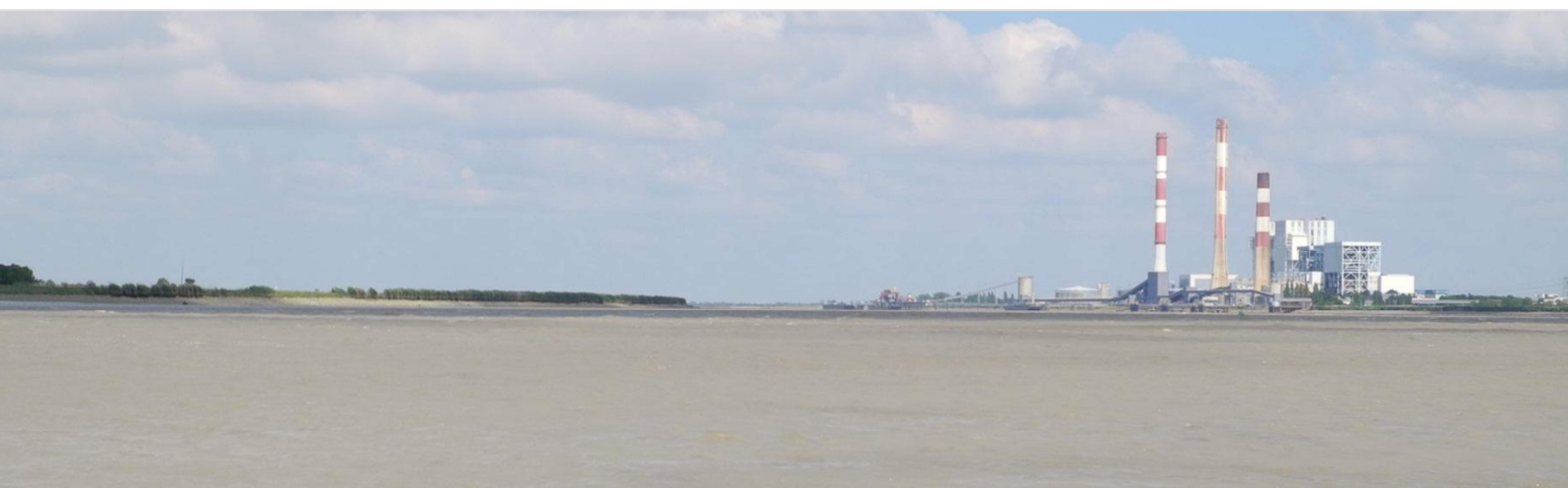


Rapport de stage pour l'obtention de la première année de Master

ETUDE PAR TELEMETRIE HYDROACOUSTIQUE DU COMPORTEMENT MIGRATOIRE D'UNE ESPECE AMPHIHALINE : LA GRANDE ALOSE (*ALOSA ALOSA* LINNÆUS, 1758) DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE



Romain GADAIS
Mai 2011

Maîtres de stage :

M. Emilien LASNE (Dr.), Mlle. Elise BULTEL
Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes Côtiers USM 0404
UMR 7208 BOREA - Muséum National d'Histoire Naturelle – CNRS

FINANCEMENT

Cette étude a été financée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. (MEDDTL) dans le cadre de la convention MNHN/MEDDTL DEB « Amphihalins, cohérence du réseau Natura 2000 en mer ».

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu mes deux maîtres de stage : M. Emilien LASNE et Mlle Elise BULTEL pour leur disponibilité, leur implication et leur passion pour le projet amphihalin et plus particulièrement le volet télémétrie.

Je souhaite adresser un remerciement général à toute l'équipe MNHN du Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes Côtiers (CRESCO) qui m'a permis de réaliser mon stage dans d'excellentes conditions grâce à la dynamique, l'attention et la sympathie de chacun.

Je remercie également M. Eric FEUNTEUN, Directeur du CRESCO, pour m'avoir accueilli dans la structure qu'il dirige et pour son aide et ses suggestions quant à ma problématique.

Je remercie ensuite Mlle Elodie REVEILLAC, M. Anthony ACOU et M. Régis GALLON pour leur expérience, leur aide et leurs éclairages quant à l'exploitation et au traitement des données de télémétrie et de variable environnementales.

Un merci particulier à Mlle Laure VIRAG pour son initiation à l'otolithométrie d'Anguille européenne.

Je tiens également à remercier M. Mickaël VALLEE, pêcheur professionnel de Cordemais qui n'a pas seulement été un accompagnateur lors de nos journées de marquage et de maintenance mais un guide aux conseils et aux expériences précieuses.

Mme Christine BERTIER (GIP Loire Estuaire), Mme Stéphanie POLIGOT-PITSH, M. André ROBERT, M. Bruno CORTES (DREAL Pays de la Loire) et M. Nicolas ROCHE (DDT du Maine-et-Loire) doivent également être remerciés. Sans leur partenariat et leur aide par la fourniture de données (parfois dans l'urgence) une bonne partie de ce rapport n'aurait tout simplement pas pu être réalisée.

Je remercie la communauté des pêcheurs professionnels fluviaux et estuariens ligériens, que j'apprécie particulièrement, et chez qui j'ai trouvé une expérience faite des nombreuses heures passées sur la Loire qui m'a été d'une aide précieuse, notamment M. Robert GUILLOT, M. Bruno GABRIS, M. Philippe BOISNEAU et M. Didier MACE.

Je tiens, enfin, à remercier, toute l'équipe pédagogique et les intervenants professionnels responsables de la formation de L3 et M1 Ingénierie des Milieux Aquatiques et des Corridors Fluviaux, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Pour terminer, j'adresse un remerciement tout particulier à M. Emmanuel LESURTEL (DDT Loire-Atlantique - Service Maritime et Navigation, VNF) qui m'a mis en relation avec le CRESCO et m'a permis de réaliser ce stage.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	2
2	SITE ET ESPECE ETUDIES.....	3
2.1	CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE : L'ESTUAIRE DE LA LOIRE	3
2.1.1	Généralités.....	3
2.1.2	Zonation Natura 2000.....	3
2.2	LA GRANDE ALOSE	4
3	MATERIELS ET METHODES	4
3.1	DONNEES ENVIRONNEMENTALES DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE.....	4
3.1.1	Hydrologie	4
3.1.2	Physico-chimie.....	5
3.1.3	Interactions des phénomènes environnementaux dans l'estuaire	5
3.2	PRINCIPES GENERAUX DE LA TELEMETRIE HYDRO-ACOUSTIQUE.....	5
3.2.1	Généralités.....	5
3.2.2	Fonctionnement de l'équipement acoustique utilisé	6
3.3	DEPLOIEMENT DES RECEPTEURS HYDROACOUSTIQUES	6
3.3.1	Mise en place des hydrophones	6
3.3.2	Capacité de détection.....	7
3.3.3	Acquisition des données.....	7
3.4	IMPLANTATION DES EMETTEURS HYDROACOUSTIQUES.....	8
3.5	TESTS STATISTIQUES ET OUTILS ANALYTIQUES EMPLOYES	9
3.5.1	Moyenne, erreur standard et étendue	9
3.5.2	Coefficient de condition de Beckman.....	9
3.5.3	Test de Mann-Whitney	9
3.5.4	Analyse en Composantes Principales	9
4	RESULTATS	10
4.1	CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE.....	10
4.1.1	Contexte environnemental de la période d'étude.....	10
4.1.2	Relations entre les paramètres environnementaux	12
4.2	BILAN METHODOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUES DES INDIVIDUS ECHANTILLONNES/MARQUES	13
4.2.1	Bilan méthodologique	13
4.2.2	Caractéristiques biométriques des poissons capturés	14
4.3	ANALYSE DES COMPORTEMENTS MIGRATOIRES	15
4.3.1	Approche globale de la migration.....	15
4.3.2	Patrons de déplacements individuels.....	16
4.3.3	Date de capture et migration	19
4.3.4	Caractéristiques biométriques et migration.....	20
4.3.5	Variables environnementales et migration	20
4.3.6	Vitesses de déplacement.....	22
5	DISCUSSION.....	23
5.1	ASPECTS METHODOLOGIQUES.....	23
5.2	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL.....	24
5.3	COMPORTEMENTS MIGRATOIRES	25
5.4	RELATIONS ENTRE VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET MIGRATION.....	27
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	29

RESUME

Le bouchon vaseux et les conditions d'oxygénations de l'estuaire de la Loire apparaissent comme les principaux facteurs impactant la migration des espèces amphihalines.

L'étude par télémétrie hydroacoustique menée sur 72,1 km en Loire estuarienne, portant sur 51 grandes Aloses munies d'un émetteur puis détectées par un réseau d'hydrophones, a permis d'améliorer la connaissance des premières phases de leur migration anadrome.

Les conditions d'écoulement et de bruits de fond en estuaire ont provoqué une certaine porosité de barrières acoustiques assurées par les hydrophones, ne permettant pas de conclure à l'absence du poisson sur le site en cas de non détection.

L'analyse des données de détection a mis en évidence que, ni la date de capture/marquage, ni les caractéristiques biométriques n'influencent la proportion d'Aloses détectées à l'amont.

Les résultats de cette première année d'étude ont également montré que les Aloses ont réalisé une phase d'attente dans l'estuaire aval avant de migrer de manière épisodique lorsque les conditions environnementales étaient propices. La vitesse moyenne calculée lors cette phase de montaison était de 53,6 km/j avec un minimum de 24,8 km/j et un maximum de 91,2 km/j.

Sur la période considérée, ces épisodes migratoires se sont produits lors de la conjonction de différentes conditions hydrologiques et physico-chimiques à degrés de corrélation variables :

- lors des plus faibles coefficients de marée (mortes eaux)
- lors des plus hautes concentrations moyennes et des plus faibles étendues journalières en oxygène dissous
- lors des plus faibles concentrations et étendues moyennes journalières en matières en suspension

Mots clés : Alosa alosa, migration, estuaire, Loire, conditions environnementales

ABSTRACT

The turbidity maximum and oxygen conditions of the Loire estuary appear to impact significantly the migration of diadromous species.

The hydroacoustic telemetry study conducted in the Loire estuary covering 72.1 km, conducted on 51 Allis shads equipped with a transmitter and then detected by a hydrophone array has improved the knowledge of the early stages of their anadromous migration.

Flow conditions and background noise in the estuary were responsible of the porosity of the acoustic barriers created by the hydrophones, preventing us from concluding that a fish undetected was a fish absent of the area.

The analysis of sensor data showed that neither the date of capture/tagging, nor morphometric traits influence the proportion of Allis shads detected upstream.

The results of this first year of study also showed that Allis shads have made a standby phase in the estuary before their sporadic upstream migration which appeared when environmental conditions were favorable. The average speed calculated during this phase of upstream movement was 53.6 km / d with a minimum of 24.8 km / d and a maximum of 91.2 km / d.

Over this period, these migration episodes occurred during a combination of different hydrological and physico-chemical conditions differently correlated:

- during lower tidal coefficients (neap tides)
- during the highest daily average and lowest stretches concentrations of dissolved oxygen
- during the lowest daily average and lower stretches concentrations of suspended matter

Key words : Alosa alosa, migration, estuary, Loire, environmental conditions

PREAMBULE

L'étude du comportement migratoire de la grande Alose (*Alosa alosa* LINNÆUS, 1758), dans l'estuaire de la Loire, par télémétrie hydroacoustique, entre dans le cadre du projet « Amphihalins » confié au Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. (MEDDTL) (Figure 1).

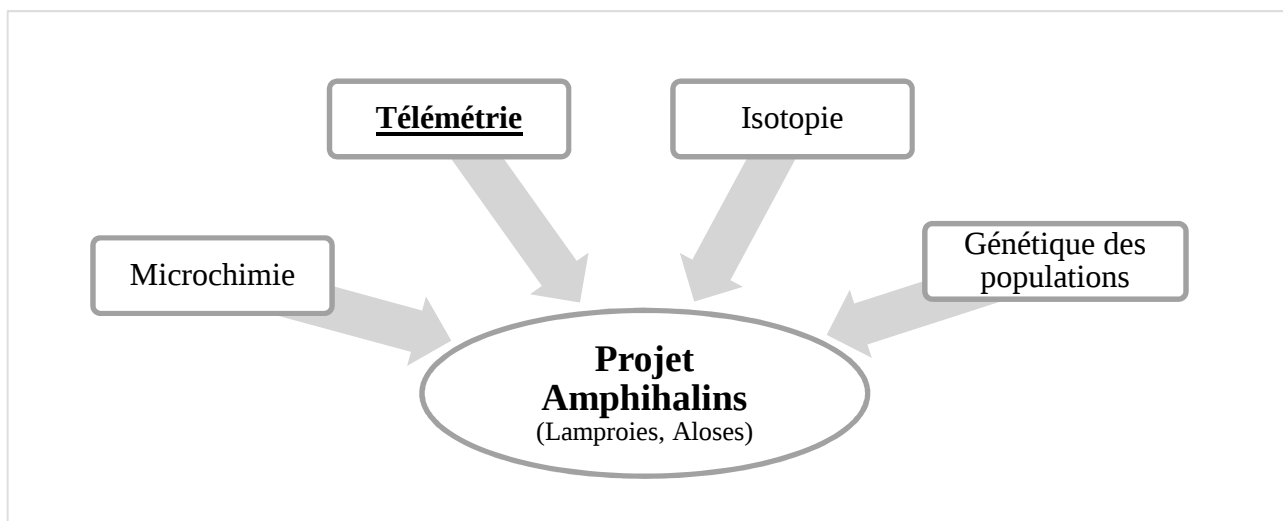


Figure 1 : place de l'étude télémétrique dans le projet « Amphihalins »

Ce projet est, plus précisément, mené, par l'équipe du MNHN de la station marine de Dinard (UMR BOREA) au Centre de Recherche et d'Enseignement sur les Systèmes Côtiers (CRESCO).

L'objectif de ce vaste projet est d'apporter des éléments permettant de répondre à la réserve scientifique émise par la Commission Européenne concernant certaines espèces de poissons amphihalins inscrites en annexe II de la Directive 92/43/CEE « Habitats-Faune-Flore » (Aloses et Lamproies), dans le cadre de la procédure de désignation des sites Natura 2000 en mer.

