière (-)	Terrain/Labo	Piège/Bac
Edel 1979	<i>A. anguilla</i>					↑ Lumière (-)	Labo	Bac
Haraldstad et al 1985	<i>A. anguilla</i>	A (-)	A (+)			↓ intensité lumineuse (+)	Terrain	Piège
Vollestad et al. 1986	<i>A. anguilla</i>	C (-)	C (+)			↑ Lumière artificielle (-)	Terrain	Piège
Moriarty 1989	<i>A. anguilla</i>		A (+)	A (+, noire)		↑ Vent (+)	Terrain	Piège
Poole & Reynolds 1990	<i>A. anguilla</i>			A (+, noire)			Terrain	Piège
Haddingh et al 1999	<i>A. anguilla</i>		C (+)			↑ Lumière artificielle (-)	Labo	Bac
Acou et al. 2000	<i>A. anguilla</i>		C (+)		C (+)		Terrain	Piège
Cullen & McCarthy 2000	<i>A. anguilla</i>					↑ Lumière artificielle (-)	Terrain	Piège
Okamura et al 2002a	<i>A. anguilla</i>	C (-)		A (+, noire)	C (+)	↓ Photopériode (C +) ↓ Pr. atm (C +)	Terrain	Piège
Behrmann-Godel et al. 2003	<i>A. anguilla</i>		A (+)	A (+, noire)			Terrain	Télémétrie
Cullen & McCarthy 2003	<i>A. anguilla</i>	A (-)	C (+)			↑ Vent (+) ↓ Pr. atm (+)	Terrain	Piège
Durif et al. 2003	<i>A. anguilla</i>	A (-)	C (+)		C (+)	↑ Turbidité (C +) ↓ Conductivité (C +)	Terrain	Télémétrie & piège
Miyai et al. 2004	<i>A. anguilla</i>	C (-)	C (+)	A (+, noire)			Terrain	Piège
Gosset et al 2005	<i>A. anguilla</i>		A (+)				Terrain	Télémétrie
Acou et al. 2008	<i>A. anguilla</i>		C (+)		C (+)	↓ Pr. atm. (C +)	Terrain	Piège
Bruijs et al 2009	<i>A. anguilla</i>		A (+)	A (-, PL)			Terrain	Télémétrie
Burnet 1969	<i>A. australis</i>			C (-, PL)	C (+)	↓ Pr. atm. (+)	Terrain	Piège
Burnet 1969	<i>A. dieffenbachii</i>			C (-, PL)	C (+)	↓ Pr. atm. (+)	Terrain	Piège
Todd 1981	<i>A. australis</i>		A (+)	A (+, noire)	A (+)		Terrain	Piège
Sloane 1984	<i>A. australis</i>	C (+)					Terrain	Piège
Boubée et al 2001	<i>A. australis</i>	A (-)	C (+)		C (+)		Terrain	Piège
Boubée et al 2001	<i>A. dieffenbachii</i>		C (+)		C (+)			
Okamura et al 2002b	<i>A. japonica</i>	C (-)		C (+, noire)		↓ Pr. atm. (C +)	Terrain	Piège
Smith & Saunders 1955	<i>A. rostrata</i>		A (+)				Terrain	Piège
Haro et al. 2003	<i>A. rostrata</i>				C (+)		Terrain	Piège

A, association observée entre le facteur et le mouvement de dévalaison ; C, corrélation statistique significative entre facteur et mouvement. Les signes entre parenthèses indiquent des relations positive ou négative.

2.2.4. Rythme migratoire à l'échelle nycthémérale

Depuis longtemps, les pêcheurs savent bien que les captures d'anguilles argentées migrantes seront maximales la nuit (Boetius 1967 ; Deelder 1984 ; Westin & Nyman 1979 ; Tableau 2). Tesch (1977) précise que l'intensité migratoire de l'anguille argentée est plus forte pendant la première partie de la nuit, c'est-à-dire que la descente s'amorce au coucher du soleil et s'estompe quand la lune apparaît à l'horizon et rayonne sur la rivière (Vollestad et al. 1986). Cependant, quand la turbidité de l'eau est très importante, l'activité migratoire des anguilles argentées est aussi importante le jour que la nuit (Acou, obs. pers. sur la Loire ; Behrmann-Godel & Eckmann 2003).

Ces observations basées sur des captures en milieu naturel sont globalement confirmées par des études expérimentales. Edel (1979) constata que les anguilles argentées femelles étaient beaucoup plus actives la nuit que le jour et surtout qu'elles étaient particulièrement sensibles aux transitions jour-nuit. Müller (1972, in Van Veen et al. 1976) a montré que la disparition de lumière est le principal synchroniseur de l'activité motrice. Van Veen et al. (1976) ont même constaté que c'est *via* un mécanisme photorecepteur extra-optique que se faisait la transmission. Des individus aveuglés et ayant subi une pinéalectomie sont encore capables de synchroniser leur activité motrice avec la lumière, alors que des individus dont le crâne est recouvert d'une plaque métallique ne peuvent plus ajuster leur rythme d'activité ni avec la lumière, ni avec l'alternance jour-nuit et ne sont plus actives la nuit. La réaction à un éclairage fin sur le crâne conduit ces auteurs à penser que la synchronisation de l'activité motrice des anguilles argentes avec le nycthémère se ferait *via* des photorécepteurs encéphaliques.

Cependant, la dévalaison nocturne est aussi la conséquence d'un comportement lucifuge de l'anguille argentée (Langon et Dartiguelongue 1997). En effet, les anguilles migrantes adoptent un comportement de fuite face à la lumière artificielle (Lowe 1952 ; Haddering et al. 1999). Ce phénomène est exploité depuis longtemps par les pêcheurs d'Italie ou d'Irlande qui, lorsque les filets étaient remplis, utilisaient des torches pour ralentir les prises en attendant de les vider et les remettre à l'eau (Tesch 1977). Cela a été confirmé ensuite par des études en milieu naturel où l'action de certains facteurs naturels ou artificiels liées à la luminosité (lune, turbidité, nébulosité, etc.) influençait significativement les captures d'anguilles argentées (Table 1). Notamment, Vollestad et al. (1986) constatent qu'un éclairage de 20 lux sur la rivière diminue significativement l'intensité migratoire. Ils précisent par ailleurs que l'intensité seuil à partir de laquelle l'intensité migratoire commence à diminuer est 0,06 lux.

Tableau 2 : Résumé des études analysant l'activité migratoire des anguilles argentées à l'échelle horaire.

Référence	Espèce	Résultats/Conclusions	Type de suivi horaire	Lieu de suivi
Haraldstad et al. 1985	<i>A. anguilla</i>	la plupart (?) des anguilles migrent la nuit avec un maximum entre 20:00 et 24:00 pas d'anguilles entre 10:00 et 16:00	Piège	Terrain
Cullen & McCarthy, 2000	<i>A. anguilla</i>	« des piègeages réalisés à 3 occasions ont montré qu'il n'y avait pas d'anguilles argentées la journée »	Piège	Terrain
Durif et al, 2003	<i>A. anguilla</i>	« la plupart des anguilles migrent la nuit »	Télémétrie	Terrain
Gosset et al, 2005	<i>A. anguilla</i>	« la très grande majorité des captures d'anguilles argentées a lieu la nuit et au crépuscule (entre 18:00 et 08:30) »	Télémétrie	Terrain
Brujjs et al, 2009	<i>A. anguilla</i>	63% des captures d'anguilles argentées au cours des 5 premières heures de la nuit	Télémétrie	Terrain
Myiai et al, 2004	<i>A. anguilla</i>	82,4% des anguilles capturées entre 18:00 et 6:00 ; les plus grosses captures entre 18:00 et 21:00 Seuls 17% capturés en journée (entre 6:00 et 18:00)	Piège	Terrain
Edel, 1976	<i>A. rostrata</i>	« les anguilles argentées mâles sont plus actives à l'obscurité qu'à la lumière »	Bac	Expérimental
Edel, 1979	<i>A. rostrata</i>	« les anguilles argentées femelles sont plus actives à l'obscurité qu'à la lumière »	Bac	Expérimental
Boubée et al, 2001	<i>A. rostrata</i> & <i>A. dieffenbachii</i>	« les pêcheurs Maori savent bien que les anguilles argentées migrent essentiellement la nuit quand la lune ne brille pas »		
Behrmann Godel & Eckmann 2003	<i>A. anguilla</i>	« les anguilles migraient aussi bien le jour et la nuit »	Télémétrie	Terrain

2.2.5. Bilan des modèles de prédiction des périodes de migration

Comme nous l'avons vu, il existe dans la littérature des travaux qui ont analysé l'influence des facteurs environnementaux sur les patrons de captures d'anguilles argentées (Haraldstad et al. 1985 ; Poole & Reynolds 1990 ; Vollestad et al. 1994 ; Feunteun et al. 2000 ; Cullen et McCarthy 2003 ; Chadwick et al. 2007 ; Acou et al. 2008) ou d'autres espèces de poissons migrateurs ou non (Jonsson & Ruud-Hansen 1984 ; Trépanier et al. 1996 ; Erkinaro et al. 1999 ; Yako et al. 2000 ; Jokikokko & Mäntyniemi 2003 ; Katsélis et al. 2007). Si ces travaux permettent d'améliorer de manière importante la connaissance des déterminismes environnementaux en jeu, ils n'ont cependant pas de valeur prédictive puisqu'ils ne sont pas testés et validés sur le long-terme. Dans cette partie, un bilan non exhaustif de travaux qui ont eu pour objectif de prédire les périodes de migration de poissons migrateurs (anguilles et saumons) est présenté. Globalement, ils sont basés (i) sur une analyse classique des captures en relation avec les facteurs environnementaux, (ii) sur l'activité migratoire d'individus maintenus en captivité ou (iii) sur la connaissance des comportements migratoires.

2.2.5.1 basés sur les paramètres environnementaux

Acou et al. (2000) ont analysé la migration d'avalaison dans un petit bassin versant aménagé de l'Ouest de la France, le Frémur. Dans ce bassin versant, un barrage de 14 mètres de hauteur, qui crée une retenue d'eau potable de 3 millions de m³ est présent à l'aval (6 km de la limite tidale) du cours d'eau. Un peu plus à l'aval, le suivi d'un piège de dévalaison (4,5 km de la limite tidale) a été réalisé sur plusieurs années, permettant ainsi d'analyser l'influence de ce barrage sur les patrons de migration et en particulier sur le déterminisme environnemental de la migration au niveau de ce barrage. Les résultats ont montré que la migration n'était possible que quand le niveau d'eau de la retenue dépassait la crête de surverse (91% des anguilles argentées étaient capturées quand la retenue surversait). Les périodes de surverse arrivant généralement tardivement dans la saison, les périodes de migration pouvaient accuser un retard de près de trois mois par rapport aux périodes classiques de migration (Acou et al. 2008). Une modélisation de l'intensité migratoire à partir des variables environnementales (débit, pluviométrie, température, pression atmosphérique, etc.) a été réalisée en 1998. Environ 88% de la variabilité journalière des captures étaient expliquée par les variations de débit et de pluviométrie, toutes les autres variables ont été exclues du modèle linéaire. Ces résultats suggèrent que dans le Frémur, les mouvements hydrodynamiques, agissant comme une « chasse d'eau », sont essentiels pour que les anguilles argentées en phase d'attente dans la retenue, soient incitées à poursuivre la migration d'avalaison. Il est probable que les premières crues automnales stimulent le départ en migration d'avalaison et contribuent à une accumulation d'anguilles argentées dans la retenue pendant la phase de remplissage. Par conséquent, ce modèle basé sur les facteurs environnementaux permet de savoir quand les anguilles vont dévaler une fois que la surverse a débuté. Par conséquent, son utilisation potentielle doit être limitée à des petits bassins versants aménagés comme le Frémur où des retenues d'eau potable sont présentes.

Boubée et al. (2001) ont précisé les facteurs qui influençaient la migration d'avalaison des anguilles argentées (*A. dieffenbachii* et *A. australis*) au niveau de barrages hydroélectriques (barrages Aniwhenua et Matahina) d'une petite (environ 100 km de linéaire) rivière néo-zélandaise (Rangitaki). Les canaux d'alimentation de ces barrages sont équipés de grilles de dévalaison de 30 mm d'intervalle. Pendant la dévalaison, toutes les anguilles argentées

femelles généralement très grandes (1 mètre en moyenne) sont plaquées contre les grilles et meurent asphyxiées en raison d'une pression intense de l'eau à cet endroit. Boubée et al. (2001) ont donc voulu prédire la migration d'avalaison pour limiter les mortalités. Leurs résultats montraient que les pics de migration coïncidaient presque de manière synchrone avec une augmentation de débit et avec quelques jours de délais (1 à 3 jours) avec les chutes de pluie. Ils ont donc choisi de prédire la migration à partir des événements pluvieux, qui ne durent jamais plus de 3 jours dans cette région, pour faciliter le travail des gestionnaires. En effet, un délai de quelques jours permet d'organiser plus facilement les manœuvres d'ouvrage. Une valeur seuil de pluie cumulée (> 40 mm) sur trois jours a été utilisée et a permis d'expliquer 60% des captures d'anguilles argentées au barrage d'Aniwhenua. Ils concluent que la pluie peut être utilisée par les gestionnaires pour savoir quand les opérations de piégeage/transport des anguilles argentées ou d'ouverture de vannes peuvent être réalisées. Cependant, Boubée et al. (2001) précisent que les valeurs seuils observées sont spécifiques au site et devront être dépendantes du niveau d'échappement en anguilles argentées souhaité. Par ailleurs, cette méthode n'est applicable qu'aux petits bassins versants où une relation claire existe entre la pluviométrie et le régime hydraulique. En effet, dans les bassins versants aménagés ou de grande taille, les régimes hydrauliques peuvent être plus complexes et ne sont pas toujours directement reliés aux pluies.

Basé sur un suivi d'avalaison de 6 années dans une petite rivière du Maine (Amérique du Nord), Haro et al. (2003) ont examiné les relations entre migration et facteurs environnementaux pour déterminer si le débit et la pluviométrie pouvaient être utilisés pour prédire les périodes de migration d'*A. rostrata*. Ils ont observé que la période de migration variait beaucoup entre les années et que les périodes clés de la migration incluant le départ (date à laquelle 5% des captures cumulées annuelles sont réalisées), la partie initiale de la migration (nombre de jours entre 5% et 25% des captures cumulées) et la migration complète (nombre total d'anguilles argentées capturées) n'étaient pas corrélés significativement à la pluviométrie journalière. Ils ont suggéré que ce résultat était lié au trop faible nombre d'années disponible. Cependant, ils ont noté une corrélation significative entre le débit journalier moyen et la proportion journalière d'anguilles argentées capturées et les captures d'anguilles argentées étaient significativement plus importantes les jours de pluie. Basés sur ces résultats, Haro et al. (2003) suggèrent que le débit et la pluviométrie sont des facteurs potentiellement intéressants pour prédire la migration. Cependant, aucune prédiction et validation n'ont été réalisées dans cette étude.

Durif & Elie (2008) ont étudié la migration des anguilles argentées en relation avec les facteurs environnementaux à partir de l'analyse d'une série temporelle de 12 années de captures aux guideaux d'un pêcheur professionnel de la Loire, localisé à Montjean/Loire (entre Angers et Nantes). Partant du constat que la prédiction du nombre d'anguilles argentées est complexe voire impossible, dans la mesure où les modèles doivent tenir compte de différents paramètres tels que les facteurs environnementaux, le nombre d'anguilles prêtes physiologiquement à migrer (i.e. stade argenté), les caractéristiques de l'hydrosystème (rivière, lac ou marais) et leur degré d'aménagement (barrages, centrales hydroélectriques), ils se sont plutôt intéressés aux principaux pics de migration. Précisément, ils ont défini des seuils qui correspondaient à 3 proportions des captures totales annuelles : 50% (C_{50}), 75% (C_{75}) et 95% (C_{95}) et tenté de prédire chaque année en fonction des facteurs environnementaux et temporel (débit, température de l'air, photopériode, pluviométrie et jour julien), (1) les jours pour lesquels les CPUE excédaient ces seuils (analyse de pic) et (2) le

nombre de jours nécessaires pour atteindre C_{50} , C_{75} et C_{95} (analyse temporelle). Les résultats de l'analyse de pic étaient peu satisfaisants puisque seulement 50% des jours qui dépassaient ces captures seuils étaient effectivement prédits. A l'inverse, la durée de migration nécessaire pour atteindre ces seuils était très bien prédite, puisque l'efficacité des prédictions variait entre 80% et 95% en fonction des seuils considérés. Les facteurs qui contribuaient significativement à cette analyse temporelle étaient les jours juliens, le débit, la température, la pluviométrie et la photopériode. En conclusion, l'étude de Durif & Elie (2008) confirme que la prédiction des pics principaux d'anguilles argentées est une affaire complexe, particulièrement dans un grand hydrosystème comme la Loire. Il semble plus réalisable de prédire les patrons de migration (le nombre de jours nécessaires pour obtenir 50%, 75% et 95% des captures totales annuelles). Cependant, ce résultat, s'il est très intéressant pour comprendre la dynamique de la migration, ne peut servir aux gestionnaires pour cibler ou non des arrêts de turbinage.

2.2.5.2 basés sur l'activité migratoire d'anguilles en captivité

Le Migromat® est un système qui permet de détecter l'activité migratoire des anguilles argentées (Adam 2000). Pour cela, ce système analyse l'activité d'anguilles argentées (environ une soixantaine) maintenues dans des bacs à proximité de la rivière. Le dispositif consiste en deux grands bacs comprenant chacun 5 compartiments connectés entre eux et alimentés en continu par l'eau de la rivière. Le déplacement des anguilles marquées individuellement par PIT-tags dans les bacs est détecté par des antennes fixes situées à l'entrée de chaque compartiment. Une augmentation nette du niveau d'activité des anguilles (i.e. passage entre compartiments) correspond à une agitation prémigratoire qui préfigure et permet de prédire à court terme une période de migration d'avalaison (Adam 2000). Cependant, les facteurs potentiels (environnementaux ou non) impliqués dans cette agitation prémigratoire ne sont pas connus. Bruijs et al. (2009) ont récemment utilisé ce dispositif dans la Meuse au niveau de deux centrales hydroélectriques. Les prévisions du Migromat® permettaient à terme de limiter les mortalités importantes (entre 16% et 26%) d'anguilles argentées après leur transit dans les turbines en ciblant des arrêts ponctuels de turbinage. Un objectif important de cette étude était également de tester l'efficacité de ce dispositif en comparant ses prédictions avec l'activité migratoire d'anguilles argentée suivies *in situ* par radiopistage. Les résultats de l'étude montrent que si les prévisions du Migromat® avaient été utilisées pour arrêter le turbinage, le passage des anguilles argentées dans les turbines aurait diminué de près de 70%. Cependant, les prévisions du Migromat® ont tendance à surestimer les événements migratoires puisqu'en moyenne 60% des événements migratoires prédits par le Migromat® ne sont pas confirmés par le suivi de radiopistage. Ce résultat limite donc l'utilisation de ce dispositif, en particulier au niveau de centrales hydroélectriques, où l'objectif est de trouver le meilleur compromis entre arrêt de turbinage et échappement d'anguilles argentées. Une limite importante de cette technique est que la prédiction réalisée par le Migromat® ne précède le pic réel de dévalaison que de quelques heures ce qui laisse un temps de réaction très court.

2.2.5.3 basés sur la modélisation du comportement de migration

Zabel (2002) a utilisé une équation d'advection-diffusion pour modéliser la migration de saumons dans la rivière Columbia (Amérique du Nord). L'advection correspond à la

migration vers l'aval des poissons tandis que la diffusion fait référence à une dispersion au cours du temps. Les modèles d'advection-diffusion permettent typiquement de prédire la distribution des populations dans l'espace à un instant donné. Cependant, une manière différente de les utiliser est de fixer une position dans l'espace et d'examiner quand un poisson arrive en ce point fixe. C'est l'approche choisie par l'auteur en générant une distribution des temps de trajet (« travel times ») d'un groupe de saumons au niveau d'une route migratoire d'une longueur fixe. Pour construire ce modèle, une estimation des deux paramètres est nécessaire : r , le taux de dévalaison et σ , le taux de dispersion de la population. Une hypothèse de ce modèle de base est que tous les poissons d'une population adoptent le même comportement migratoire. En réalité, il varie probablement en fonction des caractéristiques de l'individu et des facteurs environnementaux. Pour évaluer cela, l'auteur a utilisé la taille du poisson comme un indice de son stade de développement et a considéré le débit comme un facteur environnemental clé qui influence le taux de dévalaison. Zabel (2002) a donc appliqué ce modèle aux données de « temps de trajets » de jeunes saumons (*Onchorhynchus tshawytscha*) tous (environ 166000 smolts) marqués individuellement par PIT-tags pendant leur migration d'avalaison au barrage de Lower Granite et recapturés 225 km plus bas au barrage de McNaryDam. Les sorties du modèle étaient bien meilleures quand r et σ variaient avec la taille du poisson et le débit respectivement par rapport au modèle nul (pas de covariable). La prédiction des temps de trajet d'une année complète a été réalisée et s'ajustait parfaitement aux patrons observés. Ainsi, ce modèle présente un très grand pouvoir prédictif. Son utilisation est cependant limitée (i) par le nombre très important d'individus nécessaires pour paramétrer r et σ et surtout (ii) par le fait que le point de départ de migration des animaux est connu, ce qui est difficilement envisageable pour les anguilles à l'échelle d'un grand bassin versant.

2.3 Conclusion

Comme on l'a vu, la migration d'avalaison est très liée aux facteurs environnementaux. Le déterminisme environnemental reste encore mal connu du fait de la grande variabilité des patrons de migration observés mais aussi parce que les facteurs environnementaux impliqués sont tous très corrélés entre eux et semblent agir en synergie. A l'issue de ses travaux, Durif (2003) suggère que la période de migration a lieu essentiellement au cours d'une période de faible intensité lumineuse (perçue par l'anguille dans la colonne d'eau), ce qui est généralement confirmé par les patrons de captures observés aux échelles saisonnières, journalières ou horaires. Cependant, il existe peu d'études qui analysent spécifiquement les relations entre l'intensité lumineuse dans la colonne d'eau et l'activité migratoire des anguilles argentées. Dans une récente étude, Cairns et Hooley (2002) ont récemment élaboré un indice de luminosité nocturne basé sur les phases lunaires, la durée nocturne pendant laquelle la lune est au dessus de l'horizon et la couverture nuageuse. Leurs travaux ont montré que les captures d'anguilles (jaunes et argentées) réalisées aux filets dans l'estuaire du Saint-Laurent étaient négativement corrélées à cet indice de luminosité nocturne. Il serait intéressant d'utiliser cet indice dans le cadre spécifique d'une analyse de la migration d'avalaison d'anguilles argentées.

Quels que soient les facteurs qui initient véritablement la migration d'avalaison, les variations de débit et de pluviométrie influencent ou tout au moins « accompagnent » les anguilles

migrantes et à ce titre sont des variables intéressantes pour la prédiction de la dévalaison. Les travaux de Boubée et al. (2001) notamment ont montré qu'il était possible de prédire les pics les plus importants à partir de cette variable. Ces prédictions sont probablement réalisables uniquement dans les petits bassins versants ou têtes de bassin versant où les régimes hydrauliques sont généralement très sensibles à l'intensité et à la durée de la pluviométrie. Pour les autres (bassins versants aménagés ou de grandes tailles), les régimes hydrauliques sont généralement plus complexes et pas toujours directement reliés aux pluies. Par conséquent, les pics de migration sont généralement plus brouillés et plus longs, et moins sensibles aux facteurs environnementaux que dans les petits systèmes ce qui rend leur prédiction moins aisée. Les périodes et caractéristiques de migration dans de tels hydrosystèmes n'ont pas été à ce jour encore caractérisées et méritent d'être étudiés.

A ce jour, il n'existe aucun modèle validé visant à prédire les périodes de dévalaison à des fins opérationnelles de gestion. Seuls Haro et al. (2003) ont exploré les gains potentiels de différents scénarii de gestion (arrêt des turbines à différentes périodes clés de la migration d'avalaison) par rapport à des opérations normales de turbinage, en simulant les mortalités d'anguilles argentées au niveau d'une centrale hydroélectrique fictive. Les mortalités d'anguilles argentées simulées étaient proportionnelles au débit turbiné. Les périodes d'arrêt de turbinage ont été basées sur (1) les dates estimées de début et fin de la période correspondant à 25% et 75% des captures cumulées, (2) une période de 7 jours centrée sur la date estimée de 50% des captures cumulées, (3) les événements pluvieux et de deux combinaisons (1 et 3 ; 2 et 3). Des arrêts de turbinage pendant les période (1) et (3) permettaient une réduction des deux tiers et de moitié des mortalités par rapport à une période normale de turbinage respectivement. La combinaison (1 et 3) permettait de réduire les mortalités de moitié par rapport à la période (1) seule. De plus, la stratégie qui consistait à arrêter le turbinage pendant les 7 jours les plus probables de migration était peu intéressante compte tenu de la grande variabilité interannuelle des captures. Même si ces travaux doivent être validés dans le futur, Haro et al. (2003) ont montré que des scénarii de gestion basés sur la combinaison d'approches déterministe (caractéristiques de la migration observée sur la base d'un suivi interannuel) et prédictive (pour lesquelles tout reste à faire) étaient pleins de promesses et permettraient de limiter sensiblement les mortalités d'anguilles argentées.

Partie 2

Prédiction des pics de dévalaison des
anguilles argentées à partir des
données environnementales :

Développement d'un modèle opérationnel sur la Loire

3. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles à partir des données environnementales : développement d'un modèle opérationnel sur la Loire

3.1. Introduction

Comme nous l'avons vu, la période de migration et plus précisément les pics de captures des anguilles argentées sont étroitement liés aux facteurs environnementaux. Dans cette partie, un modèle opérationnel de prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des facteurs environnementaux est développé. L'objectif de ce modèle est de prédire, au sein de la période de migration (généralement d'Octobre à Février), les pics de migration d'anguilles argentées, pour permettre aux gestionnaires de centrales hydroélectriques de cibler les arrêts de turbinage et réduire ainsi leur perte de production.

La vocation de ce modèle opérationnel développé sur la Loire est également d'être utilisé par les gestionnaires sur d'autres hydrosystèmes possédant des caractéristiques et des tailles différentes. Cela a constitué un cahier des charges important qui a guidé très clairement le développement même de la modélisation et impliqué que ce modèle soit (i) robuste et simple à utiliser, (ii) basé sur des variables environnementales que les gestionnaires utilisent généralement et dont la prévision est possible pour leur assurer un délai minimum (24 heures) nécessaires à la mise en place de la manœuvre d'ouvrage (arrêt des turbines), (iii) et que les effets sites (e.g. la taille du bassin versant qui influence évidemment l'intensité des captures et le régime de débit) soient réduits au maximum.

Le modèle a été développé à partir de l'analyse de séries temporelles de captures aux guideaux de pêcheurs professionnels de la Loire, localisés à l'aval du cours d'eau entre Angers et Nantes, rare site en France et en Europe où des séries chronologiques à long terme de captures d'anguilles argentées (20 années de captures) sont disponibles pour un système fluvial d'une telle taille. Seules ces séries chronologiques uniques permettent à la fois une modélisation et un test des prédictions sur une nombre important d'années, éléments indispensables à la validation du modèle et de ses prédictions. A l'aval d'un si grand cours d'eau, la prévision des pics de dévalaison s'avère délicate voire impossible (Durif 2003 ; Durif & Elie, 2008) parce que les principales vagues de migration correspondent aux vidanges successives de différents affluents caractérisés par des régimes hydrologiques distincts selon leur position sur le cours d'eau. **Aussi, l'objectif n'est pas de prévoir le niveau des captures mais de déterminer les fenêtres environnementales propices à la migration d'avalaison.** Les pêcheurs professionnels d'anguilles argentées qui ciblent l'espèce au moment de son ultime migration vers la mer des Sargasses, l'ont toujours fait pour assurer leurs captures et pour éviter de multiplier les sorties peu rentables voire inutiles, certes de façon empirique, mais aussi avec un bon taux de réussite. L'esprit de notre démarche est de retranscrire et formaliser au mieux de manière statistique, grâce à des variables environnementales pertinentes, ce que les pêcheurs professionnels effectuent depuis des lustres, c'est-à-dire déterminer les nuits favorables à la capture des anguilles argentées. Si les prédictions du modèle sont validées, elles permettront de répondre à des enjeux majeurs de conservation de l'anguille européenne (réduction de la mortalité par turbinage), de productions hydroélectriques (réduction de la perte de production) et également d'écologie (meilleure connaissance du déterminisme environnemental de la migration).

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Site d'étude : le bassin versant de la Loire

Le bassin versant de la Loire est le plus grand bassin hydrographique français (117 054 km²) soit 1/5^{ème} du territoire. Il s'étend du sud-est du Massif Central jusqu'à l'océan Atlantique (Figure 5). Le cours d'eau principal, la Loire, est le plus long de France (1012 km) et prend sa source à 1 408 m d'altitude au Mont-Gerbier-de-Jonc (Ardèche). Son débit moyen à Ancenis (aval de la zone d'étude) est de 806 m³ s⁻¹. Les principaux affluents de la Loire sont l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne, la Maine (formée par la confluence de la Sarthe grossie du Loir et de la Mayenne). Plus en aval, à Nantes, la Sèvre Nantaise se jette dans la Loire estuarienne (Figure 5).

Du point de vue climatique, le bassin versant de la Loire est sous influence océanique, continentale puis montagnarde de l'aval vers l'amont, et méditerranéenne dans la partie la plus amont de la Loire et de l'Allier. Il en résulte différents types de crue selon les précipitations : des crues cévenoles lorsque d'importantes et violentes pluies d'origine méditerranéenne s'abattent sur les zones amont, des crues océaniques liées à des épisodes pluvieux prolongés, et des crues mixtes résultant de la concomitance des deux types précédents.

La principale caractéristique du bassin de la Loire, qui a contribué à sa renommée, est la bonne connectivité longitudinale de l'axe Loire-Allier (pas d'obstacle majeur entre la mer et le kilomètre 730). Par contre, de nombreux obstacles sont présents dans des affluents situés à l'aval du bassin (e.g. la Mayenne, la Sarthe, la Vienne, etc. ; P. Steinbach, comm. pers.). La très grande majorité de ces ouvrages (90%) sont des seuils de basse chute inférieurs à 3 m de hauteur et souvent de l'ordre de 1 m par rapport au module (débit moyen interannuel), généralement noyés ou effacés en période de crue. Ainsi, ces ouvrages entravent beaucoup plus la colonisation des jeunes anguilles que la dévalaison des anguilles argentées. Les mortalités d'anguilles argentées liées au passage de ces ouvrages (principalement seuil) seraient en effet très limitées (com. pers. P. Steinbach - ONEMA). A ce jour, 119 équipements hydroélectriques sont recensés sur le réseau de colonisation du bassin de la Loire (Steinbach 2005). Les puissances d'équipement et les risques d'impact sont très variables entre les usines hydroélectriques de plusieurs dizaines de Mégawatts et la petite turbine fonctionnant pour la consommation propre d'un propriétaire du moulin. Cependant, il semble que les anguilles argentées de la Loire soient relativement épargnées vis-à-vis de la problématique hydroélectrique, mais le risque d'aggravation de ce facteur de mortalité reste à évaluer particulièrement quand des projets de remise en service de centrales hydroélectriques, notamment dans la partie aval du réseau migratoire sont envisagées (Paroles d'Anguilles, 2003).

Peu de bassins versants en Europe disposent d'une pêche professionnelle historique organisée spécifiquement vers la capture d'anguilles argentées. Les pêcheries utilisant des guideaux sont réparties le long du cours principal de la Loire entre l'amont d'Amboise (Indre-et-Loire), Angers (Maine-et-Loire) et Varades (Loire-Atlantique) (Figure 5). Deux pêcheries sont situées au niveau de la confluence de grands bassins, comme l'Indre en rive gauche et la Maine en rive droite. Au total, entre 9 et 15 pêcheries ont fonctionné entre le début des années 1980 et 2007.

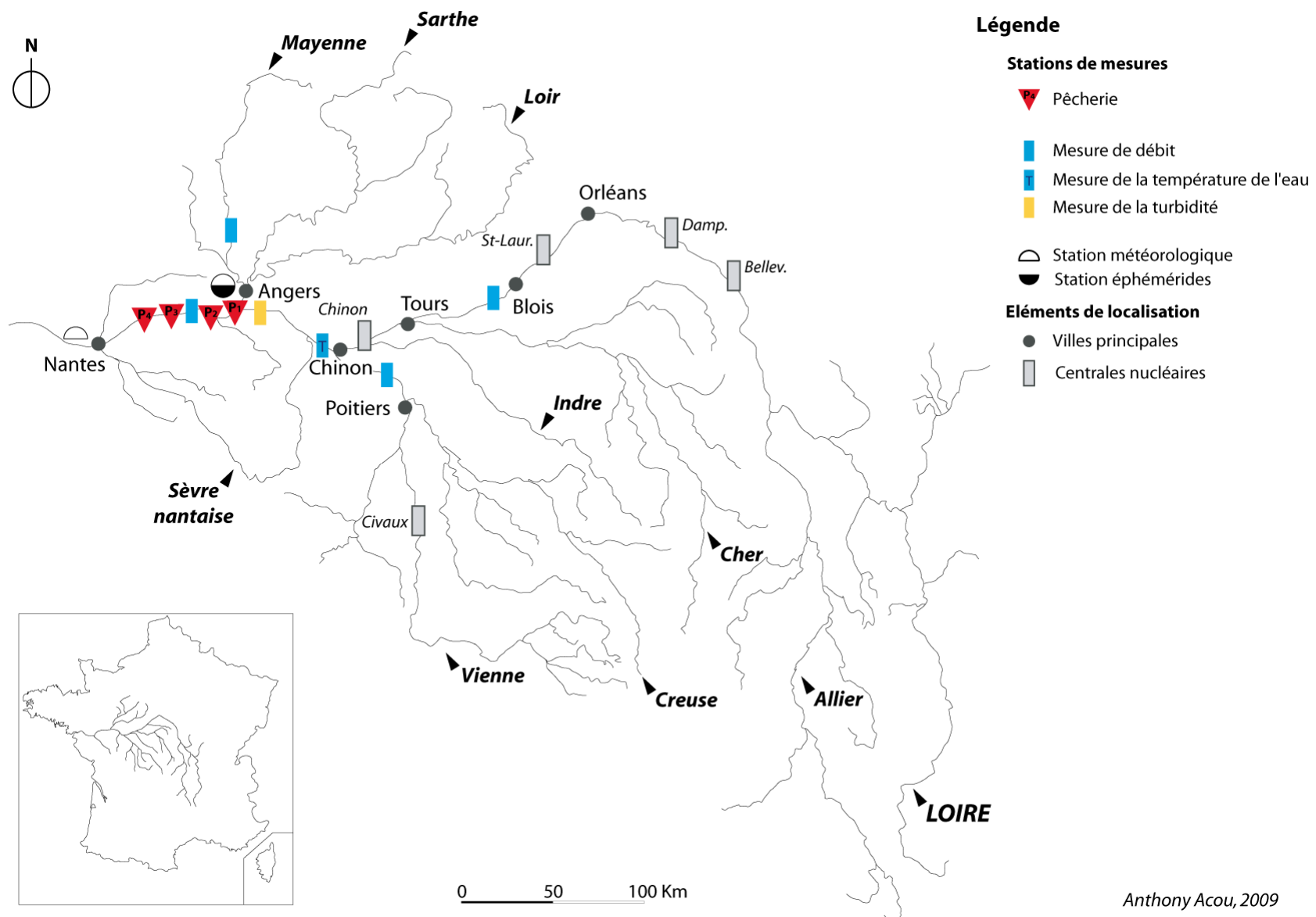


Figure 5: Localisation des pêcheries au guidon et des principales stations de mesure des variables environnementales.

3.2.2. Technique de pêche

Les pêcheries sont toutes équipées d'un engin identique, appelé « guideau » ou « dideau », utilisé spécifiquement pour capturer l'anguille d'avalaison. La période de pêche débute chaque année le 1^{er} Octobre (le 15 septembre pour le département d'Indre-et-Loire situé très en amont par rapport au front de colonisation des anguilles) et se termine le 15 février. Mais en général, elle n'est pratiquée que jusqu'à fin décembre, lorsque débute la saison de capture des lamproies. Cette pêche se pratique essentiellement la nuit, lors de crues accompagnées le plus souvent de conditions météorologiques dépressionnaires. Elle nécessite plusieurs relèves du filet durant la nuit pour éviter le colmatage du filet par les feuilles, branches ou troncs emportés par le courant. Parfois, quand la turbidité de l'eau est très importante, des pêches sont réalisées en pleine journée.

Le guideau s'apparente à un chalut qui mesure 25 m de long sur 10 m de large et 5 m de haut. Ses mailles sont décroissantes entre l'entrée (120 mm) et l'extrémité (20 mm), et est prolongé par une poche amovible (maille 10 mm) dans laquelle les anguilles sont recueillies. Il est amarré à deux poteaux métalliques horizontaux reliés à un treuil, ce qui permet de le manœuvrer depuis le bateau (appelé aussi « toue »). Contrairement au chalut, le bateau reste immobile malgré le courant grâce à un système d'ancrage et de câbles (Figure 6). C'est donc le courant qui ouvre les poches du filet dans lequel s'engouffrent les anguilles argentées. Les caractéristiques techniques et les dimensions des guideaux étant fixées dans le temps, il y a peu de variation dans la puissance de pêche, ni entre les bateaux ni entre les saisons de pêche pour un même bateau. La capturabilité varie seulement en fonction du débit du fleuve, puisqu'une augmentation de débit et par conséquent de la section mouillée du cours d'eau diminue la proportion d'eau filtrée par le guideau.

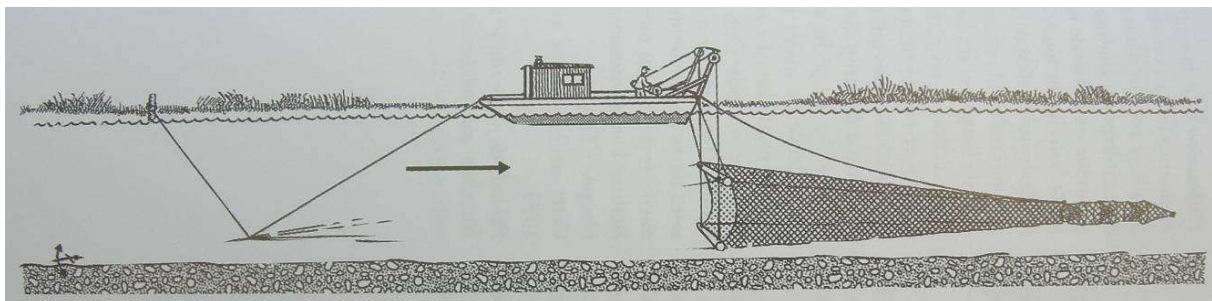


Figure 6 : Schéma d'un guideau en pêche (Source : Guide des engins de pêche fluviale et lacustre, CSP, 2003).