Les finalités de ce projet étude sont multiples :

- Caractériser le comportement migratoire des poissons amphihalins en estuaire (temps de résidence, mortalité, vitesse de migration, patrons de déplacements, ...)
- Produire des connaissances sur l'utilisation de l'habitat des poissons amphihalins en milieux estuarien, côtier ou hauturier
- Evaluer et suivre la production d'amphihalin par les bassins versants

Différentes approches et outils scientifiques complémentaires sont mis en œuvre pour répondre à ces objectifs (Figure 1). En qui concerne l'étude du comportement migratoire par télémétrie sur lequel ce rapport se focalise, l'estuaire de la Loire a été choisi en tant que site d'étude du projet « Amphihalins » car il présente l'ensemble des espèces concernées par le projet et a été moins étudié que l'estuaire de la Seine ou la Gironde.

1 INTRODUCTION

L'estuaire de la Loire est un lieu de passage obligatoire pour l'ensemble du recrutement en géniteurs de migrateurs potamotoques du bassin de la Loire tel que les Aloses (*Alosa alosa* LINNE, 1758 et *Alosa fallax fallax* LACEPEDE, 1803), le Saumon atlantique (*Salmo salar* LINNE, 1758) et les Lamproies migratrices (*Petromyzon marinus* LINNE, 1758 et *Lampetra fluviatilis* LINNE, 1758) (STEINBACH, 2001).

La majorité de ces espèces représente des enjeux économiques (pêche professionnelle et amateur), sociaux (espèces patrimoniales et emblématiques) et environnementaux. Cependant, depuis les années 1950, elles sont globalement en situation de déclin (STEINBACH, 2000).

La portion estuarienne de la Loire fait l'objet de nombreux usages directs ou indirects (urbanisation, industries, navigation, pêche professionnelle, agriculture, chasse, tourisme, ...) et est soumis à diverses pressions anthropiques (rejets d'activités industrielles, de zones urbaines, dragage afin d'assurer le passage des navires, ...) (CSEEL., 1984).

Depuis 1940, date des premiers grands travaux de chenalisation, l'estuaire de la Loire connaît des conditions environnementales défavorables du point de vue de la faune aquatique, telles que des situations de très faible oxygénation provoquées par l'apparition d'un bouchon vaseux (CSEEL., 1984).

Or, les caractéristiques biologiques et plus particulièrement la période de migration de certains amphihalins les amènent à fréquenter la partie estuarienne du fleuve au moment de ces crises d'hypoxie ou d'anoxie (CHAUDON, 2005). Il est probable que ces phénomènes aient un impact négatifs sur les populations, soit en entraînant des mortalités, soit en perturbant la migration trans-estuarienne.

Malgré ces hypothèses, la portion estuarienne du trajet migratoire des différentes espèces amphihalines est souvent mal connue et a été peu étudiée dans l'estuaire de la Loire. Des outils adaptés à cette problématique existent pourtant, comme la télémétrie hydroacoustique.

Les objectifs de cette étude sont donc multiples. D'un point de vue méthodologique, il s'agit de (1) dresser le bilan du déploiement d'un système de suivi télémétrique en milieu estuarien pour l'étude du comportement migratoire de poissons amphihalins (contraintes, difficultés, limites techniques, aspects méthodologiques). D'un point de vue scientifique, il s'agit (2) de caractériser la migration estuarienne de la grande Alose (patron de migration, vitesse de déplacement, temps de séjour...) et (3) d'évaluer les facteurs environnementaux (physico-chimique, hydrologique) influant, déclenchant, ralentissant ou empêchant la migration de cette espèce pour éventuellement en tirer des conclusions en terme de conservation.

D'une façon générale, l'hypothèse que nous testerons est que les conditions physico-chimiques, et notamment la concentration en oxygène dissous devraient, en conditions limitantes, influencer négativement la migration trans-estuarienne des Aloses (CHAUDON, 2005) voire être un facteur prépondérant sur le recrutement de géniteur entrant en milieu continental (STEINBACH, 2001).

A termes, ces résultats pourraient permettre d'adapter les différents usages et pressions portés sur la grande Alose et sur le milieu estuarien qu'elle fréquente au début de sa migration.

Une meilleure connaissance de la portion estuarienne de la migration de la grande Alose permettrait, en effet, la mise en place de mesures de protection de l'espèce et de gestion de ses habitats.

2 SITE ET ESPECE ETUDIES

2.1 Caractéristiques du site d'étude : l'estuaire de la Loire

2.1.1 Généralités



Figure 2 : bassin versant de la Loire, site d'étude (orange), principaux affluents et agglomérations - source : EPTB Loire (modifié)

La Loire est un fleuve d'environ 1013 km dont le bassin versant de 109 930 km² recouvre un cinquième du territoire français (Figure 2) (GIP Loire Estuaire, 2009).

Dans sa partie la plus aval, 95 km peuvent être considérés comme formant l'estuaire (GIP Loire Estuaire, 2009), ce qui correspond à la portion sous influence de la marée dynamique, délimitée entre la limite transversale à la mer (Saint-Nazaire) et la limite de remontée de la marée dynamique (Anetz).

Cet estuaire est caractérisé, à l'aval de Nantes, par un profond chenal de navigation reliant l'estuaire aval à l'océan et à l'amont de Nantes, par une succession d'épis et d'îles marquant l'entrée dans la Loire fluviale (AUCLERC, 2006).

L'estuaire aval abrite de vastes vasières et annexes hydrauliques (marais saumâtres, bras morts, canaux, ...) qui constituent des zones de refuge et de nourricerie pour différentes espèces piscicoles notamment l'Anguille européenne (*Anguilla anguilla* LINNE, 1758) (GIP Loire Estuaire, 2002).

L'emplacement de cet l'estuaire (au centre de la façade Atlantique), la surface de son bassin versant (STEINBACH, 2001), le nombre et la qualité des frayères potentielles (CHAUDON, 2005) en fait une voie d'entrée privilégiée pour les poissons migrateurs vers les milieux continentaux.

Le site d'étude s'étend sur 72,1 km (linéaire délimité par les récepteurs) (Figure 3). Il se situe entre les installations industrialo-portuaires de Donges / Montoir-de-Bretagne / Saint-Nazaire et la commune d'Oudon en aval immédiat d'Ancenis.

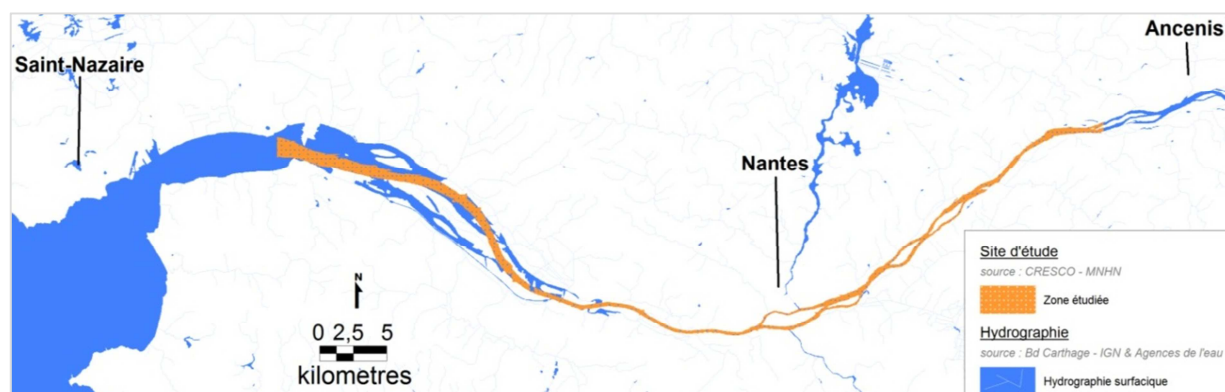


Figure 3 : délimitation du site d'étude et des principales agglomérations

2.1.2 Zonation Natura 2000

L'estuaire de la Loire, et plus particulièrement le site d'étude, fait l'objet de différentes zones de protection des espaces naturels. Quatre sites Natura 2000 (Site d'Importance Communautaire) ont notamment été délimités car ils constituent, entre autres, des zones de croissance ou d'étape migratoire pour la grande Alose et l'Alose feinte (Annexe 1).

2.2 La grande Alose

Deux espèces d'Aloses sont présentes sur la Loire : la grande Alose (*Alosa Alosa* LINNE, 1758) et l'Alose feinte (*Alosa fallax fallax* LACEPEDE, 1803). Ces deux espèces sont des migrateurs amphihalins potamotoques (BAGLINIERE & ELIE, 2000) appartenant à la famille des *Clupeidae* (CUVIER, 1817) comprenant également les harengs et les sardines. La grande Alose réalise sa croissance en mer (durant 3 à 8 ans) puis rejoint la partie moyenne et amont des fleuves, à la fin de l'hiver et au début du printemps, afin de frayer. Les juvéniles (alosons) dévalent ensuite les fleuves afin de rejoindre progressivement le milieu marin.



Figure 4 : photo de grande Alose - source : LOCHET, A. CEMAGREF Bordeaux

La grande Alose est caractérisée par une écaillure irrégulière et désordonnée sur les flancs (Figure 4) contrairement à l'Alose feinte chez qui l'écaillure est homogène.

Le nombre et la taille des branchiospines sont également plus élevés chez la grande Alose (supérieur à 90 sur le 1^{er} arc branchial).

Ce nombre est inférieur à 60 chez *Alosa fallax* et compris entre 60 et 90 pour les Aloses hybrides (BOISNEAU, BOISNEAU, & RUAUX, 2011).

Concernant le bassin versant de la Loire, la grande Alose (*Alosa Alosa* LINNE, 1758) possède des zones de frayères naturelles situées sur la Vienne, la Creuse (respectivement jusqu'aux barrages de Chatellerault et Descarte) et sur l'axe Loire/Allier en amont du bec d'Allier (STEINBACH, 2001). Des zones de frayères forcées se situant en aval des obstacles à la migration (ex : frayère de Saint-Léger-des-Vignes située en aval du barrage de Decize) sont également recensées (BACH, et al., 2010).

La remontée des géniteurs dans l'estuaire de la Loire se fait généralement de janvier à août (MENESSION-BOISNEAU, 1990 in (BAGLINIERE & ELIE, 2000)). Ce sont, majoritairement, des individus âgés de 4 à 5 ans de vie en mer, avec un séjour en mer plus court pour les mâles que pour les femelles (BOISNEAU, BOISNEAU, & RUAUX, 2011). La grande majorité des géniteurs meurt après la phase de reproduction et ne redescend pas en mer (BAGLINIERE & ELIE, 2000).

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 Données environnementales de l'estuaire de la Loire

Différentes institutions, chargés de suivre l'évolution de paramètres physico-chimiques et hydrologiques de la Loire, ont mis à disposition leurs données (Annexe 2). Ces données ne couvrent pas toujours la totalité de la période d'étude (du premier relâché (28 avril 2011) au dernier téléchargement des données (13 juillet) car elles nécessitent souvent un prétraitement afin de corriger les différentes sources d'erreurs (pannes, dérive d'appareils, décalage due à un changement de matériel, absence de données, ...).

3.1.1 Hydrologie

Les hauteurs d'eau de la Loire sont suivies en continu au niveau de la station de mesure de Montjean-sur-Loire (dép. 49) par le service Hydrométrie de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. Cette station de jaugeage permet de calculer un débit moyen journalier grâce à une courbe de tarage (relation hauteur/débit). C'est la station de jaugeage la plus en aval qui n'est pas soumise au régime des marées. Les coefficients de marée sont calculés à Saint-Nazaire par le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.

3.1.2 Physico-chimie

Les paramètres physico-chimiques (Température, Oxygène dissous, Salinité et Turbidité ou Matières En Suspension) sont mesurés via le réseau de station SYVEL géré par le GIP Loire Estuaire. Ce réseau ne couvre que la portion aval de la zone d'étude (Figure 5).



Figure 5 : emplacement des stations de mesure SYVEL - source : GIP Loire Estuaire

Les mesures sont réalisées en sub-surface (de quelques dizaines de cm à 1 m de profondeur suivant les stations). Pour ces données notamment, la validation définitive n'a pas pu être effectuée car les capteurs étaient en attente de retour d'analyse (calibration).

3.1.3 Interactions des phénomènes environnementaux dans l'estuaire

L'estuaire de la Loire est caractérisé par la présence fréquente d'un bouchon vaseux (zone de turbidité maximale) de localisation, d'intensité et d'étendue variable en fonction du cycle des marées (vives/mortes eaux, pleine/basse mer) et du débit fluvial (GIP Loire Estuaire, 2009).

L'oxydation de la matière organique contenue dans le bouchon vaseux, par les bactéries peut provoquer des situations d'hypoxie (concentration en oxygène dissous entre 1 et 3 mg/l) voire d'anoxie (concentration inférieure à 1 mg/l) généralement d'avril à novembre (GIP Loire Estuaire, 2002). Présence du bouchon vaseux et déficit d'oxygénation sont donc profondément liés (CHAUDON, 2005).

Ce contexte physico-chimique particulier joue un rôle prépondérant sur le déplacement voire la survie des espèces de poissons présentes dans l'estuaire. En effet, les crises d'anoxie entraînent fréquemment des mortalités massives de Mulets porcs (*Liza ramada* RISSO, 1810) et probablement de migrateurs amphihalins (STEINBACH, 2001 ; CHAUDON, 2005). De plus, la présence du bouchon vaseux constituerait « un écran physico-chimique infranchissable en période estivale » (STEINBACH, 2001) et ferait de l'estuaire « un des premiers facteurs limitants des populations amphihalines du bassin de la Loire » (STEINBACH, 2000).

3.2 Principes généraux de la télémétrie hydro-acoustique

3.2.1 Généralités

La télémétrie est une technique basée sur la transmission de données entre un émetteur (acoustique ou radio) implanté sur un organisme vivant et un récepteur, fixe ou mobile, installé dans la zone étudiée. Les systèmes de télémétrie basés sur les ondes radio sont généralement utilisés pour les eaux peu profondes et de faible conductivité, telles que les eaux continentales. A l'inverse, la technologie hydroacoustique est particulièrement adaptée aux eaux saumâtres ou salées. (PRIEDE, 1991)

Cette dernière utilise la propagation d'ondes ultrasonores entre un émetteur (ou « tag ») et un récepteur (ou « hydrophone ») qui convertit les ondes reçues en énergie électrique. Le signal est généré, au niveau de l'émetteur, par un anneau en céramique compact. Cette particularité rend inutile la présence d'antenne, ce qui permet aux marques acoustiques d'être de petite taille et de limiter les problèmes liés à l'implantation dans le poisson (PRIEDE, 1991).

D'autre part, le signal acoustique peut être codé, ce qui permet le suivi simultané de plusieurs poissons utilisant une même fréquence d'émission (THROSTAD, OKLAND, ROWSELL, & MACKINLEY, 2000).

3.2.2 Fonctionnement de l'équipement acoustique utilisé

Les émetteurs produisent des séquences (« pings ») de 7 impulsions sonores (« pulses ») à intervalles irréguliers et séparés par un délai aléatoire, compris, dans notre cas, entre 10 et 30 secondes ou 30 et 60 secondes, suivant le modèle utilisé (Annexe 3). L'intervalle entre les 7 pulses permet de définir un code identifiant spécifiquement le poisson marqué (Figure 6).

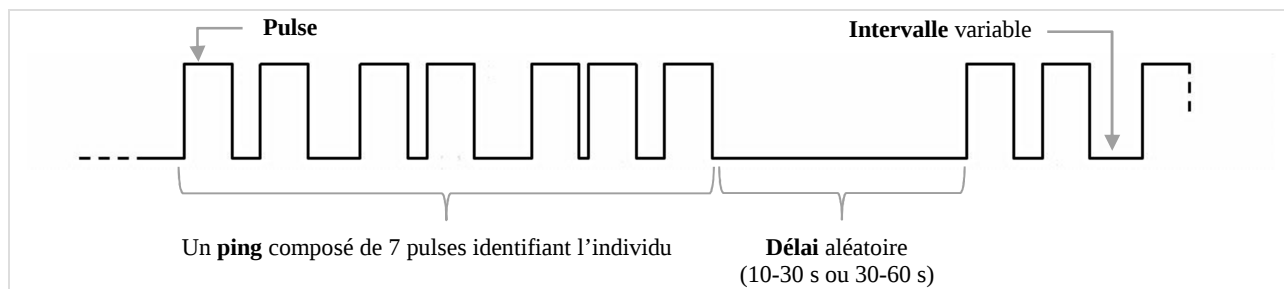


Figure 6 : représentation schématique du signal émis par les tags acoustiques

La durée de vie des batteries, garantie par le constructeur, est de 159 ou 237 jours en fonction des émetteurs employés (Annexe 3). L'émetteur peut, par conséquent, continuer de fonctionner après la mort du poisson et sera donc potentiellement détectable s'il se situe dans l'aire de détection des hydrophones.

3.3 Déploiement des récepteurs hydroacoustiques

3.3.1 Mise en place des hydrophones

Dix-sept hydrophones ont été déployés sur une portion d'environ 72,1 km de Loire (du point kilométrique Bd-Carthage® 917 à 989). Les bouées de navigation et les infrastructures existantes (pontons) ont été utilisées pour leur amarrage, dans l'optique de former des lignes ou barrières de détection. La zone d'étude est alors compartimentée ; chaque compartiment étant délimité par une ligne d'hydrophone à ses extrémités amont et aval (Figure 7) et caractérisé par des conditions environnementales relativement homogènes (hydrologie, salinité, habitats) tout en sachant que, par définition, un estuaire est un milieu à très forte hétérogénéité spatiale et temporelle (zone de transition).

Les hydrophones employés sont des « VR2W Receivers® » fabriqués par la société VEMCO® (Annexe 4). Ils ont été majoritairement placés à quelques mètres de la surface, la tête de l'hydrophone étant orientée vers le fond. Toutefois, l'un d'entre eux a été placé près du fond et orienté vers la surface pour des raisons techniques d'implantation.



Figure 7 : carte des stations et des hydrophones déployés sur l'estuaire de la Loire

3.3.2 Capacité de détection

Les hydrophones permettent de détecter la présence (passage ou stationnement) d'un poisson marqué dans leur zone de détection (Figure 8).

Sur le plan vertical, les hydrophones forment une aire de détection théorique quasiment sphérique (Figure 8 – jaune) avec néanmoins un « angle mort » ou « zone d'ombre » situé à l'arrière de l'hydrophone (Figure 8 – rouge). Cet angle mort forme un cône où la détection est réduite bien que le signal puisse être détecté indirectement par les phénomènes de réflexion et/ou de réfraction de celui-ci dans la colonne d'eau (HEUPEL, SEMMENS, & HOBDA, 2006).

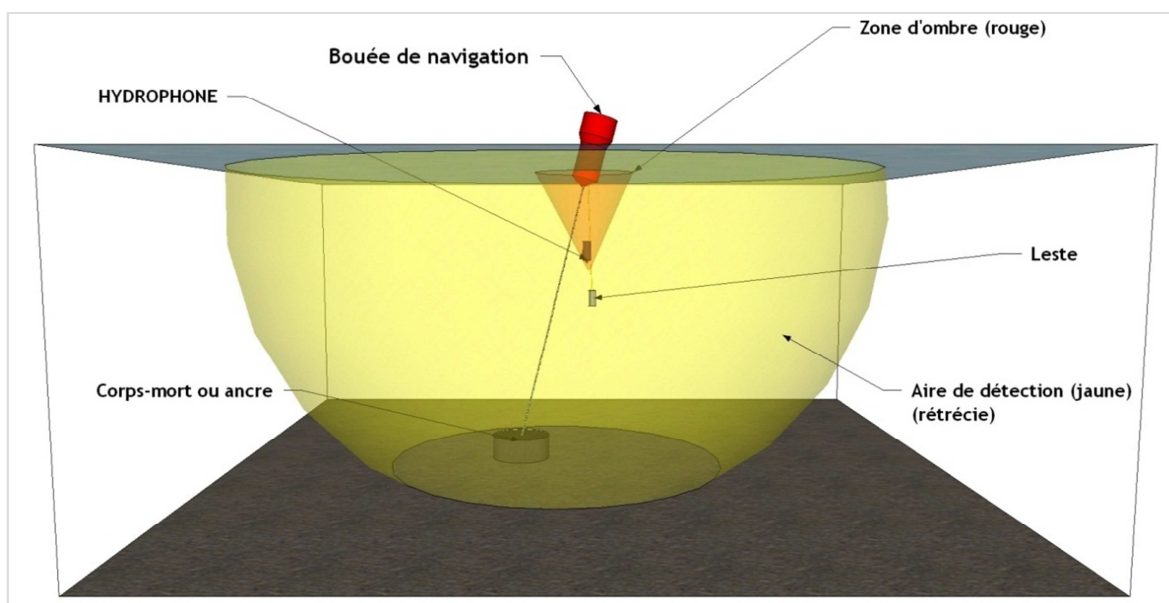


Figure 8 : schéma d'implantation des hydrophones et niveaux théorique de détection

Les rayons de détection des hydrophones sont très variables en fonction des conditions de réception (morphologie, bruits de fond, courants, ...). En effet, elles varient fortement en fonction de chaque contexte d'étude (600-800 m (HEUPEL, SEMMENS, & HOBDA, 2006), 130-400m (AARESTRUP, et al., 2010)).

Des tests de détection in-situ ont été menés, à des distances variables sur le plan horizontal et vertical, pour chaque hydrophone, grâce à des émetteurs identiques à ceux employés sur les poissons. Ces tests ont permis d'évaluer un rayon maximal de détection à 435 m pour Paimbœuf, 415 m pour Cordemais, 290 m pour Le Pellerin, 225 m pour Bellevue, 210 m pour Thouaré, 130 m pour Oudon et 200m pour la Patache. Il est à noter qu'un des deux hydrophones situé à la station du Pellerin a été inopérant du 1^{er} juin au 13 juillet 2011.

3.3.3 Acquisition des données

Les données de détection stockées et enregistrées par les hydrophones ont été téléchargées régulièrement. Leur acquisition s'est déroulée à bord d'une embarcation, par transmission Bluetooth entre l'hydrophone préalablement ramené à la surface et le logiciel Vemco User Environment (VUE Version 1.8[®]) installé sur un ordinateur portable. L'ensemble des données stockées dans les hydrophones ont été téléchargées pour la dernière fois dans la journée du 13 juillet 2011 hormis pour un des 5 hydrophones situé à la station de Paimbœuf qui a été téléchargé, pour la dernière fois, le 30 mai 2011.

Les données brutes de détection sont présentées sous la forme d'un tableau comprenant la date (*Date*), l'heure (*Time*), le code de l'émetteur (*Code space* et *ID*) et celui de l'hydrophone (*Receiver*). L'identifiant du poisson (*Transmitter*) correspondant à son code d'émetteur ainsi que et la station (*Station*) à laquelle l'hydrophone appartient ont été rajoutées manuellement (Figure 9).

Date	Time	Code Space	ID	Transmitter	Receiver	Station
11/07/11	05:03:32	A69-1206	197	ALAL-1027	VR2W-112123	5-Pellerin
11/07/11	05:04:23	A69-1206	197	ALAL-1027	VR2W-112123	5-Pellerin
11/07/11	05:05:25	A69-1206	48	ALAL-1053	VR2W-112253	7-Paimboeuf
11/07/11	05:06:38	A69-1206	197	ALAL-1027	VR2W-112123	5-Pellerin

Figure 9 : aperçu du format des données de détection

3.4 Implantation des émetteurs hydroacoustiques

Les individus destinés à être marqués puis suivis lors de leur migration ont été capturés en partenariat avec un pêcheur professionnel exerçant en partie aval de l'estuaire. Une fois remontés à bord, ils ont suivi les différentes étapes du protocole de marquage et d'analyse (Figure 10).

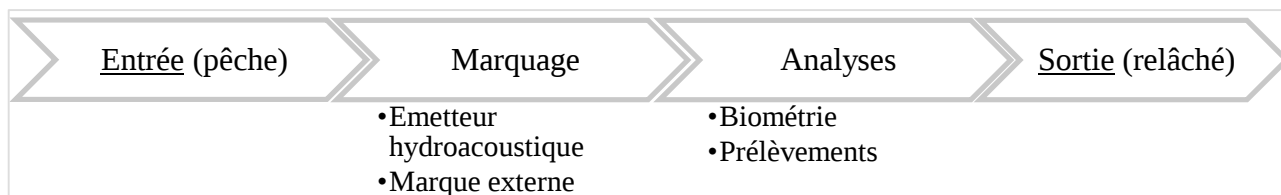


Figure 10 : protocole de marquage des géniteurs d'Aloses

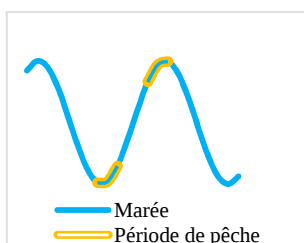


Figure 11 : période de pêche par rapport à la marée

Les pêches se sont déroulées au niveau de Cordemais (44) sur les lots LM (Loire Maritime) et 15. La pêche se pratiquait au filet tramail dérivant (Annexe 5) de jour ou de nuit, généralement durant la marée montante, en fin de basse mer-début de pleine mer ou en milieu de pleine mer (Figure 11).

Les coordonnées UTC - GPS (*précision* < 9 m), la salinité (*résolution* = 0,1) et la température (*résolution* = 0,1°C) de l'eau sont relevées en début de dérive du filet puis à la relâche des individus.

Dès leur sortie de l'eau et leur démaillage, les géniteurs de grande Alose capturés ont été placés dans un vivier oxygéné puis ont suivi les différentes étapes de marquage, de biométrie (mesures de la longueur depuis la tête jusqu'à l'échancrure de la nageoire caudale (Longueur à la fourche) (*résolution* : 1mm) et du poids total (*résolution* : 1g) et de prélèvements (prélèvement d'écaillés pour analyses des histoire de vie et d'une portion de la nageoire dorsale pour des analyses génétiques réalisées dans le cadre du programme amphihaline, mais non traités dans ce rapport).

Trois types d'émetteurs hydroacoustiques fabriqués par la société Thelma Biotel[®] ont été utilisés lors des campagnes de marquage ; chacun possédant des caractéristiques techniques différentes (Annexe 3). Le rapport poids de l'émetteur/poids total du poisson dans l'air n'excède jamais 2% conformément au seuil généralement admis dans la littérature (CONNORS, SCRUTON, BROWN, & MCKINLEY, 2002) et déjà employé sur des grandes Aloses ligériennes (STEINBACH, GUENEAU, AUTUORO, & BROUSSARD, 1986).

Le marquage intrastomacal « par intubation » a pu être employé sur les grandes Aloses car elles ont une activité alimentaire limitée voire inexistante à partir de leur entrée en estuaire (BAGLINIERE & ELIE, 2000). Cependant, ceci n'exclut pas un rejet éventuel de l'émetteur (ROCHE, et al., 2007).

L'émetteur est introduit dans un tube en PVC - adapté à son diamètre - puis placé dans la bouche de l'Alose. Un piston en plastique rigide permet ensuite de pousser l'émetteur dans l'œsophage de l'Alose qui est maintenue dans un bac d'eau aérée (oxygénation par pompe à air et diffuseurs).

Ces opérations ont été réalisées sans anesthésie afin de limiter le temps de manipulation et de récupération du poisson et ainsi d'optimiser le taux de survie de cette espèce fragile (durée moyenne entre le début du marquage et la relâche : 16 minutes).

Une marque externe (type « spaghetti » commercialisée par la COFA) a également été apposée à la base de la nageoire dorsale de chaque individu pour permettre l'identification du poisson lors d'une

éventuelle recapture (récupération de l'émetteur hydroacoustique, acquisition de données supplémentaires (date et lieu de capture, état de santé)).

Les individus marqués ont ensuite été placés dans un bac de récupération oxygéné puis relâchés à proximité du lieu de prélèvement (en aval de la ligne de détection de Cordemais) lorsque leur état était rétabli.

3.5 Tests statistiques et outils analytiques employés

3.5.1 Moyenne, erreur standard et étendue

Les moyennes employées dans cette étude sont des moyennes arithmétiques. Elles sont suivies de $\pm$ l'erreur standard pour un intervalle de confiance de 95% (noté moyenne $\pm$ erreur standard (e.s. 0,95)). La notion d'erreur standard, ou écart type de la moyenne, dépend du nombre de données dans l'échantillon, plus il est grand et plus l'erreur standard est petite. Elle donne l'estimation de la qualité de la moyenne. L'étendue est la différence entre le maximum et le minimum d'une série considérée.