3.2.3. Les données de captures d'anguilles argentées

A l'issue de chaque pêche, les anguilles sont comptées une à une. Les captures journalières d'anguilles argentées ainsi que l'effort de pêche (exprimé en nombre de nuits de pêche par 24h) sont consignés dans un carnet de pêche, les captures nulles sont donc différenciées des jours sans pêche. Le nombre de captures est rapporté à une unité commune d'effort de pêche pour obtenir la CPUE (Capture Par Unité d'Effort), permettant ainsi une comparaison des captures dans l'espace (entre les pêcheries) et dans le temps (entre les années). La CPUE représente donc le nombre d'anguilles argentées capturées par nuit de pêche, c'est-à-dire de la veille à 12h au lendemain 12h.

L'AAIPPBLB nous a fourni les CPUE journalières de 4 pêcheries obtenues sur une période de 20 années (entre 1987 et 2006). Ces pêcheries (numérotées de 1 à 4 dans le sens amont-aval afin de préserver la confidentialité des données individuelles) sont localisées dans un rayon d'environ 40 km entre Angers (aval de la confluence Loire-Maine) et Ancenis (amont de la limite maximale d'influence tidale) (Figure 5). Ces séries chronologiques sont donc représentatives des captures d'anguilles argentées produites par la Loire amont.

Tableau 3 : Caractéristiques générales des séries chronologiques des quatre pêcheries observées sur la période d'étude (de la saison 1987 à 2006).

	Numéro de la pêche			
	1	2	3	4
Nombre de saisons de pêche	18	19	20	20
Nombre total d'anguilles argentées capturées	81 416	266 864	149 827	90 435
CPUE journalière maximale	1 340	4 400	2 550	1 190
Proportion (en %) de captures nulles	4.0	4.5	1.2	2.8

Les séries chronologiques étaient complètes (20 saisons de pêche) pour les pêcheries 3 et 4 (Tableau 3). Seules manquaient deux saisons pour la pêche 1 (saisons 2005 et 2006) et la saison 2004 pour la pêche 2. Au total, ce sont 588 542 anguilles argentées qui ont été capturées et comptées individuellement par les quatre pêcheurs sur l'ensemble de la période d'étude. Environ $7\,650 \pm 4\,500$ anguilles argentées étaient capturées en moyenne par pêche et par saison de pêche. Les captures nulles variaient en fonction des pêcheries entre 1.2% et 4.5% des jours effectifs de pêche.

3.2.4. Les variables environnementales

La synthèse bibliographique a clairement montré que la migration d'avalaison est liée à de nombreux facteurs environnementaux (débit, turbidité, pression atmosphérique, pluviométrie, lune, intensité lumineuse, etc.). Un travail important de cette étude a été de récolter le maximum de variables environnementales susceptibles d'expliquer la variabilité journalière des CPUE d'anguilles argentées. Les variables qui ont été mesurées au moins une fois par jour à proximité des pêcheries (entre Angers et Nantes ; Figure 5) et sur l'ensemble de la période d'étude (du 1^{er} Octobre au 15 Février des années 1987 à 2006), sont les suivantes :

3.2.4.1. Les variables météorologiques

La pression atmosphérique (hPa), la température de l'air (°C), la vitesse (m.s^{-1}) et orientation du vent (degré) et la pluviométrie (mm) ont été fournies par la station Météo-France d'Angers/Beaucouzé.

3.2.4.2. Les variables hydrologiques

Le débit journalier de la Loire ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) mesuré à la station de jaugeage de Montjean/Loire proche des sites de captures (Figure 3) a été fourni par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Les mesures de turbidité en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) des eaux brutes de la Loire réalisées aux Ponts-de-Cé par l'usine de traitement des eaux d'Angers ont pu également être accessibles grâce à Angers Loire Métropole.

3.2.4.3. L'indice de luminosité

Un indice de luminosité a été développé par Cairns & Hooley (2002) pour déterminer si les variations d'éclairements nocturnes et niveaux de marées induites par la lune étaient des facteurs qui expliquaient les patrons de captures d'anguilles (principalement jaunes) réalisées par les pêcheurs professionnels de l'estuaire du Saint-Laurent (Québec). A notre connaissance, c'est la première fois que cet indice est dédié exclusivement à l'analyse des captures d'anguilles argentées dans des habitats continentaux.

Le principe de cet indice est d'estimer l'éclairement nocturne total, qui est la somme des éclairements (lunaires et autres) reçus au sol (ou dans notre cas à la surface de l'eau) par unité de surface. L'éclairement lunaire, qui est directement lié à sa phase, a été exprimé en proportion de luminosité d'une pleine lune (pleine lune = 100 ; nouvelle lune = 0). Les étoiles et autres corps célestes produisent également de la lumière pendant la nuit. Cependant, cette source lumineuse représente environ à 0,5% de l'éclairement total observé une nuit de pleine lune par temps clair (R. Garstang, Université du Colorado, comm. pers.).

L'éclairement nocturne total dépend donc de l'éclairement lunaire, de la durée où la lune est au-dessus de l'horizon, de la couverture nuageuse (ou nébulosité) et de l'éclairement non-lunaire. L'indice de luminosité correspond à un éclairement nocturne relatif à une nuit de pleine par temps clair :

$$IL = (0,995 \times MI \times MT \times CM) + (0,005 \times CE),$$

où IL est l'indice de luminosité, MI est l'éclairement de la lune relatif à une pleine lune, MT est la proportion (en %) du nombre d'heures pendant la nuit où la lune est au-dessus de l'horizon, CM est la proportion (en %) moyenne du ciel qui est sans nuages pendant la période où la lune est au-dessus de l'horizon, et CE est la proportion (en %) moyenne du ciel couvert par les nuages pendant toute la nuit.

MI et les heures de levers et couchers du soleil et de la lune observés à Angers sur toute la période d'étude nécessaires pour calculer MT ont été fournies par l'Institut des Mécaniques Célestes et Calculs des Ephémérides (IMCCE, <http://www.imcce.fr>). La station Météo-France de Nantes/Bouguenais a fourni les données journalières tri-horaires de nébulosité du ciel. La nébulosité s'exprime en octas sur une échelle de 0 (ciel complètement dégagé) à 8 (couverture nuageuse maximale).

L' IL est un indice continu borné entre 0 (correspond par exemple à une nouvelle lune avec une nébulosité maximale) et 1 (e.g. pleine lune toute la nuit sans nuages). Cet indice est particulièrement intéressant car il fournit chaque nuit une estimation beaucoup plus fine de la lumière effective perçue par les anguilles à la surface de l'eau par rapport à l'utilisation

classique des phases lunaires. Malgré une pleine lune, l'indice de luminosité peut être nul en raison d'une couverture nuageuse maximale. L'exemple de la nuit du 14/11/1997 avec une nébulosité de 8 octas et la présence d'un pic de capture d'anguilles argentées observé cette nuit là confirme que la pleine lune n'a pas inhibé le comportement de migration (Figure 7).

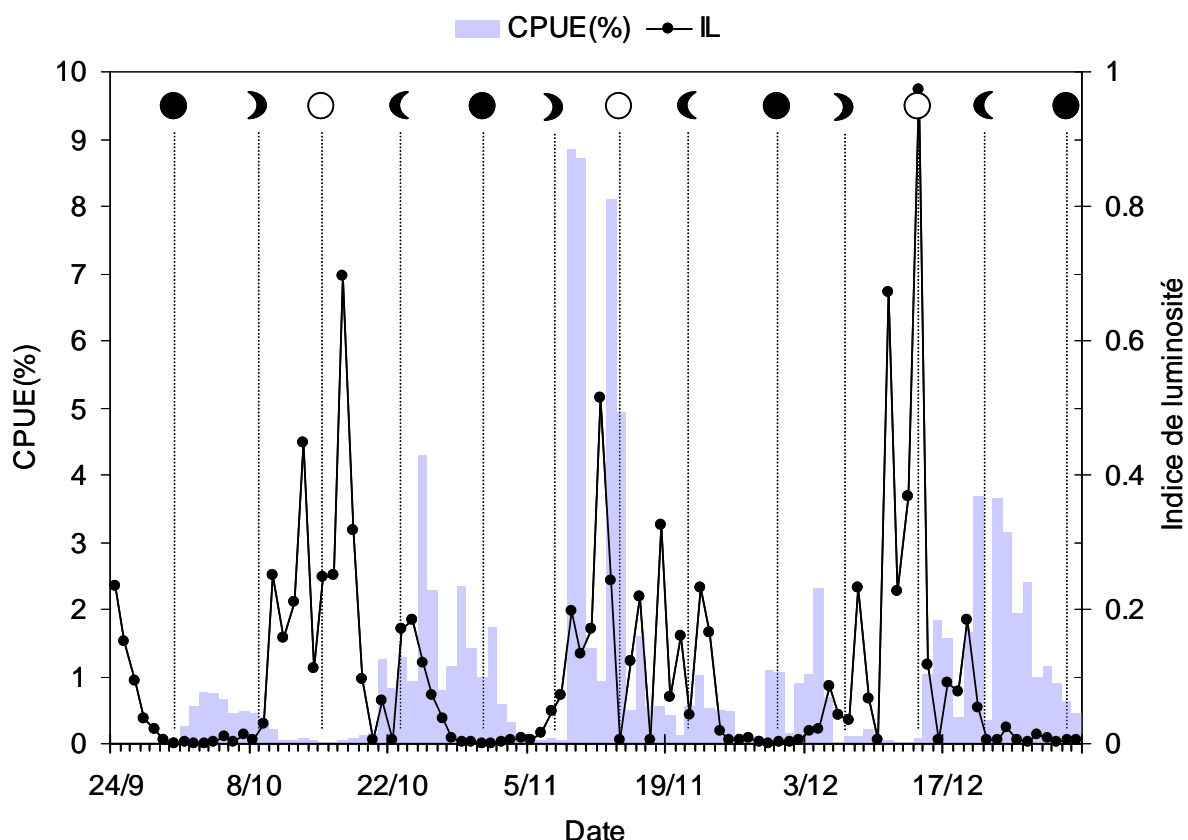


Figure 7 : Evolution des CPUE d'anguilles argentées de la pêche 3 (saison 1997) en fonction de l'indice de luminosité et des phases lunaires. ○ : pleine lune ; ☾ : dernier quartier ; ● : nouvelle lune ; ☾ : premier quartier.

3.2.4.4. Les types de temps

Paquet et al. (2006) ont réalisé une classification des journées pluvieuses en fonction du type de circulation atmosphérique et la forme du champ pluviométrique qui prévalait le jour de l'observation, sur la période 1953-2002 à l'échelle de la France. Ce découpage en « types de temps » a été transposé dans l'espace des circulations atmosphériques, identifiées à partir des formes de géopotentielle 700 et 1000 hPa du jour et du jour suivant, permettant ainsi d'affecter chaque jour l'historique traité à une classe. A l'arrivée, 8 classes ont été retenues. Les diagrammes de la Figure 8 présentent les champs synoptiques types de ces huit classes (champ moyen de 1000 hPa de l'ensemble des journées affectées à une classe, sur la période 1953-2002).

Les classes 1 et 2 correspondent à des régimes d'Ouest, les journées de la classe 1 présentant un caractère « ondulant » marqué, les journées de la classe 2 étant plus stationnaires (peu de différence entre le champ du jour_j et du jour_{j+1}). Les classes 3, 4 et 5 correspondent

respectivement à des régimes de Sud-Ouest, Sud et Nord-Est. La classe 4 correspond ainsi aux situations de débordements frontaliers sur le haut bassin de l'Ariège dans les Pyrénées. La classe 6 est une classe particulièrement intéressante du point de vue risque pluviométrique puisqu'il s'agit de la classe qui contient les épisodes dits de « retour d'Est ». Il en va de même de la classe 7 qui, elle, contient la majorité des épisodes dits « cévenols » (une autre partie pouvant appartenir à la classe 4, la circulation de sud de la classe 7 étant plus décalée vers la Méditerranée). La classe 8 enfin correspond aux journées dites « anticycloniques ».

3.2.4.5. Bilan et caractéristiques des variables environnementales

Les types et caractéristiques des variables environnementales disponibles pour notre étude sont mentionnés dans le Tableau 4.

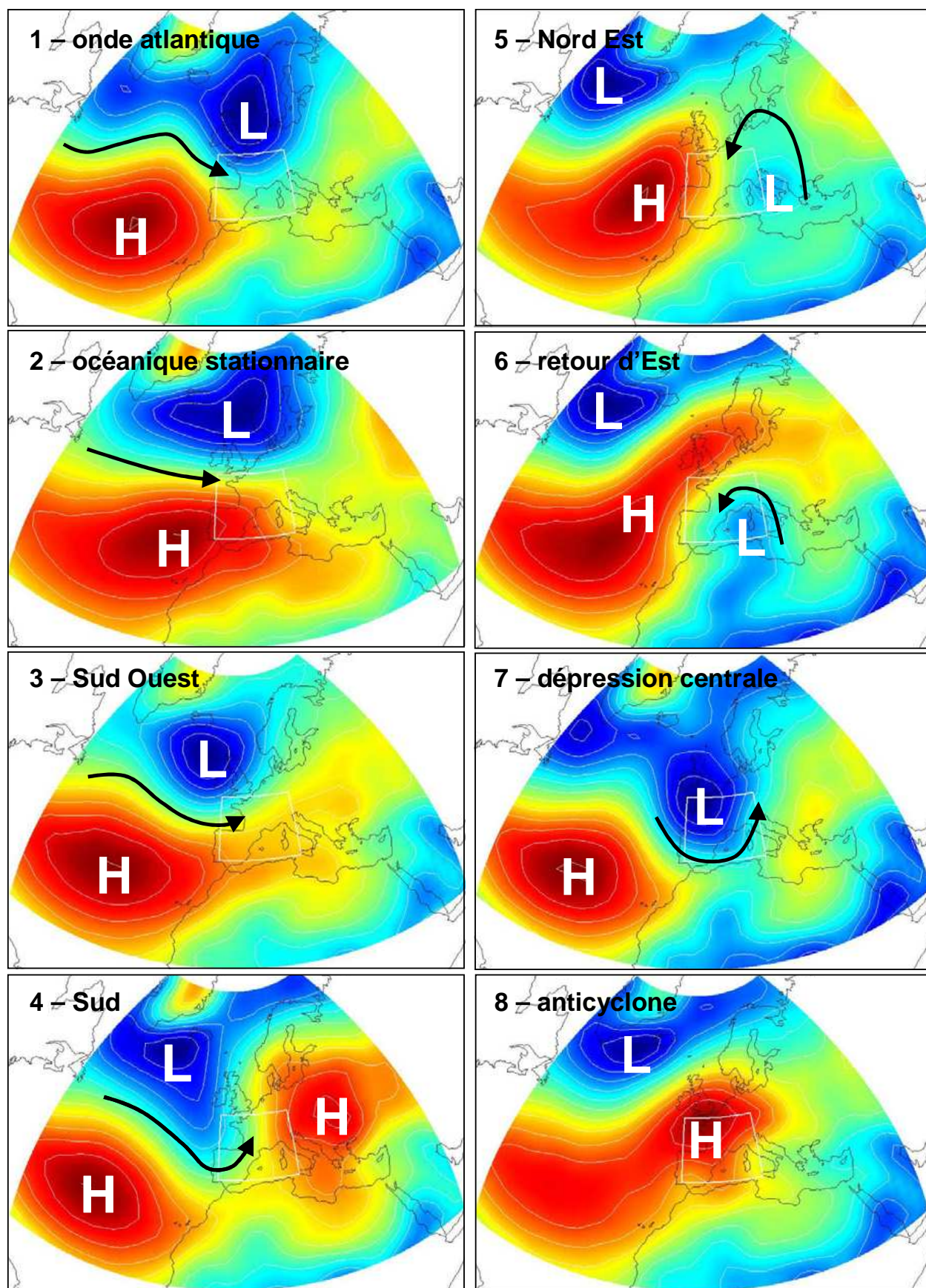


Figure 8 : Présentation des 8 types de temps. L et H : zones de basses et hautes pressions atmosphériques. La flèche noire indique la direction et la forme du front dépressionnaire.

Tableau 4 : Caractéristiques générales des variables environnementales mesurées au moins une fois par jour entre le 1^{er} Octobre et le 15 Février des années 1987 à 2007. C : variable continue ; D : variable discrète. MF : Météo-France ; BH : Banque Hydro ; UT : Usine de Traitement des Eaux ; IM : Institut des Mécaniques Célestes et Calculs des Ephémérides.

Libellé de la variable	Unité	Type	Min	Max	$\mu \pm$ et (C) ou modalité la plus fréquente (D)	Pas de Temps de la mesure	Lieu de la mesure	Source de la donnée
Pression atmosphérique	hPa	C	978,2	1042,7	$1017,8 \pm 10,8$	tri-horaire	Angers	MF
Température de l'air	°C	C	-12,2	27,1	$8,0 \pm 5,2$	tri-horaire	Angers	MF
Vitesse du vent	m.s ⁻¹	C	0,0	10,4	$3,1 \pm 1,6$	tri-horaire	Angers	MF
Orientation du vent	degré	C	0	352	172 ± 82	tri-horaire	Angers	MF
Pluviométrie	mm	C	0,0	41,6	$2,3 \pm 4,5$	quotidien	Angers	MF
Nébulosité	octa	D	0	8	7	quotidien	Nantes	MF
Débit	m ³ .s ⁻¹	C	123	5450	1021 ± 920	quotidien	Monjean /Loire	BH
Turbidité	NTU	C	0,6	238,0	$22,1 \pm 21,0$	quotidien	Angers	UT
Indice de luminosité	sans unité	C	0,00	0,99	$0,13 \pm 0,20$	quotidien	Angers	IM
Types de temps	sans unité	D	1	8	2 ¹	quotidien	-	MF

¹ la modalité 2 de la variable « types de temps » correspond à la classe océanique stationnaire.

3.2.5. Analyses préalables

3.2.5.1 Facteurs qui influencent la stratégie de pêche

Les séries chronologiques analysées dans cette étude proviennent de captures réalisées par des pêcheurs professionnels dont l'intérêt est clairement de limiter les séances de pêche peu « rentables ». Par conséquent, la stratégie de pêche (i.e., la décision de pêcher ou non) adoptée par chacun d'entre eux est probablement guidée par leur propre expérience, c'est-à-dire leur capacité à déterminer si les conditions environnementales sont favorables aux captures d'anguilles argentées. Ainsi, les stratégies adoptées ne doivent pas être totalement aléatoires. Un préalable important avant de débiter la phase de modélisation est donc d'analyser la pratique des pêcheurs afin de caractériser la qualité de l'échantillonnage, et par exemple de savoir si les jours sans pêche correspondent à des jours a priori où l'intensité migratoire des anguilles est faible ou non. Certains pêcheurs peuvent utiliser pleinement leur expérience pour décider de ne pas pêcher car (i) ils prévoient qu'en fonction des conditions environnementales la pêche sera pas rentable pour eux (effet météorologique), (ii) qu'ils prennent un risque important de casser leur matériel car les débits sont très importants (effet débit) et/ou (iii) qu'après tout ils ont capturé suffisamment de poissons pour assurer leur revenu ou qu'ils sont fatigués (effet temporel), etc. Enfin, une question importante est de savoir si les critères qui guident la décision de pêche varient en fonction des pêcheurs.

Pour chaque année (entre 1987 et 2006) et chaque pêcherie, le nombre de sorties, l'intervalle (nombre de jours entre le 1^{er} Octobre et le dernier jour effectif de pêche) et l'occurrence des sorties manquantes (jours sans pêche) ont été considérées. Les variables indépendantes considérées, qui ont toutes été discrétisées en classes, sont les suivantes :

- Variables temporelles : année et semaine
- Variables environnementales
 - Débit de la Loire à Montjean (m^3/s) :
1 : < 750 ; 2 : $[750 - 1500]$; 3 : $[1500 - 2250]$;
4 : ≥ 2250
 - Pression atmosphérique (hPa)
1 : < 1000 ; 2 : $[1000 - 1015]$; 3 : $[1015 - 1030]$;
4 : ≥ 1030
 - Lunaison
1 : de la nouvelle lune au premier quartier ; 2 : du
premier quartier à la pleine lune ; 3 : de la pleine
lune au dernier quartier ; 4 : du dernier quartier à
la nouvelle lune
 - Vent
 - Vitesse (m/s)
1 : < 2 ; 2 : $[2 - 4[$; 3 : $[4 - 6[$; 4 : ≥ 6
 - Direction (N, E, S & W)

L'influence des variables indépendantes sur l'occurrence des sorties manquantes a été analysée par le biais de régressions logistiques. Le critère d'AIC a été utilisé pour sélectionner les variables dépendantes les plus significatives.

3.2.5.2 Sélection des variables environnementales

Il est souvent complexe de discerner les véritables stimuli environnementaux qui initient et font persister le comportement de dévalaison. En effet, les facteurs environnementaux sont généralement corrélés entre eux avec plus ou moins de retard – la crue qui survient quelques jours après une dépression et des événements pluvieux significatifs, s’accompagne généralement d’une augmentation de la vitesse du vent et de la turbidité, tandis que la température chute, etc. (Tableau 5). Cependant, il est fondamental de synthétiser cette information environnementale dans les modèles pour limiter la colinéarité des variables indépendantes. Les prédictions basées sur des variables colinéaires sont généralement peu robustes en raison d’une grande instabilité des coefficients, et une faible modification dans les données peut engendrer des écarts importants de prédiction. L’utilisation de la variable « type de temps », à condition qu’elle synthétise une partie de l’information environnementale, pourrait limiter ces problèmes de colinéarité. De plus, cette variable traduit la situation météorologique à une large échelle géographique (à l’échelle de la France) et intègre donc les nombreuses influences climatiques (océaniques, continentales, montagnardes et méditerranéennes) à l’origine des différents types de crues (cévenoles, océaniques ou mixtes) caractéristiques de la Loire. Enfin, cette variable est prévisible à 4 jours par les services de Météo-France ce qui est très intéressant pour l’aspect opérationnel du modèle car cela offre la possibilité aux gestionnaires d’anticiper leur manœuvre d’ouvrage.

Nous avons donc étudié la relation entre les 8 types de temps (variable illustrative) obtenus selon la méthode de Paquet et al. (2006) et les 8 variables environnementales (variables explicatives) mesurées localement pour notre étude grâce à une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). L’ACM permet de faire un bilan des liaisons entre des variables qualitatives et d’étudier les associations de modalités. Toutes les variables explicatives ont été discrétisées en 3 modalités (Tableau 6). Les valeurs seuils ont été calculées à partir de la méthode des quantiles empiriques afin d’équilibrer au maximum les effectifs dans chaque modalité. La période correspond à tous les jours entre le 1^{er} Octobre et le 15 Février des années 1987 à 2006, ce qui représente 2760 jours. Cette analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R (<http://www.r-project.org/>).

Tableau 5 : Matrice des corrélations des variables environnementales continues (moyennes journalières) mesurées entre le 1^{er} Octobre et 15 Février des années 1987 à 2006. IL : indice de luminosité ; Q : débit ; Turb : turbidité ; Pluv : pluviométrie ; Patm : pression atmosphérique ; Temp : température de l'air ; DV : direction du vent ; VV : vitesse du vent. Les corrélations significatives au seuil de $P < 0,05$ sont figurées en gras (cf. Tableau 3 pour plus de précisions sur les variables).

	IL	Q	Turb	Pluv	Patm	Temp	DV	VV
IL	1,0	-	-	-	-	-	-	-
Q	0,03	1,0	-	-	-	-	-	-
Turb	0,08	0,33	1,0	-	-	-	-	-
Pluv	-0,13	0,07	0,01	1,0	-	-	-	-
Patm	0,12	-0,15	-0,05	-0,47	1,0	-	-	-
Temp	-0,17	-0,01	-0,03	0,27	-0,40	1,0	-	-
DV	-0,07	0,10	0,07	0,24	-0,22	0,27	1,0	-
VV	-0,18	0,08	0,04	0,35	-0,41	0,19	0,18	1,0

Tableau 6 : Caractéristiques des variables discrètes utilisées pour réaliser l'ACM et proportions des jours (pour un total de 2760 jours) où les modalités ont été observées.

Variables	Modalités	Caractéristiques	Proportions (%)
Type de temps	1	Onde atlantique	5,8
	2	Océanique stationnaire	31,6
	3	Régime de Sud Ouest	5,0
	4	Régime de Sud	24,2
	5	Régime de Nord Est	5,5
	6	Retour d'Est	4,9
	7	Dépression centrale	3,0
	8	Anticyclone	20,1
Débit (m ³ .s ⁻¹)	1	≤ 476	33,4
	2	> 476 et ≤ 1080	33,5
	3	> 1080	33,1
Direction du vent (degré)	1	≤ 140	33,7
	2	> 140 et ≤ 219	33,1
	3	> 219	33,2
Indice de luminosité	1	≤ 0,005	38,1
	2	> 0,005 et ≤ 0,116	28,6
	3	> 0,116	33,3
Pluviométrie (mm)	1	≤ 0	43,4
	2	> 0 et ≤ 1,2	24,4
	3	> 1,2	32,2
Pression atmosphérique (hPa)	1	≤ 1013,5	33,4
	2	> 1013,5 et ≤ 1023,2	33,3
	3	> 1023,2	33,3
Température de l'air (°C)	1	≤ 6,1	33,4
	2	> 6,1 et ≤ 10,2	32,9
	3	> 10,2	33,7
Turbidité (NTU)	1	≤ 11,2	33,4
	2	> 11,2 et ≤ 22,1	33,2
	3	> 22,1	33,4
Vitesse du vent (m.s ⁻¹)	1	≤ 2,5	34,1
	2	> 2,5 et ≤ 3,9	33,9
	3	> 3,9	32,0

3.2.5.3 Prédiction du départ de la migration

Un enjeu important de cette étude est de prédire les captures d'anguilles argentées, mais également d'extrapoler ce modèle à d'autres systèmes où les patrons de la migration sont différents. Dans la revue bibliographique, nous avons montré que la date médiane de migration augmentait selon un gradient latitudinal Nord-Sud, avec globalement une migration plus tardive à mesure que les populations d'anguilles étudiées étaient localisées dans le sud de l'Europe (Figure 4). Grâce à un suivi interannuel de la dévalaison des anguilles argentées de la rivière Imsa en Norvège, Vollestad et al. (1986) ont par ailleurs émis l'hypothèse, non vérifiée encore, que le départ de la migration en automne est plus précoce les années où l'étiage en été est plus marqué (faible débit et température élevée). Si cette hypothèse était validée, elle permettrait de cibler précisément dans le temps le départ de la période de vigilance, c'est-à-dire la période au cours de laquelle les gestionnaires seront amenés à effectuer des arrêts de turbine. Elle permettrait donc de réduire d'éventuelles pertes de production électrique.

Nous avons donc caractérisé de manière standard et pour chaque année le départ de la migration. Il correspond au $J_{5\%}$, c'est-à-dire au nombre de jours nécessaires à compter du 1^{er} Octobre, date légale d'ouverture de la pêche professionnelle, pour capturer 5% des captures totales annuelles de la pêcherie. Les variables indépendantes considérées pour expliquer la variation du $J_{5\%}$ sont la température de l'eau observée à Chinon (seul site qui fournissait une mesure de cette variable sur la période 1987-2006) et le débit mesuré à Montjean/Loire (Figure 5). Pour chaque variable, la relation entre le $J_{5\%}$ et les valeurs mensuelles moyennes et maximales d'avril à octobre, et les toutes les combinaisons de deux mois (d'Avril-Mai à Septembre-Octobre), trois mois (d'Avril-Juin à Août-Octobre), quatre mois (d'Avril-Juillet à Juillet-Octobre), cinq mois (d'Avril-Août à Juillet-Octobre), six mois (d'Avril-Septembre à Mai-Octobre) et sept mois (Avril-Octobre) ont été testées par régressions linéaires.

3.2.6. Modélisation des CPUE

Des Modèles Linéaires Généralisés (GLM) ont été développés pour décrire et prédire la distribution des captures d'anguilles en fonction des variables environnementales. L'objectif *in fine* de ces modèles est de fournir des prédictions de captures d'anguilles argentées qui pourront aider les gestionnaires de centrales hydroélectriques à cibler les nuits où des arrêts de turbines sont nécessaires (*i.e.* quand un pic significatif de captures d'anguilles argentées est attendu). Ces modèles doivent donc être robustes, fiables et opérationnels. En particulier, ils doivent reposer sur des variables environnementales facilement accessibles, et dont la prévision à quelques jours est possible pour assurer un délai minimum (au moins 24 heures) nécessaire pour anticiper la manœuvre d'ouvrage. Par ailleurs, la possibilité d'utiliser ces modèles à d'autres hydrosystèmes est envisagée. Ceci implique que les effets sites, par exemple la taille du bassin versant qui influence évidemment l'intensité des captures d'anguilles argentées ou le régime de débit, doivent être réduits au maximum pour permettre l'extrapolation du modèle. Tous ces éléments constituent un cahier des charges important qui doit être pris en compte dans la démarche globale de modélisation. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (<http://www.r-project.org>).

3.2.6.1 La variable dépendante

La variable dépendante est la **CPUE journalière relative (proportion journalière des captures totales annuelles)** d'une cinquième série chronologique, correspondant à la moyenne des CPUE journalières des quatre pêcheries. Cette cinquième série « lissée » a été calculée afin de limiter l'importante variabilité des CPUE observées entre les pêcheries probablement liée aux différentes stratégies de pêche adoptées par les pêcheurs (cf. § 3.3.1) mais également à des effets sites qui influencent la capturabilité. Cette série chronologique est supposée être représentative des patrons de captures annuels obtenus au sein d'une pêcherie exploitée par un pêcheur au comportement moyen. C'est la CPUE journalière relative de cette cinquième série qui a été considérée afin de réduire l'importante variabilité interannuelle des CPUE mais également l'influence de la taille du bassin versant de la Loire sur l'intensité des captures. Cette cinquième série a été calculée sur l'ensemble de la période d'étude (20 années, 1987-2006).

3.2.6.2 Les variables indépendantes

Les variables indépendantes considérées dans le modèle sont :

3.2.6.2.1 Les variables météorologiques (types de temps et indice de luminosité)

Sans trop dévoiler les résultats présentés plus loin (cf. § 3.3.2), les 8 modalités de la variable type de temps permettent de bien décrire et synthétiser la situation météorologique (pression atmosphérique, pluviométrie, orientation du vent, etc.) observée chaque jour au niveau des pêcheries. Ainsi, l'association des variables types de temps et indice de luminosité permettra de bien appréhender et quantifier les « ambiances » météorologique et lumineuse pendant les nuits de captures.

3.2.6.2.2 Les variables hydrologiques (débit et turbidité)

Le débit est une variable qui agit directement sur l'activité migratoire en tant que vecteur de migration. Son action sur la migration peut également être indirecte, à travers l'augmentation de turbidité qu'il engendre. Sur la Loire, ces deux variables sont corrélées mais l'intensité de la relation observée est relativement faible (coefficient de corrélation, $r = 0,3$ et $P < 0,05$; Tableau 5), probablement parce que certains pics de turbidité ne sont pas toujours liés à des pics de débits. Par ailleurs, la turbidité est une variable qui apporte une information complémentaire importante par rapport à l'indice de luminosité. En effet, un indice de luminosité maximal (dans le cas d'une pleine lune avec une nébulosité minimale) peut être sans effet sur le comportement migratoire si dans le même temps la turbidité est très forte. Pour ces deux raisons (corrélation modérée entre débit et turbidité et apport d'une information pertinente d'un point de vue biologique), ces deux variables ont été intégrées dans les modèles.

3.2.6.2.3 La variable temporelle (numéro de la semaine)

Certains travaux suggèrent que l'exigence des anguilles argentées par rapport aux conditions optimales de migration diminue au cours de la saison car elles ont un « besoin interne de migration ». En d'autres termes, cela signifierait que la fréquence des pics de captures peu liés aux conditions environnementales optimales (crues, dépressions, etc.) augmenterait avec le temps. Pour formaliser cette hypothèse biologique forte, le numéro de la semaine (la première semaine débutant le 1^{er} Octobre de chaque année) a été incluse dans les modèles.

3.2.6.2.4 Intégration dans les modèles

Parmi les variables indépendantes, deux sont discrètes (le type de temps et le numéro de la semaine) et trois sont continues (indice de luminosité, débit et turbidité). Dans le but d'homogénéiser le type des variables indépendantes utilisées pour modéliser les captures, toutes les variables continues ont été discrétisées. Chaque variable a été mesurée au moins une fois entre le 1^{er} Octobre et le 15 Février pendant 20 années, ce qui correspond à 2760 mesures. Parmi elles, il existe forcément des mesures imprécises voire même aberrantes. La discrétisation, c'est-à-dire la transformation des variables continues en classe, présente l'avantage de limiter ces problèmes d'imprécision de mesures et des « outliers ». En fonction des variables, la discrétisation a porté sur la valeur moyenne journalière et/ou la variabilité journalière (delta-jour en % calculé de la façon suivante : $((X_{j+1}-X_j)/X_j)*100$ où X_j est la valeur moyenne du jour j). Le choix a été réalisé en fonction de notre capacité à déterminer le rôle de la variable sur la migration. En effet, si une variable initie la migration, c'est plutôt la variabilité journalière de cette variable qui influencera les captures. A l'inverse, pour une variable qui va inhiber la migration à partir d'une valeur seuil, c'est la discrétisation de la valeur journalière absolue qui sera la plus pertinente.

Le débit d'un hydrosystème est proportionnel à sa taille. Ainsi, les pics de captures d'anguilles argentées peuvent avoir lieu pour des gammes de valeurs de débit faibles (1 à $5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ dans le Frémur par exemple ; Acou et al., 2008) ou beaucoup plus élevées (2000 à $5000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; la présente étude). Il semble donc que c'est la variabilité journalière du débit, plutôt qu'un débit seuil, qui influence les captures. De plus, en considérant la variabilité journalière du débit, cela nous permet de limiter l'influence de la taille du bassin versant sur le régime

hydrologique, élément nécessaire à l'extrapolation du modèle. Concernant la turbidité, nous n'avons pu déterminer comment cette variable agissait sur la migration. Par conséquent et sans *a priori*, c'est à la fois la valeur journalière brute et la variabilité journalière de la turbidité qui ont été discrétisées. Enfin, puisque la lumière est un facteur qui inhibe clairement l'activité migratoire, c'est la valeur journalière de l'indice de luminosité qui a été discrétisée et injectée dans le modèle.

Il n'existe pas de méthode universelle pour discrétiser les variables continues. Cependant, quelques règles de base doivent être respectées : 1) éviter d'avoir des nombres de classes trop différentes d'une variable à l'autre, 2) éviter d'avoir des tailles de classes trop différentes pour une même variable, 3) éviter d'avoir des classes trop petites et 4) un bon nombre de classes tourne souvent entre 3 et 5 (cf. Tuffery, 2007 pour plus de détails). Ces règles ont été respectées au mieux pour définir, à partir de l'examen de la distribution des variables continues, le nombre de modalités (Tableau 7).

Au final, ce sont 6 variables discrètes qui seront utilisées pour réaliser la modélisation : classes de variabilité journalière de débit et turbidité, classes de turbidité journalière, classes d'indice de luminosité, types de temps et numéro de la semaine. De plus, nous avons tenu compte d'éventuels effet « retard » de 1 à 4 jours entre les variables environnementales et les captures d'anguilles argentées, puisqu'il peut exister un délai de quelques jours entre par exemple une crue et un pic de captures. D'un point de vue plus opérationnel, il peut être intéressant dans le cas de variables non prévisibles telle que la turbidité (Tableau 7), d'imposer la sélection de la classe observée au jour $j-1$, ou $j-2$, etc. En effet, cela permet, à condition qu'un suivi journalier de cette variable soit effectué, d'intégrer cette variable pertinente d'un point de vue biologique dans les modèles sans perdre trop d'informations (les modalités entre jours successifs sont autocorrélées temporellement) et par conséquent d'augmenter la robustesse des prédictions, et surtout de laisser un délai d'au moins 24 heures aux gestionnaires pour anticiper leur manœuvre d'ouvrage.

Tableau 7. Moyennes des variables indépendantes mesurées et utilisées pour la modélisation des captures d'anguilles argentées. Une description des modalités utilisées et de la fréquence des modalités observées est mentionnée. La période totale considérée est de 2760 jours (138 jours entre le 1^{er} Octobre et le 15 Février pendant 20 années).

Variables	Moyennes \pm ET (min ; max)	Modalités	Bornes	Fréquences (%)	Remarques
Variabilité journalière du débit (%)	$1,5 \pm 9,2$ (-27,2 ; 109,7)	1	< -10	3,2	Prévision possible à 4 jours
		2	[-10 ; 10[83,3	
		3	[10 ; 30[12,0	
		4	[30 ; 50[1,2	
		5	≥ 50	0,3	
Variabilité journalière de turbidité (%)	$11,9 \pm 96,0$ (-96,5 ; 2503,2)	1	≤ -20	17,8	Variable non prévisible
		2	[-20 ; 0]	39,7	
		3	[0 ; 20]	23,3	
		4	> 20	19,1	
Turbidité quotidienne (NTU)	$22,1 \pm 21,0$ (0,6 ; 238,0)	1	< 10	28,1	Variable non prévisible
		2	[10 ; 20[33,9	
		3	≥ 20	38,0	
Indice de luminosité	$0,1 \pm 0,2$ (0,0 ; 1,0)	1	< 0,3	84,1	Prévision possible à 4 jours
		2	[0,3 ; 0,6[10,7	
		3	$\geq 0,6$	5,1	
Type de temps	-	1	-	5,8	Prévision possible à 4 jours
		2	-	31,6	
		3	-	5,0	
		4	-	24,2	
		5	-	5,5	
		6	-	4,9	
		7	-	3,0	
Numéro de la semaine	-	8	-	20,1	Variable déterminée
		N = 20	-	-	

3.2.6.3 Delta distribution

Les données de comptage (CPUE, nombre ou densité) contiennent généralement de nombreuses valeurs nulles. Ces valeurs nulles ne sont généralement pas prises en compte dans les traitements car les modèles classiques sont inadaptés pour analyser ce genre de données. Cependant, ces valeurs ne peuvent être ignorées car elles contiennent d'importantes informations sur la biologie de l'espèce considérée, particulièrement quand on étudie des phénomènes migratoires caractérisés par des successions de pics de captures. Dans notre jeu de données, la proportion des valeurs nulles était relativement faible (entre 1,2 et 4,5% des CPUE observées en fonction des pêcheries) parce que fort de leur expérience, les pêcheurs professionnels ciblent préférentiellement les pics de dévalaison et surtout ont probablement tendance à réduire leur effort de pêche les nuits *a priori* moins propices. Cependant, l'objectif final de cette étude est d'extrapoler la méthode développée sur la Loire à d'autres hydrosystèmes où des techniques d'échantillonnage plus « aveugles » comme les pièges de dévalaison ou des pêcheries scientifiques expérimentales sont utilisées. Dans ce contexte, les modèles construits dans cette étude sont basés sur des modèles de mélange qui prennent en compte ces valeurs nulles (Stefansson, 1996 ; Le Pape et al., 2003 ; Shono, 2008). Chaque jour i , la capture $CPUE_i$ est supposée suivre une distribution Delta-LogNormale :

$$CPUE_i \sim 1_i \cdot X_i | 1_i=1$$

où 1_i est une variable de Bernoulli (prenant la valeur 0 ou 1) modélisant la présence/absence d'anguilles le jour i , et $X_i | 1_i=1$ est une distribution Log-Normale modélisant les CPUE positives. En d'autres termes, la capture $CPUE_i$ est décrite par le modèle suivant :

$CPUE_i = 0$ avec une probabilité $1 - p_i$ (absence)

si $CPUE_i > 0$ (présence, avec une probabilité p_i), alors $CPUE_i \sim \text{LogNormale}$

L'ajustement de ce type de modèle sur les données se déroule en trois étapes. Premièrement, une régression logistique (modèle M1, GLM Binomial) est ajustée sur les données booléennes de présence/absence. Dans un second temps, un modèle linéaire classique est ajusté sur les CPUE positives log-transformées pour respecter les hypothèses d'hétéroscédasticité (modèle M2, modèle linéaire log-normal). Enfin, le couplage des deux modèles M1 et M2 est réalisé. La prédiction de la capture $CPUE_i$ résultant du couplage des deux modèles, notée $CP\hat{U}E_i$, est obtenue en couplant les prédictions de la probabilité de présence du modèle 1, notée \hat{p}_i , avec la prédiction de la log-CPUE positive, notée $\log(CP\hat{U}E_{i+})$, donnée par le modèle M2 :

$$CP\hat{U}E_i = \hat{p}_i \cdot e^{\log(CP\hat{U}E_{i+})} \cdot e^{s^2_i/2}$$

où s^2_i est la variance de prédiction de la log-CPUE positive $\log(CP\hat{U}E_{i+})$.

3.2.6.4 Modèles de présence/absence

Pour chaque jour i , la structure générale du modèle de régression logistique est la suivante :

$$1_i \sim \text{Bernoulli}(p_i)$$

avec

$$\text{Logit}(p_i) = \text{facteurs (Météo)} + \text{facteurs (Hydro)} + \text{facteur (Sem)}$$

où 1_i est la variable binaire de présence/absence. Les facteurs constituent les variables indépendantes discrètes utilisées comme variables explicatives dans le modèle. Les interactions de facteurs n'ont pas été considérées dans le modèle. Les facteurs « Météo » sont les types de temps (8 classes) et les classes d'indice de luminosité (3 classes). Les facteurs « Hydro » sont les classes de variabilité journalière de débit (5 classes) et de turbidité (4 classes), et les classes de turbidité (3 classes). Le facteur « Sem » est le numéro de la semaine (20 semaines à compter du 1^{er} Octobre). Pour les deux facteurs « Météo », des effets retard variant entre 1 et 4 jours ont été considérés. La même procédure a été appliquée à la variable débit. Par contre, étant donné que les deux variables de turbidité sont imprévisibles, seules les valeurs des classes des jours $j-1$ à $j-4$ ont été considérées. Au final, ce sont donc 24 facteurs (correspondant à : (2 facteurs « Météo » \times 5) + (1 facteur « Hydro » \times 5) + (2 facteurs « Hydro » \times 4) + (1 facteur « Sem »)) qui ont été intégrés dans le modèle. La sélection des facteurs explicatifs dans le modèle a été réalisée par la méthode de sélection pas-à-pas ascendante et descendante basée sur le critère d'AIC (Akaike Information Criterion), programmée dans la procédure *stepAIC* du logiciel R. Cette méthode nous a permis de sélectionner les meilleures variables, mais aussi pour chaque variable sélectionnée de forcer la sélection du meilleur et d'un unique pas de temps (variable avec effet retard de 1 à 4 jours ou pas) et enfin d'éviter la sélection de variables qui portent une information redondante (classes de variabilité journalière de turbidité vs classe de turbidité journalière). Cette méthode de sélection nous affranchit des problèmes d'autocorrélation (si deux facteurs tels que le débit et la turbidité portent une information proche, un des deux facteurs ne sera pas sélectionné). De plus, le critère d'AIC permet de sélectionner le modèle qui offre le meilleur compromis entre qualité d'ajustement aux données et parcimonie. Une fois le modèle construit à l'aide de cette procédure, la significativité des facteurs sélectionnés dans les modèles finaux a été testée par un test du χ^2 .

3.2.6.5 Modèles de CPUE relatives positives

Pour chaque jour i , la structure générale du modèle linéaire gaussien développé pour les CPUE positives (log-transformées) est la suivante :

$$\log(\text{CPUE}_{i+}) \sim \text{facteurs (Météo)} + \text{facteurs (Hydro)} + \text{facteur (Sem)} + \varepsilon_i$$

où $\log(\text{CPUE}_{i+})$ est la valeur de CPUE (% journalier des captures totales annuelles) quand les anguilles sont présentes et ε_i sont les résidus distribués selon une loi Normale.

Le nombre de facteurs considérés initialement ($N = 24$) ainsi que la méthode utilisée pour les sélectionner dans le modèle final (*stepAIC*) sont les mêmes que ceux présentés dans le paragraphe précédent. Une nouvelle fois, seuls des effets additifs entre facteurs ont été considérés. Une fois les modèles construits, une analyse de variance (test « F ») a été réalisée afin d'analyser plus précisément l'effet des facteurs sélectionnés par la procédure *stepAIC* sur les CPUE positives. Enfin, pour évaluer l'influence des différentes modalités des facteurs sélectionnés par la procédure *stepAIC* dans le modèle final, des post-tests de Tukey ont été réalisés.

3.2.7. Analyse de sensibilité (« Leave One Out »)

La qualité réelle d'un modèle ne peut être estimée au vu de ses résultats sur les données qui ont servi à le construire. Il n'est pas rare, en effet, que les prédictions d'un modèle soient très satisfaisantes sur les données « d'apprentissage » et mauvaises sur les données « test ». Il est donc fondamental de tester la sensibilité du modèle, qualité essentielle à son utilisation et à sa généralisation, et multiplier les validations sur les jeux de données indépendants. Quand le jeu de données est suffisamment important, comme c'est le cas dans cette étude puisque 20 années de captures quotidiennes entre 1987 et 2006 sont disponibles, une technique généralement utilisée est le « Leave One Out ». Cette technique permet une validation croisée où chacun des ensembles d'apprentissage est constitué de l'ensemble complet des données dont on a retiré un seul individu. Appliqué à notre jeu de données, le « Leave One Out » consiste à modéliser 20 fois les CPUE relatives d'anguilles argentées sur les différentes combinaisons de 19 années parmi les 20 de la période d'étude (Tableau 8). Tous les modèles ont été construits avec le même « pool initial » de variables indépendantes (i.e. 23 facteurs environnementaux et un facteur temporel) sélectionnées par une procédure automatisée (*stepAIC*), et seule la période d'apprentissage était différente. Si le nombre, l'ordre d'introduction et les caractéristiques (delta ou valeur absolue ; effet retard) des facteurs finalement sélectionnés varient peu dans les 20 modèles, alors nous pourrions conclure que l'architecture du modèle est peu sensible à la période d'apprentissage. Cette analyse de sensibilité vise donc à dégager l'architecture d'un modèle final qui devra, après validation sur les années « test », être construit cette fois sur l'ensemble de la période d'étude (20 années).

Tableau 8: Description des vingt combinaisons de 19 années (périodes d'apprentissage) utilisées pour la modélisation des CPUE relatives d'anguilles argentées et années test pour réaliser la prédiction.

Numéro du modèle	Période d'apprentissage	Années test pour réaliser la prédiction
1	1988-2006	1987
2	1987,1989-2006	1988
3	1987-1988, 1990-2006	1989
4	1987-1989, 1991-2006	1990
5	1987-1990, 1992-2006	1991
6	1987-1991, 1993-2006	1992
7	1987-1992, 1994-2006	1993
8	1987-1993, 1995-2006	1994
9	1987-1994, 1996-2006	1995
10	1987-1995, 1997-2006	1996
11	1987-1996, 1998-2006	1997
12	1987-1997, 1999-2006	1998
13	1987-1998, 2000-2006	1999
14	1987-1999, 2001-2006	2000
15	1987-2000, 2002-2006	2001
16	1987-2001, 2003-2006	2002
17	1987-2002, 2004-2006	2003
18	1987-2003, 2005-2006	2004
19	1987-2004, 2006	2005
20	1987-2005	2006

3.2.8. Diagnostic et qualité du modèle

Une fois les vingt modèles construits, il convient de contrôler si les hypothèses de modélisation sont respectées. Ces analyses post-ajustement reposent principalement sur l'examen des résidus (i.e. écart entre les valeurs prédites et observées). Ce sont des techniques graphiques simples et robustes, considérées comme un des moyens les plus sûrs d'évaluer la qualité d'un modèle. Nous avons utilisé les quatre graphiques délivrés par défaut par la fonction `plot.lm()` du logiciel R pour réaliser ces analyses post-ajustement.

- graphique des résidus *vs* valeurs ajustées (ou prédites)

Ce graphique permet de vérifier l'indépendance et la linéarité des résidus. Il ne faut pas de tendance visible, et on attend une répartition aléatoire des résidus autour de 0. Si par exemple, une forme de trompette se dessine sur le graphique, cela signifie que la variance explose avec la valeur de la variable ajustée, signe que la variance n'est pas constante (hétéroscédasticité).

- graphique des résidus standardisés

Ce graphique permet de vérifier les mêmes hypothèses que le précédent. La seule différence est que les résidus sont standardisés (racine carrée des valeurs absolues des résidus) et varient entre 0 et 1.

- graphique QQplot (quantile-quantile plot)

Le QQplot est un graphique qui permet de vérifier la normalité des résidus. Le nuage de points représenté oppose les quantiles de la distribution empirique aux quantiles de la distribution théorique normale envisagée, de moyenne et d'écart type estimés sur les CPUE relatives observées. Si le QQplot est proche d'une droite sans présenter de discontinuité, ni de forme « en vague », cela signifie que les résidus suivent approximativement une loi normale et l'hypothèse d'homoscédasticité (i.e. dispersion des résidus homogène sur toute la gamme des valeurs de la variable dépendante) est vérifiée.

- graphique des distances de Cook

Ce graphique permet de détecter les valeurs atypiques. La distance de Cook est une distance globale qui mesure à la fois, pour une observation donnée, le fait d'être à l'écart du gros des observations, et celui d'avoir un effet exceptionnellement important sur le modèle. Elle donne pour chaque observation la distance entre les paramètres estimés par le modèle avec et sans cette observation. Elle permet donc de repérer les observations atypiques et exceptionnellement influentes. C'est ensuite à la discrétion de l'opérateur de corriger (si c'est une erreur de saisie par exemple) de garder ou d'éliminer ces observations.

3.2.9. Test de la prédiction sur les 20 années « test »

Les CPUE relatives journalières ont été prédites sur les 20 années test non utilisées pour réaliser la modélisation (de 1987 à 2006 ; Tableau 8). Ces années indépendantes nous permettent ainsi d'évaluer la robustesse et la fiabilité des prédictions en comparant notamment chaque jour les CPUE relatives prédites *vs* observées. Cette évaluation de la qualité des prédictions consiste à comptabiliser chaque année, le nombre de pics des CPUE observées et prédites, pour ensuite estimer les taux annuels de :

$$\text{Prédiction vérifiée (en \%)} = \frac{\text{Nombre de pics observés et prédits}}{\text{Nombre de pics observés}} \times 100$$

$$\text{Sous prédiction (en \%)} = 100 - \text{prédiction vérifiée}$$

$$\text{Surprédiction (en \%)} = \frac{\text{Nombre de pics non observés et prédits}}{\text{Nombre de pics prédits}} \times 100$$

Les pics de captures ont été définis de la manière suivante. Est considéré comme pic de capture, toute distribution unimodale de durée variable (de 1 à x jours) dépassant une valeur seuil de CPUE relative. Cette valeur seuil a été fixée à 1% pour les CPUE relatives observées, car elle équivaut en moyenne à une capture journalière d'environ 85 ± 23 anguilles argentées sur l'ensemble de la période d'étude, ce qui représente à notre avis une valeur minimale d'un pic significatif de captures. La valeur seuil des CPUE prédites a été fixée à 0,5% parce que les prédictions obtenues selon cette méthode delta-glm sont généralement plus faibles que les valeurs observées (Acou, données non publiées).

3.2.10. Recherche du meilleur compromis entre échappement des anguilles argentées et perte de production

En se basant sur la valeur des variables environnementales disponible pour le jour x, le modèle fournit une estimation de la CPUE relative pour le jour x+1. Il permet donc de prédire pour le lendemain une valeur de CPUE relative, ce qui laisse le temps matériel à un gestionnaire de centrale hydroélectrique d'anticiper une manœuvre d'ouvrage. Cependant, comment le gestionnaire peut-il utiliser cette information et à partir de quel niveau de CPUE prédite peut-il arrêter ses turbines avec l'assurance qu'il a permis un échappement significatif d'anguilles argentées ? Un moyen simple serait d'utiliser la CPUE relative comparativement à une valeur seuil référence (*i.e.* quand la CPUE prédite dépasse la valeur seuil, alors un arrêt de turbine est à envisager). La difficulté étant de trouver la valeur seuil qui offre le meilleur compromis entre la proportion d'anguilles argentées échappées et la perte de production (nombre de jours d'arrêt de turbines). Cette valeur seuil ne doit pas être trop faible au risque d'obtenir un arrêt systématique des turbines, ou à l'inverse trop élevée au risque d'assurer un échappement minimal d'anguilles argentées. La vérité est certainement entre les deux, peut être vers la valeur seuil de 0,5% utilisée dans le paragraphe précédent. Cependant, cette valeur seuil doit être définie de manière plus objective. Pour cela, une gamme de valeurs seuils incrémentées de 0,05% et variant entre 0,05% et 5% (pour un total de 24 valeurs seuil) a été considérée. De plus, le jeu de données disponible composé des CPUE relatives observées (série P5) et prédites chaque année (fournies par les 20 modèles) a été utilisé. Pour chaque valeur seuil, des arrêts de turbine d'une centrale hydroélectrique fictive localisée au milieu des pêcheries ont été simulés à chaque fois que la CPUE relative prédite dépassait la valeur seuil considérée. Chaque année, la proportion réelle d'anguilles argentées échappées (basée sur la somme des CPUE relatives observées) ainsi que le nombre total de jours d'arrêt de production ont pu être quantifiés. Ces simulations ont été réalisées sur les 20 années « test » (de 1987 à 2006 ; Tableau 8). C'est l'examen du graphique qui présente en ordonnées, l'échappement moyen d'anguilles argentées et le nombre moyen d'arrêt de turbines, et en abscisse, les 24 valeurs seuil classées selon un gradient décroissant, qui permettra d'orienter

les gestionnaires dans la sélection de la valeur seuil qui offre le meilleur compromis, selon leurs objectifs, entre échappement et perte de production. Un dernier élément, plus pratique cette fois, qui peut guider le gestionnaire dans la sélection d'une valeur seuil est la distribution des plages d'arrêts. En effet, si par exemple 40 arrêts sont nécessaires pour une année donnée, le gestionnaire pourra plus facilement mettre en œuvre un arrêt de 40 nuits consécutives que 40 arrêts ponctuels. Ainsi, la distribution des plages d'arrêts de turbine observée pour toutes les valeurs seuil qui permettent d'atteindre des cibles d'échappement en anguilles argentées entre un minimum de 40% (cible d'échappement préconisée par l'Europe) et 80% (cible optimale pour l'espèce) sera présentée.

3.2.11. Gain obtenu par les gestionnaires grâce à l'utilisation du modèle

Pour le gestionnaire, il est important d'estimer le gain qu'offrirait l'utilisation du modèle par rapport à d'autres options de gestion. L'unique option utilisée actuellement et par ailleurs rarement testée, consiste à arrêter les turbines pendant plusieurs jours consécutifs, généralement trois, quand le débit instantané dépasse le module interannuel. Cette option basée uniquement sur les événements hydrologiques est probablement bien adaptée à des petits cours d'eau où les pics de migration sont brefs (quelques jours à quelques semaines) et clairement liés à des crues qui excèdent rarement 3 jours. Sur la Loire, la période de migration est généralement beaucoup plus longue (quelques semaines à quelques mois) et par conséquent le cumul des captures réalisées en dehors des pics peut constituer une part non négligeable des captures totales annuelles. De plus, les crues durent généralement plus de 3 jours. Tous ces éléments tendent à montrer que cette option est peu adaptée à un grand cours d'eau comme la Loire. Pour s'en assurer, des arrêts de turbines ont été simulés chaque jour quand le débit instantané était supérieur au module observé sur la Loire ($806 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La simulation montre qu'elle permet en moyenne sur l'ensemble de la période d'étude (1987-2006) un échappement de $45,3 \pm 30,1\%$ d'anguilles argentées (min = 0 ; max = 86,3%) pour environ $62,8 \pm 39,1$ jours d'arrêt de turbine (min = 0 ; max = 117 jours). Le bilan de cette option n'est donc pas très intéressant (moins de la moitié des captures sauvées pour 2 mois complets d'arrêt de turbines) probablement parce que l'augmentation de débit n'est pas l'unique facteur sur la Loire qui favorise les captures d'anguilles argentées, que ce soit les saisons à crues marquées ou pas.

La référence envisagée ici est basée non pas sur les événements hydrologiques, mais sur les captures en adaptant la méthode des « courbes de débits classés » classiquement utilisée en hydrologie. Les CPUE relatives observées sur l'ensemble de la période d'étude ont été classées chaque année par ordre décroissant. Puis cette courbe a été moyennée pour obtenir la courbe des CPUE relatives classées. Cette courbe réalisée *a posteriori* a permis d'estimer l'échappement maximal en anguilles argentées qu'il est possible d'atteindre pour un nombre donné de jours d'arrêt de turbinage. Elle représente d'une certaine manière le gain maximal qu'offrirait un modèle capable de prédire chaque année les CPUE journalières maximales. C'est donc cette courbe moyenne des captures classées qui a été utilisée pour déterminer si l'utilisation du modèle environnemental que nous avons développé est avantageux ou pas pour les gestionnaires.

3.3. Résultats

3.3.1. Analyse des captures et stratégies de pêche

3.3.1.1 Variabilité des CPUE

Les CPUE observées sur l'ensemble de la période d'étude, qui correspond à tous les jours effectifs de pêche où des captures nulles et non nulles ont été réalisées entre le 1^{er} Octobre et le 15 février des années 1987 à 2006, variaient significativement entre les pêcheries (Anova sur les CPUE log-transformées : $F = 88,80$; $n = 5040$; $P < 0,001$). Plus précisément, les CPUE moyennes des pêcheries 1 et 4 (en moyenne $80,3 \pm 157,1$ et $67,8 \pm 120,1$ respectivement) étaient significativement plus faibles que celles des pêcheries 2 et 3 (respectivement $174,4 \pm 332,1$ et $139,5 \pm 239,3$) (Figure 9). De même, une grande variabilité interannuelle des CPUE a été observée au sein de chaque pêcherie (Anova sur les CPUE log-transformées : tous les $P < 0,05$).

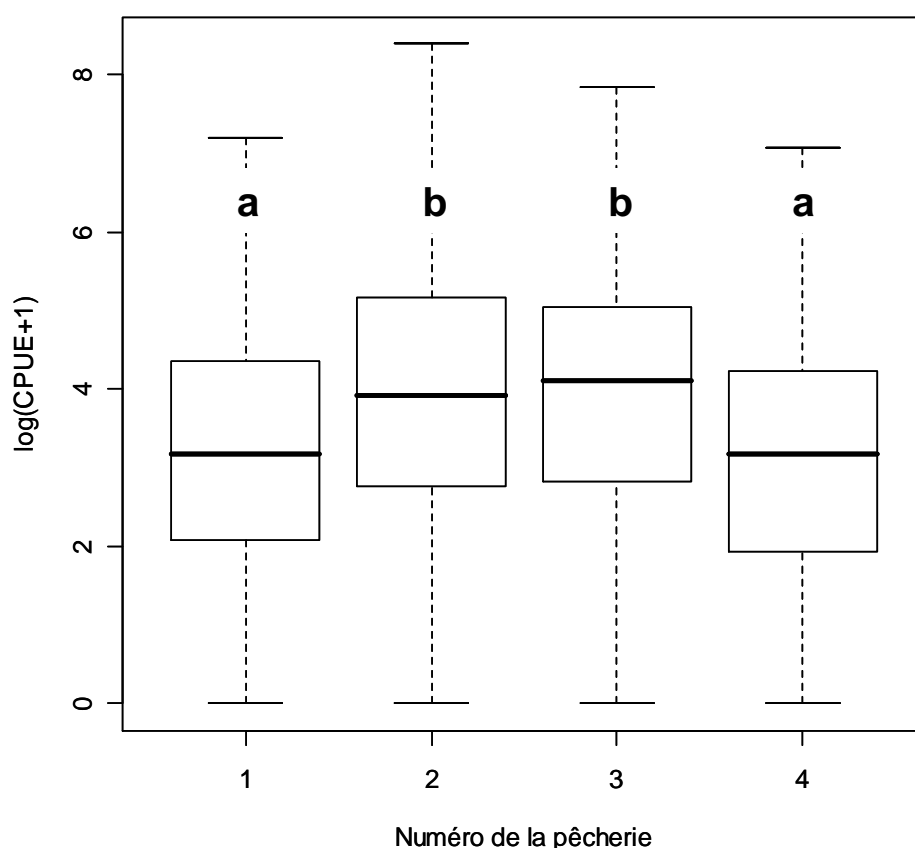


Figure 9 : Distribution des CPUE (nombre d'anguilles par nuit de pêche et par engin) observées entre 1987 et 2006 par pêcherie. Pour une CPUE particulière, une lettre différente signifie une différence significative des CPUE moyennes entre les différentes pêcheries (Post-test de Tukey ; $P < 0,001$).

3.3.1.2 Variabilité des stratégies de pêche

La stratégie adoptée au sein de chaque pêcherie a été caractérisée par le biais de trois variables : le nombre moyen annuel de sorties, la durée moyenne de la période de pêche et le nombre moyen annuel de sorties manquantes. Le nombre de sorties variaient significativement entre les pêcheries (Anova, $F(3,73) = 7,32$; $P < 0,001$; Figure 10). Le nombre de sorties effectué au sein de la pêcherie 2 ($79,7 \pm 16,3$ jours) était significativement plus important que ceux des pêcheries 1 et 4 ($48,8 \pm 10,1$ et $56,3 \pm 31,1$ jours respectivement; Tukey-test, $P < 0,001$). La durée moyenne de pêche observée chaque année n'était pas significativement différente entre les pêcheries (Anova, $F(3,73) = 2,52$; $P = 0,06$). Néanmoins, des comparaisons deux à deux ont montré que la durée moyenne de pêche observée dans la pêcherie 2 ($90,8 \pm 16,3$ jours) était environ 20 jours plus longue que celle de la pêcherie 4 ($69,3 \pm 30,7$ jours ; Tukey-test, $P < 0,05$). Enfin, le nombre moyen annuel de sorties manquantes était significativement plus élevé dans la pêcherie 1 ($36,6 \pm 14,7$ jours) que dans les pêcheries 2 ($10,4 \pm 12,0$ jours), 3 ($20,8 \pm 18,3$ jours) et 4 ($21,0 \pm 18,2$ jours) (Anova, $F(3,73) = 8,95$; $P < 0,001$; Tukey-test, $P < 0,05$).

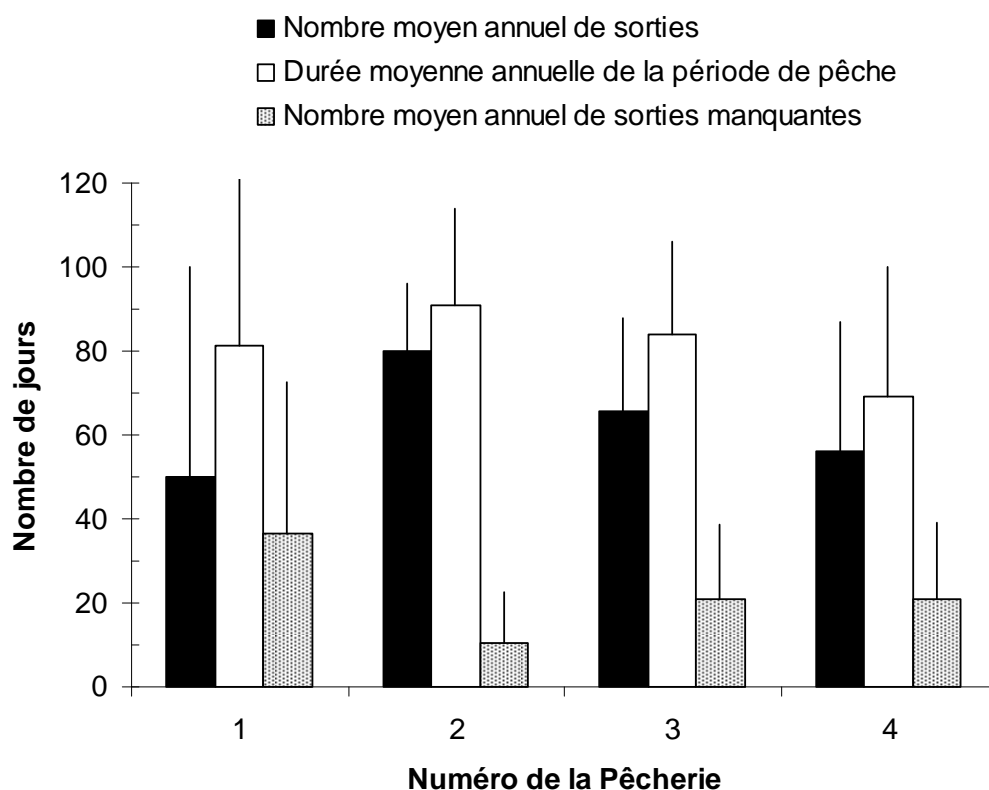


Figure 10 : Statistique des stratégies de pêche pour chaque pêcherie.

3.3.1.3 Occurrence des sorties manquantes

Les variables temporelles (facteurs Année et Numéro de la semaine) expliquaient une grande part de la variabilité de l'occurrence des sorties manquantes (Tableau 9). Cependant, aucune tendance claire entre les années et les occurrences n'a été observée pour la majorité d'entre elles (pêcheries 2, 3 et 4 ; régression linéaire : tous les $P > 0,05$). En revanche, les sorties du

pêcheur 1 étaient de moins en moins fréquentes au cours des années, et particulièrement à partir de 1995 (régression linéaire : $P < 0,05$), probablement parce que ce dernier réorientait voire arrêta progressivement son activité de pêche à la fin de notre période d'étude (Figure 11). Les occurrences des sorties manquantes moyennes ainsi que leurs variabilités étaient significativement plus importantes à partir de la mi-saison (entre les semaines 8 et 11 selon les pêcheries ; Figure 11). Il semble donc qu'un suivi régulier était assuré jusqu'à la moitié du mois de décembre pour assurer un minimum de captures. Ensuite, la fatigue aidant, les sorties étaient moins régulières mais peut-être plus ciblées sur des nuits qui permettaient à coup sûr la capture d'anguilles argentées. Le numéro de la semaine est donc une variable qui intègre à la fois un effet « chiffres d'affaires » (captures cumulées) et « fatigue » (temps passé à pêcher).

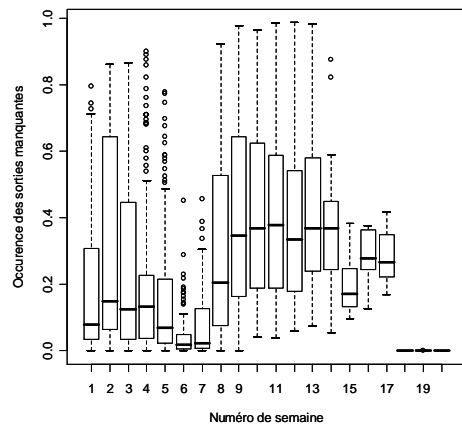
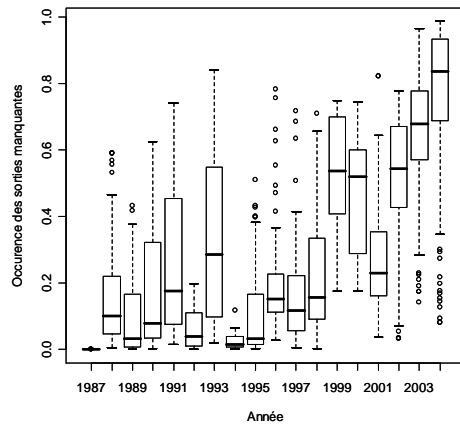
Tableau 9 : Résultats des régressions logistiques sur l'occurrence des sorties manquantes. La probabilité associée par un test du χ^2 est figurée; *ns* = non significatif; * = $P < 0,05$; *** = $P < 0,001$.

Facteurs	Numéro de la pêche			
	1	2	3	4
Année	***	***	***	***
Numéro de la semaine	***	***	***	***
Débit	***	***	***	***
Phase lunaire	<i>ns</i>	<i>ns</i>	***	***
Température _{air}	***	<i>ns</i>	***	<i>ns</i>
Pression atmosphérique	<i>ns</i>	<i>ns</i>	***	***
Pluviométrie	<i>ns</i>	<i>ns</i>	***	***
Vitesse du vent	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Direction du vent	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	*

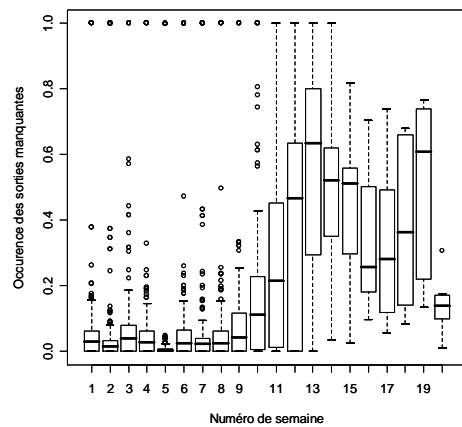
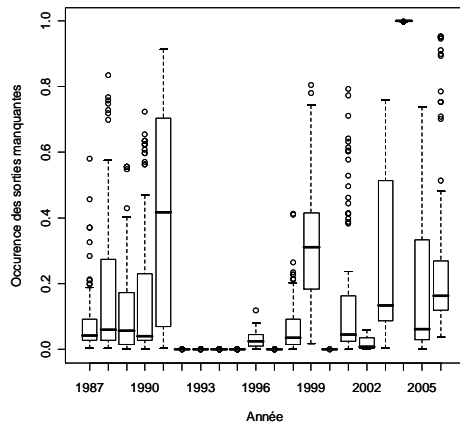
Parmi les variables environnementales testées, le débit était la variable qui expliquait le plus la variabilité de l'occurrence des sorties manquantes (Tableau 9 ; Figure 12). En particulier, les résultats montrent que les pêcheurs 1 et 3 sortaient beaucoup moins quand les débits dépassaient $2250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (modalité 4 ; Figure 12) probablement parce que le risque de casse était trop important.

Les phases lunaires (Figure 12) et la pression atmosphérique (graphiques non représentées) influençaient significativement l'occurrence des sorties manquantes des pêcheries 3 et 4 (Tableau 9). Globalement, ces deux pêcheurs sortaient moins quand la lune était proche de la pleine lune et quand les conditions météorologiques étaient stables (pression atmosphérique élevée, vents orientés à l'est et au nord et vitesse du vent faible). A contrario, aucune variable météorologique n'expliquait significativement l'occurrence des sorties manquantes des pêcheries 1 et 2 (excepté un effet température de l'air pour la pêche 1 qui traduit plutôt un effet temporel). Ce résultat suggère que le choix des pêcheurs 3 et 4 de ne pas aller pêcher est plus clairement basé sur la stabilité des conditions environnementales (temps peu propice à la migration des anguilles argentées et donc à leurs captures) que les pêcheurs 1 et 2.

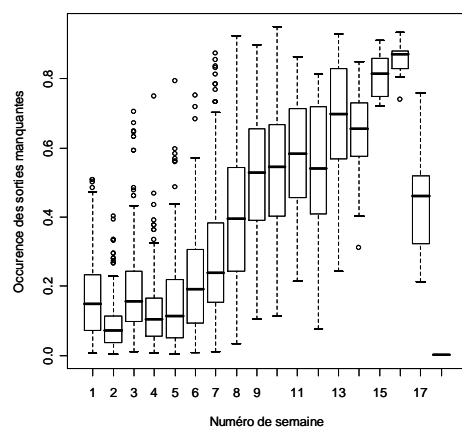
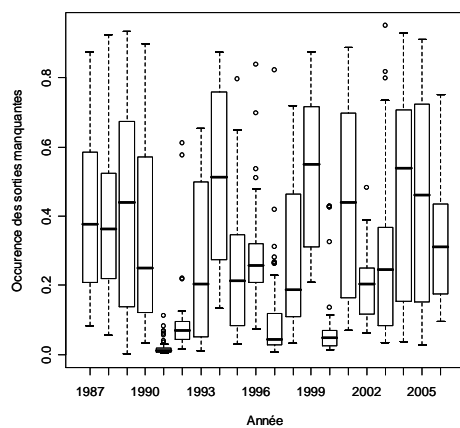
Pêcherie 1



Pêcherie 2



Pêcherie 3



Pêcherie 4

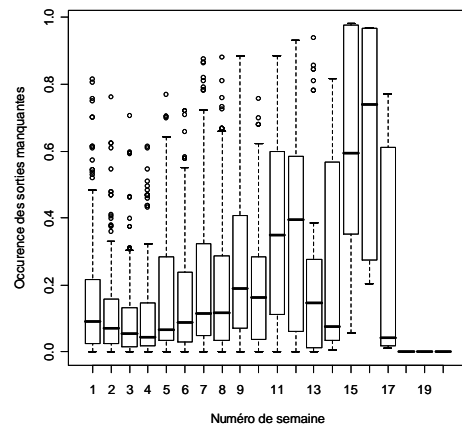
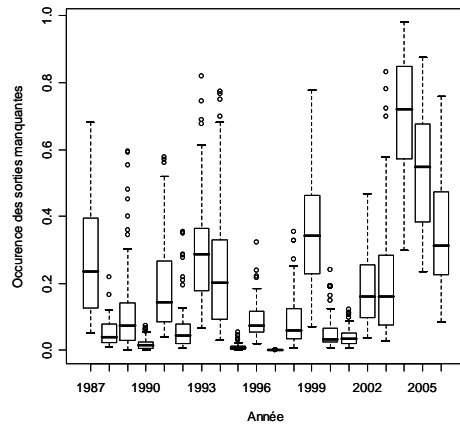
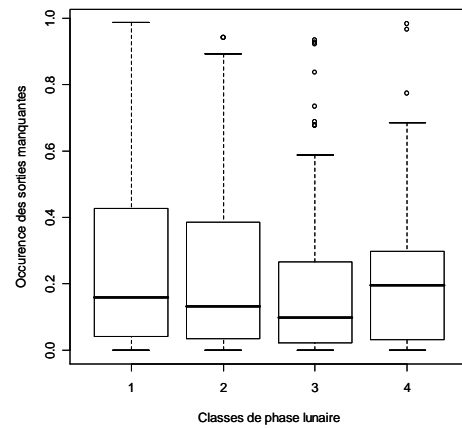
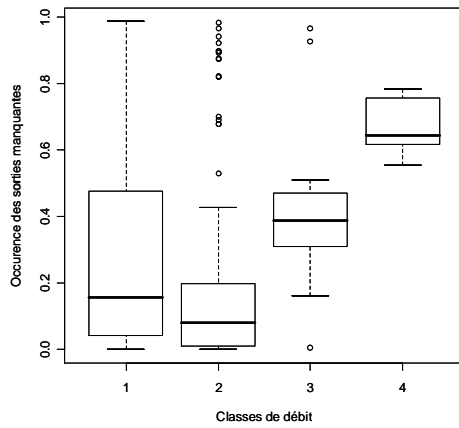
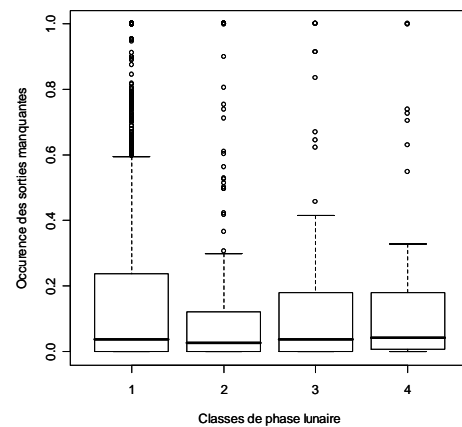
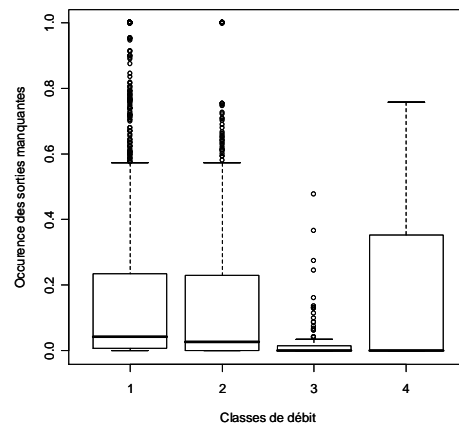


Figure 11 : Boite à moustaches représentant l'occurrence des sorties manquantes des 4 pêcheries en fonction des années et du numéro de la semaine.