3.5.2 Coefficient de condition de Beckman

Le coefficient de condition K de Beckman (1948) permet de caractériser l'état d'embonpoint des individus en intégrant à la fois les variables de taille et de poids. Il permet de refléter l'état d'embonpoint des individus étudiés. Cet indice a déjà été employé sur des grandes Aloses dans la littérature (TAVERNY & ELIE, 2001). Il a été calculé à partir des données de biométrie (la longueur à la fourche (Lf en mm) et le poids total (Pt en g)) recueillies lors des sessions de capture/marquage afin de caractériser l'homogénéité ou l'hétérogénéité biométrique des individus marqués et des individus considérés comme migrants. Il se calcule par la formule suivante :

$$K = \frac{10^5 \times Pt}{Lf^3}$$

3.5.3 Test de Mann-Whitney

Le test de Mann-Whitney est un test non paramétrique qui permet la comparaison de deux échantillons indépendants de faible effectif ($n_i < 30$) ou ne suivant pas une distribution normale.

Le seuil de signification utilisé (α) est de 0,05. De manière générale, l'hypothèse nulle (H_0) est « *il n'existe pas de différence significative entre les deux échantillons* ». Le test est utilisé en tant que test bilatéral. Le U traduit la différence (supériorité ou infériorité) des valeurs des différents échantillons entre eux. Il est ensuite comparé (informatiquement) au U_{table} contenu dans la table de Mann-Whitney. La *p-value* correspond à la probabilité sous l'hypothèse nulle d'obtenir un résultat aussi extrême que celui observé aux deux extrémités de la distribution (bilatéralité). On rejette l'hypothèse nulle lorsque cette probabilité est inférieure au seuil alpha ($p\text{-value} < \alpha$).

Cet outil statistique a été utilisé afin de tester les différences biométriques (Lf, Pt et K) entre les individus considérés comme migrants et ceux non détectés à l'amont.

3.5.4 Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse multi-variée. Cette analyse permet, entre autres, d'étudier et de visualiser des relations (corrélation, anti-corrélation, liaison, indépendance) entre les variables, afin de limiter le nombre de variables à considérer par la suite. L'ACP a été utilisé pour mettre en valeur les différentes liaisons (corrélation, anti-corrélation) ou indépendances des variables environnementales étudiées.

Le type d'ACP employé est une analyse utilisant les coefficients de corrélation de Pearson comme indice de similarité entre les différentes variables ($\alpha = 0,05$, *test bilatéral*). Les variables ont été centrées et réduites afin de limiter l'influence de l'ordre de grandeur de chaque variable sur l'ACP.

(analyse normée). Le nombre d'axes factoriels a été choisi tel qu'ils rassemblent les contributions de l'ensemble des variables supérieures à 100/nombre de variables.

4 RESULTATS

4.1 Conditions environnementales dans l'estuaire de la Loire

Le contexte environnemental a été analysé sur une période plus étendue (du 1^{er} mars au 16 juillet) que celle de l'étude (du 28 avril au 16 juillet) afin de la replacer dans un contexte plus global. Les données physico-chimiques ont été considérées au niveau de Cordemais car elles correspondent aux conditions du site de capture et de relâche des individus marqués.

4.1.1 Contexte environnemental de la période d'étude

Débit de la Loire

Le printemps et l'été 2011 ont été marqués par des débits particulièrement faibles par rapport aux années précédentes (débit moyen d'avril, mai et juin en moyenne 2,64 fois inférieures aux 5 années précédentes). Durant la période d'étude, les débits sont en décroissance progressive et ne présentent pas d'évènements particuliers (hausse ou diminution brutale) (Figure 12).

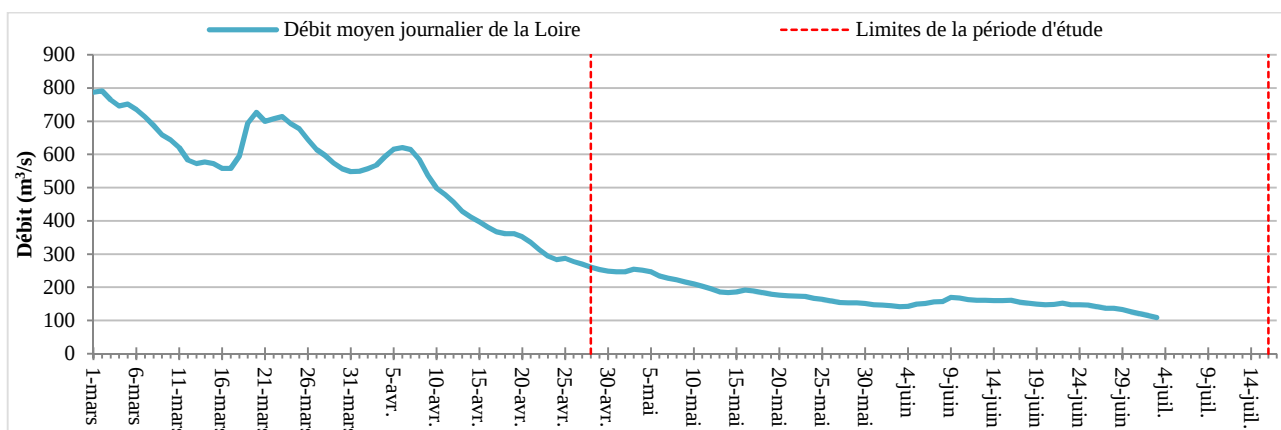


Figure 12 : débit moyen journalier de la Loire à Montjean-sur-Loire et période d'étude

Coefficient de marée

L'évolution du coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire, ainsi que la période d'étude, ont été représentées graphiquement (Figure 13). Durant cette période, les marées de vives eaux ont été de faible amplitude et on note deux marées de mortes eaux aux coefficients plus faibles que les 3 autres (de 41 et 40 respectivement le 26 mai et le 25 juin 2011).

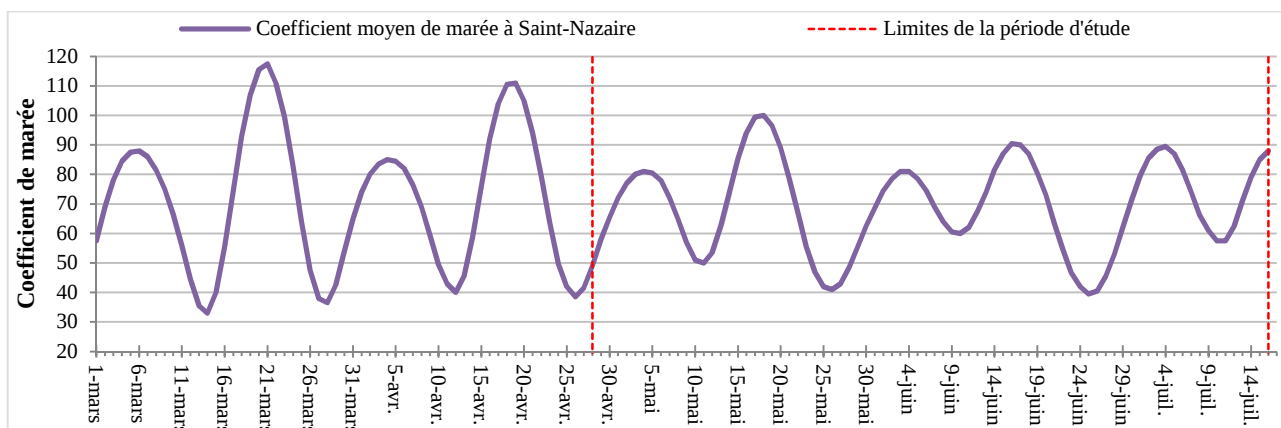


Figure 13 : coefficient moyen journalier de marée à Saint-Nazaire

Salinité

Concernant la salinité à Cordemais (Figure 14), le niveau moyen, ainsi que l'étendue (différence entre maximum journalier et le minimum journalier), sont plus élevés durant la période d'étude.

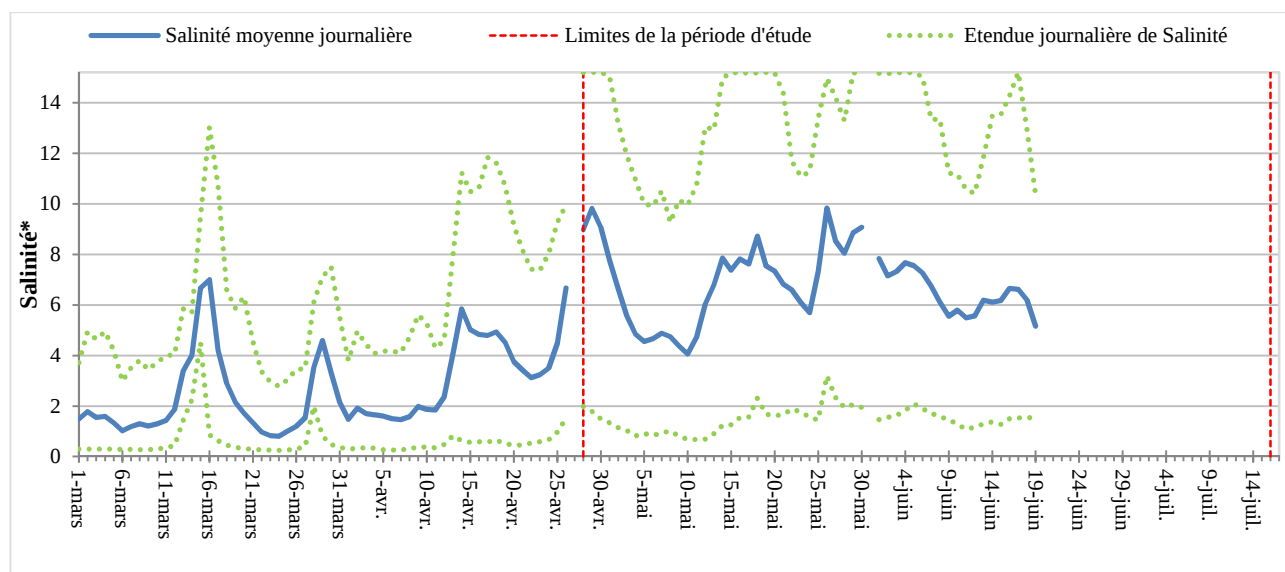


Figure 14 : moyenne et étendue journalière de salinité à Cordemais.

Les valeurs aberrantes (car reposant sur un nombre trop faible de données instantanées) ont été supprimées.

* le seuil de saturation du capteur de salinité est de 15,2

Matières en suspension

La quantité de Matières En Suspension (MES) à Cordemais varie fortement (Figure 15). Les moyennes journalières lors de la période d'étude varient moins qu'antérieurement. Cependant, l'étendue journalière est plus élevée lors de la période d'étude.

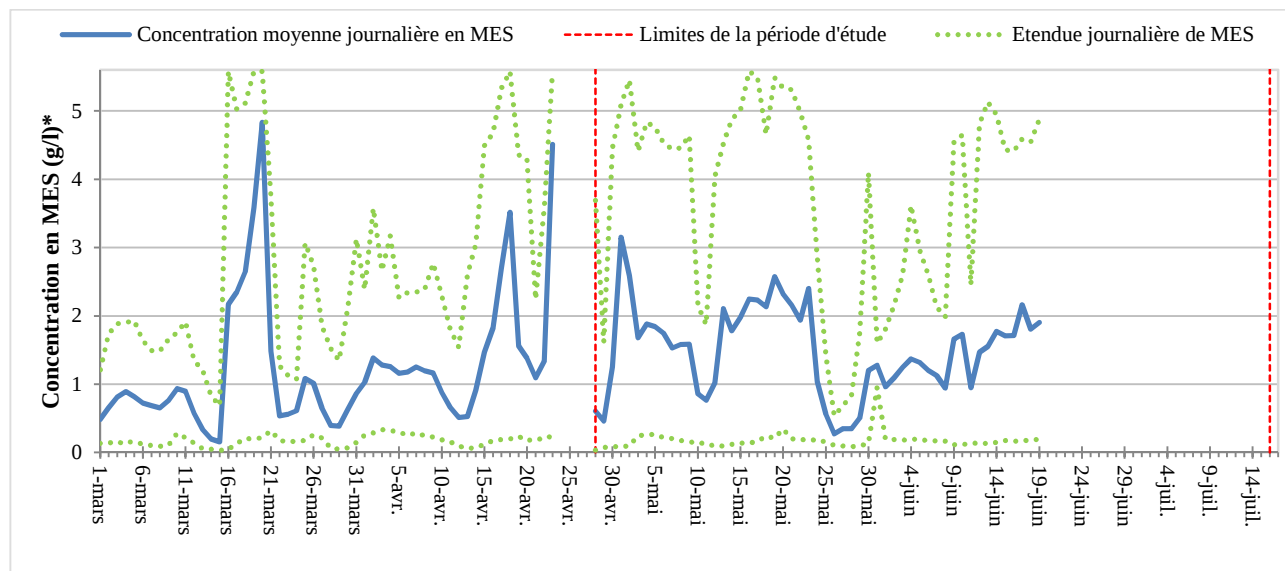


Figure 15 : moyenne et étendue journalière de concentration en MES à Cordemais

Les valeurs aberrantes (car reposant sur un nombre trop faible de données instantanées) ont été supprimées.

* le seuil de saturation du capteur est de 5,6 mg/l

Oxygène dissous

Concernant la concentration en oxygène dissous, de grandes variations durant la période d'étude (Figure 16) sont remarquables. Cependant, la concentration reste globalement faible par rapport aux mois de mars et d'avril. L'étendue journalière de l'oxygène dissous est également plus homogène durant la période d'étude.