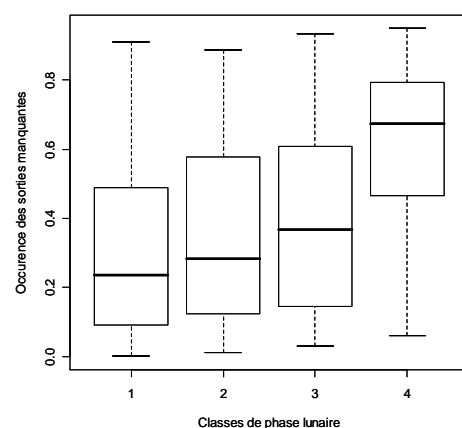
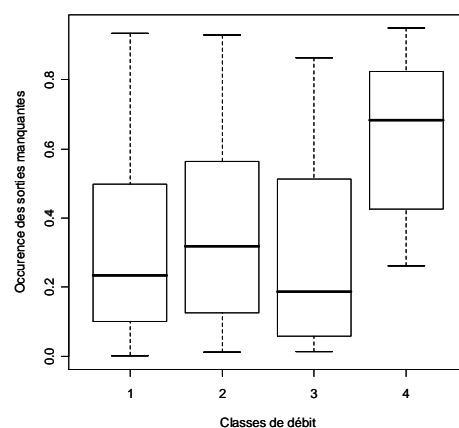
Pêcherie 1



Pêcherie 2



Pêcherie 3



Pêcherie 4

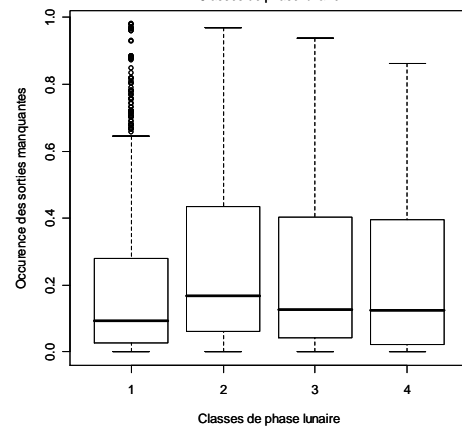
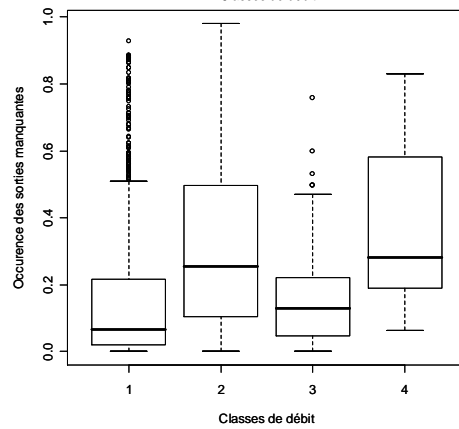


Figure 12 : Boite à moustaches représentant l'occurrence des sorties manquantes des 4 pêcheries en fonction des classes de débit et des phases lunaires.

3.3.1.4 Les CPUE de la pêche 5 : la nouvelle variable dépendante

En conclusion de cette partie, il apparaît que les stratégies de pêche adoptées étaient assez différentes en fonction des pêcheries. En particulier, les sorties manquantes avaient lieu quand les conditions environnementales étaient clémentes (pêcheries 3 et 4) ou de manière plus aléatoire (pêcheries 1 et 2). Ces différences de stratégie peuvent expliquer en partie la grande variabilité des CPUE moyennes observées entre les pêcheries. Cependant la capturabilité probablement très variable des anguilles argentées en fonction de la localisation des guideaux sur le gradient amont-aval de la Loire doit également être prise en compte. Une cinquième série, correspondant à la moyenne des CPUE journalières des quatre pêcheries, a donc été calculée dans le but de limiter l'importante variabilité des CPUE observées entre les pêcheries. De plus, la CPUE journalière relative de cette cinquième série virtuelle a été considérée afin de réduire l'importante variabilité interannuelle des CPUE mais également l'influence de la taille du bassin versant de la Loire sur l'intensité des captures. Les caractéristiques de cette nouvelle série, qui sera la variable à expliquer de notre étude, sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 10 : Caractéristiques par année de la série chronologique de la pêche 5. *I* : intervalle de pêche entre le 1^{er} Octobre et le dernier jour effectif de pêche (en jours) ; *J* : nombre effectif de sortie au sein de *I* ; *F* : fréquence des captures nulles (%).

Année	I	J	CPUE (ang./24h)			CPUE relatives (%)			F
			min	max	$\mu \pm \text{e.t.}$	min	max	$\mu \pm \text{e.t.}$	
1987	84	78	0	880	$146,9 \pm 196,4$	0,0	7,7	$1,3 \pm 1,7$	7,7
1988	113	97	2	939	$119,3 \pm 206,4$	0,0	8,1	$1,0 \pm 1,8$	0,0
1989	138	136	1	906	$74,8 \pm 107,6$	0,0	8,9	$0,7 \pm 1,1$	0,0
1990	104	104	0	709	$106,7 \pm 142,5$	0,0	6,4	$1,0 \pm 1,3$	1,0
1991	138	87	1	760	$98,8 \pm 163,7$	0,0	8,8	$1,1 \pm 1,9$	0,0
1992	66	64	0	861	$123,4 \pm 164,3$	0,0	10,9	$1,6 \pm 2,1$	7,8
1993	85	85	3	483	$89,4 \pm 94,4$	0,0	6,4	$1,2 \pm 1,2$	0,0
1994	92	92	0	1648	$93,8 \pm 210,4$	0,0	19,1	$1,1 \pm 2,4$	10,9
1995	95	93	0	689	$93,5 \pm 142,9$	0,0	7,9	$1,1 \pm 1,6$	2,2
1996	70	66	0	1550	$99,9 \pm 258,7$	0,0	23,5	$1,5 \pm 3,9$	9,1
1997	91	91	1	759	$114,3 \pm 165,7$	0,0	7,3	$1,1 \pm 1,6$	0,0
1998	90	90	1	497	$96,1 \pm 110,5$	0,0	5,7	$1,1 \pm 1,3$	0,0
1999	78	59	2	901	$178,3 \pm 222,7$	0,0	8,6	$1,7 \pm 2,1$	0,0
2000	68	66	5	764	$129,2 \pm 150,4$	0,1	9,0	$1,5 \pm 1,8$	0,0
2001	94	79	1	2403	$145,2 \pm 324,0$	0,0	20,9	$1,3 \pm 2,8$	0,0
2002	60	59	1	578	$147,4 \pm 165,9$	0,0	6,6	$1,7 \pm 1,9$	0,0
2003	106	85	0	1269	$108,0 \pm 193,5$	0,0	13,8	$1,2 \pm 2,1$	12,9
2004	119	81	0	883	$50,0 \pm 121,8$	0,0	21,8	$1,2 \pm 3,0$	3,7
2005	123	106	0	1215	$71,7 \pm 158,2$	0,0	16,0	$0,9 \pm 2,1$	3,8
2006	136	103	0	1292	$89,7 \pm 188,3$	0,0	14,0	$1,0 \pm 2,0$	1,0
μ totale $\pm \text{e.t.}$	97,5 $\pm 24,2$	86,1 $\pm 18,7$	-	1066 ± 543	105,0 $\pm 179,4$	-	11,6 $\pm 5,7$	1,2 $\pm 2,0$	3,0 $\pm 4,2$

En moyenne sur l'ensemble de la période d'étude, 17 semaines étaient nécessaires pour obtenir la totalité des anguilles argentées capturées (Figure 13). Cependant, une grande variabilité des patrons annuels de capture a été observée comme en témoigne les écarts-types importants associés aux CPUE moyennes cumulées. C'est l'année 1992 qui présentait les patrons de captures les plus précoces : en effet, 77% des captures totales annuelles ont été réalisées en seulement 5 semaines. A l'inverse, il a fallu 16 semaines pour obtenir 74% des captures totales annuelles au cours de l'année 2005.

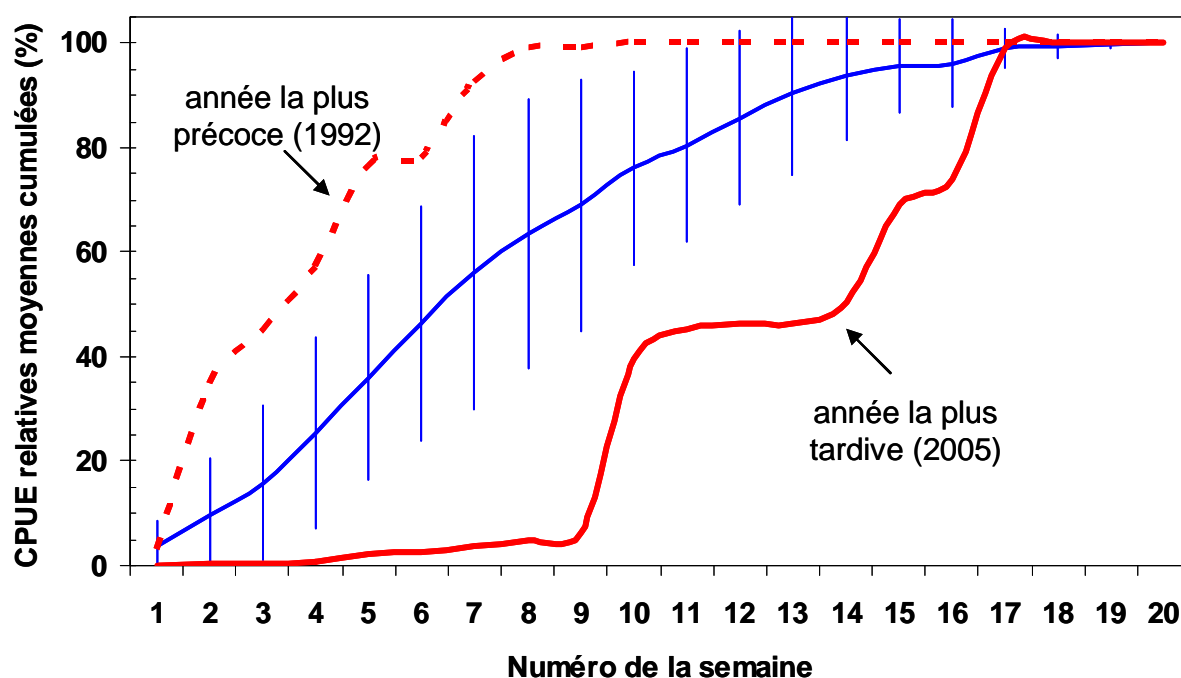


Figure 13 : Evolution hebdomadaire des CPUE cumulées moyennes (\pm e.t.) de la série chronologique P5 entre les années 1987 à 2006 (courbe bleue). Les patrons annuels de captures des années 1992 (courbe pointillée rouge) et 2005 (courbe pleine rouge) sont figurés. La semaine 1 débute au premier octobre et le dernier jour de la semaine 20 est le 15 février.

3.3.2 Le type de temps : une variable météorologique synthétique

L'ACM (Analyse de Correspondances Multiples) a été construite à partir des 8 variables explicatives (variables environnementales) et de la variable illustrative (le type de temps).

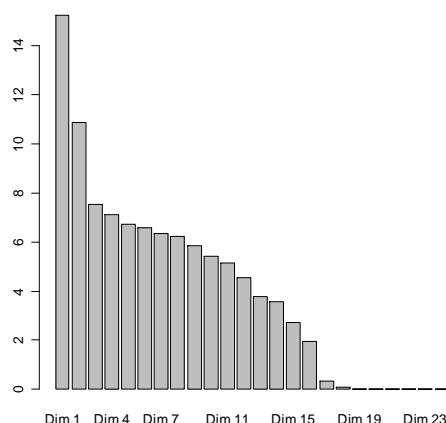


Figure 14 : Valeurs propres associées à chaque dimension de l'ACM contruite à partir de 8 variables explicatives (cf. Tableau 6) et de la variable illustrative (le type de temps).

Le diagramme en barres des valeurs propres a été représenté pour déterminer le nombre d'axes à analyser. Un décrochage flagrant entre l'axe 2 et 3 a été observé (Figure 14) suggérant la sélection des deux premiers axes pour l'analyse. Ces deux premiers axes exprimaient 26,1% de l'inertie totale, c'est-à-dire qu'environ 26% de l'information du tableau de données était résumée par deux dimensions, ce qui est relativement important dans le cadre d'une ACM. Seule l'interprétation des deux premiers axes factoriels a été détaillée ici.

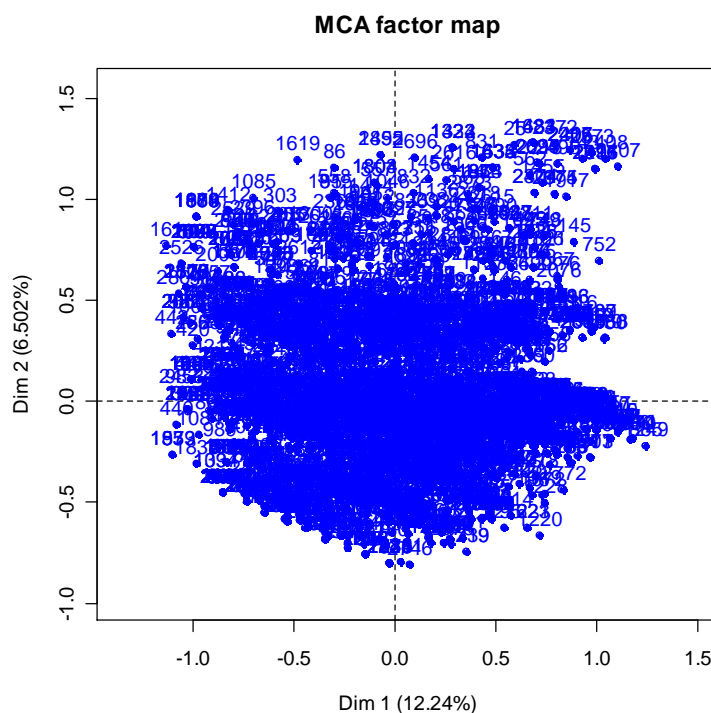


Figure 15 : ACM sur les données environnementales : représentation des individus (N = 2760 jours).

Le graphique des individus (Figure 15) et le graphique avec l'ensemble des modalités des variables qualitatives actives et illustratives (Figure 16) montrent qu'il ne se dégage pas d'organisation particulière du nuage de point. A ce stade, aucun regroupement particulier d'individus n'est détectable.

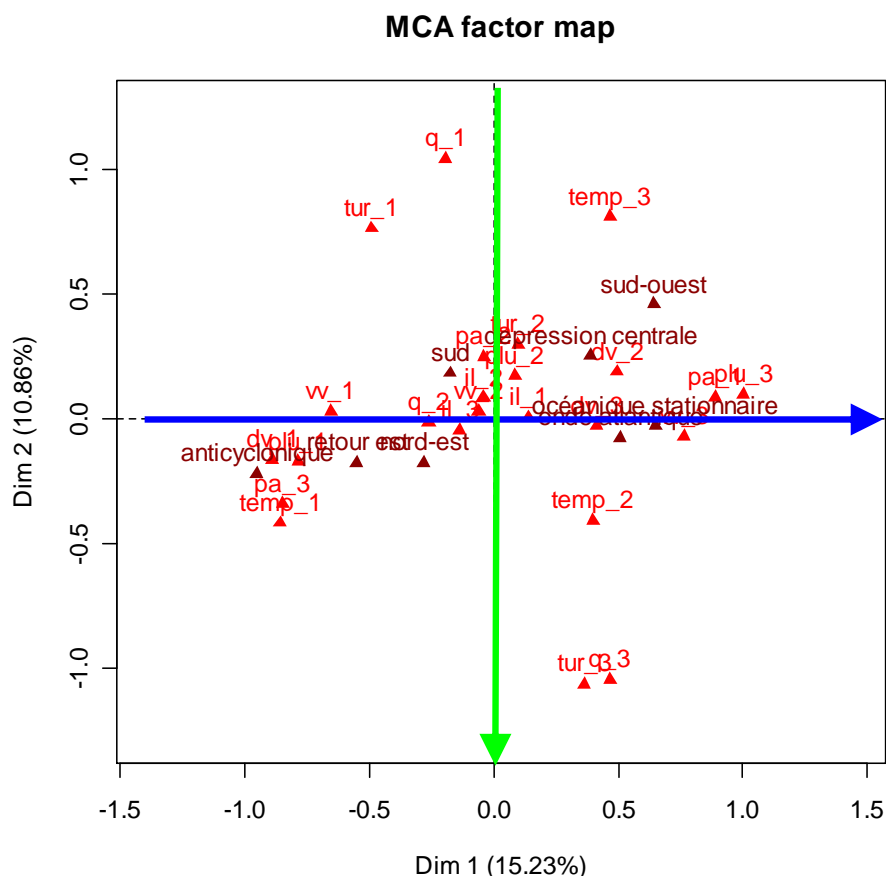


Figure 16 : Représentation des modalités actives (variables environnementales : ▲) et illustratives (8 types de temps : ▲) (cf. tableau 6 pour plus de détails sur les caractéristiques des différentes variables). La flèche bleue représente un axe météorologique (axe 1) et la flèche verte l'axe hydrologique (axe 2).

Dans l'ensemble, le premier axe de la Figure 16 oppose un profil « conditions météorologiques stables » (à gauche) au profil « conditions dépressionnaires » (à droite). On retrouve ainsi des jours caractérisés par des pressions atmosphériques élevées, des températures et vitesses du vent faibles opposées aux jours plus dépressionnaires, pluvieux et venteux. L'axe 2 oppose des jours caractérisés par des conditions hydrologiques faibles (modalités 1 de turbidité et débit ; en haut) et élevés (modalités 3 de ces mêmes variables ; en bas). Pour connaître les variables les plus liées aux axes, i.e. interpréter les axes par variables, les contributions de chaque variable ont été calculées en sommant les contributions des modalités de la variable (Tableau 11). Les variables qui contribuaient le plus à la création de l'axe 1 étaient les variables pluviométrie et pression atmosphérique. Les variables qui contribuaient le plus à la création de l'axe 2 étaient le débit et la turbidité.

Tableau 11 : Contribution de chaque variable explicative à la création des axes 1 et 2 de l'ACM.

Variables explicatives	Axe 1	Axe 2
Direction du vent	16,49	1,21
Indice de luminosité	0,57	0,15
Pression atmosphérique	20,57	3,58
Pluviométrie	24,23	1,34
Débit	4,38	41,65
Température _{air}	15,17	17,19
Turbidité	4,95	32,8
Vitesse du vent	13,64	0,13

Ainsi, il semble que l'axe 1 représente un gradient dépressionnaire croissant entre (à gauche) les modalités *Anticyclonique*, *Retour d'Est* et *Régime de Nord-Est* qui caractérisent les jours froids et secs, et (à droite) les modalités *Onde atlantique* et *Océanique stationnaire* qui ont lieu au cours de jours plus doux, mais agités et pluvieux (Figure 16). Les modalités de la variable illustrative sont toutes très éloignées du gradient des conditions hydrologiques représenté par l'axe 2. Ce résultat est probablement lié au délai qu'il existe entre l'évènement météorologique (i.e. dépression et pluie) et l'observation de la crue. En tout cas, cela montre que si les 8 modalités de la variable *Type de temps* permettent de bien décrire les conditions météorologiques chaque jour, cette variable est beaucoup moins pertinente pour décrire ou prévoir une crue ou une augmentation de turbidité.

En conclusion de cette partie, il apparaît que la variable *Type de temps* est une variable qui synthétise très bien la situation météorologique. Cette variable est particulièrement intéressante dans le cadre de notre modélisation des captures d'anguilles argentées, puisqu'elle intègre à elle seule l'ensemble des informations météorologiques décrites généralement par de nombreuses variables telles que la pression atmosphérique, la température, la pluviométrie, etc. Son utilisation permet donc de limiter significativement d'éventuels problèmes d'autocorrélation qui sont souvent préjudiciables à la fiabilité et à la robustesse des prédictions générées par le modèle. Nos résultats ont montré que cette variable était peu liée aux conditions hydrologiques. On peut donc envisager sereinement d'associer cette variable *Type de temps* aux variables hydrologiques (Débit et Turbidité) dans les modèles, pour décrire et prédire au mieux les captures d'anguilles argentées.

3.3.3 Déterminisme environnemental du $J_{5\%}$

Le $J_{5\%}$ variait beaucoup en fonction des années (coefficient de variation : 92%). En effet, il pouvait être atteint très précocement (dès le premier jour légal de pêche ; année 1994) ou beaucoup plus tardivement (55 jours après le 1^{er} Octobre ; année 2005) (Figure 17). Sur la période d'étude, le $J_{5\%}$ moyen était de $15,6 \pm 14,3$ jours et il augmentait significativement (Anova ; $P < 0,05$) entre la première décade (années 1987-1996 ; moyenne = $8,1 \pm 5,5$ jours) et la seconde décade (années 1997-2006 ; moyenne = $23,1 \pm 16,7$ jours).

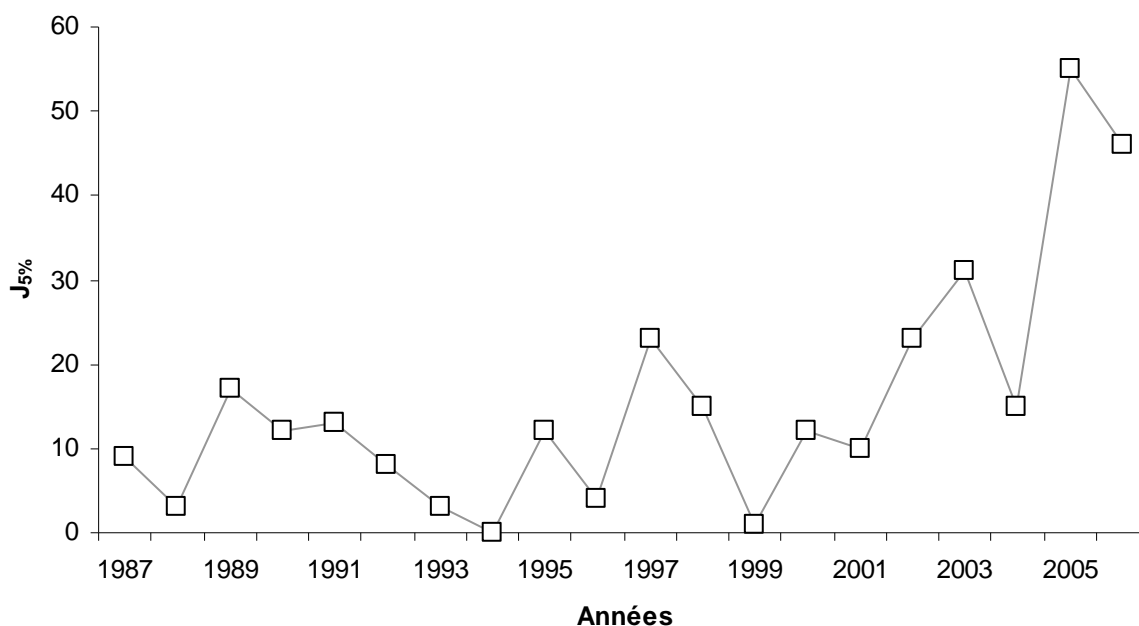


Figure 17: Evolution interannuelle du $J_{5\%}$ (nombre de jours nécessaires pour capturer 5% des captures totales annuelles à partir du 1^{er} Octobre) calculé sur la série de la pêcherie 5.

L'importante variabilité interannuelle du $J_{5\%}$ était faiblement expliquée par les variations des valeurs moyennes, maximales et cumulées de température et de débit, et ce sur l'ensemble des périodes considérées (mois seul ou combinaisons de 2 à 7 mois). En effet, la meilleure relation observée, qui correspondait à la température moyenne relevée entre les mois de Juillet et Octobre, ne contribuait à l'explication que de 38% de la variabilité du $J_{5\%}$ (régression linéaire ; $r^2_{\text{ajusté}} = 0,38$; $P < 0,01$). Ces résultats rendent impossibles la prédiction du début de la période de vigilance. Ainsi, le début de la modélisation des captures d'anguilles argentées considérée dans cette étude est fixé au 1^{er} Octobre de chaque année, date légale d'ouverture de la pêche professionnelle.

3.3.4 Modélisation des CPUE relatives d'anguilles argentées

3.3.4.1 Analyse de sensibilité « Leave One Out »

La période d'apprentissage influençait relativement peu l'architecture des modèles binomiaux et log-normaux (Tableau 12).

L'occurrence des anguilles argentées était expliquée dans 90% des cas (18 modèles binomiaux sur 20) par l'association de deux facteurs : la classe de turbidité de la veille de la capture et le numéro de la semaine. Pour les 10% restant, la procédure *stepAIC* a conduit à la sélection d'un facteur supplémentaire (le type de temps observé deux jours avant la capture ; modèles 9 et 18).

90% des modèles log-normaux (18 modèles sur 20) possédaient la même architecture. Ces facteurs, selon leur ordre d'introduction dans les modèles étaient : l'indice de luminosité estimé la nuit de la capture, la variabilité du débit et la turbidité observées la veille de la capture, le numéro de la semaine et le type de temps avec un délai de deux jours (Tableau 12). Pour le modèle 4, seul le délai de la variable type de temps était différent (délai de 4 jours). Pour le modèle 19, la variabilité journalière de la turbidité observée 4 jours avant la capture a été sélectionnée en lieu et place de la variable turb [1].

Finalement, l'architecture du modèle le plus largement représenté (80% des modèles obtenus ; modèles 1-3, 5-8, 10-17 et 20) à l'issue de cette analyse était :

→ pour la modélisation de l'occurrence : turb[1] et sem
→ pour la modélisation des CPUE relatives positives : il, qvar[1], turb[1], sem et meteo[2]

Cette association de facteurs constitue l'architecture du futur modèle final, qui sera après validation, basé sur les 20 années de captures. L'influence des facteurs sélectionnés pour expliquer l'occurrence et les CPUE positives d'anguilles argentées sera analysée en prenant l'exemple du modèle 1, modèle représentatif des 17 autres modèles qui présentent la même structure et par conséquent du futur modèle final.

3.3.4.2 Modèle binomial (présence/absence) :

Les captures nulles d'anguilles argentées représentaient 2,8% des 1722 nuits de pêche réalisées entre le 1^{er} Octobre et le 15 Février des années 1987 à 2006. Par conséquent, l'occurrence des anguilles argentées, quels que soient les facteurs testés et les périodes d'apprentissage sélectionnées, était très élevée et dépassait souvent 95%. Les facteurs les plus largement sélectionnés pour expliquer l'occurrence des anguilles argentées étaient la turbidité et le numéro de la semaine (Tableau 12 ; Tableau 13). Les résultats du modèle 1 montraient que les anguilles étaient en effet significativement moins présentes quand la turbidité était la plus élevée (classe 3 ; Figure 18). De même, leur présence diminuait significativement entre les semaines 6 et 13 (Figure 18). Ces tendances étaient identiques pour tous les autres modèles binomiaux. Cependant, ces résultats sont à interpréter avec précaution compte tenu de l'occurrence très élevée (> 95%) observée pour chacune des modalités des deux facteurs (Figure 18).

Tableau 12 : Facteurs sélectionnés par les vingt modèles pour expliquer les variabilités d'occurrence (modèle binomial) et des CPUE positives (modèle log-normal) d'anguilles argentées de la pêche 5. *turb* : classe de turbidité journalière (en NTU); *turbvar* : classe de variabilité journalière de turbidité (en %); *sem* : numéro de la semaine ; *meteo* : classe de type de temps ; *il* : classe d'indice de luminosité ; *qvar* : classe de variabilité journalière de débit (en %). Le délai des facteurs sélectionnés (en nombre de jours) est figuré entre crochets.

Numéro du modèle	Période d'apprentissage	Modélisation des captures							
		Modèle binomial : CPUE _{i,0/1}			Modèle log-normal : CPUE _{i+}				
1	1988-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
2	1987,1989-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
3	1987-1988, 1990-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
4	1987-1989, 1991-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [4]
5	1987-1990, 1992-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
6	1987-1991, 1993-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
7	1987-1992, 1994-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
8	1987-1993, 1995-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
9	1987-1994, 1996-2006	turb [1]	sem	meteo [2]	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
10	1987-1995, 1997-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
11	1987-1996, 1998-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
12	1987-1997, 1999-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
13	1987-1998, 2000-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
14	1987-1999, 2001-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
15	1987-2000, 2002-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
16	1987-2001, 2003-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
17	1987-2002, 2004-2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
18	1987-2003, 2005-2006	turb [1]	sem	meteo [2]	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]
19	1987-2004, 2006	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	sem	meteo [2]	turbvar [4]
20	1987-2005	turb [1]	sem	-	il	qvar [1]	turb [1]	sem	meteo [2]

Tableau 13 : Facteurs sélectionnés par la procédure *stepAIC* du modèle 1 pour expliquer la variabilité de l'occurrence des anguilles argentées ($CPUE_{i,0/1}$). Les facteurs non sélectionnés sont notés par une croix. Les résultats des tests de χ^2 et leurs probabilités associées sont aussi figurés : *** = $P < 0,001$. Le délai (en nombre de jours) est figuré entre crochets.

Facteurs	$CPUE_{i,0/1}$
Turbidité	[lag1]
$P(\chi)$	***
Numéro de la semaine	[]
$P(\chi)$	***
Variabilité journalière de débit	×
$P(\chi)$	-
Type de temps	×
$P(\chi)$	-
Indice de luminosité	×
$P(\chi)$	-

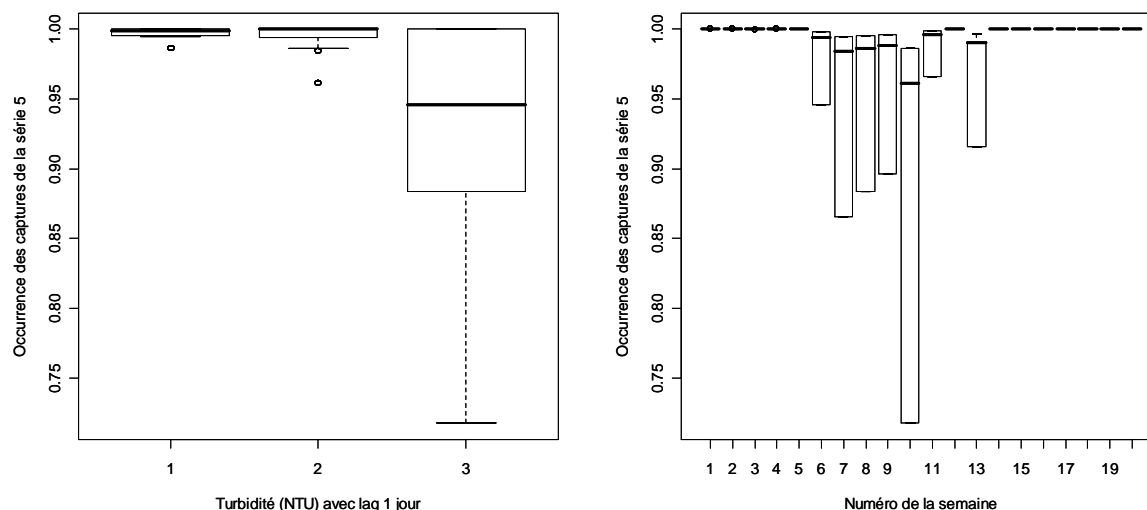


Figure 18 : Occurrence modélisée selon les coefficients du modèle 1, des anguilles argentées en fonction de la classe de turbidité (à gauche) et du numéro de la semaine (à droite).

3.3.4.3 Modèle log-normal (CPUE relatives >0)

Pour le modèle 1 mais également pour tous les autres modèles, tous les facteurs hydrologiques (Débit et Turbidité), météorologiques (Indice de luminosité et Type de temps) et temporel (Numéro de la semaine) ont été sélectionnés selon la procédure *stepAIC* dans les modèles log-normaux finaux (Tableau 12 ; Tableau 14). Tous ces facteurs expliquaient donc une part significative et complémentaire (deux facteurs corrélés qui portent une information similaire n'auraient pas été sélectionnés selon cette procédure) de l'importante variabilité des CPUE relatives d'anguilles argentées observées. L'ordre d'introduction des facteurs dans le modèle est fonction du niveau d'explication de la variabilité des captures. Ces facteurs classés dans l'ordre décroissant de leur contribution étaient : l'Indice de luminosité, la variabilité journalière de Débit, la Turbidité, le Numéro de la Semaine et enfin le Type de temps (Tableau 12 ; Tableau 14).

C'est l'Indice de luminosité observé pendant la nuit de pêche, et non sa variabilité journalière, qui a été sélectionné dans tous les modèles finaux. Ce résultat suggère que ce facteur agit de manière instantanée sur les captures d'anguilles argentées. Les CPUE d'anguilles argentées étaient significativement plus importantes quand l'Indice de luminosité était faible (classe 1 vs classes 2 et 3 ; Figure 19), confirmant que la lumière peut inhiber le comportement migratoire.

Les CPUE d'anguilles argentées augmentaient significativement avec la variabilité journalière de débit (Figure 19). Plus précisément, les CPUE moyennes étaient significativement plus importantes quand le delta journalier de débit égalait ou dépassait 10% d'augmentation (classes 3 à 5 ; Figure 19). Parmi tous les délais testés, c'est le delta journalier de débit du jour précédent la capture qui a été sélectionné, suggérant qu'il existait un jour de décalage entre une crue significative ($\geq 10\%$ d'augmentation journalière) et un pic de captures.

C'est la valeur absolue (vs variabilité journalière) de Turbidité qui a été sélectionnée dans le modèle 1 comme dans la plupart des autres modèles (Tableau 12 ; Tableau 14). Ce résultat suggère que probablement la Turbidité est une variable qui inhibe l'activité migratoire à partir d'une valeur seuil, plutôt qu'une variable qui initie la migration (variabilité journalière). Les résultats ont confirmé que les CPUE d'anguilles argentées étaient significativement plus faibles quand la turbidité était strictement inférieure à 10 NTU (classe 1 ; Figure 19). Parce que la Turbidité n'est pas à notre connaissance prévisible, nous rappelons que la sélection de cette variable avec un délai d'un jour (lag1) a été imposée dans les modèles. Cependant, les analyses ont montré que la turbidité observée la nuit même (sans lag) de la pêche expliquait encore plus la variabilité des captures. Ce résultat suggère que la Turbidité, comme l'Indice de luminosité, agit de manière instantanée sur l'activité migratoire, ce qui renforce l'hypothèse du facteur inhibiteur.

Les CPUE variaient également significativement entre le Numéro de la semaine (Tableau 14 ; Figure 19). Cependant, aucune tendance temporelle claire n'a pu être mise en évidence dans le modèle 1 comme dans tous les autres modèles (régressions linéaires, $P > 0,05$).

Enfin, le Type de temps était une variable qui influençait les captures d'anguilles argentées (Tableau 12 ; Tableau 14). Parmi les délais testés, c'est le Type de temps qui prévalait deux jours avant la nuit de pêche qui expliquait le plus la variabilité des captures. Plus précisément, les CPUE étaient significativement plus faibles quand des régimes Nord-Est, Sud et Anticycloniques étaient observés (Figure 19).

Tableau 14 : Résultats du GLM sur les CPUE relatives positives ($CPUE_{i+}$) du modèle 1. Les facteurs sélectionnés par la procédure *stepAIC* sont figurés selon leur ordre d'introduction dans le modèle. Le délai (en nombre de jours) est figuré entre crochets. Le résultat des tests F et leurs probabilités associées sont figurés : *** = $P < 0,001$.

Facteurs	$CPUE_{i+}$
Indice de luminosité	[]
F	15,5
$P(F)$	***
Variabilité journalière de débit	[lag1]
F	104,0
$P(F)$	***
Turbidité	[lag1]
F	85,1
$P(F)$	***
Numéro de la semaine	
F	7,2
$P(F)$	***
Type de temps	[lag2]
F	7,2
$P(F)$	***

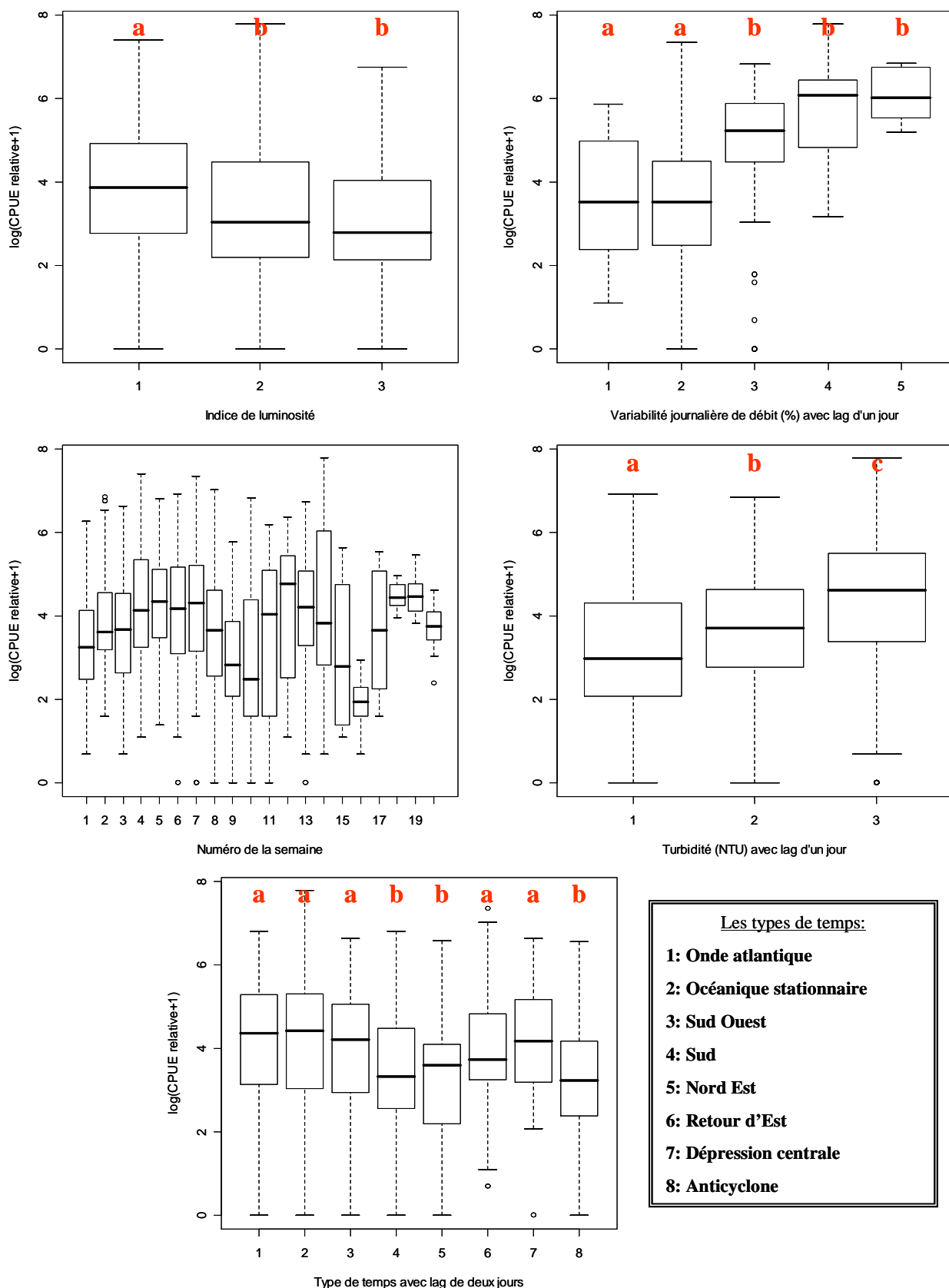


Figure 19 : Boîtes à moustaches représentant la médiane, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles et l'intervalle des CPUE relatives log-transformées (%) en fonction des modalités des facteurs sélectionnés dans le modèle 1 selon la procédure *stepAIC*. Les ronds vides représentent les « outliers ». Des lettres (a ou b) différentes signifient que les modalités sont différentes ($P < 0,001$) selon le post-hoc test de Tukey (pour plus de détails sur les variables, cf. Tableau 7).

3.3.4.4 Analyse des résidus

Pour le modèle 1 comme pour tous les autres modèles réalisés, l'analyse graphique des résidus ne révèle pas de manquement majeur aux hypothèses de modélisation (Figure 20). Les graphiques de gauche confirment en effet que les résidus étaient répartis aléatoirement. Le QQplot montre que les points étaient relativement bien alignés. Ce résultat suggère qu'il n'y avait pas d'incompatibilité manifeste avec une distribution normale et par conséquent l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus était vérifiée. Enfin, seules trois observations atypiques (parmi 1643) ont été détectées par le graphique de Cook, ce qui est très faible.

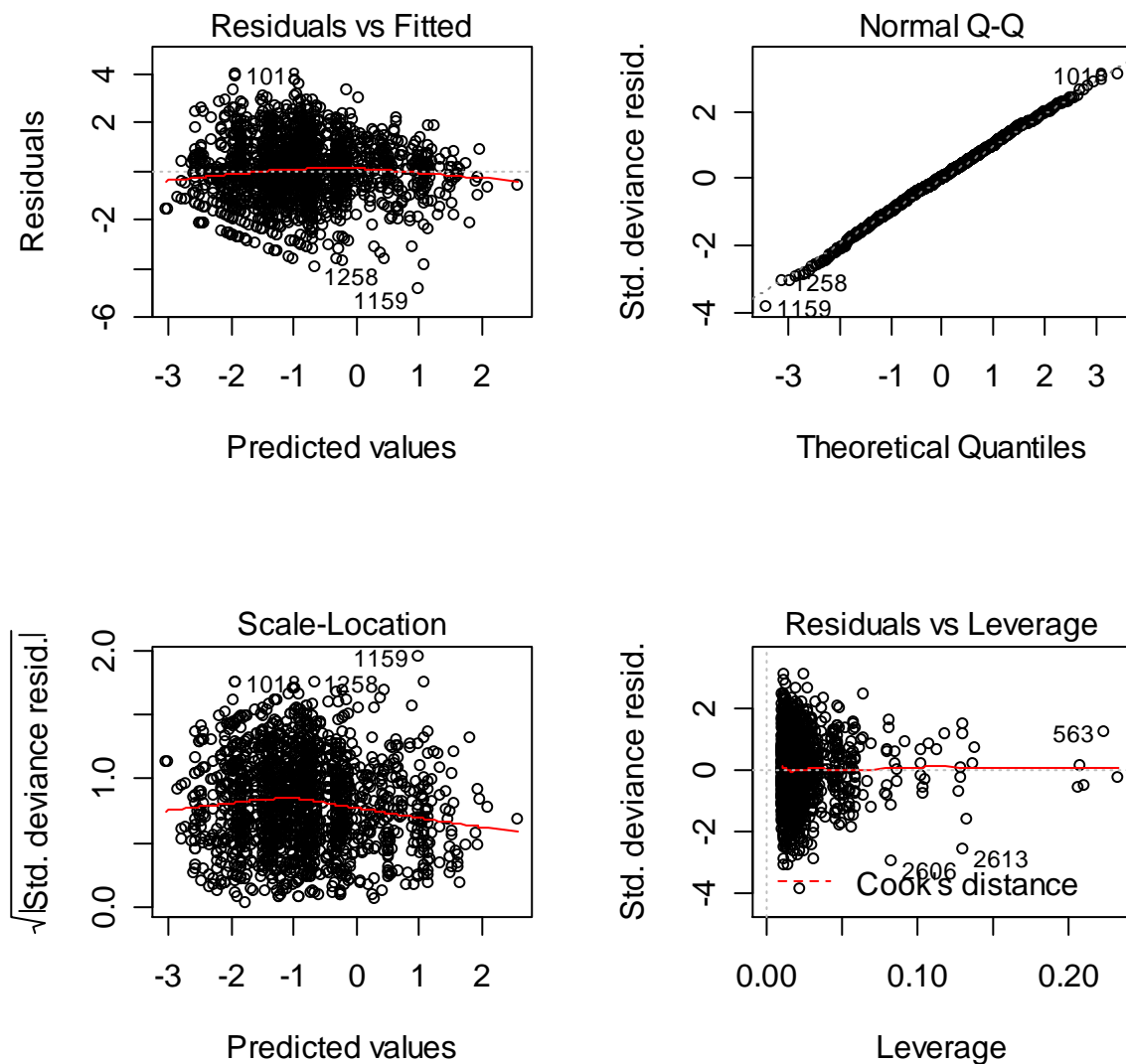


Figure 20 : Analyse des résidus obtenus pour le modèle 1. Graphiques des résidus (à gauche), graphique des QQplot (en haut à droite) et graphique de Cook (en bas à droite)

3.3.5 Prédiction des captures sur 20 années « test »

Pour chacune des 20 années « test » considérée, les pics d'anguilles argentées observés et prédits ont été caractérisés puis comptabilisés pour estimer les taux de prédiction vérifiée, de sous-prédiction et de sur-prédiction (Figure 21). Les taux de prédiction vérifiée variaient entre 22% (modèle 9 ; année 1995) et 100% (e.g. modèle 11 ; année 1997) pour une valeur moyenne de $73,6 \pm 19,3\%$, ce qui signifie qu'environ 3 pics observés sur 4 étaient effectivement prédits par les modèles (Tableau 15). Les taux de sur-prédiction variaient entre 0% (e.g. modèle 9 ; année 1995) et 63,6% (année 2005 ; modèle 19) pour une valeur moyenne de $35,4 \pm 17\%$, c'est-à-dire qu'approximativement un pic prédit sur trois n'était pas confirmé sur le terrain. Quand seuls les modèles qui présentaient la même architecture (i.e. modèles 1-3, 5-8, 10-17 et 20) étaient considérés, les taux moyens de prédiction vérifiées et sur-prédiction étaient de $77,8 \pm 14,4\%$ (min - max : 57,1 - 100%) et $34,6 \pm 15,0\%$ (0 - 57,1 %).

Les résultats issus de la méthode utilisée ici sont à considérer à titre informatif pour deux raisons principales. Tout d'abord, les résultats sont très dépendants des valeurs seuils fixées pour les CPUE prédites et observées. De plus, une fois caractérisés, tous les pics sont considérés équivalents, qu'il dépasse de peu ou très largement la valeur seuil considérée (Figure 21). Même si l'ajustement des CPUE relatives observées et prédites par le modèle final (basé sur une modélisation des 20 années de captures) est très acceptable (cf. Annexe 2), ces résultats doivent être complétés par une approche qui intègre la proportion réelle d'anguilles argentées échappées (cf. paragraphe suivant).

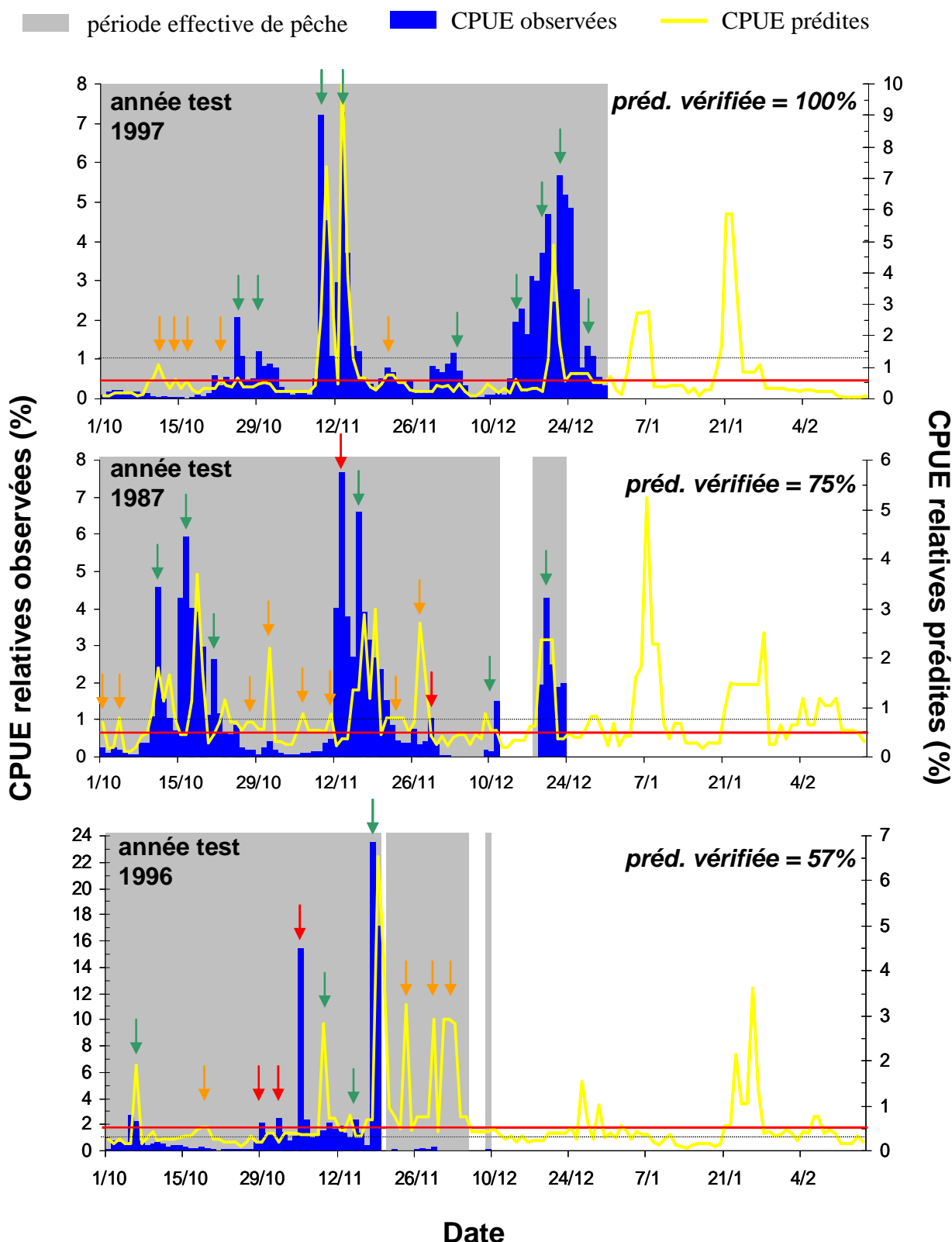


Figure 21: Analyse comparative des pics observés et prédits de trois années « test » pour lesquelles les prédictions vérifiées étaient maximale (1997), moyenne (1987) et minimale (1996). Flèche verte : pics observés et prédits ; flèche orange : pics non observés et prédits ; flèche rouge : pics observés et non prédits. La valeur seuil des CPUE observées (1,0%) est figurée par un trait pointillé noir et la valeur seuil des CPUE prédites (0,5%) par un trait plein rouge.

Tableau 15 : Taux de prédictions vérifiées, sous-prédictions et sur-prédictions estimés sur la totalité des années « test ».

Type de modèle	N° du modèle	Année test considérée	Nb de pics observés et prédits (flèche verte)	Nb de pics non observés et prédits (flèche orange)	Nb de pics observés et non prédits (flèche rouge)	Nb total de pics observés	Nb total de pics prédits	Prédiction vérifiée (en %)	Sous-prédiction (en %)	Sur-prédiction (en %)
architecture finale	1	1987	6	8	2	8	11	75,0	25,0	57,1
	2	1988	5	2	2	7	7	71,4	28,6	28,6
	3	1989	7	5	3	10	12	70,0	30,0	41,7
	5	1991	4	3	2	6	7	66,7	33,3	42,9
	6	1992	4	4	1	5	8	80,0	20,0	50,0
	7	1993	8	2	6	14	10	57,1	42,9	20,0
	8	1994	5	4	2	7	9	71,4	28,6	44,4
	10	1996	4	4	3	7	8	57,1	42,9	50,0
	11	1997	9	5	0	9	14	100,0	0,0	35,7
	12	1998	11	3	3	14	14	78,6	21,4	21,4
	13	1999	8	0	0	8	8	100,0	0,0	0,0
	14	2000	11	4	2	13	15	84,6	15,4	26,7
	15	2001	6	4	1	7	10	85,7	14,3	40,0
	16	2002	9	3	0	9	12	100,0	0,0	25,0
	17	2003	6	3	4	10	9	60,0	40,0	33,3
	20	2006	7	8	1	8	15	87,5	12,5	53,3
autre architecture	4	1990	8	3	3	11	11	72,7	27,3	27,3
	9	1995	2	0	7	9	2	22,2	77,8	0,0
	18	2004	7	6	1	8	13	87,5	12,5	46,2
	19	2005	4	7	5	9	11	44,4	55,6	63,6

3.3.6 Maximisation du compromis échappement/perte de production

Afin de décider de l'arrêt des turbines, on s'attache à fixer des valeurs seuils de CPUE prédites (exprimée en % du nombre total d'anguilles dévalantes prédites par les modèles) à partir desquelles un arrêt de turbinage est déclenché. Les arrêts de turbine fictifs ont été simulés sur toutes les années « test » en utilisant 24 valeurs seuils de CPUE prédites incrémentées de 0,05% (min = 0,05% ; max = 5%), mais également sur les 16 années « test » pour lesquelles la prédiction a été réalisée avec les modèles à architecture finale (i.e. toutes les années « test » exceptées 1990, 1995, 2004 et 2005). Dans les deux cas, l'échappement moyen d'anguilles argentées ainsi que le nombre de jours d'arrêt de turbines augmentaient quand la valeur seuil diminuait (Figure 22). Par exemple pour toutes les années « test », l'utilisation de la valeur seuil 5,0% aurait permis un échappement en anguilles argentées d'environ $3 \pm 4,8\%$ pour environ une nuit d'arrêt de turbinage. Pour ces mêmes années « test », ce sont en moyenne $92,1 \pm 12,7\%$ des anguilles argentées qui auraient été sauvées en $67,3 \pm 14,3$ nuits si la valeur seuil 0,2% avait été utilisée (Figure 22).

Pour les deux groupes d'années « test » considérées, le patron d'évolution de l'échappement moyen en fonction du seuil d'arrêt de turbinage est caractérisé par des échappements inférieurs à 20% pour les trois plus grandes valeurs de seuil (5,0 à 3,0%), puis par une augmentation modérée mais constante entre la valeur seuil 2,0% (environ 20,5% d'échappement) et 0,9% (environ 38,5% d'échappement), et enfin une augmentation plus nette de l'échappement moyen à mesure que la valeur seuil diminue entre 0,8 et 0,1% (42% et 99% d'échappement respectivement). La valeur seuil qui maximise le compromis échappement/perte de production doit donc être dans la gamme 0,8 - 0,1%. Au sein de cette gamme, une augmentation significative du nombre de jours d'arrêt de turbinage a été observée entre les valeurs seuils 0,3 et 0,2% (Figure 22). Ce résultat suggère que l'utilisation d'une valeur seuil inférieure à 0,2% aurait pour conséquence d'augmenter sensiblement le nombre d'arrêt de turbines pour un gain en échappement réduit. Par conséquent, la valeur seuil de 0,3% semble être celle qui offre le meilleur compromis entre échappement et arrêt de turbinage. Si cette valeur seuil avait été utilisée sur la période des 16 années « test », elle aurait permis un échappement annuel en anguilles argentées d'environ $83,5 \pm 12,1\%$ pour $52,2 \pm 12,8$ nuits d'arrêt de turbinage. Cet échappement aurait été de $81,0 \pm 15,0\%$ en $51,8 \pm 13,6$ nuits sur les 20 années « test ». Cependant, la sélection de la valeur seuil incombe aux gestionnaires en fonction de leurs objectifs de production et/ou d'échappement. En effet, le plan de gestion Européen préconise un échappement minimal de 40% des géniteurs, ce qui constitue une cible basse à atteindre pour les gestionnaires. A l'opposé, une cible de 80% d'échappement peut constituer une cible maximale. Les distributions des échappements et nombres de jours d'arrêts de turbines obtenues pour chaque valeur seuil, et pour les deux groupes d'années, suivent toutes une loi normale (test de Lilliefors, tous les $P > 0,05$). Par conséquent, 70% de la distribution des valeurs moyennes présentées sont comprises dans un intervalle qui varie entre la moyenne plus un écart-type et la moyenne moins un écart-type. Ainsi, si l'objectif est de laisser échapper au minimum 40% des dévalantes, alors une valeur seuil de 0,6% des CPUE prédites doit être retenue quand les 16 années « test » sont considérées. Elle assurera, avec une probabilité de réalisation de 70%, un échappement minimum de 40% (et en moyenne de 57,4 %) pour un nombre maximal de jours d'arrêt de turbines de 35 jours (27 jours en moyenne). Si c'est l'objectif haut qui est visé, alors c'est la valeur seuil 0,2% qui doit être sélectionnée. Elle assurera, avec une probabilité de réalisation de 70%, un échappement minimum de 88% (et en moyenne 94 %) pour un nombre maximal de jours d'arrêt de turbines de 80 jours (67 jours en moyenne) (Figure 22).

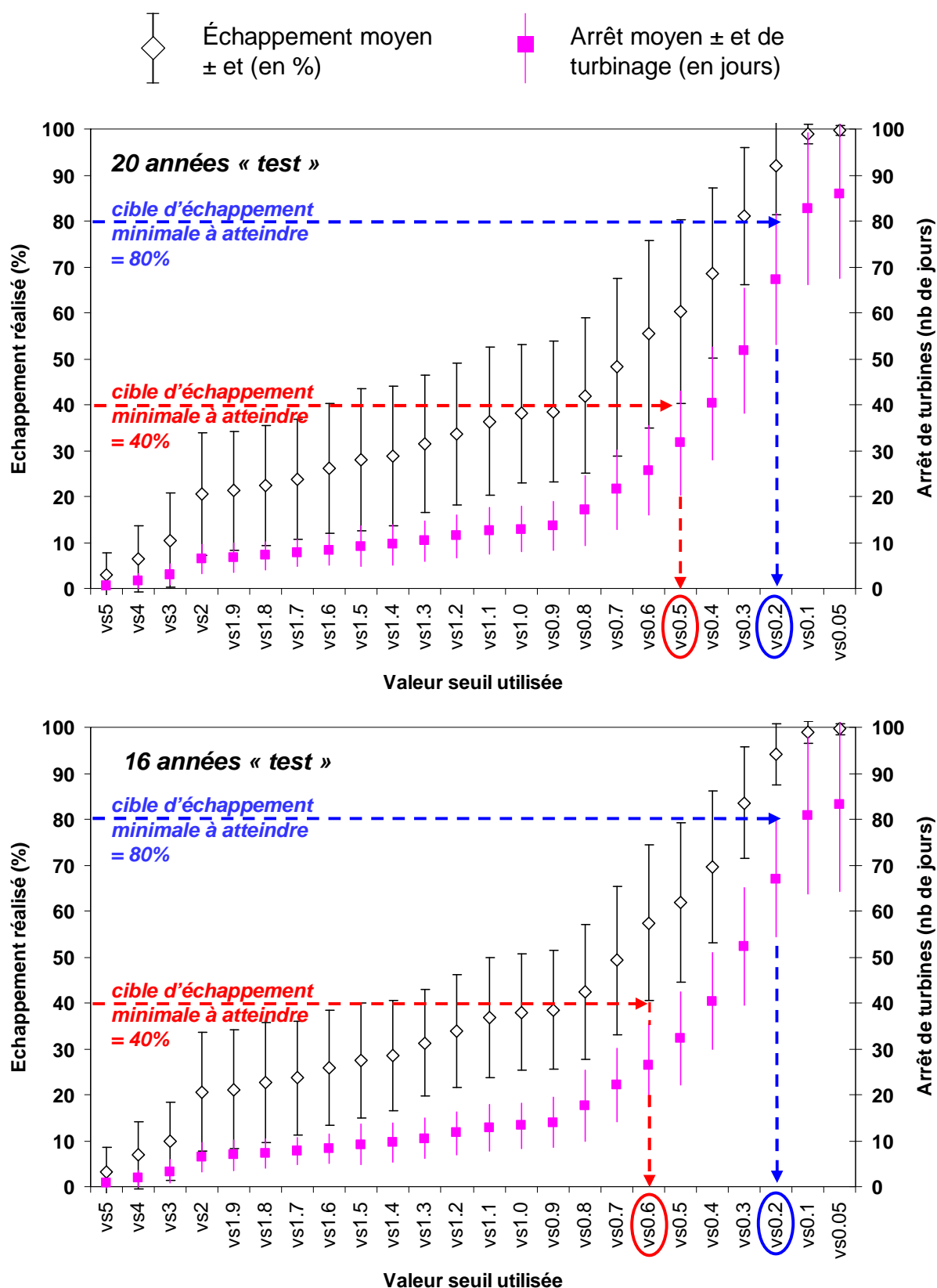


Figure 22 : Evolutions moyennes \pm e.t. de l'échappement en anguilles argentées réalisé et du nombre de jours d'arrêt de turbine observées en fonction du niveau des valeurs seuils utilisées (de 5,0 à 0,05%) simulées pour toutes les années « test » (haut ; N = 20 années) et pour les années testées par les modèles à architecture finale (bas ; N = 16 années). Les valeurs seuils utilisées sont appliquées aux CPUE prédites par les différents modèles.

Un dernier critère, cette fois plus pratique, qui peut aider le gestionnaire à sélectionner une valeur seuil particulière, est la distribution des plages d'arrêt de turbines. Ces distributions ont été estimées pour toutes les valeurs seuils qui garantissent un échappement minimal en anguilles argentées compris entre 40% (valeur seuil = 0,6%) et 80% (0,2%) (Figure 23). Globalement, quelle que soit la valeur seuil utilisée, 36% des arrêts de turbinage consistent en un arrêt ponctuel d'une seule nuit. 36% des arrêts sont des plages qui varient entre deux et quatre nuits consécutives. Enfin, les arrêts de 4 nuits et plus (maximum observé = 66 nuits consécutives pour l'année 1987 et valeur seuil = 0,2%) représentent 28% des cas. De plus, plus la valeur seuil sélectionnée était faible, plus la fréquence des plages d'arrêts de plus de 15 nuits augmentait: elle était de 2,5% pour la valeur seuil 0,6% et atteignait 17,0% pour la valeur seuil 0,2% (Figure 23).

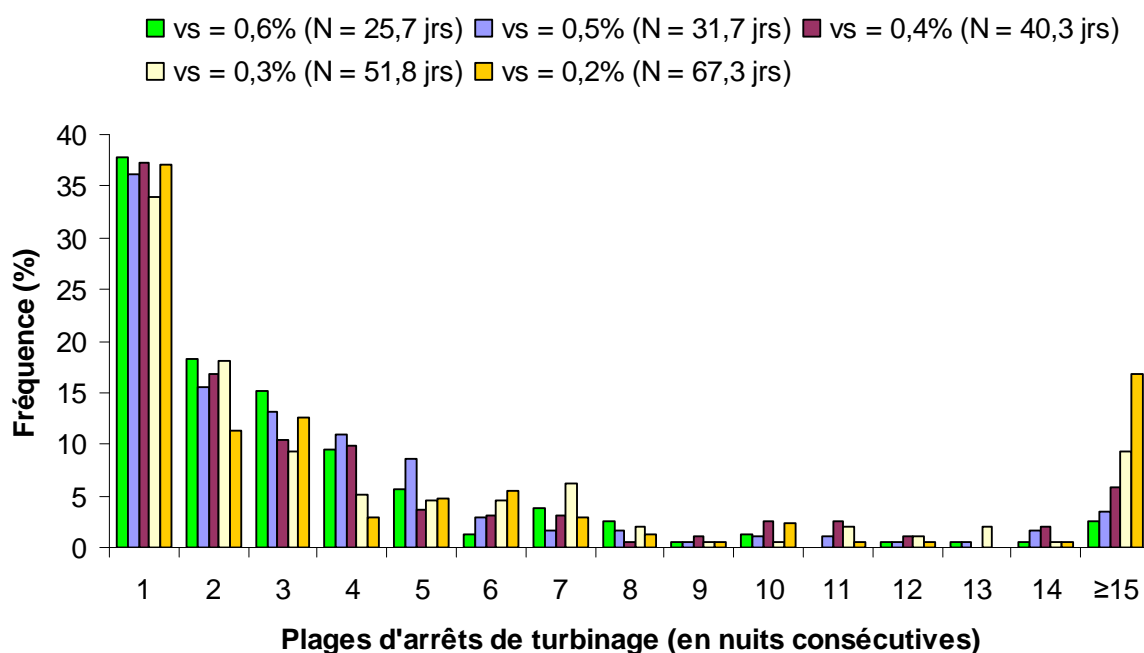


Figure 23: Distributions des plages d'arrêt de turbine (en nombre de nuits consécutives), obtenues après simulations sur l'ensemble de la période d'étude (1987-2006) et basées sur les valeurs seuils de 0,6% à 0,2%. Les nombres moyens d'arrêt de turbines observés par an sont notés entre parenthèses.

3.3.7 Gain obtenu par les gestionnaires

Les CPUE relatives observées ont été classées chaque année par ordre décroissant (Figure 24). Les CPUE relatives journalières maximales variaient entre 23,50% et 5,75% pour les années 1996 et 1998 respectivement. La courbe moyenne des CPUE relatives classées a été également représentée (Figure 25). Cette courbe représente le gain maximal qu'offrirait un « modèle idéal » capable de prédire chaque année la totalité des CPUE journalières maximales. Les résultats montrent qu'en moyenne (min = 15 jours en 1996 ; max = 45 jours en 1989) sur la période d'étude 1987-2006, 25 jours de CPUE relatives étaient nécessaires pour capturer environ 81% du flux total d'anguilles argentées (Figure 25). L'utilisation de notre modèle avec la valeur seuil de 0,3% aurait permis un même niveau d'échappement (i.e. 83,5%) pour 52 nuits d'arrêt de turbines, soit 27 jours de plus que le « modèle idéal ».

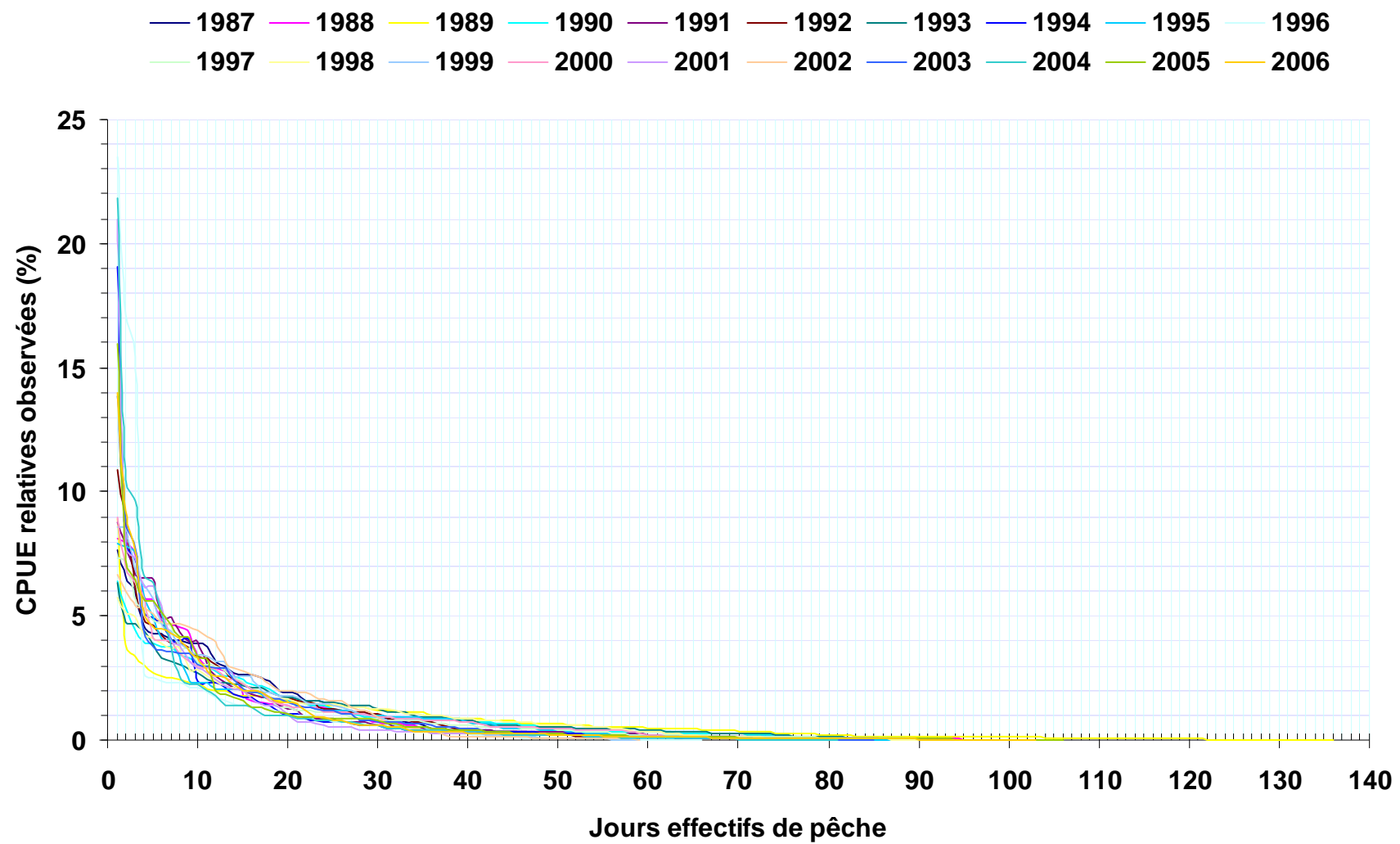


Figure 24 : Courbes des CPUE relatives observées classées par année dans un ordre décroissant sur la période 1987-2006.

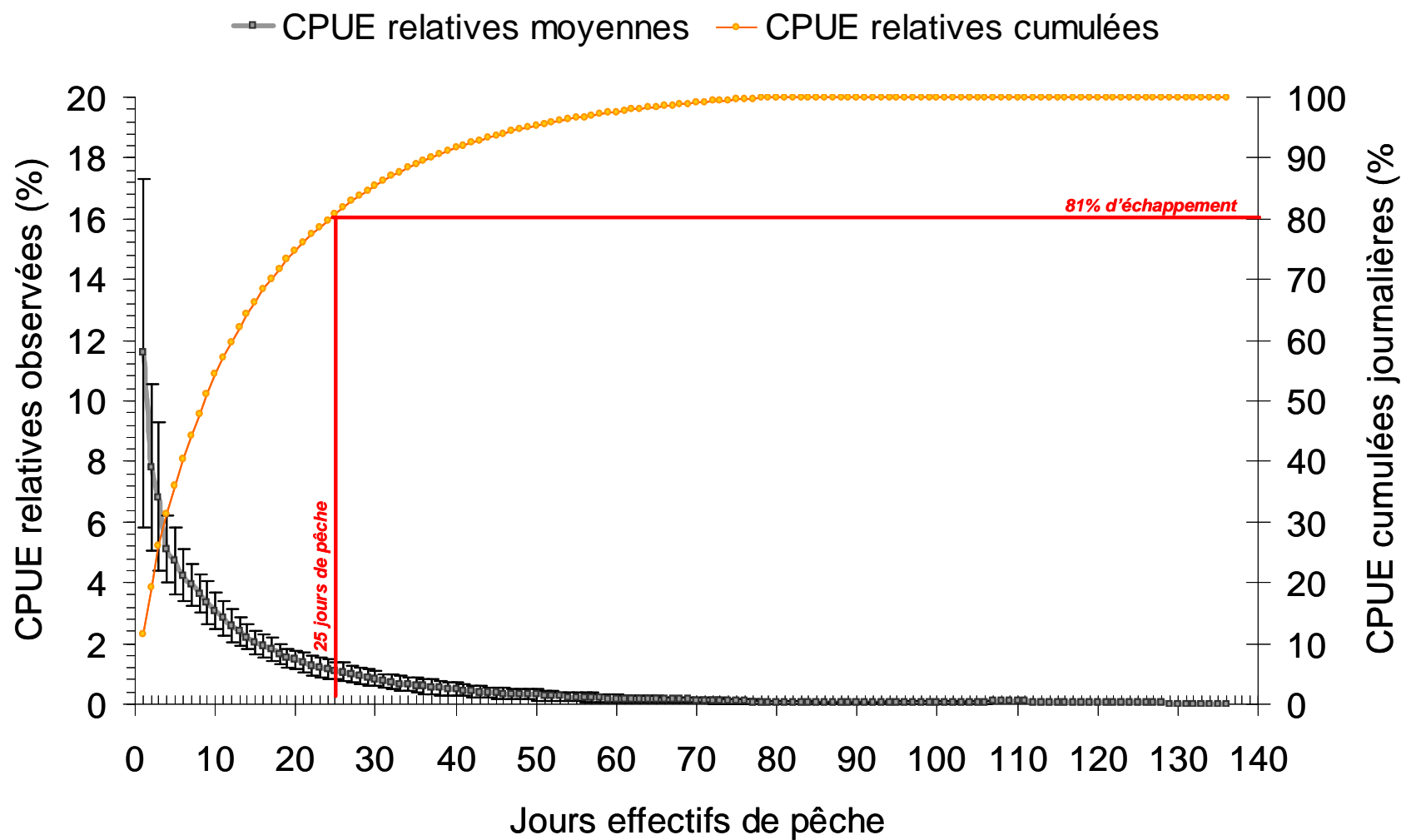


Figure 25 : Courbe moyenne \pm e.t. et courbe cumulée des CPUE observées classées dans un ordre décroissant sur la période 1987-2006.

3.4 Discussion - Conclusion

- *Un jeu de données unique...*

Cette étude n'aurait pu voir le jour sans l'acquisition d'un jeu de données unique, à savoir les captures journalières réalisées sur une période de 20 années de 4 pêcheurs professionnels de la Loire. Ces séries chronologiques importantes ont permis la modélisation des captures d'anguilles argentées, et surtout la réalisation de validations croisées (technique du « Leave One Out »), étape fondamentale qui permet d'évaluer la robustesse du modèle et la fiabilité de ses prédictions. Le fait de disposer 4 séries chronologiques était également un point fondamental puisque le comportement des quatre pêcheurs, et par la même la qualité de leur « échantillonnage », a pu être analysé. A priori, les données de captures des pêcheurs professionnels par nature ne sont pas aléatoires et l'intérêt d'un pêcheur professionnel est de limiter les séances de pêche peu « rentables » en ciblant les conditions environnementales les plus favorables aux captures d'anguilles argentées. Les résultats ont montré que les pêcheurs adoptaient deux types de stratégie. Tout d'abord, une stratégie conditionnée par les conditions environnementales avec les pêcheurs 3 et 4 qui sortaient moins quand la lune était proche de la pleine lune et quand les conditions météorologiques étaient stables (pression atmosphérique élevée, vents orientés à l'est et au nord et vitesse du vent faible). Puis, une stratégie de pêche plus aléatoire des pêcheurs 1 et 2 puisque aucune variable météorologique n'expliquait leur décision de pêcher ou non. Ces stratégies de pêche différentes mises en évidence d'une manière statistique sont des comportements avérés et confirmés sur le terrain (Boisneau Philippe, com. pers.). Cette analyse nous a donc conduit à calculer une cinquième série chronologique correspondant à la moyenne des CPUE journalières des quatre pêcheries. Cette série « lissée » permet de limiter l'importante variabilité des CPUE observées entre les pêcheries probablement liée aux différentes stratégies de pêche adoptées par les pêcheurs mais également à des effets sites qui influencent la capturabilité. Elle est donc supposée être représentative des patrons de captures annuels obtenus au sein d'une pêcherie exploitée par un pêcheur au comportement moyen. En cela, l'acquisition des 4 carnets de pêche était un atout puisqu'elle a permis de démarrer la modélisation sur un jeu de données « moins biaisé », dans la mesure où les effets sites et stratégies de pêche ont été « gommés », et que les captures étaient réalisées par tout type de conditions environnementales (*a priori* bonnes et mauvaises).

- *Un modèle robuste et validé*

L'analyse du « Leave One Out » a montré que parmi les 20 modèles testés sur des années indépendantes, 80% (N = 16) présentaient la même architecture. Cette architecture, qui correspond au modèle final, consiste à lier deux sous modèles basés sur les facteurs environnementaux et temporels suivants :

- **modélisation de l'occurrence des anguilles argentées à partir de la turbidité (en NTU) observée la veille de la capture et le numéro de la semaine**
- **modélisation des CPUE relatives positives en fonction de l'indice de luminosité, de la variabilité journalière de débit (en %) mesurée la veille**

de la capture, la turbidité (NTU) observée la veille de la capture, le numéro de la semaine, et le type de temps observé deux jours avant la capture.

Les résultats ont donc montré que le modèle final était peu sensible aux périodes d'apprentissage, gage de sa robustesse. De plus, les diagnostics réalisés sur les résidus, c'est-à-dire les écarts observés entre les valeurs prédites et observées, ont révélé que toutes les hypothèses de modélisation (distribution normale des résidus, homoscedasticité) étaient respectées. Enfin, les prédictions réalisées sur les 16 années « test », années indépendantes non utilisées pour la modélisation, ont révélé qu'en moyenne 75% des pics observés étaient effectivement prédits par le modèle. Ce résultat valide clairement les prédictions fournies par le modèle final. Cependant, des analyses ont montré que ce taux aurait pu être encore meilleur (84% en moyenne) si la sélection de la classe de turbidité avec un délai de 24 heures n'avait pas été imposée. Le modèle final présenté ici est probablement celui qui permet de trouver le meilleur compromis entre robustesse, qualité des prédictions et application opérationnelle.