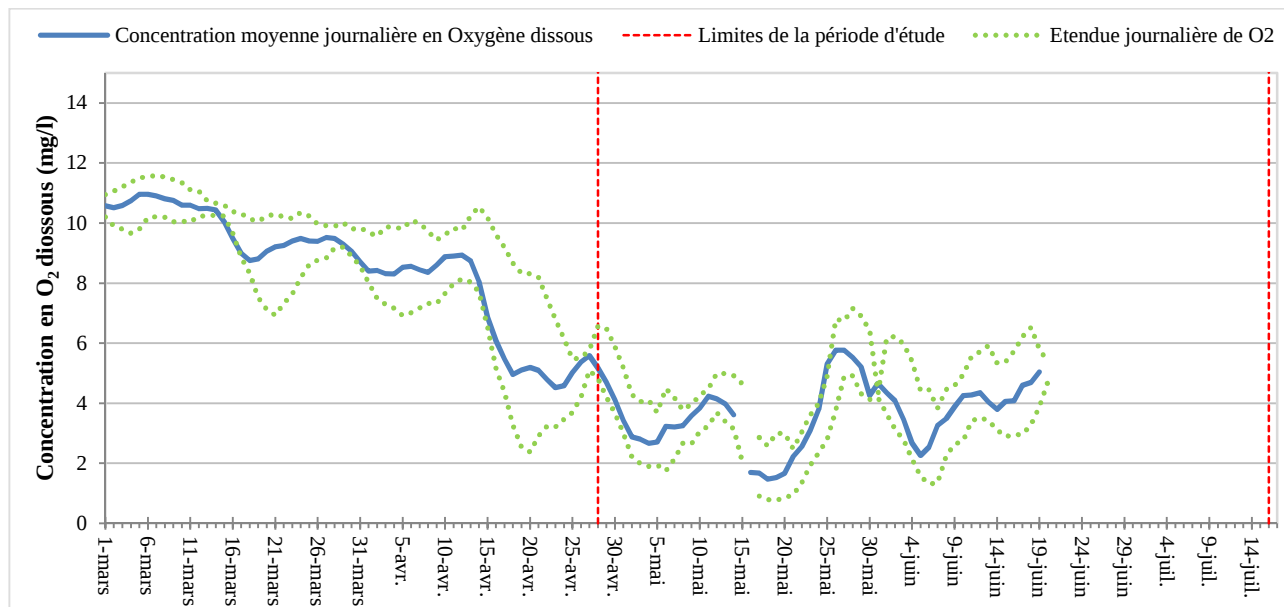


Figure 16 : moyenne et étendue journalière de concentration en Oxygène dissous à Cordemais
Les valeurs aberrantes (car reposant sur un nombre trop faible de données instantanées) ont été supprimées.

Température de l'eau

Les températures sont particulièrement élevées pendant la période d'étude et présentent une étendue importante (Figure 17).

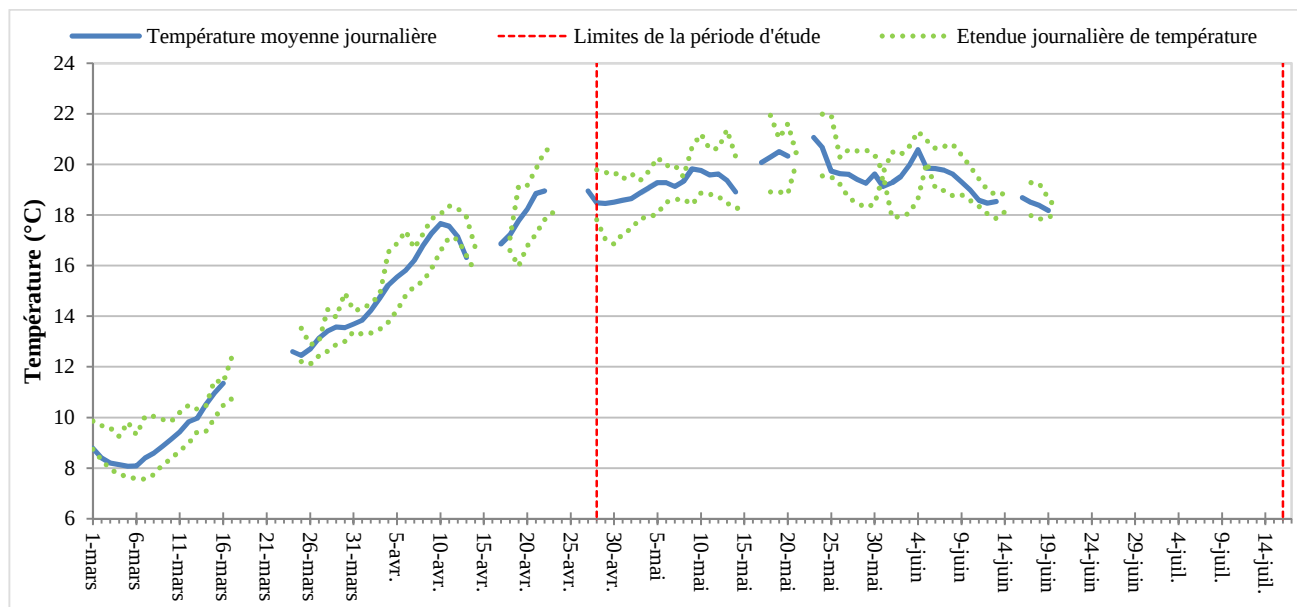


Figure 17 : températures moyennes, minimales et maximales journalières à Cordemais
Les valeurs aberrantes (car reposant sur un nombre trop faible de données instantanées) ont été supprimées.

4.1.2 Relations entre les paramètres environnementaux

Une ACP a été effectuée sur différents paramètres environnementaux décrits précédemment (résultats détaillés : Annexe 6, graphique : Figure 18).

Le coefficient de marée à Saint-Nazaire et le débit de la Loire à Montjean ont été employés sous forme de moyenne journalière. Les autres variables ont été employées sous forme de moyenne horaire.

D'après les valeurs des vecteurs propres (Annexe 6), les axes F1 et F2 ont été retenus. Le premier axe (F1) isole les variables *Oxygène dissous* et *Salinité* (positif) et *MES* (négatif) alors que le second axe (F2) sépare les variables *Température* (positif), *Coefficient de marée* et *Débit Loire* (négatif).

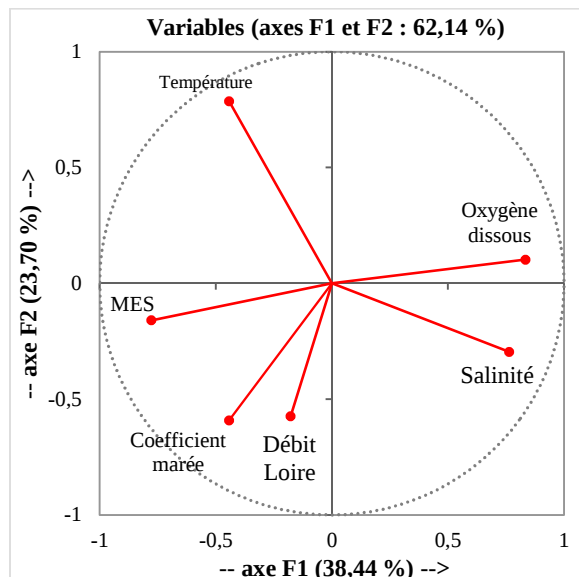


Figure 18 : graphique synthétique de l'ACP

L'étude des cosinus carré montre que les variables *Oxygène dissous*, *MES* et *Salinité* sont bien représentées sur l'axe F1 ($\cos^2$ respectivement égale à 0,695 ; 0,605 et 0,583). La variable *Température* est bien représentée par l'axe F2 ($\cos^2$ égale à 0,618) alors que les variables *Coefficient de marée* et *Débit Loire* sont plus faiblement représentées par l'axe F2 ($\cos^2$ respectivement égale à 0,351 et 0,329).

D'après l'analyse du graphique (Figure 18), la concentration en oxygène dissous est anti-corrélée à la concentration en matières en suspension. Cette dernière est moyennement corrélée avec le coefficient de marée.

Température et concentration en oxygène dissous sont indépendantes ainsi que température et concentration en MES.

4.2 Bilan méthodologique et caractéristiques des individus échantillonnés/marqués

4.2.1 Bilan méthodologique

Au total, soixante et une grandes Aloses ont été capturées lors de 4 sessions de capture/marquage :

- Le 28 et 29 avril pour 27 individus
- Le 11 et 12 mai pour 28 individus
- Le 19 mai pour 4 individus
- Le 08 juin pour 2 individus

Neuf individus sont morts à l'issue du protocole de capture/marquage avant d'avoir pu être relâchés. Le nombre d'individus capturés, marqués puis relâchés vivants est donc de 51 grandes Aloses (Figure 19). Sur ces 51 individus, 30 ont été détectés, au moins une fois, en amont du site de relâcher. Un seul individu a été recapturé par un pêcheur professionnel en aval de la zone de relâcher 13 jours après avoir été marqué et relâché.

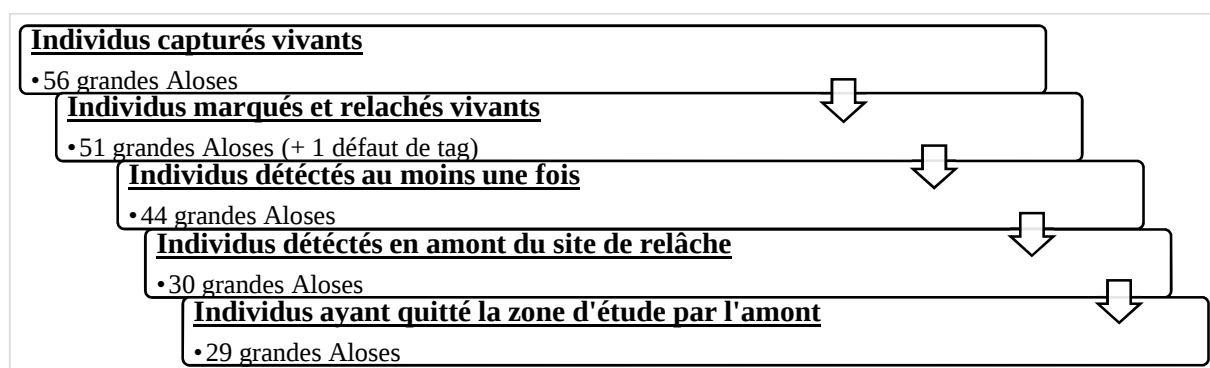


Figure 19 : nombre d'individus aux différentes phases de l'étude

Certains dysfonctionnements dus au matériel hydroacoustique employé ont été observés, notamment une erreur d'enregistrement des dates et probablement des heures pour un émetteur installé sur une grande Alose (ALAL-1055). Trois émetteurs n'ont également pas pu être activés et n'ont donc pas été implantés sur des poissons.

Environ 43 000 enregistrements de présence d'Alose marquées ont été recueillis par l'ensemble des hydrophones implantés sur le site d'étude.

D'après ces données de détection, il existe des situations pour lesquelles un poisson marqué a été détecté sur une station sans avoir été enregistré à son aval. Un défaut de détection peut donc être affirmé pour la station aval en question. Ceci permet de révéler la porosité du système de détection. Un travail spécifique sur cet aspect méthodologique serait nécessaire pour estimer cette porosité et la prendre en compte dans les analyses (ce travail n'était pas réalisable dans le temps imparti de ce stage).

4.2.2 Caractéristiques biométriques des poissons capturés

Longueur à la fourche

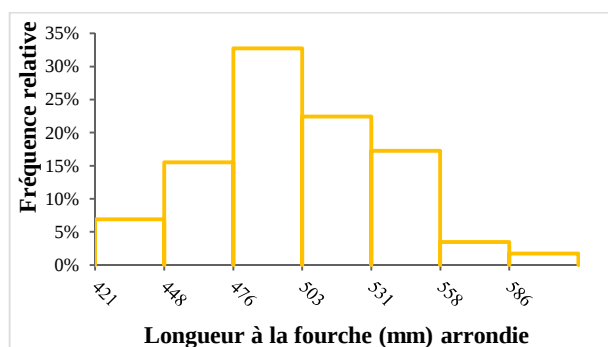


Figure 20 : histogramme des fréquences relatives de longueurs à la fourche

Les longueurs à la fourche ont été mesurées sur l'ensemble des individus capturés ($n=58$) (Figure 20).

L'étendue de ces mesures est de 192,0 mm (de 421 à 613 mm). La longueur moyenne des individus capturés est de $503,5 \pm 5,0$ mm (e.s. 0,95).

Poids total

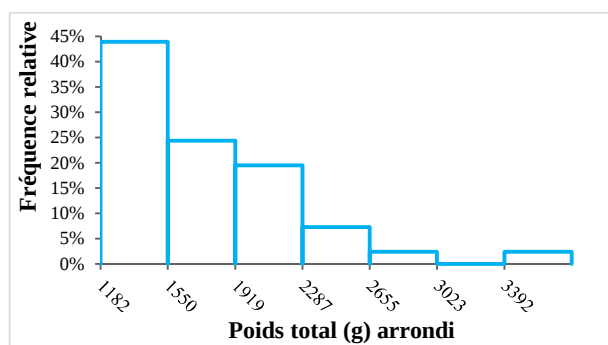


Figure 21 : histogramme des fréquences relatives de poids total

Le poids n'a pu être mesuré que sur $n=41$ individus pour des raisons techniques (Figure 21).

L'étendue est de 2578 g (de 1182 à 3760 g). Le poids moyen de l'ensemble des individus est de $1792,2 \pm 83,9$ g (e.s. 0,95).

Coefficient de condition

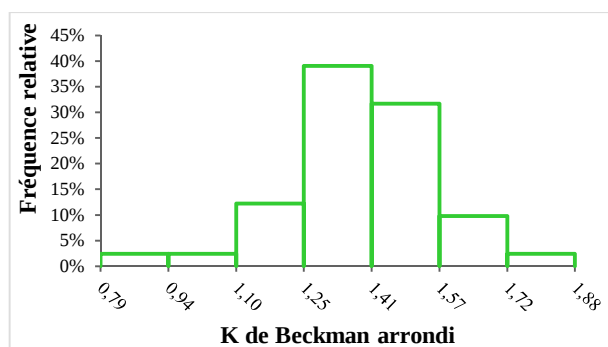


Figure 22 : histogramme de fréquence relative de coefficient de condition

Le coefficient de condition K de Beckman a été calculé sur l'ensemble des Aloses capturées présentant des données de longueur à la fourche et de poids ($n=41$) (Figure 22).

Il est en moyenne de $1,38 \pm 0,03$ (e.s. 0,95). L'étendue est de 1,09 (de 0,79 à 1,88).

Des regroupements de longueur à la fourche, de poids total et de coefficient de condition en fonctions de ces sessions de capture peuvent être établis (Figure 23).