Une tendance du modèle à sous estimer les CPUE relatives a été observée. Cette tendance a déjà été rencontrée dans une précédente étude qui avait pour objectif de modéliser les densités d'anguilles d'une sous population d'anguilles en fonction de variables de micro- et macro-habitats à l'échelle d'un petit bassin versant côtier (Acou et al., en préparation). Cette tendance est probablement due à la structure même du modèle qui consiste à lier un premier modèle binomial (modélisation de la présence/absence) puis un second modèle log-normal (modélisation des CPUE positives). Des analyses complémentaires sont donc nécessaires pour bien comprendre l'origine de ces sous estimations. Cependant, l'objectif affiché du modèle n'était pas de prédire avec certitude une valeur de CPUE relative mais plutôt de repérer les bonnes fenêtres environnementales. Autrement dit, que la variabilité journalière des CPUE relatives prédites, indépendamment de leurs valeurs intrinsèques, permette de cibler les pics de captures vérifiés par les CPUE observées. Des examens graphiques ont montré que les CPUE journalières prédites variaient généralement en même temps que les CPUE observées pour les années indépendantes (e.g. Figure 21) et sur l'ensemble de la période d'étude (cf. annexe 2), confirmant ainsi que le modèle permet de cibler les pics de migration. L'enjeu était ensuite de définir une valeur seuil référence qui permette de cibler les arrêts de turbinage (cf. suite de la discussion).

Parallèlement, les prédictions du modèle final avaient tendance à surestimer les événements migratoires puisqu'en moyenne 35% des pics prédits n'étaient pas observés. Ce taux de surprédiction modéré est inférieur aux 60% de surprédiction atteints par le Migromat® (Adam, 2000) et estimés en croisant les prédictions du Migromat® avec des suivis individuels de radiopistage d'anguilles argentées sur la Meuse (Bruijs et al., 2009). Dans la présente étude, l'activité migratoire était définie sur la base des captures observées de pêcheurs aux guideaux, technique de pêche qui peut fournir une image peu représentative de l'activité migratoire quand certaines conditions environnementales (i.e. forts débits notamment) limitent la capturabilité. Il est vraisemblable que cette technique de pêche sous-estime l'activité migratoire des anguilles argentées de la Loire, ce qui suggère que le taux de surprédiction des pics observés dans cette étude constitue un maximum. En effet, certains pics réalisés sur le plan biologique ne sont pas ciblés par les pêcheurs compte tenu des forts débits de ces périodes. Seules des techniques de radio-pistage permettraient de valider avec certitude les taux de prédiction vérifiée et de surprédiction présentés dans cette étude.

- Notion de « fenêtres environnementales »

Il est donc possible de prédire les pics de migration des anguilles argentées, ou plus précisément, de cibler les fenêtres environnementales optimales au cours desquelles l'activité migratoire des anguilles est maximale. Ces fenêtres environnementales peuvent être clairement caractérisées par les facteurs sélectionnés dans le modèle final.

- ✓ ***l'indice de luminosité***

Un point original de notre étude est d'avoir utilisé l'indice de luminosité développé par Cairns & Hooley (2002). C'est la première fois que cet indice était dédié exclusivement à l'analyse de l'activité migratoire d'anguilles argentées. Cet indice qui permet de quantifier chaque nuit l'éclairage lunaire perçu par l'anguille à la surface de l'eau, joue un rôle prépondérant. Les captures d'anguilles argentées étaient d'autant plus faibles que l'indice était élevé, confirmant que de fortes intensités lumineuses limitent l'activité migratoire des anguilles (Figure 19). Dans le modèle final, c'est la valeur intrinsèque de cet indice, et non sa variabilité journalière, qui a été sélectionnée. Ce résultat confirme que l'indice de luminosité est un facteur inhibiteur de l'activité migratoire qui permet de déterminer des périodes favorables à la migration. Cependant, si une faible intensité lumineuse est nécessaire pour la migration, ce n'est pas un facteur suffisant. D'autres facteurs environnementaux doivent prendre le relais.

- ✓ ***la variabilité journalière du débit (en %) avec un jour de délai***

Parmi eux, évidemment il y a le débit, et plus précisément sa variation journalière (en % ; Figure 19). Comme nous l'avons souligné par ailleurs, ce n'est pas la valeur du débit qui est importante. En effet, les pics de captures d'anguilles argentées peuvent avoir lieu pour des gammes de débit faibles ($1 \text{ à } 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans le Frémur par exemple ; Acou et al., 2008) ou beaucoup plus élevées ($2000 \text{ à } 5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; la présente étude). C'est donc la variabilité journalière du débit, plutôt qu'un débit seuil, qui influence l'activité migratoire. Mais là encore, ce n'est pas le seul facteur qui explique la variabilité des captures. Certaines années étaient en effet caractérisées par des crues très faibles voire inexistantes avec pourtant des pics de captures marqués (cf. Annexe 2: années 1989, 1991, 1995 et 2001). Les augmentations de débit sont sans doute possible un facteur qui favorise clairement les captures, confirmant que le débit est un vecteur de migration. Pour autant, ce n'est pas un facteur obligatoire et il est probable qu'en l'absence de crues d'autres facteurs stimulent l'activité migratoire. La qualité des prédictions fournies par le modèle final pour les années caractérisées par des régimes de crues faibles et peu variables suggère que ces facteurs sont présents dans le modèle. Une force du modèle est donc justement de ne pas considérer uniquement le débit comme le facteur qui initie ou fait perdurer la migration d'avalaison.

- ✓ ***la turbidité (NTU) avec un jour de délai***

La turbidité était également un facteur important qui influençait significativement l'activité migratoire (Figure 19). C'est la valeur intrinsèque de turbidité, et non sa variabilité journalière, qui a été sélectionnée à 95% dans les modèles (Tableau 12). De plus, les CPUE augmentaient significativement avec les modalités croissantes de turbidité (Figure 19). Ces résultats suggèrent que l'activité migratoire des anguilles argentées est inhibée pour de faibles valeurs de turbidité ($< 10 \text{ NTU}$), jouant là un rôle complémentaire avec l'indice de luminosité. Cependant, contrairement à lui, cet effet inhibiteur pour des faibles valeurs est contrebalancé par un effet plus « incitateur » pour des gammes élevées, probablement parce que toutes les conditions de luminosité mais aussi d'hydrologie (fort débit) optimales pour la migration sont réunies quand la turbidité est élevée (≥ 10 ou 20 NTU).

✓ *le type de temps avec deux jours de délai*

Enfin, le type de temps qui prévalait deux jours avant la nuit de pêche expliquait significativement la variabilité des captures. Plus précisément, les CPUE étaient significativement plus faibles quand des régimes de Nord-Est, de Sud et Anticycloniques étaient observés (Figure 19). Ces régimes météorologiques stables qui se manifestent au niveau de la Loire par des temps plutôt secs et froids entre Octobre et Février (Figure 16) sont effectivement peu propices à la migration d'avalaison. A l'inverse, les captures étaient significativement plus importantes pour des régimes météorologiques plus instables (i.e. Onde atlantique, Océanique stationnaire, Sud-Ouest, Sud, Retour d'Est et Dépression centrale) qui favorisent eux les précipitations et par conséquent les crues. Dans une précédente étude réalisée dans la Rouvre (Orne), 39% des anguilles capturées dans un piège de dévalaison étaient réalisées pendant des régimes « Océanique stationnaire » (Lissalde Bonnet 2008). Cependant, le stade des anguilles capturées n'était pas différencié ce qui rend impossible la comparaison des résultats. Outre l'intérêt de cette variable « Type de temps » pour la modélisation (variable synthétique de l'information météorologique), cette variable est très complémentaire car en qualifiant l'ambiance météorologique, elle permet en quelque sorte de « contrôler » les signaux environnementaux délivrés par les autres variables comme la turbidité ou le débit. Par exemple, des augmentations de débit ou de turbidité prévues au cours de régimes anticycloniques, ou à l'inverse de régime de dépression, conduiront à des prédictions d'anguilles argentées très différentes, et probablement plus fiables que si cette variable n'avait pas été intégrée dans le modèle.

D'autres facteurs environnementaux sont connus pour influencer l'activité migratoire des anguilles argentées (conductivité, température, pression atmosphérique, vent, photopériode, etc. ; Tableau 1). Ces facteurs sont pour la plupart d'entre eux corrélés à au moins une variable présente dans le modèle final. Ils n'auraient donc probablement pas permis d'augmenter sensiblement la qualité des prédictions. Les 4 variables environnementales sélectionnées (indice de luminosité, débit, turbidité et type de temps) sont probablement les variables qui offrent le meilleur compromis entre explication de la variabilité des captures et application opérationnelle du modèle.

- *Apports du modèle pour la gestion du turbinage*

Pour le gestionnaire, il est important d'estimer le gain potentiel qu'offrirait l'utilisation du modèle par rapport à d'autres options de gestion. La méthode utilisée ici a été de simuler des arrêts de turbinage d'une centrale hydroélectrique fictive localisée au milieu des pêcheries et pour chaque arrêt de turbines envisagé, de quantifier la proportion d'anguilles argentées sauvées correspondant au cumul des captures effectivement réalisées (CPUE relatives observées). Trois scénarii ont été envisagés. C'est par rapport à eux que le gain du modèle a été évalué.

✓ *Scénario complet : 100% des anguilles argentées sauvées en 120 jours*

Ce premier scénario consiste en un arrêt complet des turbines pendant toute la période de migration des anguilles argentées. Les patrons de captures observés sur la Loire ont montré qu'en moyenne sur les 20 années étudiées, 17 semaines (du 1^{er} Octobre à fin Janvier) étaient nécessaires pour sauver 100% des anguilles argentées dévalant pendant la période d'ouverture de la pêche (Figure 13). Si cette mesure était appliquée, cela équivaldrait à arrêt du turbinage sur une période d'environ 120 jours de production hydroélectrique. C'est bien sûr une option

radicale que les exploitants veulent éviter mais qui représente pour nous un premier élément de comparaison : 100% des anguilles argentées sauvées en 120 jours, ce qui correspond à un ratio de 0,83 % d'anguilles argentées par jour d'arrêt de turbines.

✓ ***Scénario basé sur les évènements hydrologiques : 45% des anguilles argentées sauvées en 63 jours***

Une option appliquée actuellement dans les petits hydrosystèmes consiste à arrêter les turbines pendant 3 jours consécutifs quand le débit instantané dépasse le module interannuel (Baisez A., com. pers.). Comme nous l'avons précisé auparavant, cette option basée uniquement sur les évènements hydrologiques est probablement bien adaptée à des petits cours d'eau où les pics de migration sont brefs (quelques jours à quelques semaines) et clairement liés à des crues qui excèdent rarement 3 jours. Sur la Loire, la période de migration est généralement beaucoup plus longue (quelques semaines à quelques mois ; Figure 13) et par conséquent le cumul des captures réalisées en dehors des pics peut constituer une part non négligeable des captures totales annuelles. De plus, les crues durent généralement plus de 3 jours. Tous ces éléments suggèrent que cette option est peu adaptée à un grand cours d'eau comme la Loire. Pour s'en assurer, des arrêts de turbines ont été simulés chaque jour quand le débit instantané était supérieur au module observé sur la Loire ($806 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). La simulation montre qu'elle permet en moyenne sur l'ensemble de la période d'étude (1987-2006) un échappement moyen effectif de $45,3 \pm 30,1\%$ d'anguilles argentées (min = 0 ; max = 86,3%) pour environ $62,8 \pm 39,1$ jours d'arrêt de turbine (min = 0 ; max = 117 jours). Le bilan de cette option n'est donc pas optimal (moins de la moitié des captures sauvées pour 2 mois complets d'arrêt de turbines) probablement parce que comme nous l'avons vu, l'augmentation de débit n'est pas l'unique facteur sur la Loire qui favorise les captures d'anguilles argentées, que ce soit les années à crues marquées ou pas. Le ratio de ce scénario est 0,71 % d'anguilles argentées sauvées par jour d'arrêt de turbines.

✓ ***Scénario « modèle idéal » : 80% des anguilles argentées sauvées en 25 jours***

L'analyse des CPUE relatives observées classées a montré qu'en moyenne (min = 15 jours en 1996 ; max = 45 jours en 1989) 80% des anguilles argentées étaient capturées en 25 jours sur l'ensemble de la période d'étude (Figure 25). Nous avons considéré que ce résultat correspondait en quelque sorte aux prédictions d'un modèle idéal capable chaque année de prédire avec certitude la totalité des CPUE observées. Si des arrêts de turbine étaient réalisés sur la base des prédictions de ce modèle idéal, un ratio très élevé équivalant à 3,2% d'anguilles argentées sauvées par jour d'arrêt de turbines serait obtenu. Ce ratio constitue la valeur maximale qui peut être atteinte sur la Loire.

✓ ***Scénario « modèle opérationnel » : en moyenne 83,5% des anguilles argentées sauvées en 52 jours***

Pour obtenir un échappement moyen équivalent au modèle idéal, la valeur seuil de CPUE prédite de 0,3% doit être utilisée (Figure 22). Les simulations réalisées ont effet montré que l'utilisation du modèle opérationnel avec cette valeur seuil aurait permis en moyenne un échappement de 83,5% d'anguilles argentées en 52 jours d'arrêt de turbinage, ce qui correspond à un ratio de 1,6% d'anguilles argentées par jour d'arrêt. Ainsi, par rapport au modèle idéal, le modèle opérationnel permet un échappement un peu plus important (83,5% vs 80,0%) pour 27 jours d'arrêt de turbinage en plus. Ce résultat encourageant montre que le modèle permet aux gestionnaires de cibler efficacement leurs arrêts de turbines en maximisant des anguilles argentées.

Le choix des valeurs seuil est prépondérant et incombe aux gestionnaires en fonction de leurs objectifs. Plutôt que de sélectionner une valeur seuil en fonction de cibles d'échappement ou nombre de jours d'arrêt de turbines moyens, il semble plus pertinent de se baser sur des cibles minimums d'échappement. Par exemple, si l'objectif est d'atteindre sur la Loire chaque année au moins 40% d'échappement (cible minimale préconisée par l'Europe), alors la valeur seuil de 0,6% doit être retenue (Figure 22). En effet, elle assurera avec une probabilité de réalisation de 70%, un échappement minimum de 40% (et 57,4% en moyenne) pour un nombre maximal de jours d'arrêt de turbines de 35 jours (27 jours en moyenne). Si l'objectif haut d'échappement est visé (80% au minimum chaque année), alors c'est la valeur seuil 0,2% qui doit être sélectionnée puisqu'elle permettra un échappement minimum de 88% (en moyenne 94%) pour un nombre maximal de jours d'arrêt de turbines de 80 jours (67 jours en moyenne) (Figure 22). Il semble donc que le gestionnaire devra choisir une valeur seuil de CPUE prédites vraisemblablement comprise dans la gamme 0,6% - 0,2%. Un dernier élément décisionnel est la fréquence des plages d'arrêt turbine qui conditionne la mise en pratique des manœuvre d'ouvrage. Evidemment, plus la valeur seuil sélectionnée est basse, plus la plage d'arrêt sera longue. Cependant, ces jours d'arrêt supplémentaires sont principalement des plages d'arrêts de 15 jours consécutifs et plus (Figure 23), qui sont plus aisées à mettre en œuvre pour le gestionnaire que des arrêts au coup par coup.

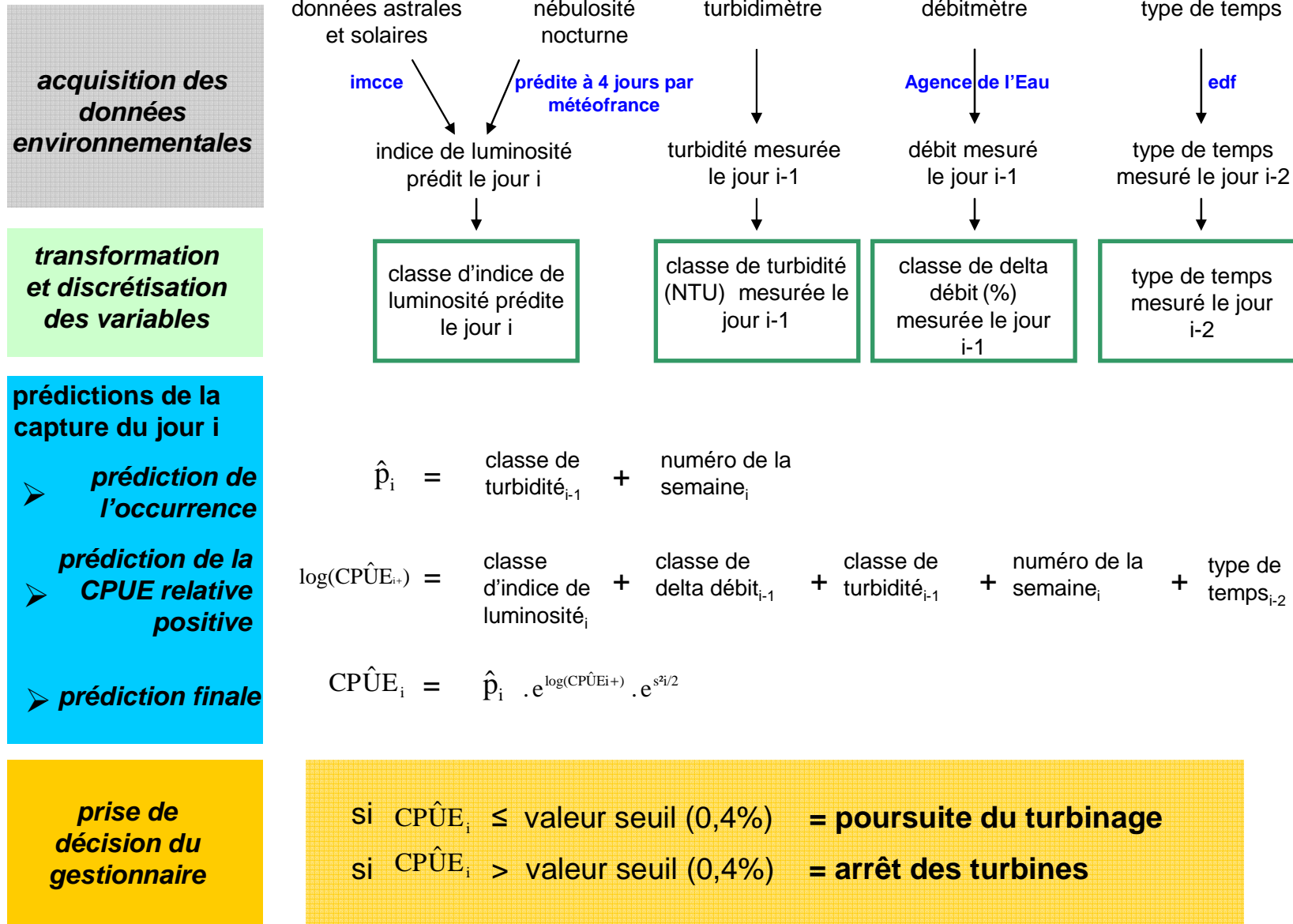
- *Un modèle opérationnel qui permet aux gestionnaires d'anticiper 24 heures avant la manœuvre d'ouvrage*

L'application du modèle, sur la Loire ou sur d'autres sites dans le cadre d'une extrapolation, implique de suivre les 4 étapes présentées dans l'encart ci-après. La première étape consiste à recueillir les données environnementales indispensables pour estimer les 4 facteurs sélectionnés dans le modèle final (indice de luminosité, turbidité, débit et type de temps).

- l'indice de luminosité : pour calculer cet indice (cf. § 3.2.4.3 pour les détails de la formule), les données astrales (heures et couchers du soleil et de la lune) et de nébulosité nocturne sont nécessaires. Les données astrales pourront être recueillies auprès de l'Institut des Mécaniques Célestes et Calculs des Ephémérides (imcce.fr) tandis que les services de Météo France (météofrance.fr) pourront fournir des prévisions tri-horaires fiables à 4 jours de la nébulosité nocturne. Dans les deux cas, ces informations sont disponibles sur l'ensemble du territoire français.

- la turbidité : Contrairement aux autres variables comme par exemple le débit, la mesure de la turbidité n'est pas généralisée ce qui rend cette variable difficile à recueillir. De plus, la turbidité, à notre connaissance, n'est pas prévisible. Une astuce a été de forcer la sélection dans le modèle final de la valeur de turbidité observée la veille de la nuit de pêche. Les résultats ont montré que la qualité des prédictions était fortement réduite quand la turbidité (même de la veille) n'était pas présente dans les modèles. Ainsi, dans le cadre d'une extrapolation du modèle, l'acquisition d'un turbidimètre qui permette l'acquisition d'une mesure journalière au niveau de la centrale hydroélectrique semble indispensable.

Mise en œuvre pratique du modèle pour déterminer les arrêts de turbinage



- le débit : Les débits journaliers pourront être recueillis auprès des Agences de l'Eau qui disposent d'un « parc » important de stations de jaugeages sur l'ensemble du territoire français.
- le type de temps : Cette variable, spécifiquement développée par EDF, pourra être fournie sur l'ensemble du territoire français. Rappelons que c'est le type de temps qui prévaut 2 jours avant la capture qui doit être entré dans le modèle, ainsi aucune prédiction de cette variable n'est nécessaire.

La seconde étape consiste tout d'abord à calculer la variabilité journalière du débit observée un jour avant le jour i de la prédiction à réaliser (delta-jour en % calculé de la façon suivante : $((X_{i-1}-X_{i-2})/X_{i-1}*100)$ où X_{i-1} et X_{i-2} sont respectivement les débit moyens observés 1 et 2 jours avant la prédiction à réaliser). Ensuite, les variables « indice de luminosité », « turbidité » et « delta débit » devront être discrétisées en classes telles que présentées dans le Tableau 7. Au final, le gestionnaire aura estimé la valeur des classes « indice de luminosité », « turbidité », « delta débit », « type de temps » et « numéro de la semaine » pour effectuer le jour i , une prédiction de la capture pour le jour $i+1$.

Pour chacune des variables sélectionnées dans le modèle binomial (annexe 3) et log-normal (annexe 4), des estimateurs ont été calculés sur l'ensemble de la période d'étude (modèle final ajusté pour les années 1987 à 2006). L'occurrence en anguilles argentées prédite (\hat{p}_i) pour le jour $i+1$ est l'addition des produits de la valeur de la classe de la variable considérée par son estimateur. L'estimation de la CPUE positive est réalisée de la même façon. La liaison des deux modèles, réalisée selon la formule présentée dans l'encart, permet enfin d'obtenir une prédiction finale de CPUE relative d'anguilles argentées.

Si la prédiction dépasse la valeur seuil de CPUE prédite, qui devra être préalablement sélectionnée en fonction des objectifs d'échappement, alors le gestionnaire disposera de 24 heures pour effectuer un arrêt de turbine. Ce délai, qui semble suffisant pour assurer une gestion au coup par coup des manœuvres d'ouvrage, est plus important que celui délivré par le Migromat® qui était de quelques heures. Le caractère opérationnel du modèle développé ici semble donc vérifié. Par ailleurs, la mise au point d'une interface graphique conviviale (type feuille Excel) permettrait d'automatiser et grandement faciliter la saisie des variables, la discrétisation des classes et le calcul des prédictions.

• *Vers une extrapolation du modèle ?*

Comme nous l'avons vu, le modèle développé sur la Loire permettrait la gestion efficace d'une centrale hydroélectrique localisée dans la partie aval de la Loire. Cependant, cette centrale est fictive et l'application de ce modèle est envisagée sur d'autres hydrosystèmes comme la Dordogne où les caractéristiques de la migration d'avalaison (départ/durée de la migration et patrons de captures) sont probablement différentes. Dans ce contexte, les conditions d'application et les limites du modèle doivent être précisées.

Tout d'abord, le départ de la migration, fixé au 1^{er} Octobre chaque année, a été imposé. C'est en effet la date légale d'ouverture de la pêche professionnelle aux guideaux. Comme nous l'avons vu, le départ de la migration était très variable, et le $J_{5\%}$ pouvait être atteint le 25 novembre, soit 55 jours après l'ouverture de la pêche et en moyenne il était de 15,6 jours sur l'ensemble de la période d'étude (Figure 17). On voit bien là l'intérêt de prédire ce $J_{5\%}$, pour

cibler au mieux le début de la période de vigilance, c'est-à-dire la date à partir de laquelle les prédictions de captures doivent être réalisées. Sa prédiction permettrait en effet de réduire sensiblement (15 jours en moyenne) le nombre de jours d'arrêts de turbine avec la certitude que biologiquement l'activité migratoire est faible, voire nulle. Cependant nos résultats ont montré les températures et les débits observés pendant l'étiage expliquaient peu la variabilité interannuelle du $J_{5\%}$ (cf. paragraphe 2.3.3.), probablement parce qu'aucune données de captures antérieures au 1^{er} Octobre n'était disponible. Des analyses complémentaires sur des sites où un piégeage permanent des anguilles argentées est réalisé, sont nécessaires pour examiner cette relation. Elles permettraient de mieux comprendre le déterminisme environnemental du début de la migration, mais également de réduire sensiblement les arrêts de turbines.

Ensuite, la durée de la migration considérée dans le modèle final était de 20 semaines. Cette durée de migration, dépendante de la période de pêche légale sur la Loire, varie beaucoup en fonction de la taille des hydrosystèmes (Figure 2). Là encore, un travail est nécessaire pour bien préciser la relation entre la durée de la migration et caractéristiques (tailles, aménagements, etc.) des hydrosystèmes.

Enfin, la plus grosse incertitude concerne la capacité du modèle à fournir des prédictions valables une fois que les caractéristiques de la migration (date de départ et durée) sont fixées. L'indice de luminosité, le delta journalier de débit (en %) et la turbidité influencent probablement de la même manière les CPUE d'anguilles argentées, que ce soit sur la Loire ou sur d'autres hydrosystèmes. Cependant, il est vraisemblable que l'utilisation de la variable types de temps limite l'extrapolation du modèle car les modalités qui expliquent significativement les captures varient en fonction de la taille et de la localisation géographique du site considéré. L'utilisation de variables météorologiques plus classiques comme la pression atmosphérique devrait le cas échéant être envisagée dans le cadre d'une extrapolation.

Il est difficile à ce jour de savoir comment peut se dérouler l'extrapolation du modèle. Elle peut tout aussi bien engendrer une réponse différente au niveau de la valeur intrinsèque des CPUE prédites et/ou de leur variabilité journalière. En tous les cas, la phase d'extrapolation et de test (comparaison des CPUE prédites et observées) du modèle dans d'autres hydrosystèmes est indispensable pour le cas échéant, procéder à l'ajustement du modèle.

Enfin, le modèle développé est probablement transposable à d'autres grands hydrosystèmes mais sur les plus petits, des mesures de gestion plus simples reposant sur les événements hydrologiques seraient probablement plus adaptées. Cependant, ces mesures de gestion doivent être validées, ce qui n'est pas le cas actuellement. C'est en tout cas une démarche complémentaire qu'il faut avoir pour réduire les mortalités d'anguilles dans les petits bassins versants et dans les grands comme la Loire où les patrons sont beaucoup plus complexes.

L'idéal serait donc de tester ce modèle en le confrontant à la réalité de terrain, sur d'autres bassins versants de taille comparable (Dordogne, Garonne) ainsi que dans des bassins versants plus petits (Frémur, Oir, Scorff, Nivelle, etc.) et des têtes de bassins versants. Une telle extrapolation du modèle est indispensable pour développer des outils « universels » de prédiction des épisodes migratoires destinés à réduire les mortalités par le passage dans les turbines hydroélectriques et dans les dispositifs de restitution des débits installés sur les grands barrages.

4. Références bibliographiques

- Acou A., E. Feunteun, P. Laffaille & A. Legault. 2000. Catadromous migration dynamics of European eel (*Anguilla anguilla*, L.) in a dammed catchment. Verhandlungen internationale Verein der Limnologie, 27: 1-4.
- Acou A., P. Boury, P. Laffaille, A.-J. Crivelli & E. Feunteun. 2005. Towards a standardized characterization of the potentially migrating silver European eel (*Anguilla anguilla*, L.). Archiv für Hydrobiologie, 164: 237-255.
- Acou A., Laffaille P., Legault A. & Feunteun E. 2008. Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*) in an obstructed river system. Ecology of Freshwater Fish, 17: 432-442.
- Adam B. 2000. Migromat® - ein Frühwarnsystem zur Erkennung der Aalabwanderung. Wasser und Boden, 52: 16-19. (en Allemand)/
- Berg R. 1986. Fish passage through Kaplan turbines at a power plant on the River Neckar and subsequent eel injuries. Vie Milieu, 36: 307-310.
- Behrmann-Godel J. & R. Eckmann. 2003. A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. Ecology of Freshwater Fish, 12: 196-202.
- Bertin L. 1951. Les anguilles. Payot, Paris.
- Boëtius J. 1967. Experimental indication of lunar activity in European silver eels, *Anguilla anguilla* (L.). Medd. Danm. Fisk. Havunders, 6: 1-6.
- Boubee J.A., C.P. Mitchell, B.L. Chisnall, D.W. West, E.J. Bowman & A. Haro. 2001. Factors regulating the downstream migration of mature eels (*Anguilla* spp.) at Aniwhenua Dam, Bay of Plenty, New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 35: 121-134.
- Bruijjs M.C.M., Hadderingh R.H., Schwevers U., Adam B., Dumont U. & H.V. Winter. 2009. Managing human impact on downstream migrating European eel *Anguilla anguilla* in the river Meuse. Pp. 381-390 in J. M. Casselman and D.K. Cairns (eds.). Eels at the edge: science, status, and conservation concerns. Amer. Fish. Soc. Symp. no 58, Bethesda, Maryland.
- Burnet A.M.R. 1969. Migrating eels in a Canterbury river, New Zealand. N.Z. Journal of Marine & Freshwater Research, 3: 230-244.
- Cairns D.K. & P.J.D. Hooley. 2002. Lunar cycles of American eels in tidal waters of the southern Gulf of St. Lawrence, Canada. American Fisheries Society Symposium.
- Chadwick S., Knights B., Thorley J.L. & A. Bark. 2007. A long-term study of population characteristics and downstream migrations of the European eel *Anguilla anguilla* (L.) and the effects of a migration barrier in the Girnock Burn, north-east Scotland. Journal of Fish Biology, 70: 1535-1553.
- Chisnall BL, Hayes JW 2001. Age and growth of shortfinned eels (*Anguilla australis*) in the lower Waikato basin, North Island, New Zealand. New Z. J. Mar. Freshw. Res., 25: 71-80.

- CSP 2003. Guide des engins de pêche fluviale et lacustre en France métropolitaine. Ed. Cons. Sup. Pêche, 198 p.
- Cullen P. & T.K. McCarthy. 2000. The effects of artificial light on the distribution of catches of silver eel, *Anguilla anguilla* (L.), across the Killaloe eel weir in the Lower River Shannon. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 100B: 165-169.
- Cullen P. & T.K McCarthy. 2003. Hydrometric and meteorological factors affecting the seaward migration of silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in the lower River Shannon. *Environmental Biology of Fishes*, 67: 349-357.
- Deelder C.L. 1954. Factors affecting the migration of the silver eel in Dutch inland waters. *J. Cons. CIEM*, 20: 177-185.
- Deelder C.L. 1984. Synopsis of biological data on the eel *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758). *FAO Fisheries Synopsis* 80, Rome, FAO, 73 pp.
- Durif C. 2003. La migration d'avalaison de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*: Caractérisation des fractions dévalantes, phénomènes de migration et franchissement des obstacles. Doctorat de l'Université en Ecologie Aquatique, Université de Toulouse II, 357 pp.
- Durif C., C. Gosset, J. Rives, F. Travade & P. Elie. 2003. Behavioral study of downstream migrating eels by radio-telemetry at a small hydroelectric power plant. *In* *Biology, Management and Protection of Catadromous Eels* (Dixon, D. A., eds.), pp. 343-356. Bethesda, MD: American Fisheries Society, Symposium 33.
- Durif C. & P. Elie. 2008. Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *Fisheries Management and Ecology*, 15: 127-137.
- Edel R.K. 1976. Activity rhythms of maturing american eels *Anguilla rostrata*. *Mar. Biol.*, 36: 283-289.
- Edel R.K. 1979. Locomotor activity of female silver eels (*Anguilla rostrata*) in response to shelter and unnatural photoperiods. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*, 174: 98-103.
- EELREP. 2005. Estimation of the reproduction capacity of European eel. Final report, EU contract Q5RS-2001-01836, 272p. Web site link: <http://www.fishbiology.net/eelrepsum.html>
- Erkinaro J., F. Okland, K. Moen, E. Niemelä & M. Rahiala. 1999. Return migration of Atlantic salmon in the River Tana: the role of environmental factors. *Journal of Fish Biology*, 55: 505-516.
- Euston E.T., D.D. Royer & C.L. Simons. 1997. Relationship of emigration of silver American eels (*Anguilla rostrata*) to environmental variables at a low head hydro station. *Proceedings of the International Conference on Hydropower*, August 5-8, 1997, Atlantic, Georgia.

- Feunteun E., A. Acou, P. Laffaille & A. Legault. 2000. European eel (*Anguilla anguilla*): prediction of spawner escapement from continental population parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 1627-1635.
- Feunteun E., P. Laffaille, T. Robinet, C. Briand, A. Baisez, J.M. Olivier & A. Acou. 2003. A review of upstream migration and movements in inland waters by anguillid eels. Towards a general theory. *In*: Aida K, K. Tsukamoto, K. Yamauchi (eds) *Eel Biology*. Springer-Verlag, Tokyo, pp. 191-213.
- Fontaine M. 1975. Physiological mechanisms in the migration of marine amphihaline fish. *Advances in Marine Biology*, 13: 241-355.
- Fontaine Y.A. 1994. L'argenteure de l'anguille: Métamorphose, Anticipation, Adaptation. *Bulletin Français de la Pêche et Pisciculture*, 335: 171-185.
- Frost W.E. 1945. The age and growth of eels (*Anguilla anguilla*) from the Windermere catchment area. *Journal of Animal Ecology*, 14: 26-36.
- Frost W.E. 1950. The eel fisheries of the river Bann, Northern Ireland and observations on the age of silver eel. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 16: 358-393.
- Gosset C., F. Travade, C. Durif, J. Rives & P. Elie. 2005. Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. *River Research and Application*, 21: 1095-1105.
- Hadderingh R.H. & H.D. Baker. 1998. Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers. *In* *Fish Migration and Fish Bypasses*, Jungwirth M, Schmutz S., Weis S. (eds). Fishing News Books: Oxford; 315-328.
- Hadderingh R.H., G.H.F.M. Van Aerssen, R.F.L.J. De Beijer & G. Van der Velde. 1999. Reaction of silver eels to artificial light sources and water currents: an experimental deflection study. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15: 365-371.
- Haraldstad O., L.A. Vollestad & B. Jonsson. 1985. Descent of European silver eels, *Anguilla anguilla* L., in a Norwegian watercourse. *Journal of Fish Biology*, 26: 37-41.
- Haro A.J. 1991. Thermal preferenda and behaviour of Atlantic eels (genus *Anguilla*) in relation to their spawning migration. *Environmental Biology of Fishes*, 31: 171-184.
- Haro A. 2003. Downstream Migration of Silver-Phase Anguillid Eels. *In* Aida, K., K. Tsukamoto & K. Yamauchi (Eds). *Eel Biology*, Springer Verlag (Tokyo), 215-222.
- Haro A.J., T. Castro-Santos & J. Boubée. 2000a. Behavior and passage of silver-phase American eels, *Anguilla rostrata* (LeSueur), at a small hydroelectric facility. *Dana*, 12 : 33-42.
- Haro A., W. Richkus, K. Whalen, A. Hoar, W.D. Bush, S. Lary, T. Brush & D. Dixon. 2000b. Population decline of the American eel: Implications for research and management. *Fisheries*, 25 : 7-16.
- Haro A., Castro-Santos T., Whalen K., Wippelhauser G. & L. McLaughlin. 2003. Simulated effects of hydroelectric projects regulation on mortality of American eels. *American Fisheries Society Symposium*, 33: 357-365.

- Holmgren, K., H. Wickstrom & P. Clevestam. 1997. Sex-related growth of European eel, *Anguilla anguilla*, with focus on median silver eel age. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 54: 2775-2781.
- Hvidsten N.A. 1985. Yield of silver eel and factors affecting downstream migration in the stream Imsa, Norway. Inst. Fresh. Res., 62: 75-85.
- Jonsson B. & J. Ruud-Hansen. 1984. Water temperature as the primary influence on timing of seaward migrations of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 42: 593-595.
- Jokikokko E. & Mäntyniemi S. 2003. The survival of stocked Atlantic salmon smolts during sea run and the timing of migration in the river Simojoki, northern Finland. Aquaculture, 219: 431-444.
- Katselis G., K. Koukou, E. Dimitriou & C. Koutsikopoulos. 2007. Short-term seaward fish migration in the Messolonghi-Etoliko lagoons (Western Greek coast) in relation to climatic variables and the lunar cycle. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 73: 571-582.
- Langon M. & J. Dartiguelongue. 1997. La dévalaison des anguilles (*Anguilla anguilla* L.) argentées - Test de deux dispositifs de dévalaison à la centrale hydroélectrique E.D.F. d'Halsou (Nive, Pyrénées Atlantiques), 1996 - Revue bibliographique. 110 p.+annexes.
- Larinier M. & J. Dartiguelongue. 1989. La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 312 : 1-94.
- Lee T.W. 1979. Dynamique des populations d'anguilles *Anguilla anguilla* (L.) des lagunes du bassin d'Arcachon. Thèse de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 218 p.
- Le Pape O., Chauvet F., Mahévas S., Lazure P., Guérault D. & Desaunay Y. (2003). Quantitative description of habitat suitability for the juvenile common sole (*Solea solea*, L.) in the Bay of Biscay (France) and the contribution of different habitats to the adult population. Journal of Sea Research, 50 : 139-149.
- Lissalde Bonnet L. 2008. Acquisition de connaissances sur la dévalaison des anguilles : Analyse des dévalaisons d'anguilles sur la Rouvre de 1990 à 2003. Rapport EDF-ONEMA, 22 p. + annexes.
- Lobon-Cervia J. & M. Carrascal. 1992. Seasonal timing of silver eels in a Cantabrian stream. Archiv für Hydrobiologie, 125 : 121-126.
- Lowe R.H. 1952. The influence of light and other factors on the seaward migration of the silver eel (*Anguilla anguilla* L.). Journal of Animal Ecology, 21: 275-309.
- McCormick S.D., Hansen L.P., Quinn T.P. & Saunders R.L. 1998. Movement, migration and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 55: 77-92.
- Miyai T., J. Aoyama, S. Sasai, J.G. Inoue, M.J. Miller & K. Tsukamoto. 2004. Ecological aspects of the downstream migration of introduced European eels in the Uono River, Japan. Environmental Biology of Fishes, 71: 105-114.

- Monten E. 1985. Fish and turbines : Fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm, Sweden.
- Moriarty C. 1989. The silver eel catch on the lower River Shannon, Ireland.-EIFAC, Working Party on eel, Porto, Portugal
- Okamura A., Y. Yamada, N. Mikawa, S. Tanaka & H.P. Oka. 2002a. Exotic silver eels *Anguilla anguilla* in Japanese waters: seaward migration and environmental factors. Aquatic Living Resource, 15: 335-341.
- Okamura A., Y. Yamada, S. Tanaka, N. Horie, T. Utoh, N. Mikawa, A. Akazawa & H.P. Oka. 2002b. Atmospheric depression as the final trigger for the seaward migration of the Japanese eel *Anguilla japonica*. Marine Ecology Progress Series, 234: 281-288.
- Paquet E., Gailhard J. & R. Garçon 2006. Evolution de la méthode du gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique. La Houille Blanche, 5 : 80-90.
- Paroles d'Anguilles 2003. Lettre d'information n°3 du Tableau de Bord Anguille : caractérisation des anguilles argentées. 4 p. (www.anguille-loire.com).
- Parsons J., K.U. Vickers & Y. Warden 1977. Relationship between elver recruitment and changes in the sex ratio of silver eels *Anguilla anguilla* L. migrating from Lough Neagh, Northern Ireland. Journal of Fish Biology, 10: 211-229.
- Pankhurst N.W. 1982. Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel, *Anguilla anguilla* L. Journal of Fish Biology, 21: 417-428.
- Poole W.R. & J.D. Reynolds. 1990. Observations on the silver eel runs of the Burrishoole River System, Ireland, 1959 to 1988. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 75: 807-815.
- Shono H. 2008. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis. Fisheries Research, 93: 154-162.
- Sloane R.D. 1984. Preliminary observations of migrating adult freshwater eels (*Anguilla australis australis* Richardson) in Tasmania. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 35: 471-476.
- Smith M.W. & J.W. Saunders. 1955. The American eel in certain fresh waters of the Maritime Provinces of Canada. J. Fish. Res. Board Can., 12: 238-269.
- Sorensen P.W. & N.W. Pankhurst. 1988. Histological changes in the gonad skin, intestine and olfactory epithelium of artificially-matured male american eels, *Anguilla rostrata*. Journal of Fish Biology, 32: 297-307.
- Stefánsson G. 1996. Analysis of groundfish survey abundance data: combining GLM and delta approaches. ICES Journal of Marine Science, 53: 577-588.
- Paquet E., Gailhard J. & R. Garçon 2006. Evolution de la méthode du gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique. La Houille Blanche, 5 : 80-90.
- Steinbach P. 2005. Conditions de colonisation du bassin de la Loire par l'anguille – Troisièmes Rencontres – L'anguille en Loire – 09 mars. Orléans.
- Svedäng H., E. Neuman & H. Wickstrom. 1996. Maturation patterns in female European eel : age and size at the silver eel stage. Journal of Fish Biology, 48: 342-351.

- Tesch F.W. 1977. The eel. Biology and management of anguillid eels. London, Chapman & Hall. 434 p.
- Todd P.R. 1981. Timing and periodicity of migrating New Zealand freshwater eels (*Anguilla* spp.). New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 15: 225-235.
- Trépanier S., M.A. Rodriguez & P. Magnan. 1996. Spawning migrations in landlocked Atlantic salmon: time series modelling of river discharge and water temperature effects. Journal of Fish Biology, 48: 925-936.
- Tufféry S. 2007. Data mining et statistique décisionnelle : l'intelligence des données, Technip (Paris), 2^{ème} édition, 533 p.
- Van Veen T., Hartwig H.G. & K. Muller. 1976. Light-dependent motor activity and photonegative behavior in the eel *Anguilla anguilla* L.: evidence for extraretinal and extrapineal photoreception. J. Comp. Physiol., 111: 209-219.
- Vollestad L.A., B. Jonsson, N.A. Hvidsten, T.F. Naesje, O. Haraldstad & J. Ruud-Hansen. 1986. Environmental factors regulating the seaward migration of European silver eels (*Anguilla anguilla*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 43: 1909-1916.
- Vollestad L.A. 1992. Geographic variation in age and length at metamorphosis of maturing european eel : environmental effects and phenotypic plasticity. Journal of Animal Ecology, 61: 41-48.
- Vollestad L.A., B. Jonsson, N.A. Hvidsten & T.F. Naesje. 1994: Experimental test of environmental factors influencing the seaward migration of European silver eels. Journal of Fish Biology, 45 : 641-651.
- Wedemeyer G.A.R., R.L. Saunders & W.C. Clarke. 1980. Environmental factors affecting smoltification and early marine survival of anadromous salmonids. Mar. Fish. Rev., 42: 1-14.
- Westin L. & L. Nyman. 1979. Activity, orientation, and migration of Baltic Eel (*Anguilla anguilla* L.). Rapp. P.-V. Réun. CIEM, 174: 115-23.
- Wickström H., L. Westin & P. Clevestam. 1996. The biological and economic yield from a long-term stocking experiment. Ecology of Freshwater Fish, 5: 140-147.
- Yako L.A., Mather M.E. & F. Juanes. 2002. Mechanisms for migration of anadromous herring: an ecological basis for effective conservation. Ecological Applications, 12: 521-534.
- Zabel R.W. 2002. Using "travel time" data to characterize the behavior of migrating animals. The American Naturalist, 159: 372-387.
- Zacchéi A.M. & P. Tavolaro. 1988. Lateral line system during the life cycle of *Anguilla anguilla* L. Boll. Zool., 3: 145-153.

ANNEXE 1

Index des mots-clés utilisés dans la base de données bibliographiques

Abundance

acoustic fence
acoustic telemetry
activity rhythms
advection-diffusion
equation
age
age and size-structured
demography
age at maturity
age at migration
age distribution
Alosa
alteration
American shad
anaesthetic
Anguilla
Anguilla anguilla
Anguilla australis
Anguilla dieffenbachii
Anguilla japonica
Anguilla reinhardtii
Anguilla rostrata
Anguillicola crassus
anosmia
artificial light
assessment
Atlantic salmon
atmospheric depression

Baltic

bassin versant
behaviour
benzocaïne

bimodal arrival
bioaccumulation
biological reference levels
biometry
body length
brackish water habitat
buoyancy
bypass

Camouflage

capture-recapture
carrying capacity
catadromy
catch-per-unit-effort
catchability
catchment
causes of extinction
changes
chloride cells
chromatophore
climate
climate change
cloudiness
clove oil
coloration
condition
connectivity
conservation
conservation threats
controlling factors
cost of transport
crepuscular

Dam

darkness
day length
decline
deflection systems
demographic history
density
density dependence
depth
detrimental effect
diadromy
diet
diet shift
differential
growth between sexes
digestive tract
direction
discriminant analysis
distance upriver
disturbance
disturbance regime
domestication
downstream migrating eel
downstream migration
downstream passage
drag minimization

Eel

eel stock
eggs
electric fishing
elver
embryonic development
endocrinology
endurance
energy

energy storage
environment
environmental factor
environmental history
environmental parameter
environmental
 sex determination
environmental tolerance
epidermis
escapement
estradiol
estuarine habitat
estuary
Europe
European eel
eutrophication
evolution
exotic species
experimental
exponential growth
extinction
eye index
eye size

F at contents

fatty acids
faunal change
fecundity
feeding activity
female silver eel
females
fertilisation
fish barrier
fish communities
fish migration
fish passage
fisheries

fishery management
fishing effort
fishing mortality
fitness
fixed geographic
flow
flow regime
flow-attraction
food availability
foraging
freshwater
freshwater fisheries
full moon
fyke nets

Garonne Basin

gene
geomagnetic field
gestion
gill
gills
gonad condition
gonad development
gonadal development
gonadosomatic ratios
gonadotropin
gonadotropin
growth
growth habitat
growth hormon
growth hormone
growth rate
growth strategy
GSI
Gulf Stream

Habitat

habitat restoration
handling-induced
 behaviour
hatching
head shape
heavy metal
hermaphrodite
high pressure
histological analysis
home range
hormon
hormonal simulation
HSI
hydroelectric dam
hydroelectric power plant
hydroelectric
 power stations
hydrology
hydrometric factor
hydropower
hydrostatic pressure

Import

impoundment
incremental growth
individual behaviour
induced sexual maturation
infrasound source
injury
integument
invasive species

Japanese eel
juvenile eel

K_{in}

Lagoon

lake
landings
large river
larval recruitment
latitude life history traits
relationship
length
life history
light
light avoidance
light barrier
light intensity
lipid
Loire
longterm observations
luminosity
lunar cycle
lunar phase

Magnetic fields

magnetosensitive organ
male
management
manoeuvrability

marine resident
mark-recapture
experiment
maturation
maturation curves
Mediterranean sea
melanophore
metabolic cost
metabolism
metamorphosis
meteorological factor
microchemistry
microsatellites
migration
migration behavior
migration delay
migration loop
migration orientation
migration pattern
migration rate
migration speed
migration timing
migratory history
migratory stimulus
mitochondrial respiration
model
molecular phylogeny
monitoring
moon phase
morphology
morphometric changes
morphometrics
mortality
motivation
movement
mucous cell
Mugilidae
multiple regression
muscle fat content

muscle performance

N_{AOI}

natural flow regime
natural mortality
nematode
nocturnal behaviour

Ocular index

olfaction
olfaction cue
Oncorhynchus masou
Oncorhynchus nerka
Oncorhynchus
tshawytscha
ontogeny
orientation
orientation mechanism
Osmerus
osmoregulation
otolith
ovarian development
ovaries
ovulation
oxygen consumption

Parasite

passage time
pathology
PCB
peak migration
periodicity

petroleum jelly
 phenotypic plasticity
 pheromone
 photoperiod
 photoreceptor
 phylogenetic analysis
 physical triggers
 physiology
 piscivory
 PIT tag
 PIT-tag
 pituitary gland
 pollution
 pop-up tag
 population density
 population dynamic
 population effects
 population recovery
 population size
 population threats
 precautionary approach
 precipitation
 predictive model
 preferred temperature
 propulsion
 proximate composition

R

Radio telemetry
 radiotelemetry
 radiotracking
 rate of migration
 rate of population
 spreading
 recapture rate
 recruitment collapse
 refuge
 regulated river

regulating factors
 relative abundance
 reproduction
 reproductive potential
 reservoir
 resistance
 respirometry
 restoration
 rheotaxis
 river
 river flow
 river flow regime
 river habitat
 river zone
 run timing
 running
 water management
Rutilus rutilus

S

Salmo
Salmo salar
salmo trutta
 salt
salvelinus alpinus
 sampling method
 sargasso sea
 scale
 schooling
 sea
 seasonal changes
 seaward migration
 Severn
 sex
 sex determination
 sex differentiation
 sex ratio
 sexual dimorphism

sexual maturation
 shelter
 shoal
 silver eel
 silver eel escapement
 silvering
 silvering rate
 site fidelity
 size
 size at migration
 skeletochronology
 skin coloration
 smolt run
 socio-economy
 Sparidae
 spawning area
 spawning migration
 spawning stock biomass
 speciation
 species diversity
 species identification
 spectral analysis
 speed
 sperm motility
 spermatogenesis
 spillway
 Sr/Ca
 stabilization
 staging
 starvation
 steroid
 stock decline
 stock eel
 stock recruitment
 stock-recruitment
 relationship
 stocked eel
 stocking
 stream

streamflow regulation
streamflow variable
stress
surface bypass
surgery
survival
swim bladder
swimming
swimming depth
swimming direction
swimming efficiency
swimming speed
swim tunnel
synchrony

Tableau de bord

tag recovery
tagging recapture
telemetry
temperature
testis
Thetys Sea
thyroid hormones
tidal current
time lag
time series
timing
timing of migration
toxicology
tradeoff

trapping
travel time
trawling
turbidity
turbine
turbines

Ultrasonic telemetry

unpredictability
unpredictable flow regime

Video monitoring

visible implant elastomer
visual pigments
vitellogenesis
vitellogenin

Water current

water discharge
water flow
water level
water pollution
water release
water temperature
water velocity
watershed

weight
weir
wind

Xanthophore

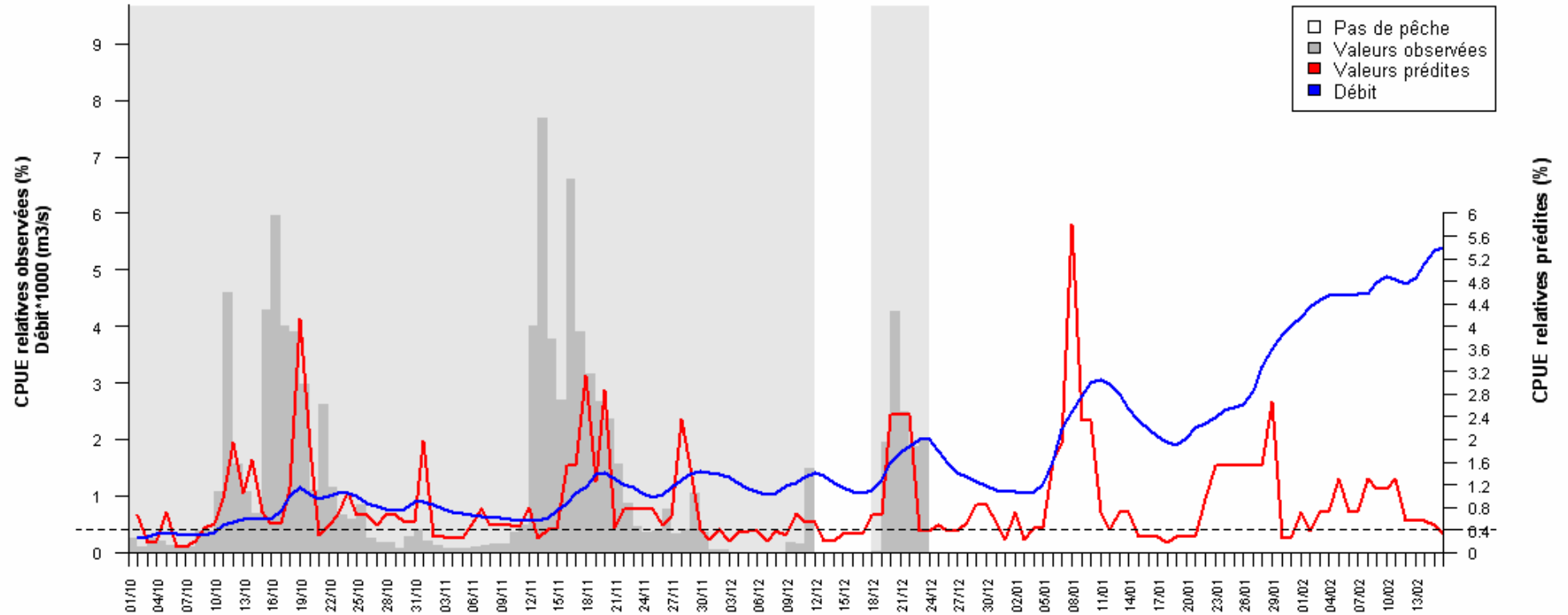
Yellow eel

yield

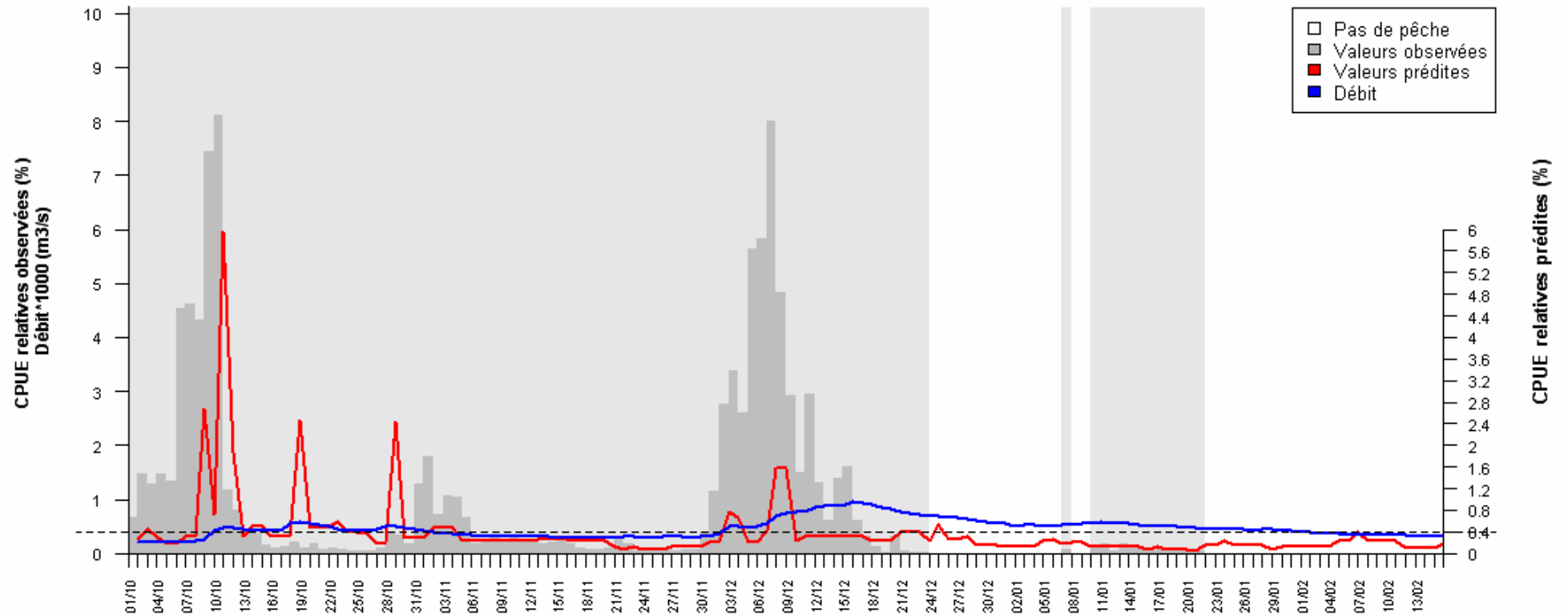
ANNEXE 2

Graphiques des CPUE relatives observées et prédites pour les années 1987 - 2006. La ligne pointillée horizontale figure la valeur seuil de CPUE prédite de 0,4% qui assure sur la Loire un échappement annuel moyen annuel d'environ 70%. La période d'apprentissage considérée est de 20 années (1987-2006).