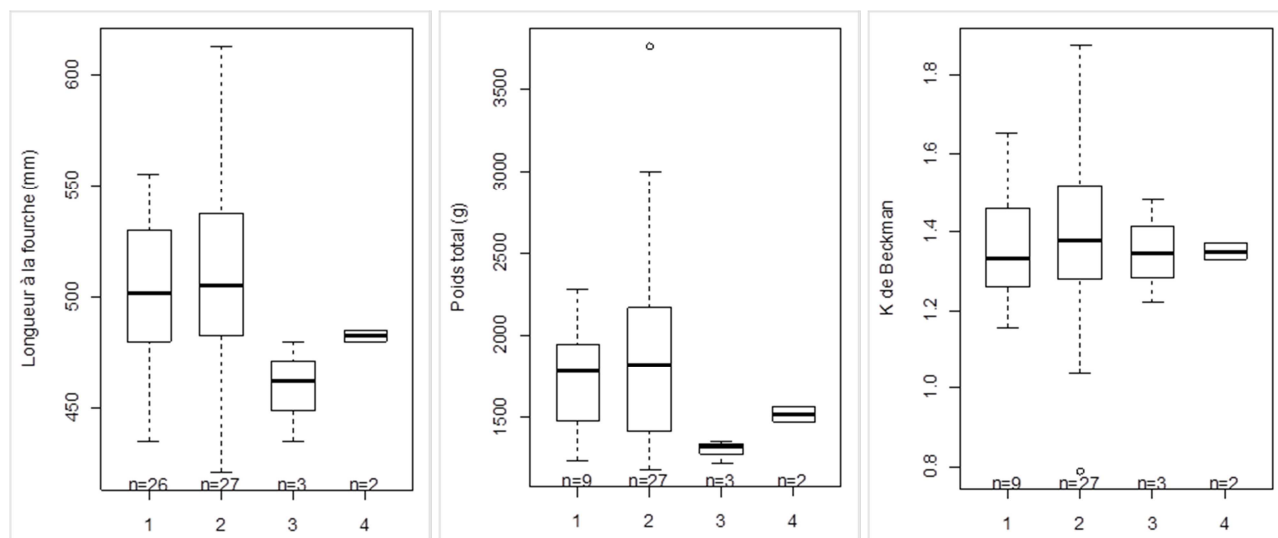


Figure 23 : boxplots des caractéristiques biométriques en fonction des sessions de capture/marquage

Les longueurs à la fourche pour les deux premières sessions de capture sont similaires, avec cependant, une étendue plus importante pour la seconde session (192 mm contre 120 mm lors de la première).

Les effectifs pour lesquels les données de poids total ont été recueillies sont variables et représentent peu d'individus pour les sessions 1, 3 et 4. On note cependant une plus grande étendue des poids (2578g) pour la seconde session de capture, ce qui est cohérent avec celle des longueurs à la fourche.

Les coefficients de conditions de Beckman (K) sont semblables quelle que soit la session de capture. L'étendue de la seconde session de capture est plus importante mais elle porte sur un plus grand nombre d'individus ($n=27$).

4.3 Analyse des comportements migratoires

4.3.1 Approche globale de la migration

La fréquence journalière de détection (nombre d'individus détectés/effectif relâché) par station peut être analysée chronologiquement (Figure 24). Les effectifs relâchés ont été cumulés afin de déterminer le nombre total d'individus marqués potentiellement « détectables ».

Trois épisodes migratoires, caractérisés par une montaison d'un grand nombre d'individus, peuvent être mis en évidence (Figure 24 a, b et c) :

- Un épisode principal, en termes d'effectif, du 22 au 27 mai (b)
- Deux épisodes secondaires :
 - o Du 10 au 13 mai (a)
 - o Du 22 au 26 juin (c)

Un décalage de la détection des individus (mode des fréquences relatives de détection) de 2-3 jours est décelable particulièrement lors du principal épisode migratoire (Figure 24 b).

Une fréquence élevée des détections est enregistrée au niveau des stations les plus avals (Cordemais et Paimbœuf). La station du Pellerin possède des détections constantes tous les jours à partir du 20 juin.

Les deux pics de fréquence de détection enregistrés le 28 et 29 avril pour les stations de Cordemais et de Paimbœuf correspondent à la détection d'une grande partie des individus marqués quelques heures après leur relâche (rappel : le relâcher a lieu entre ces deux stations).

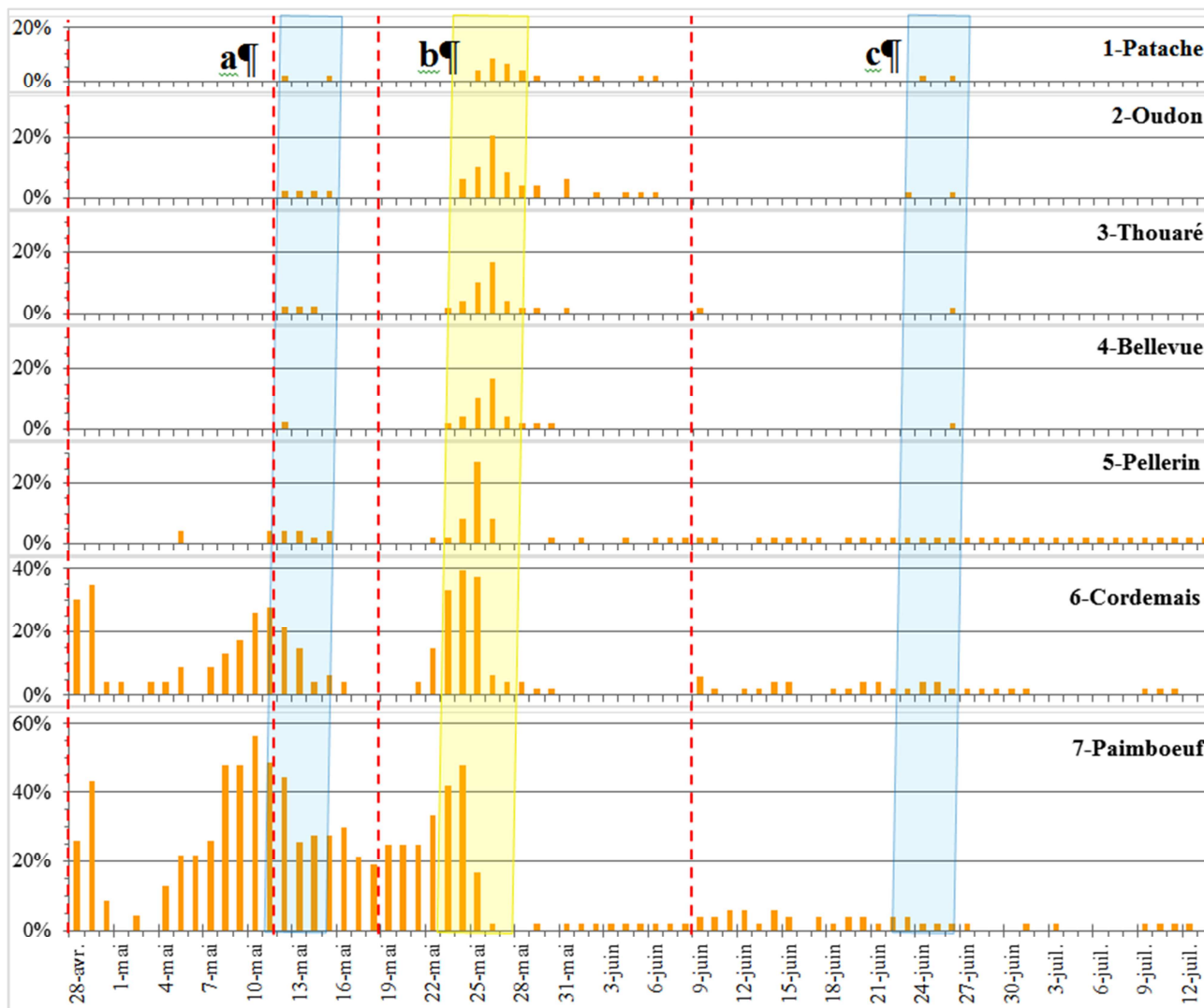


Figure 24 : fréquences de détection par station et épisodes migratoires

4.3.2 Patrons de déplacements individuels

En fonction des caractéristiques de déplacement (période de migration, vitesse de migration, trajets emprunté, ...), quatre groupes d'individus marqués et détectés peuvent être distingués. Ces regroupements seront nommés « patrons de déplacement » dans la suite du rapport. Les graphiques de migration de l'ensemble des individus par patron ainsi que la légende de ces graphiques sont présentés en Annexe 7.

Certaines phases sont communes à tous les patrons de déplacement. Pour les mettre en valeur, elles ont donc été désignées, sur les figures suivantes, par les mêmes lettres (a et b).

Patron A

Ce groupe de comportement migratoire est très largement majoritaire en termes d'effectif sur la population marquée puisqu'il concerne environ 42% des individus marqués (soit 21 grandes Aloses).

Il est caractérisé par une première phase de déplacement de faible amplitude dans la partie aval de l'estuaire (entre les stations de Paimbœuf et de Cordemais) (Figure 25 a) puis par une phase de migration anadrome très rapide de l'ensemble des individus de ce groupe, du 22 au 27 mai, quelle que soit la date de marquage (Figure 25 b). Tous les individus de ce groupe semblent avoir quitté la zone d'étude par l'amont et aucun n'a été détecté en dévalaison après leur migration.

Pour les individus de ce groupe relâchés avant le 11 mai 2011, une intensification des déplacements en fréquence et en amplitude de distance est visible du 08 au 14 mai 2011 (Figure 25 a1). Une période d'absence de détection (de 3 à 12 jours) est également discernable, pour l'ensemble des individus de ce groupe, quelques jours après leur relâche et quelle que soit la date de relâché (Figure 25 a2).

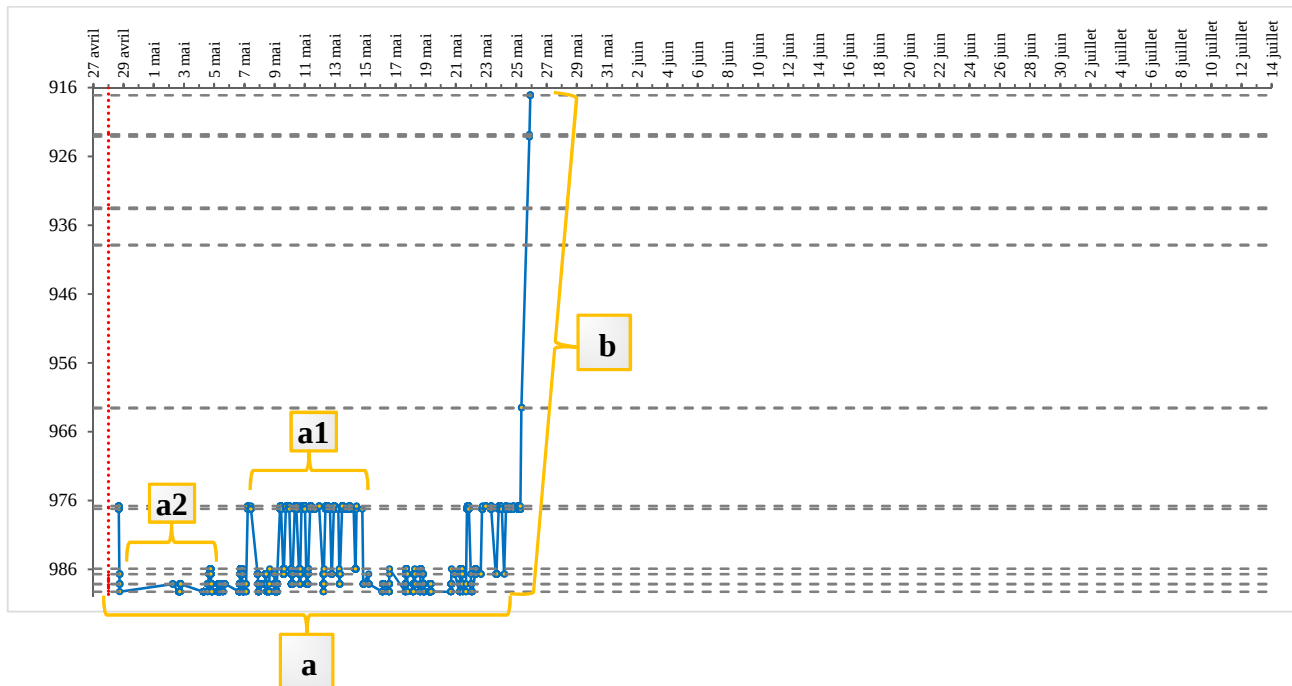


Figure 25 : graphique de migration type du patron A (ALAL-1001)

Patron B

Ce patron de migration concerne deux individus relâchés le 08 juin 2011. On note, pour ces deux individus, une migration ayant lieu du 22 au 26 juin (Figure 26 b) qui est précédée, comme dans le patron A, par une phase d'oscillation entre Paimbœuf et Cordemais de 7 à 11 jours (Figure 26 a).