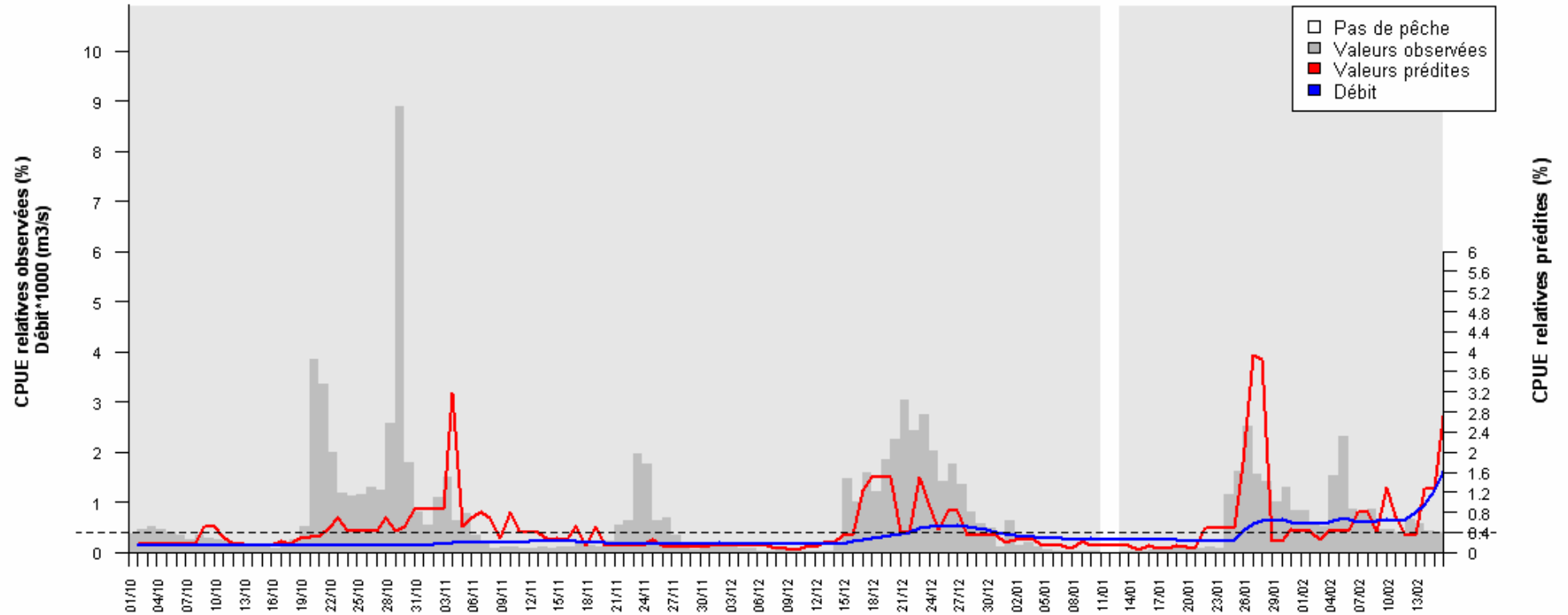
Saison 1987



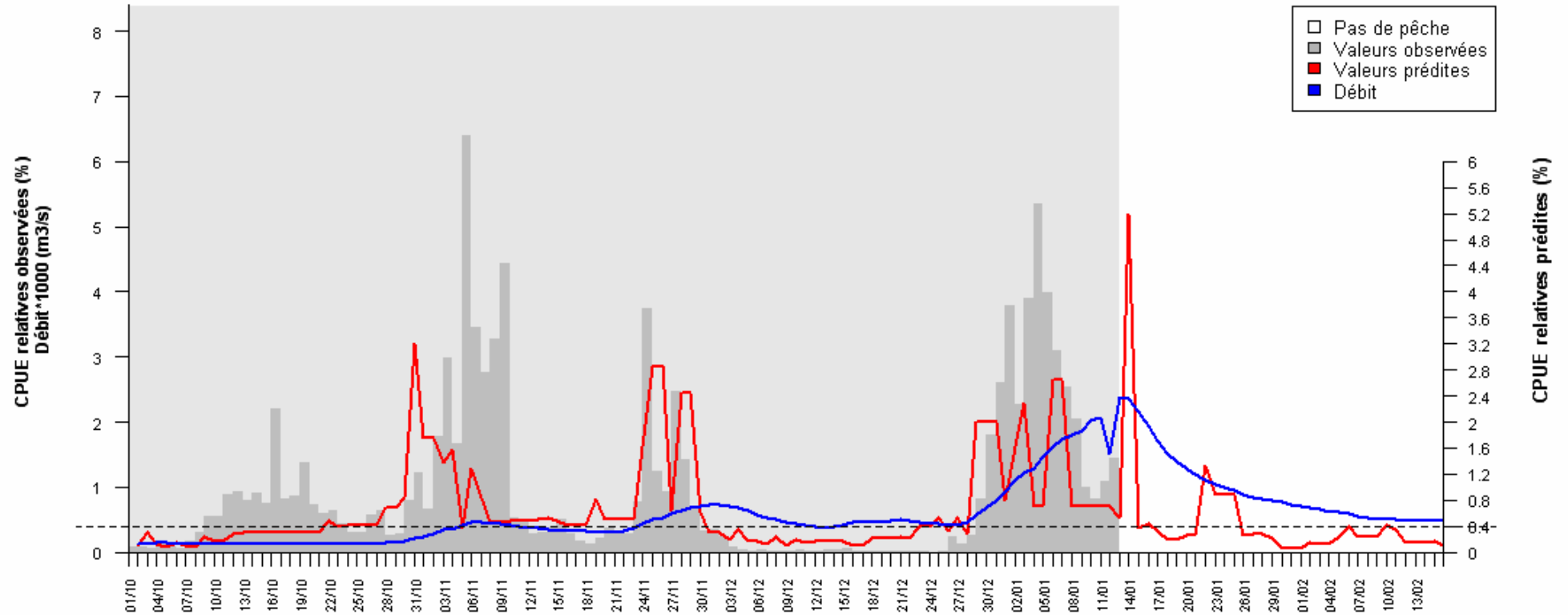
Saison 1988



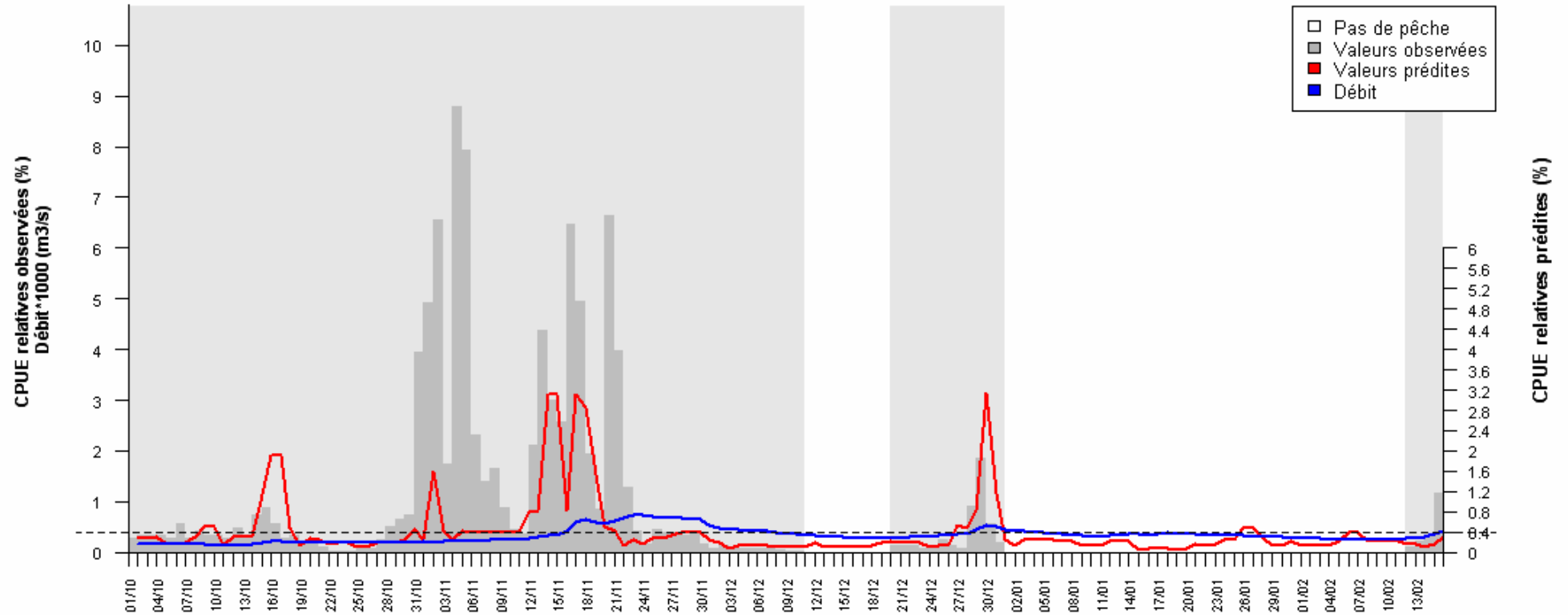
Saison 1989



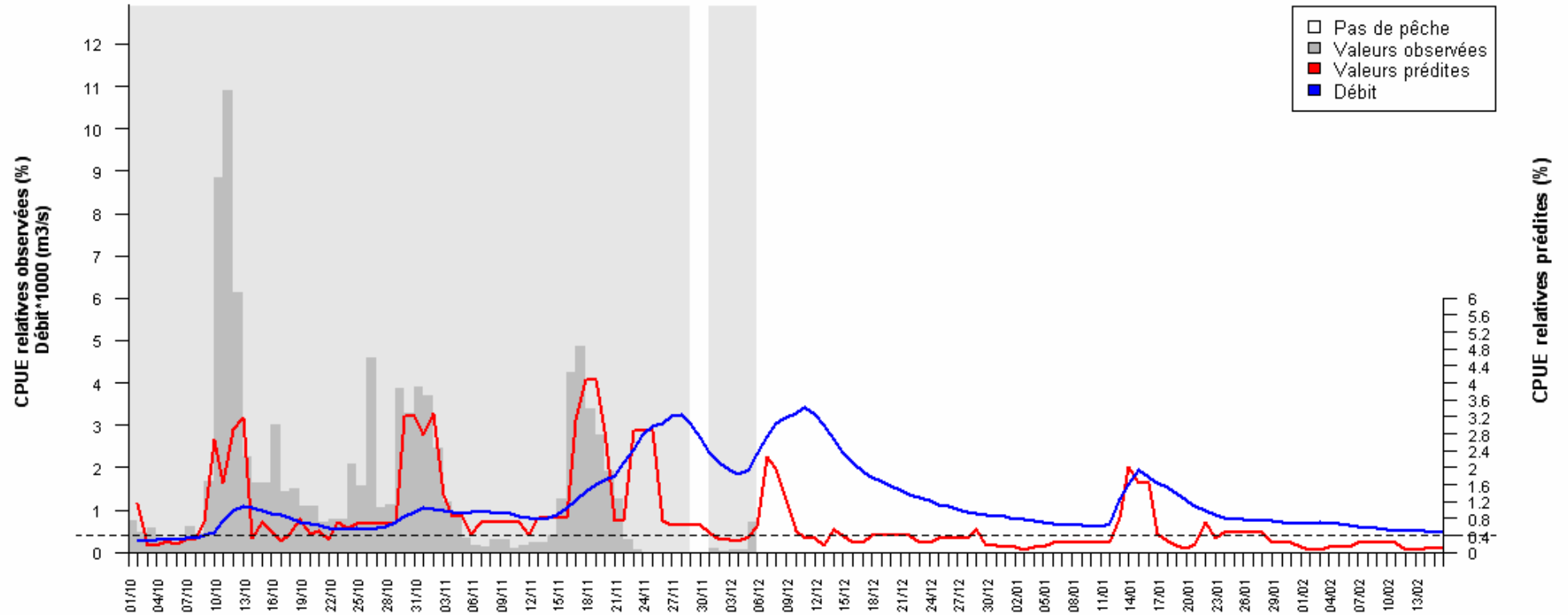
Saison 1990



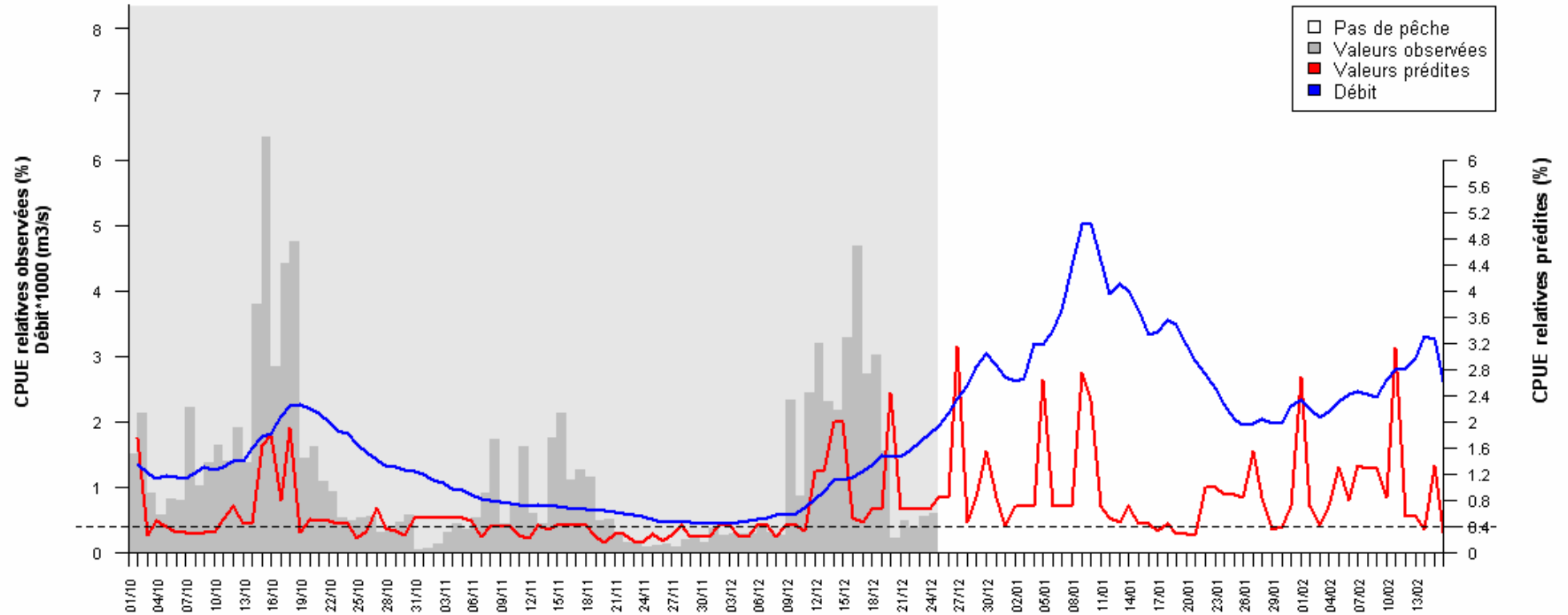
Saison 1991



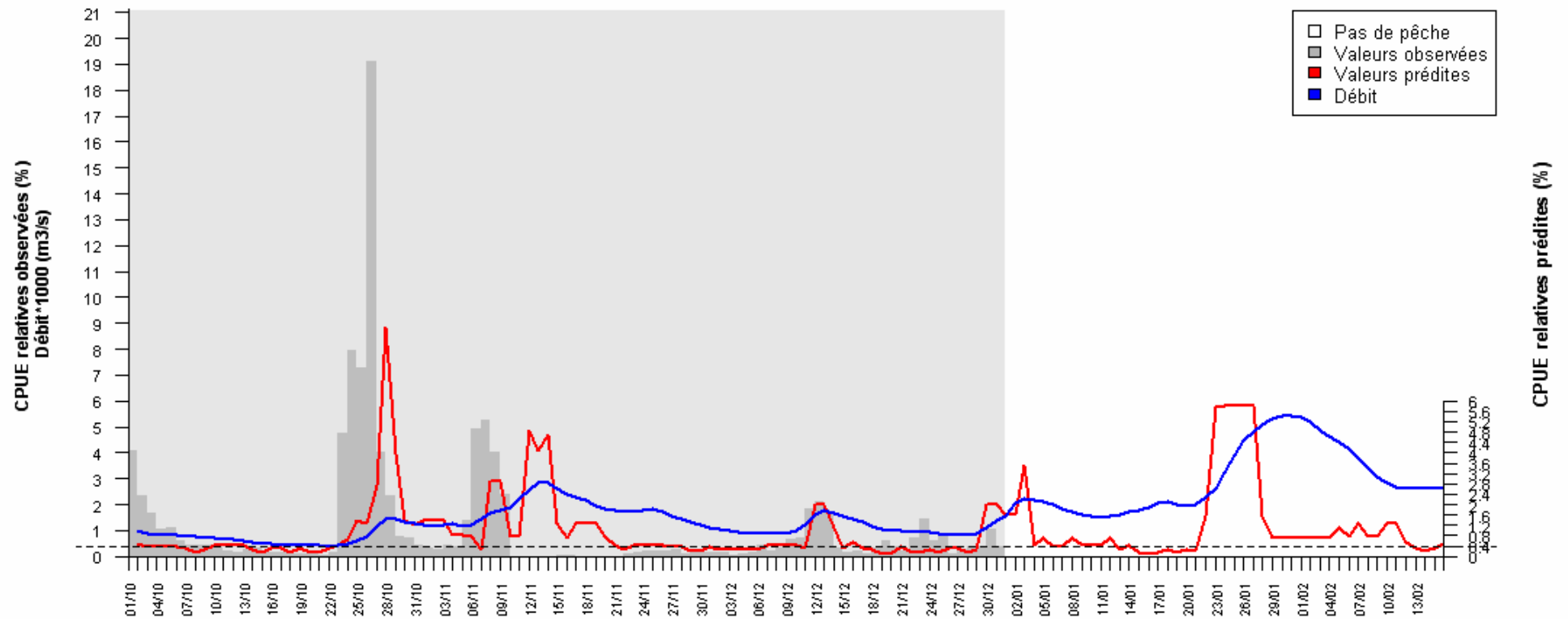
Saison 1992



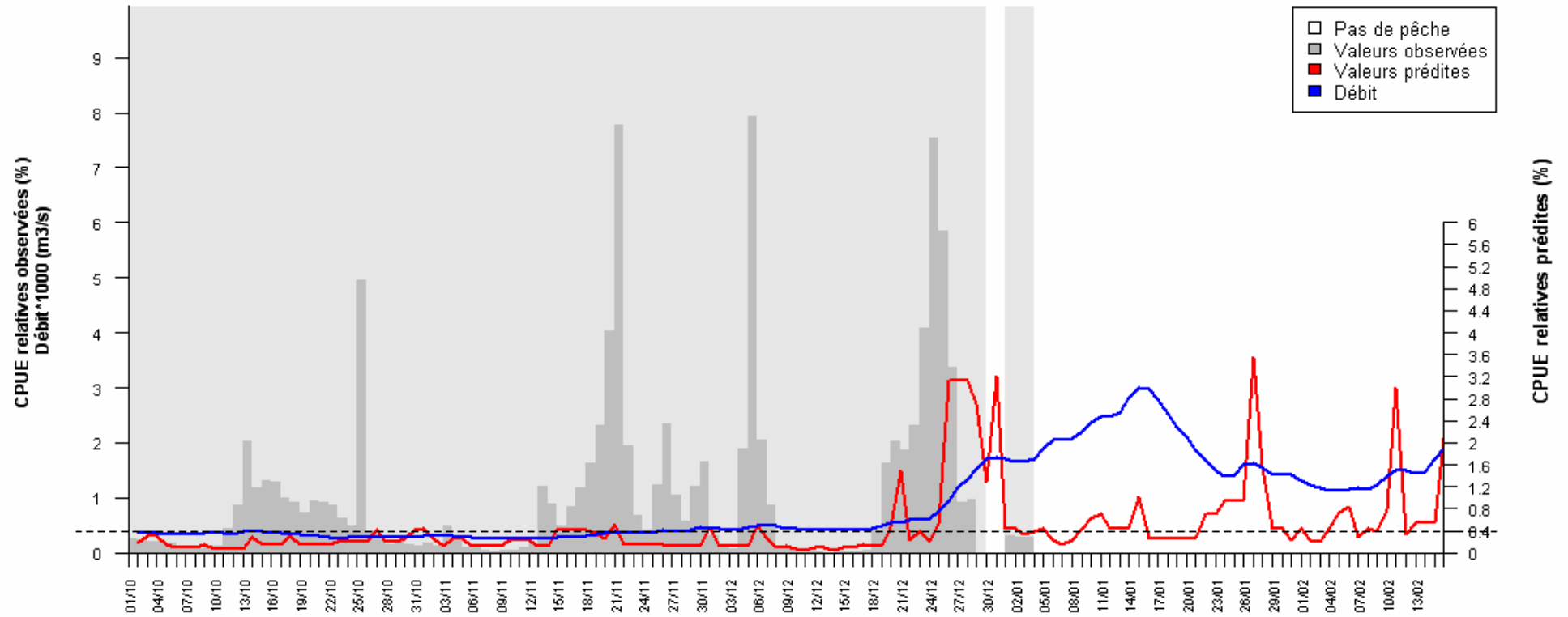
Saison 1993



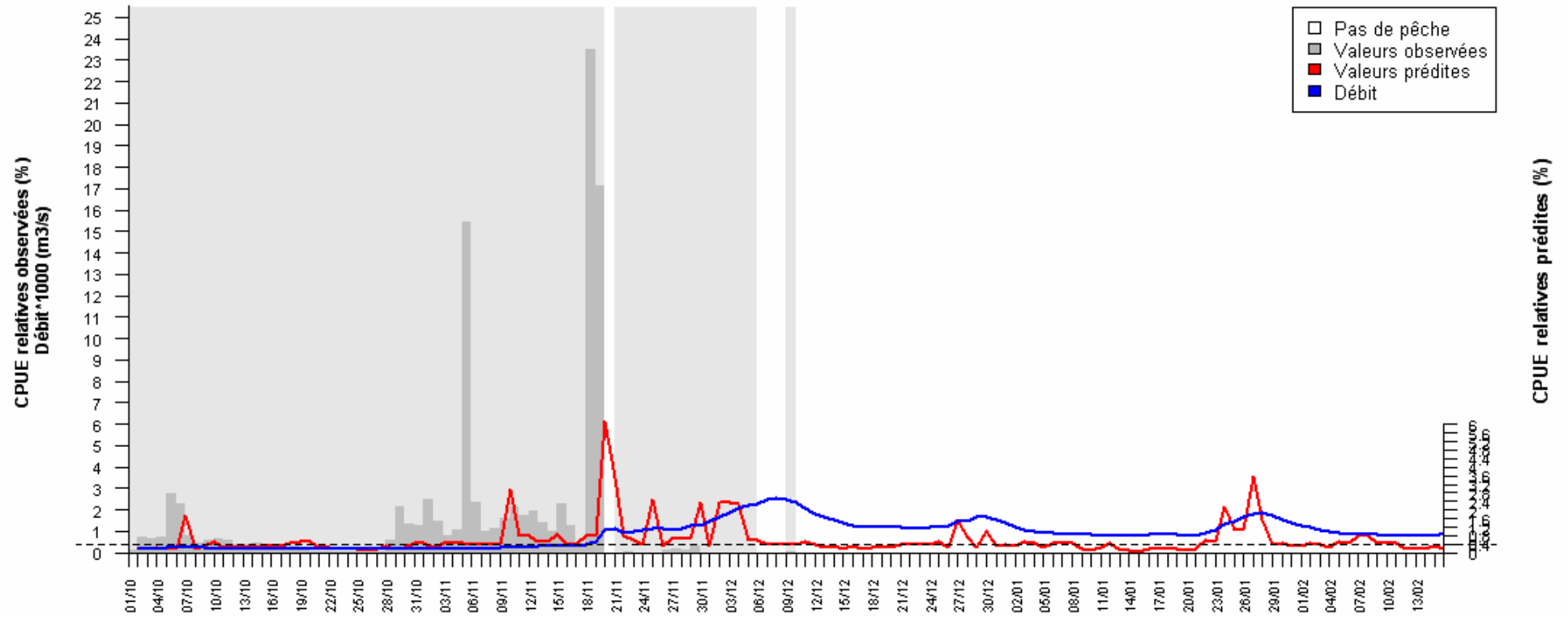
Saison 1994



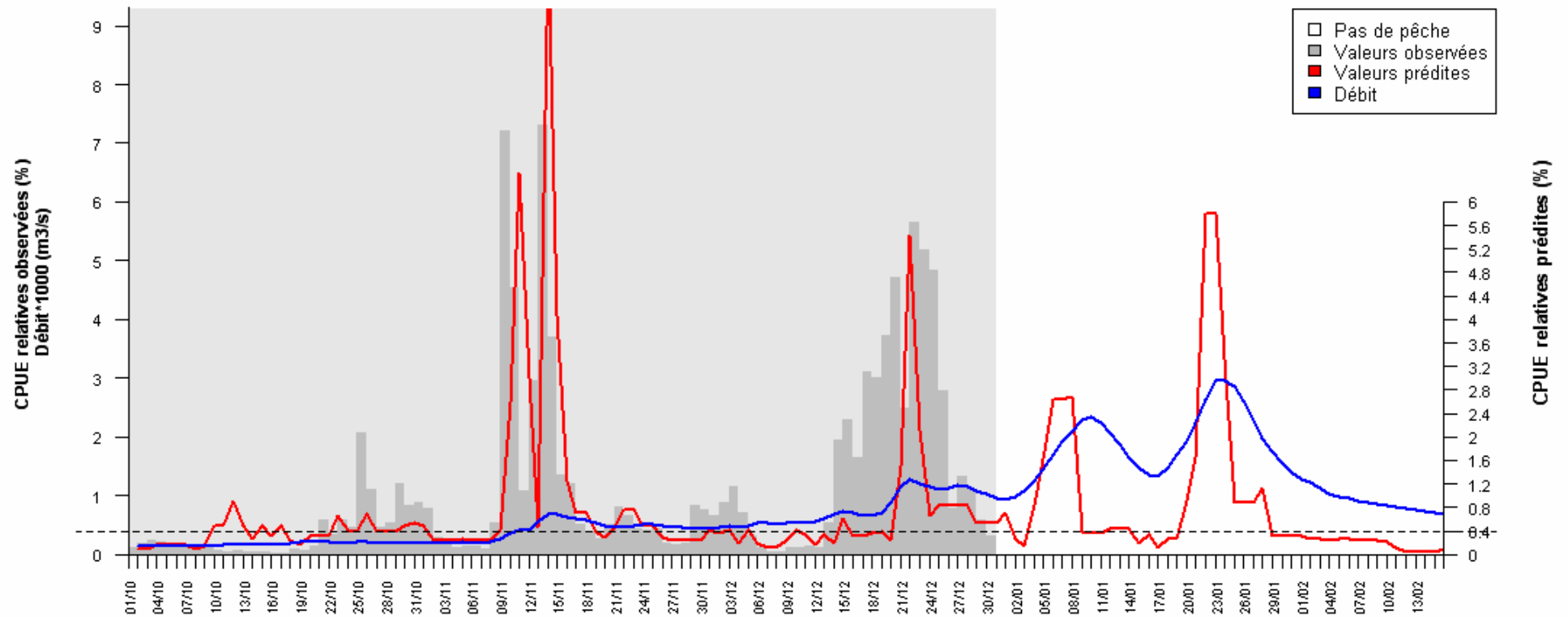
Saison 1995



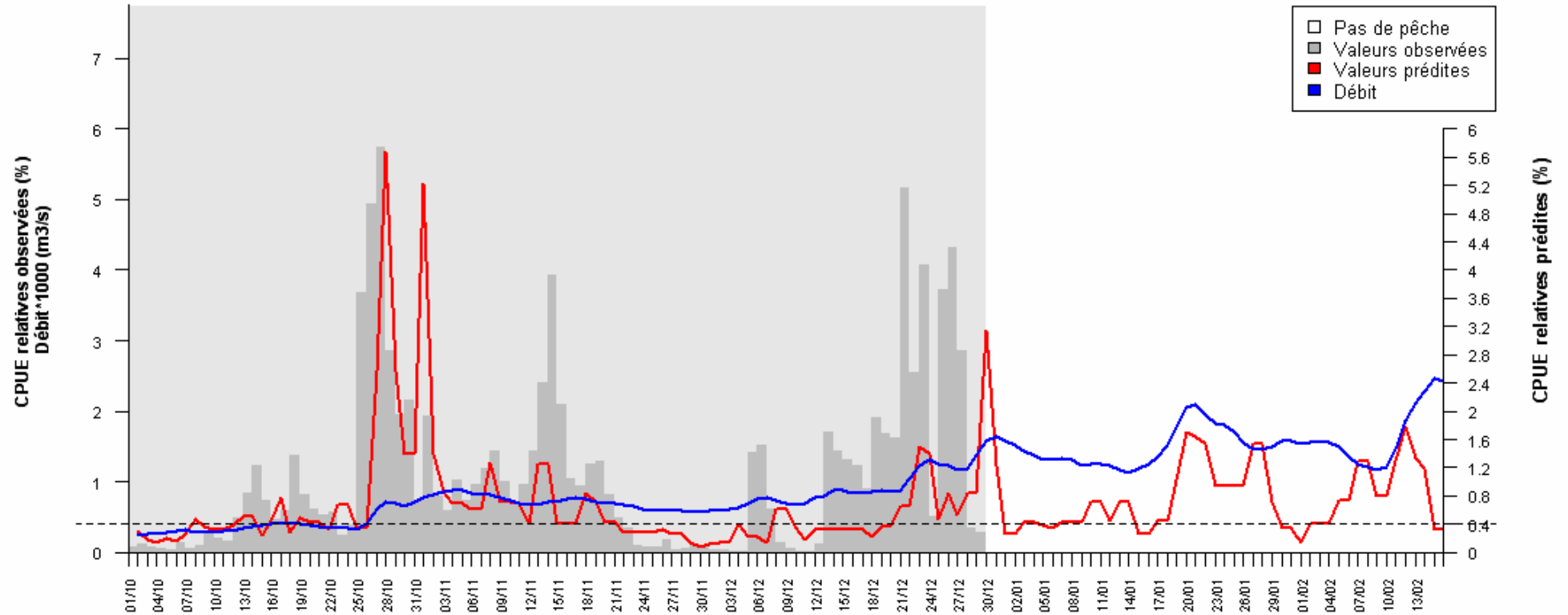
Saison 1996



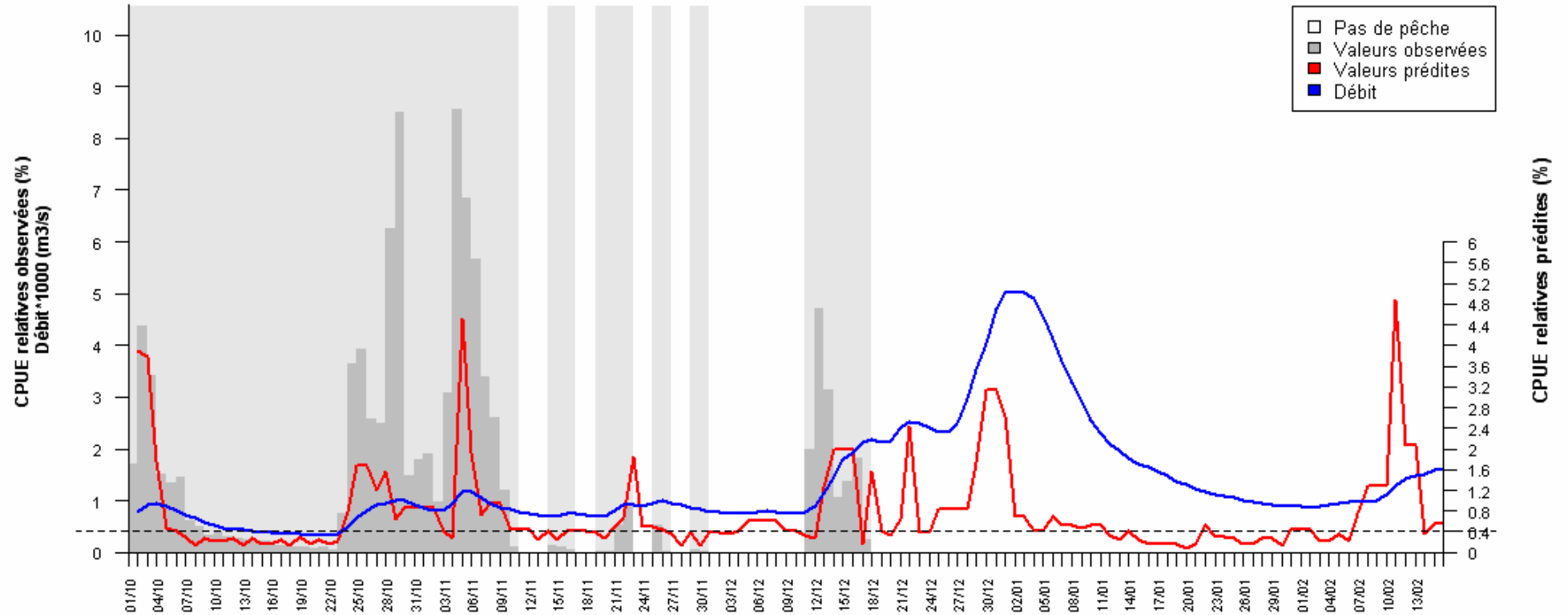
Saison 1997



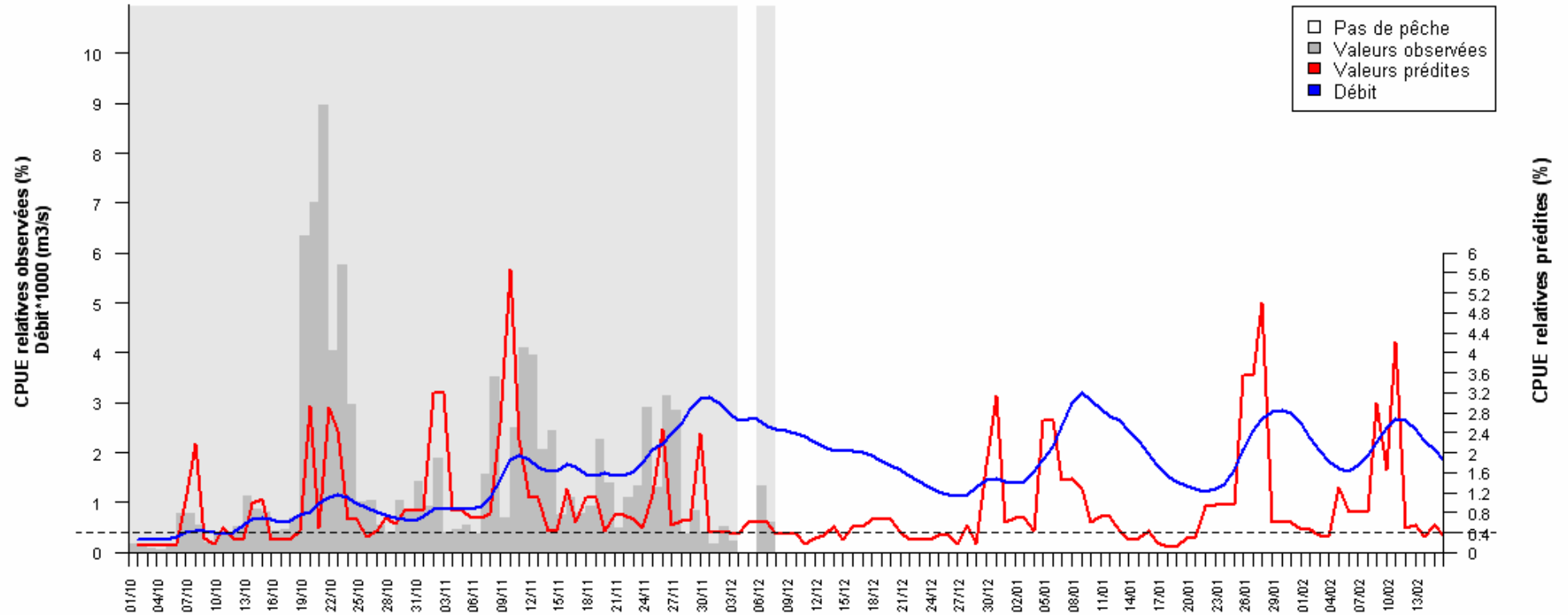
Saison 1998



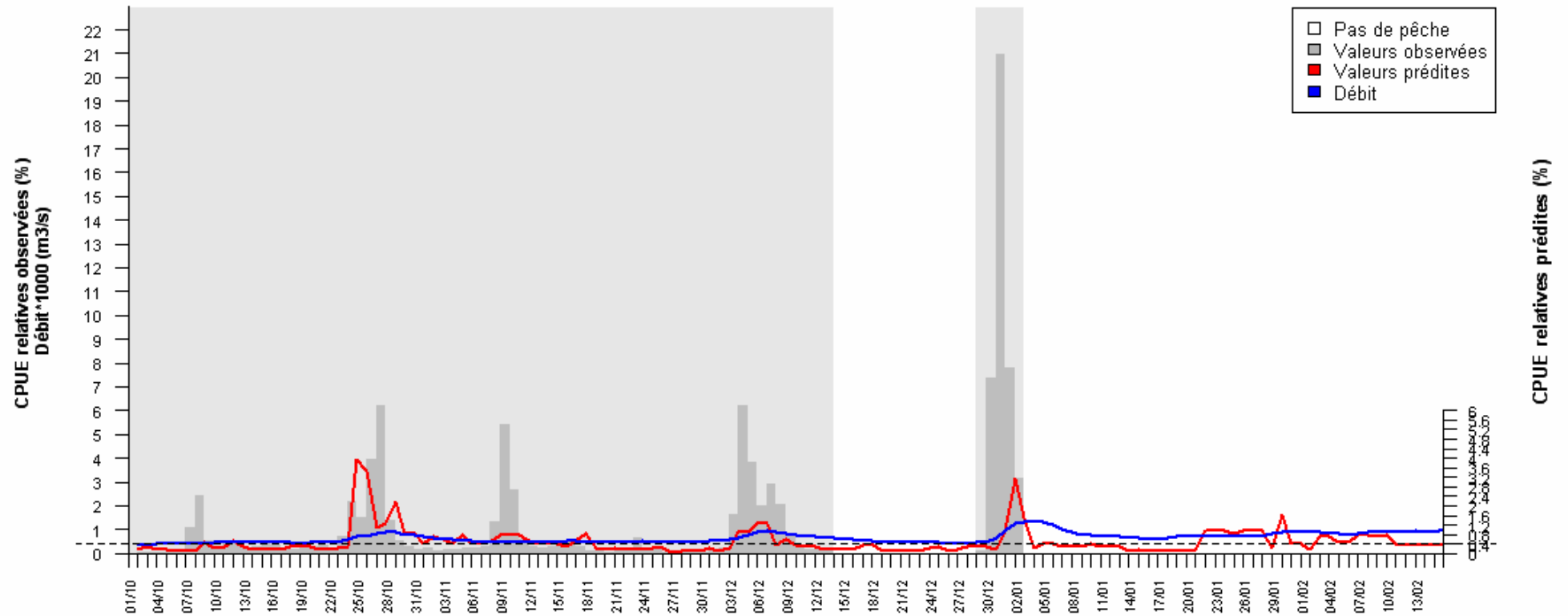
Saison 1999



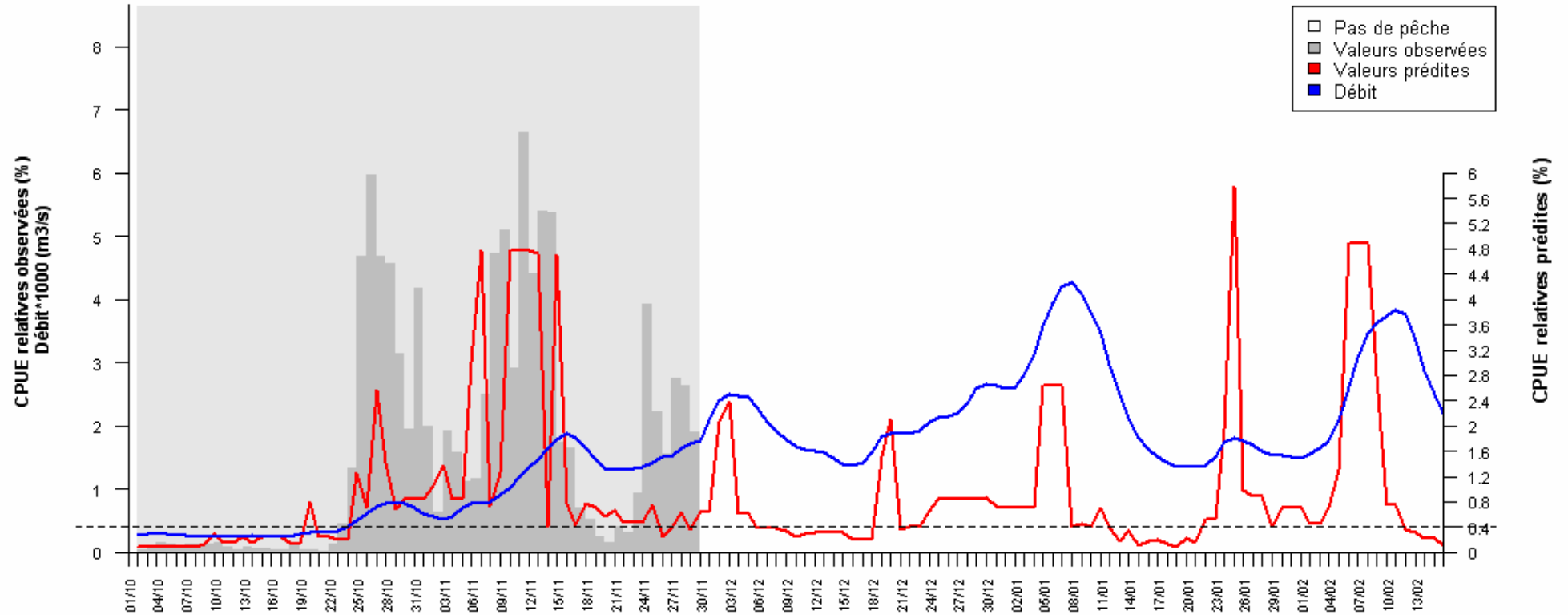
Saison 2000



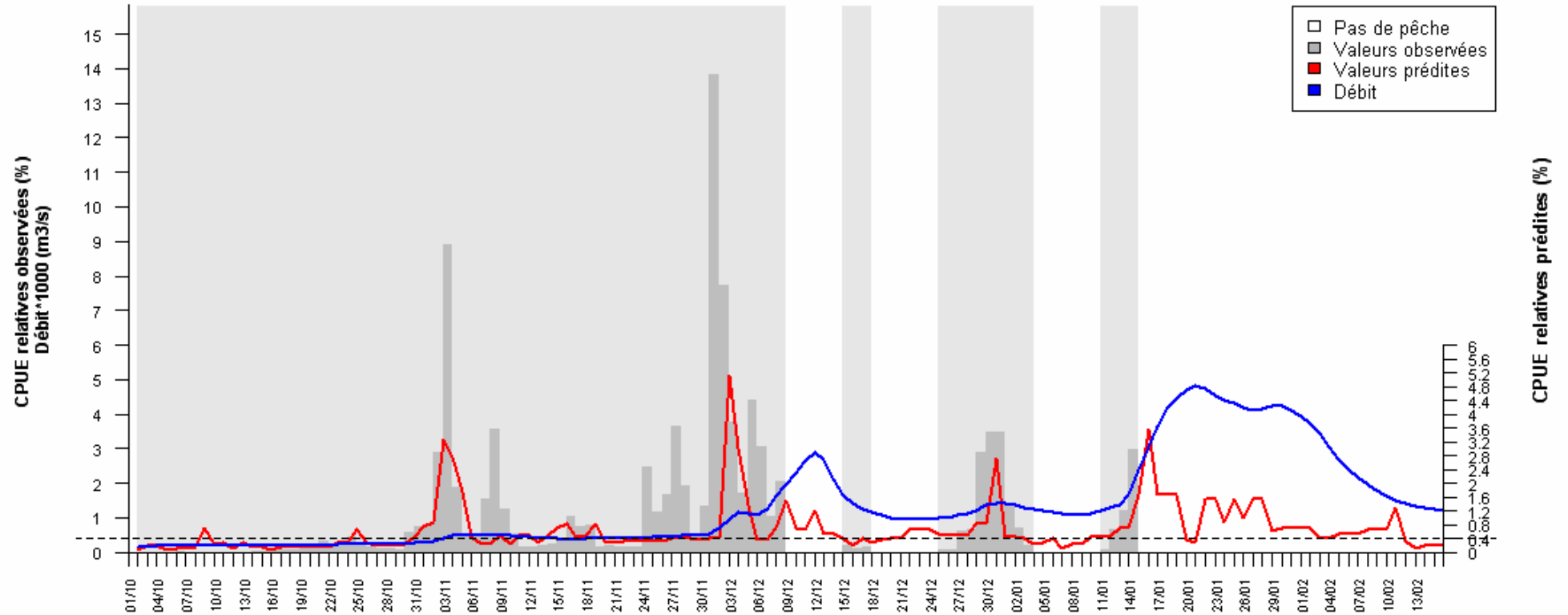
Saison 2001



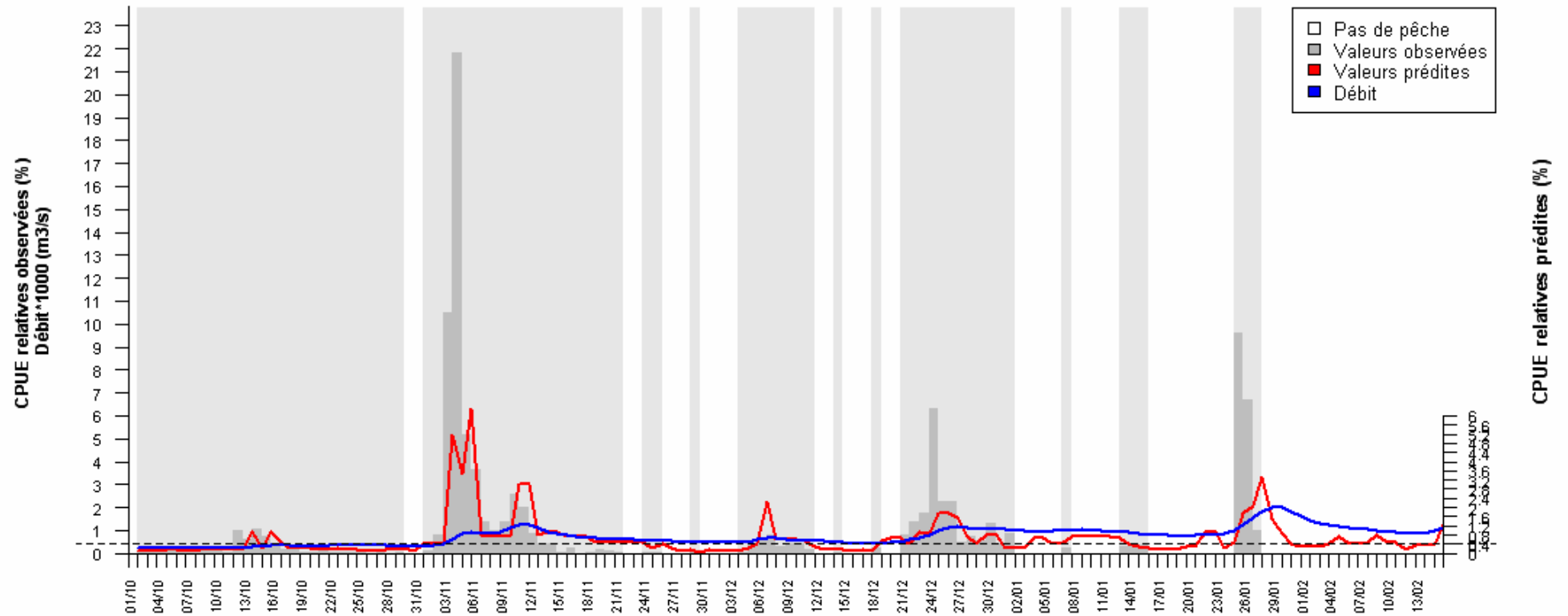
Saison 2002



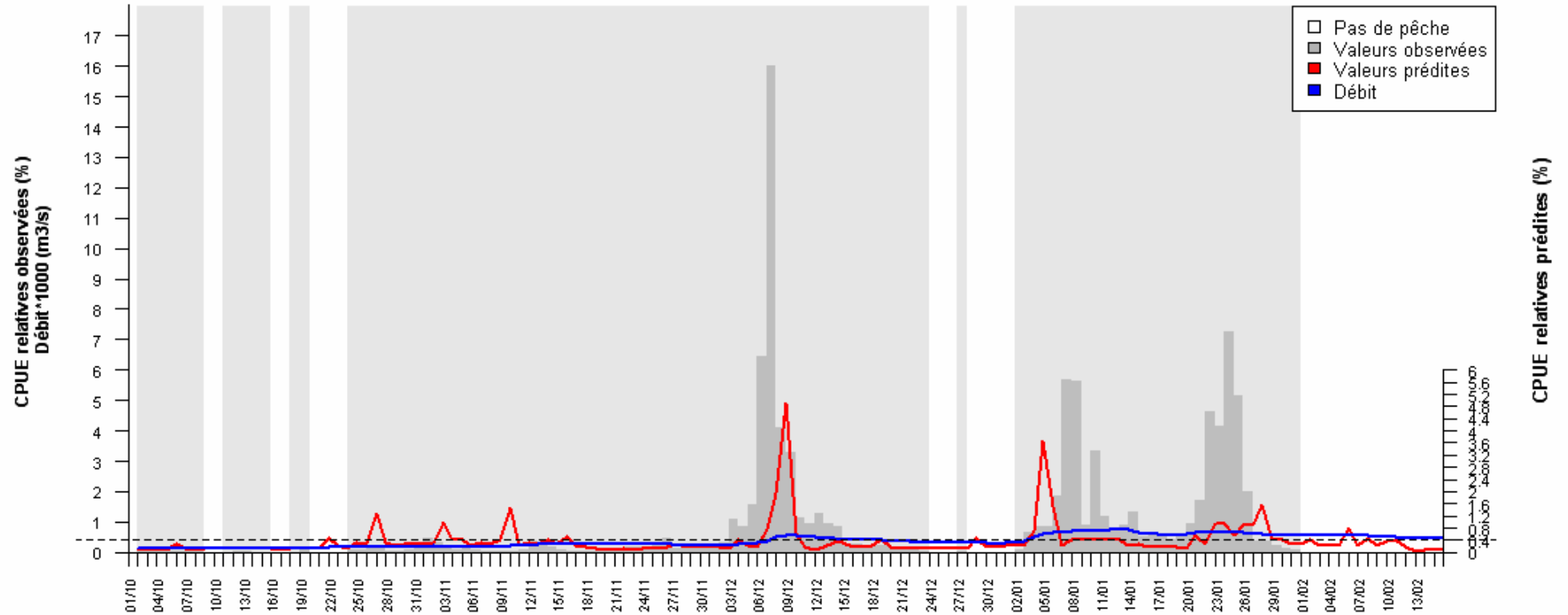
Saison 2003



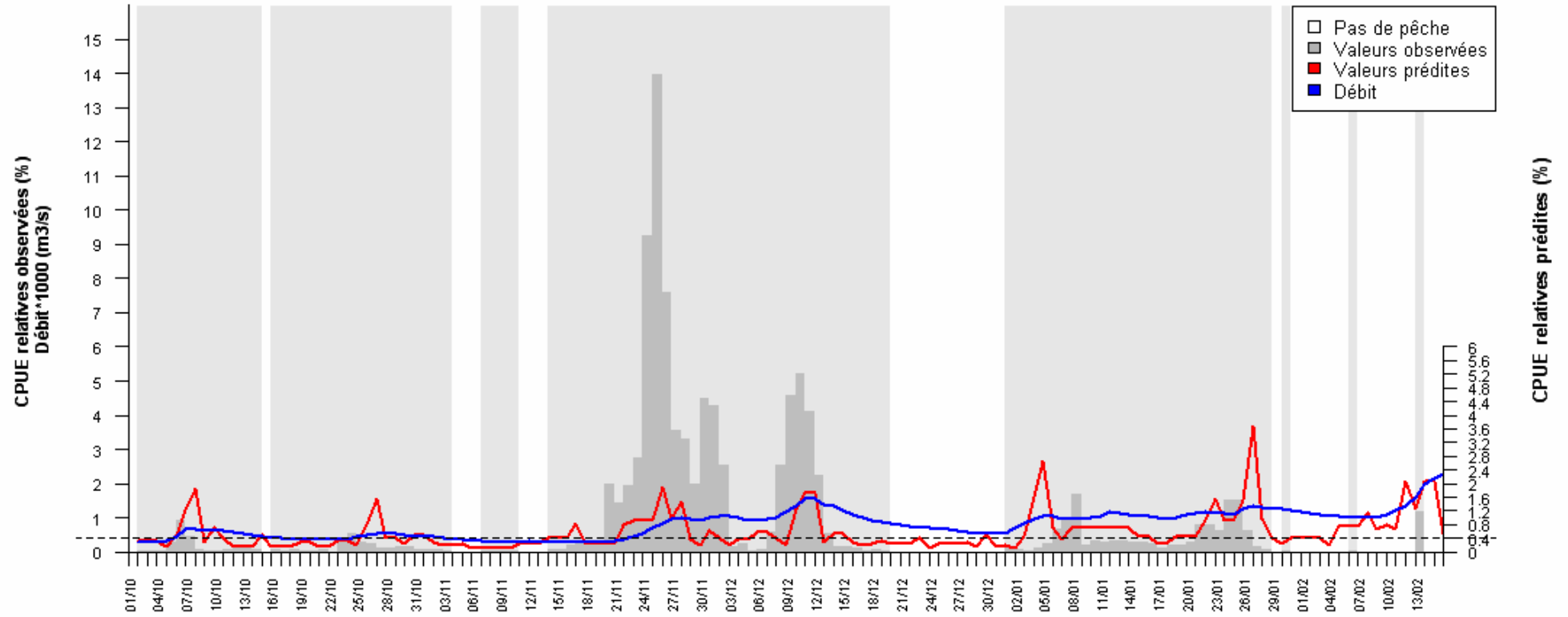
Saison 2004



Saison 2005



Saison 2006



ANNEXE 3

Estimateurs des variables « turbidité » et « numéro de la semaine » utilisés pour prédire l'occurrence (modèle binomial) des anguilles argentées (période d'apprentissage = 20 années).

Call: glm(formula = data\$p5.01 ~ as.factor(data\$turbcl1) + as.factor(data\$sem), family = binomial)

Coefficients:

(Intercept)	as.factor(data\$turbcl1)2	as.factor(data\$turbcl1)3
3.13693	1.00411	-0.89230
as.factor(data\$sem)2	as.factor(data\$sem)3	as.factor(data\$sem)4
-0.48191	0.78442	0.61084
as.factor(data\$sem)5	as.factor(data\$sem)6	as.factor(data\$sem)7
17.36547	1.21278	0.09318
as.factor(data\$sem)8	as.factor(data\$sem)9	as.factor(data\$sem)10
0.18506	0.37648	-0.42393
as.factor(data\$sem)11	as.factor(data\$sem)12	as.factor(data\$sem)13
1.61945	17.55336	0.72118
as.factor(data\$sem)14	as.factor(data\$sem)15	as.factor(data\$sem)16
17.77750	18.01341	17.67692
as.factor(data\$sem)17	as.factor(data\$sem)18	as.factor(data\$sem)19
17.64193	17.10847	17.87019
as.factor(data\$sem)20		
17.18643		

Degrees of Freedom: 1720 Total (i.e. Null); 1699 Residual

(1039 observations deleted due to missingness)

Null Deviance: 445.4

Residual Deviance: 382.6 AIC: 426.6

ANNEXE 4

Estimateurs des variables « indice de luminosité », « delta débit », « turbidité », « type de temps » et « numéro de la semaine » utilisés pour prédire les CPUE positives (modèle log-normal) des anguilles argentées (période d'apprentissage = 20 années).

Call: `glm(formula = log(data$p5r) ~ as.factor(data$ilc) + as.factor(data$qvarc11) + as.factor(data$turbcl1) + as.factor(data$sem) + as.factor(data$meteol2), family = gaussian, subset = (data$p5r > 0))`

Coefficients:

(Intercept)	as.factor(data\$ilc)2	as.factor(data\$ilc)3
-2.33653	-0.60038	-0.70894
as.factor(data\$qvarc11)2	as.factor(data\$qvarc11)3	as.factor(data\$qvarc11)4
0.33330	1.65597	2.40232
as.factor(data\$qvarc11)5	as.factor(data\$turbcl1)2	as.factor(data\$turbcl1)3
2.31892	0.68874	1.17864
as.factor(data\$sem)2	as.factor(data\$sem)3	as.factor(data\$sem)4
0.48626	0.46027	0.77860
as.factor(data\$sem)5	as.factor(data\$sem)6	as.factor(data\$sem)7
0.99422	0.93137	0.98294
as.factor(data\$sem)8	as.factor(data\$sem)9	as.factor(data\$sem)10
0.47673	0.27730	0.30782
as.factor(data\$sem)11	as.factor(data\$sem)12	as.factor(data\$sem)13
0.04889	0.23165	0.52882
as.factor(data\$sem)14	as.factor(data\$sem)15	as.factor(data\$sem)16
0.29883	0.31004	-0.17801
as.factor(data\$sem)17	as.factor(data\$sem)18	as.factor(data\$sem)19
1.06924	0.26294	0.82625
as.factor(data\$sem)20	as.factor(data\$meteol2)2	as.factor(data\$meteol2)3
-0.01159	0.15094	0.14029
as.factor(data\$meteol2)4	as.factor(data\$meteol2)5	as.factor(data\$meteol2)6
-0.33974	-0.30406	0.13352
as.factor(data\$meteol2)7	as.factor(data\$meteol2)8	
0.16216	-0.40799	

Degrees of Freedom: 1671 Total (i.e. Null); 1637 Residual
(1039 observations deleted due to missingness)

Null Deviance: 4130

Residual Deviance: 2732 AIC: 5638 Residual Deviance: 382.6 AIC: 426.6