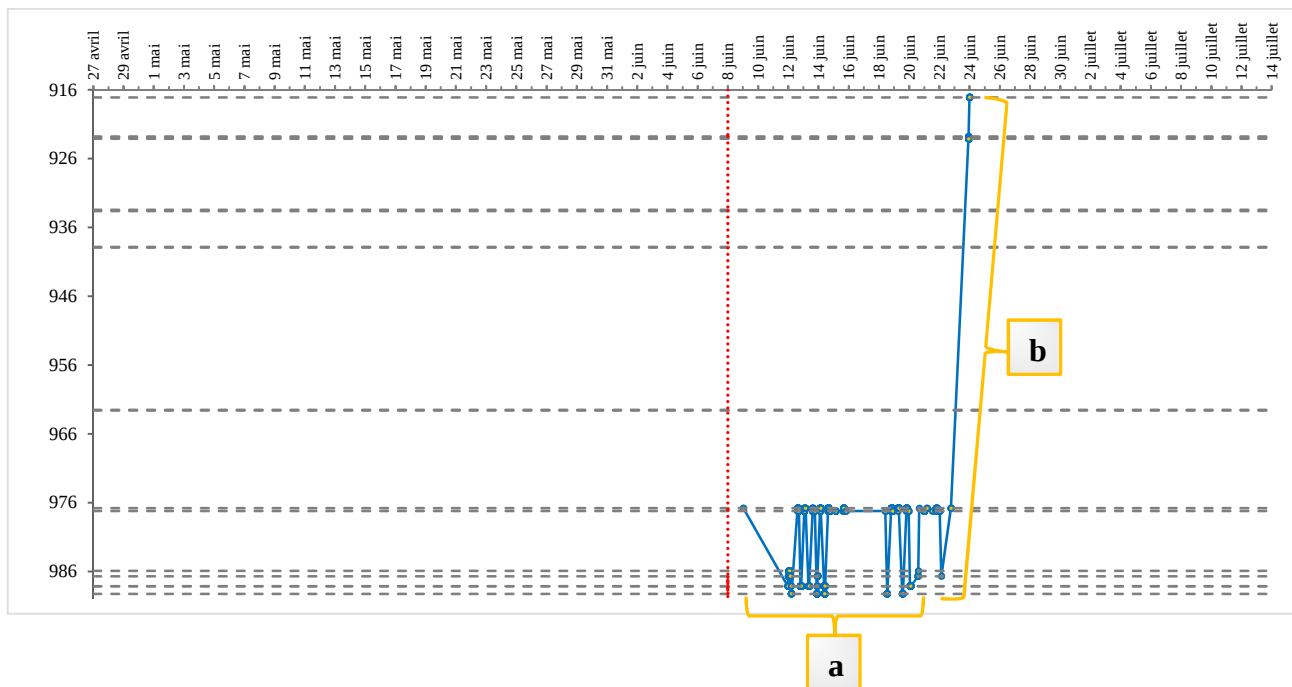


Figure 26 : graphique de migration type du patron B (ALAL-1067)

Patron C

Ce patron de déplacement concerne également 2 individus. Il présente les mêmes comportements que le patron A (période d'attente dans l'estuaire aval (Figure 27 a), absence de détection quelques jours après le relâché) mais est caractérisé par une montaison jusqu'aux stations les plus en amont de la zone d'étude des individus lors de la première période de déplacement soit du 11 au 13 mai (Figure 27 d). Sur les deux individus de ce groupe, un seul a effectué sa migration trans-estuarienne et a quitté la zone d'étude lors de la première période de déplacement. Le second individu a réalisé une anadromie jusqu'à la station la plus en amont de la zone d'étude puis une catadromie jusqu'à la station la plus en aval (Figure 27 c) avant de migrer vers l'amont lors de la seconde période de migration (Figure 27 b).

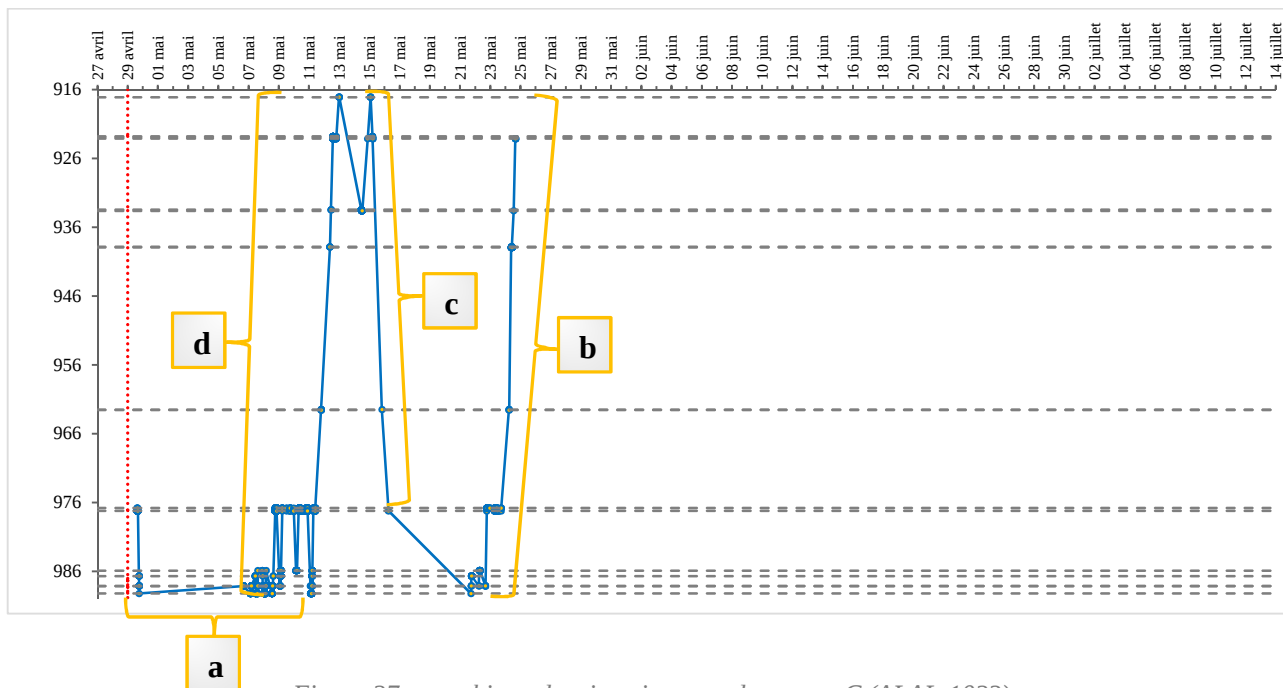


Figure 27 : graphique de migration type du patron C (ALAL-1023)

Patron D

Ce type de comportement migratoire a été observé chez deux individus. Ces deux Aloses ont réalisé une anadromie sur la même période que les individus du patron A (du 25 au 28 avril 2011) (Figure 28 a). Cependant, elles sont restées plus longtemps dans la partie amont de l'estuaire (7 à 13 jours) en réalisant des oscillations en amont de Nantes (Figure 28 e). Pour l'un des deux individus, un mouvement de dévalaison d'Oudon jusqu'au Pellerin est remarquable avant son anadromie définitive.

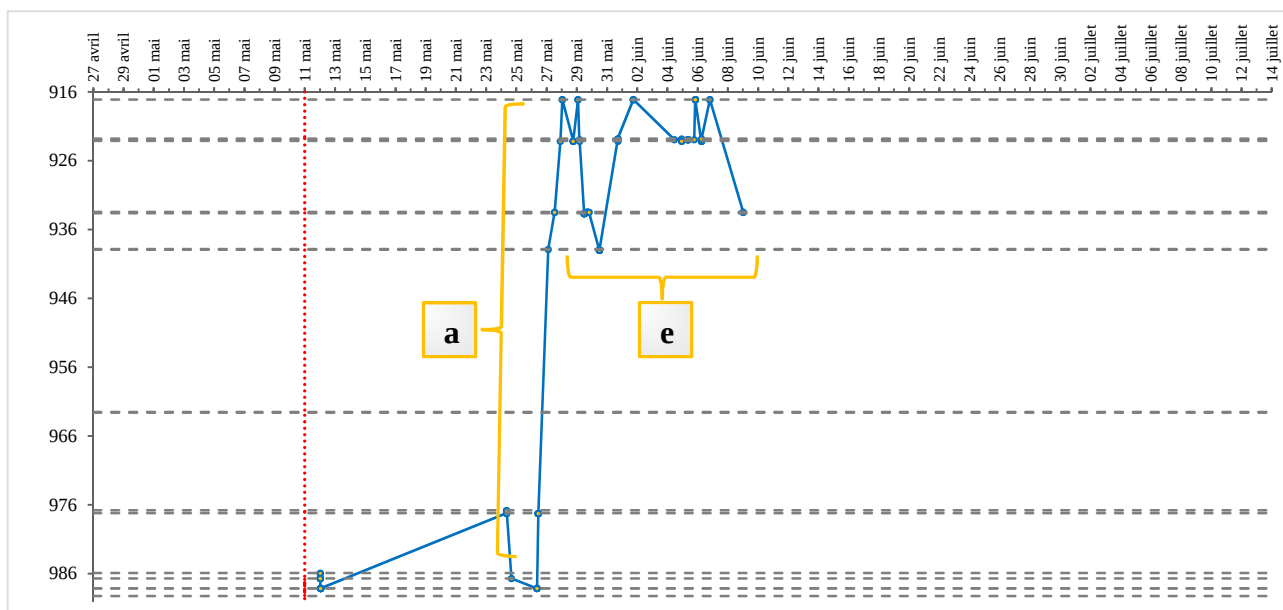


Figure 28 : graphique type de migration du groupe C (ALAL-1043)

Patron E

Ce patron de déplacement est très hétérogène et ne comporte pas assez de détections pour mettre en valeur un comportement commun. L'ensemble des individus de ce groupe n'a pas été détecté dans la partie amont de l'estuaire.

Sur les 17 grandes Aloses de ce patron, 13 présentent quelques détections en aval du site de relâche quelques jours après avoir été marquées puis ne sont plus jamais détectées. Trois autres individus sont détectés régulièrement, et toujours à la même station, de quelques jours après leur relâche jusqu'à la dernière acquisition des données (Figure 29).

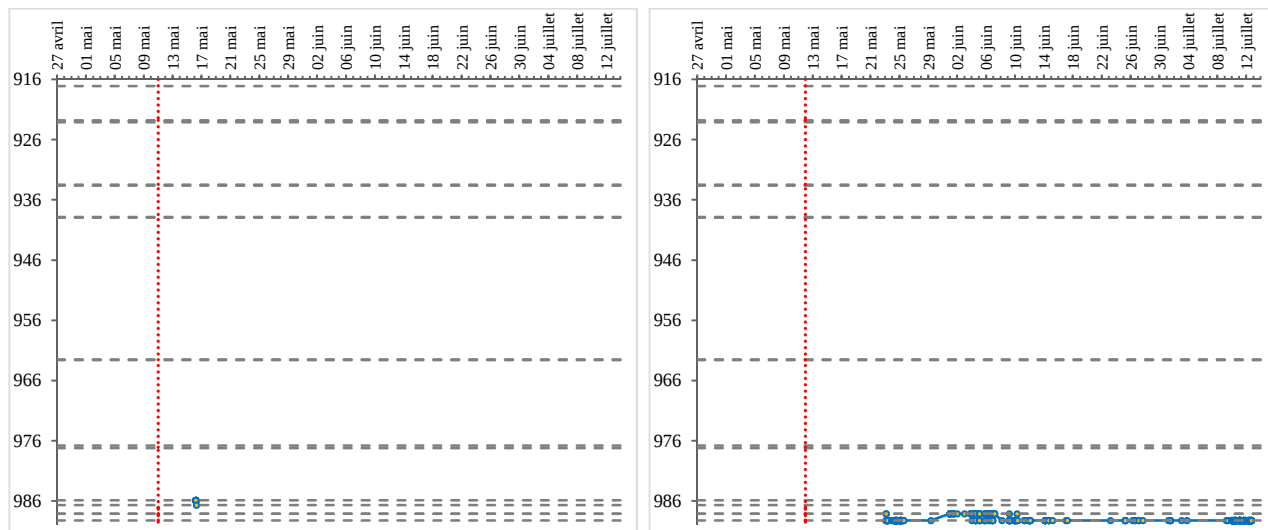


Figure 29 : exemple de deux graphiques de migration pour le patron E (ALAL-1032 et ALAL-1053)

4.3.3 Date de capture et migration

L'analyse des patrons de migration (Annexe 7), et en particulier des patrons A, C et E, montre que l'ensemble des individus ayant été détectés aux stations d'Oudon et/ou de la Patache ont quitté le site d'étude par l'amont et n'ont pas été détectés par la suite. Ces individus seront donc considérés comme « migrants » dans la suite du rapport. Le reste des individus sera qualifié de « non détectés à l'amont ».

Un taux de migrants peut donc être calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de migrant} = \frac{\text{nombre d'individus détectés à Oudon et/ou à La Patache}}{\text{nombre total d'individus relâchés}}$$

Une comparaison entre les individus migrants et n'ayant pas été détectés à l'amont peut être établie pour les différentes sessions de capture (Figure 30).

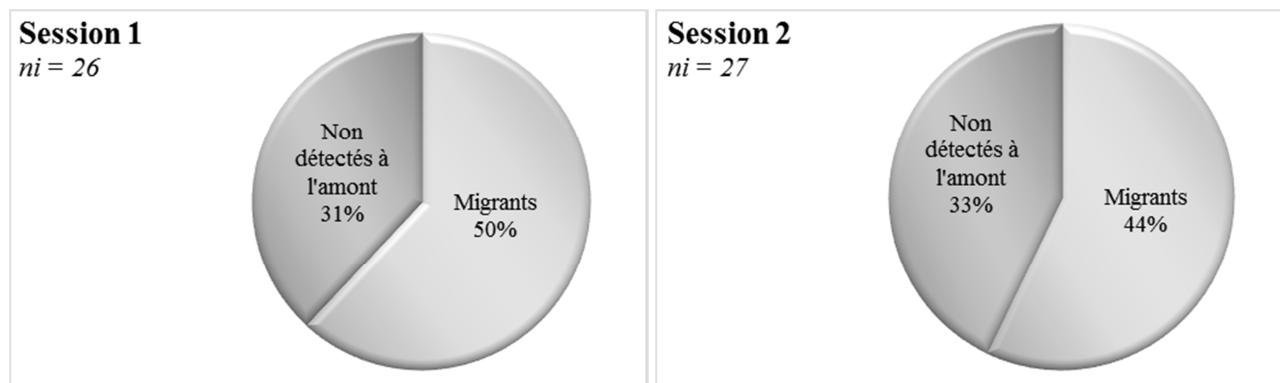


Figure 30 : pourcentage de migrants et d'individus non détectés à l'amont par date de capture

Les taux de migrants sont semblables pour les deux premières sessions de marquage. Les deux individus capturés lors de la session 3 n'ont pas pu être relâchés vivants. La dernière session (session 4) comportait 2 individus qui ont effectué une migration anadrome soit 100% des individus marqués.

Un test de comparaison de Mann-Whitney a été exécuté sur les deux échantillons issus des deux premières sessions de marquage (H_0 : « il n'existe pas de différence significative entre les pourcentages de migrants sur les deux sessions de marquage », $\alpha = 0,05$). Les autres sessions de marquage n'ont pas été prises en compte car elles présentaient des effectifs trop faibles. Selon ce test mené en tant que test bilatéral, la différence entre les deux sessions de marquage n'est pas significative sur le pourcentage de migrants (p -value bilatérale = 0,756,).

4.3.4 Caractéristiques biométriques et migration

Les caractéristiques biométriques des individus considérés comme migrants et des individus non détectés à l'amont ont été comparées grâce à une représentation en boxplot. Trois tests de Mann-Whitney (H_0 : « il n'existe pas de différence significative de L_f , P_t et K entre les individus migrants et les individus non détectés à l'amont », $\alpha = 0,05$) ont également été exécutés (test bilatéral) sur les deux échantillons issus des différents comportements de migration (Figure 31).

Ces comparaisons ont été réalisées dans le but de discerner des différences biométriques entre les individus considérés comme migrants et les individus non détectés à l'amont.

Les Aloses migrantes semblent correspondre aux individus les plus lourds (P_t moyen de $1765 \pm 93,6$ g (e.s. 0,95) contre 1690) et au coefficient de condition de Beckman le plus élevé (K moyen de $1,39 \pm 0,03$ (e.s. 0,95) contre 1,30). Cependant, ces tendances sont très légères et ne sont pas détectées par le test de Mann-Whitney.

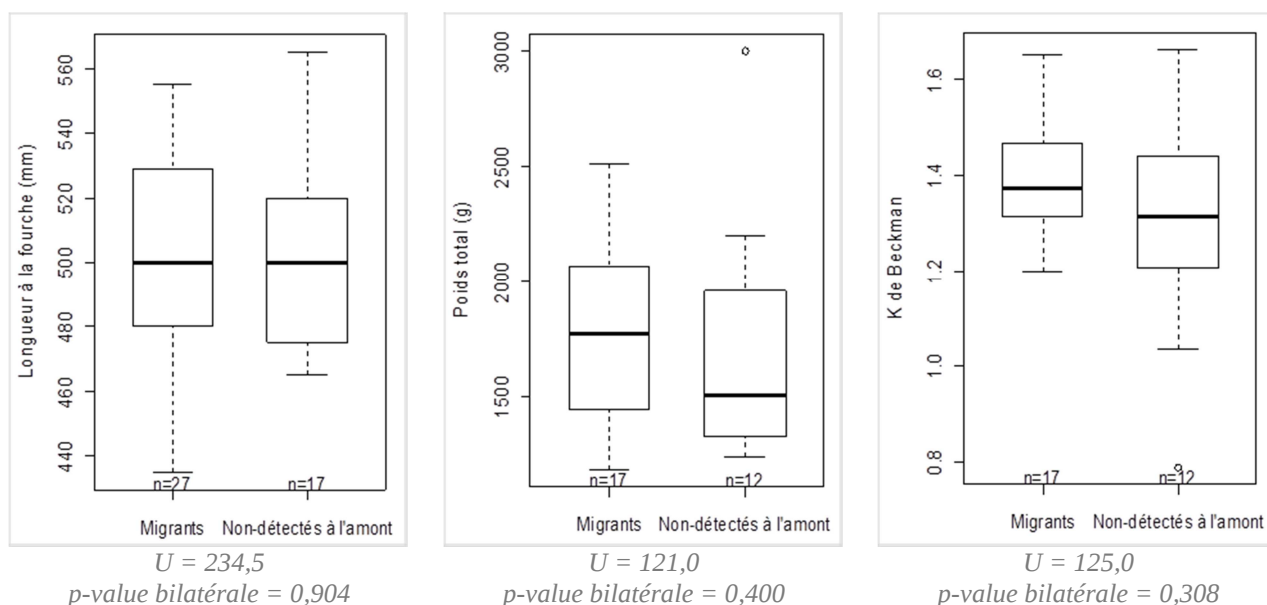


Figure 31 : boxplots des caractéristiques biométriques des individus migrants et non détectés à l'amont

4.3.5 Variables environnementales et migration

Les variables environnementales (hydrologie et physico-chimie), sous forme de moyenne et d'étendue horaire (concentration en oxygène dissous, en matières en suspension, salinité et température), ou de moyenne journalière (coefficient de marée, débit de la Loire), ont été superposées à l'ensemble des patrons de migration. Le traitement par ACP a montré qu'il existe des liaisons entre certaines variables qui se traduisent par des corrélations (c. positives) ou des anti-corrélations (c. négatives).

L'observation du débit moyen journalier de la Loire à Montjean et des patrons de migration ne montre pas de point commun entre les trois épisodes de migration mis en valeur lors de la période d'étude (Annexe 8). Le contexte et la valeur du débit de la Loire sont, en effet, différents dans les trois cas.

Une concordance entre les épisodes migratoires et les plus faibles coefficients moyen de marée à Saint-Nazaire (appelées mortes-eaux) est détectable (Figure 32). En effet, le premier épisode migratoire (concernant 2 individus) s'est déroulé pour des coefficients compris entre 50 et 54. Le second épisode (21 individus) a eu lieu pour des coefficients de 41 à 47 et le troisième épisode (2 individus) pour des coefficients de 39 à 47.

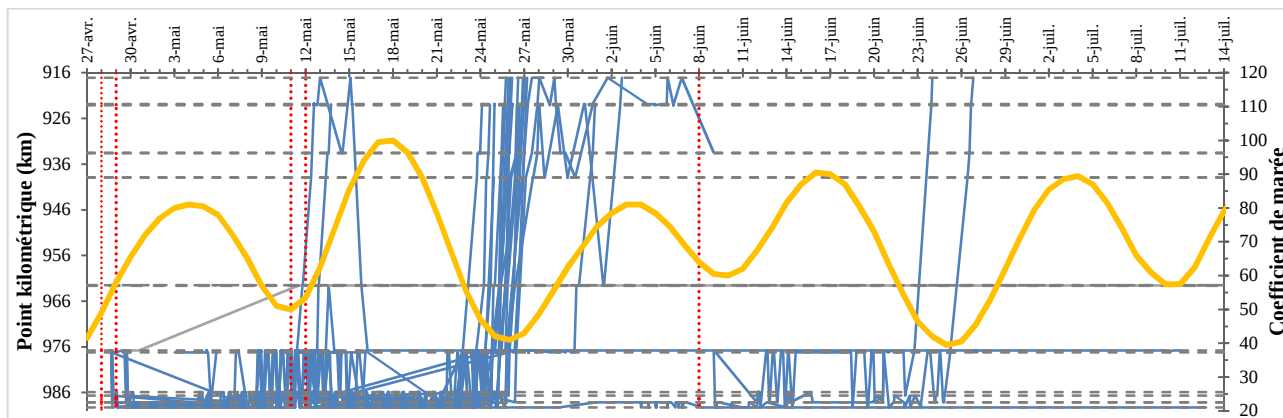


Figure 32 : coefficient moyen (-) de marée à Saint-Nazaire et patrons de migration (-)

Les deux premiers épisodes migratoires se sont produits moins d'un jour après la fin de la diminution de la salinité moyenne (Annexe 8). La migration lors du second épisode migratoire s'est déroulée durant la forte augmentation de salinité à Cordemais et durant une période où l'étendue était faible. L'absence de données ne permet pas de détecter ces phénomènes pour le troisième épisode migratoire mais une diminution de la salinité est détectable quelques jours avant. Concernant les matières en suspension, les deux premiers épisodes migratoires se sont produits lors des plus faibles concentrations en matières en suspension et lorsque leur étendue journalière était également la plus faible (Figure 33).

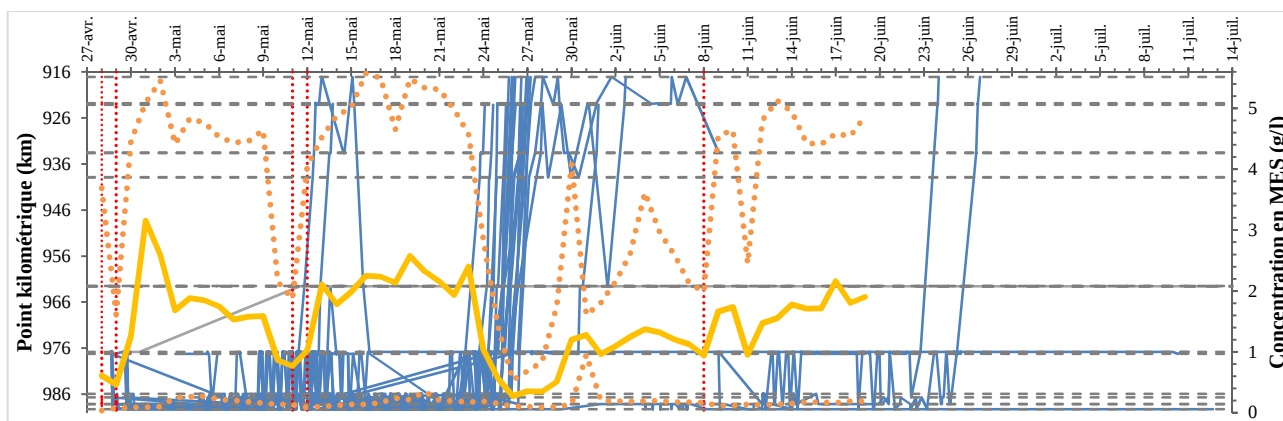


Figure 33 : moyenne (-) et étendue (...) journalière de concentration en MES à Cordemais et patrons de migration (-)

Durant la période d'étude, deux pics de concentration en oxygène dissous ont été enregistrés dans leur intégralité (phase d'augmentation, pics et phase de diminution) (Figure 34). Une synchronisation entre ces pics d'oxygène et les deux premiers épisodes migratoires est décelable.

Ces épisodes migratoires sont survenus au moment du maximum de concentration en oxygène dissous à Cordemais ou quelques jours auparavant pour le second épisode migratoire. L'absence de données ne permet pas de détecter ces phénomènes pour le troisième épisode migratoire mais une tendance à l'augmentation de l'oxygénation est enregistrée quelques jours avant celui-ci.

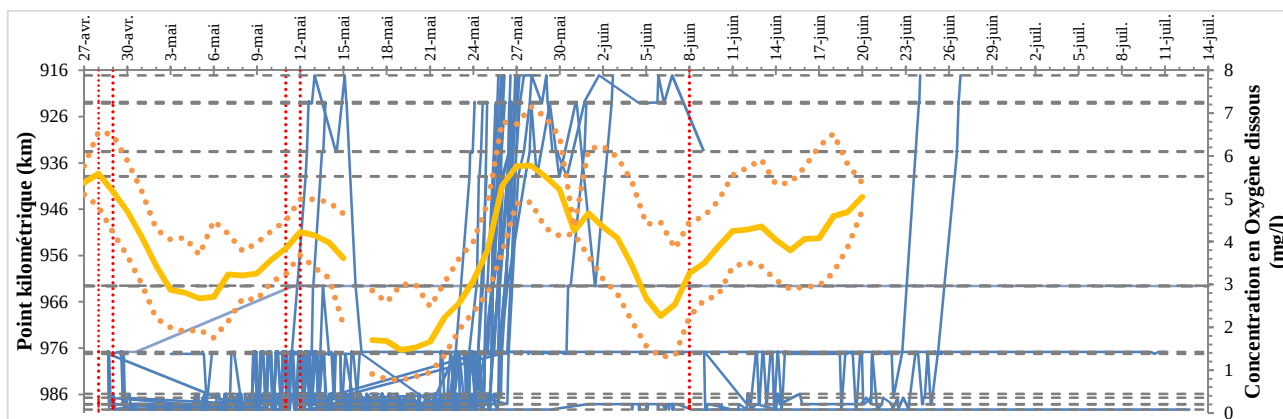


Figure 34 : moyenne (-) et étendue (...) journalière de concentration en oxygène dissous à Cordemais et patrons de migration (-)

Concernant la température, les contextes thermiques lors des deux épisodes de migration sont différents (Annexe 8). En effet, la température est plus faible en moyenne lors du premier épisode et son étendue journalière est importante. A contrario, la température moyenne lors du second épisode migratoire est plus élevée et a une étendue journalière faible. Les variations de températures sont cependant limitées lors de la totalité de la période d'étude.

Variables environnementales et épisodes migratoires

Des superpositions graphiques du taux journalier de migrants (cf. § 4.3.3) peuvent être réalisées avec les différentes conditions environnementales à Cordemais. Seul le graphique des coefficients de marée a été présenté dans le corps du rapport car, comme démontré par le traitement par ACP, il conditionne la majorité des autres variables environnementales. Les autres graphiques ont été placés en annexe (Annexe 9). L'analyse du taux de migrant, en complément des patrons de migration, permet de prendre en compte uniquement le départ des Aloses (déclenchement de la migration) et de le quantifier.

Une concordance entre le taux de migrants et les coefficients de marée les plus bas (« mortes-eaux ») est observable et peut être remarquée lors des trois périodes de mortes-eaux caractérisées par un coefficient de marée inférieure à 50 (Figure 35).

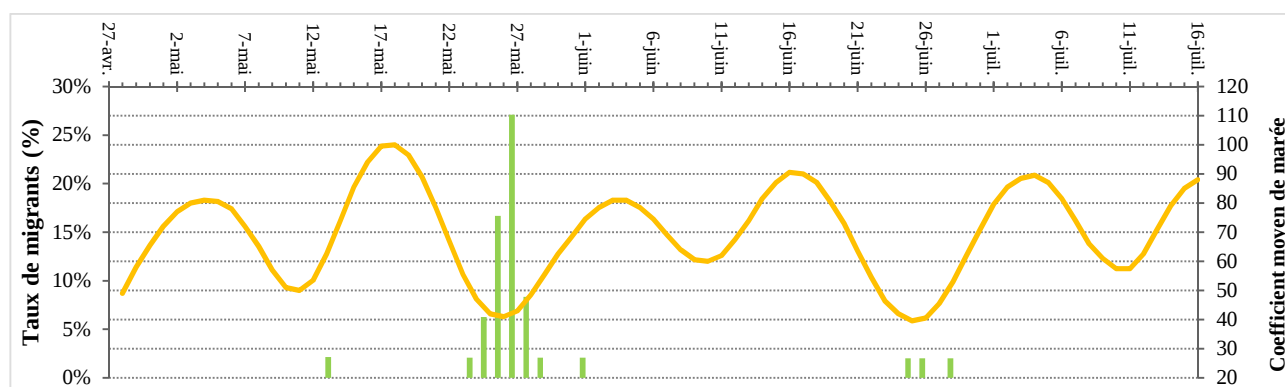


Figure 35 : taux de migrant (-) et coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire (-)

Concernant la concentration en matières en suspension, les plus forts taux de migrants sont enregistrés 1-3 jours avant les plus faibles concentrations moyennes journalières et étendues journalières en matières en suspension. Le deuxième épisode migratoire, suivi par la majorité des individus marqués, est caractérisé par des concentrations des étendues en matières en suspension particulièrement faibles.

Une synchronisation entre les concentrations maximales d'oxygène dissous et les taux les plus élevés de migrants est également détectable. Cependant, un décalage de 1-3 jours est à nouveau présent pour cette variable.

4.3.6 Vitesses de déplacement

Les vitesses de déplacement ont été calculées pour l'ensemble des individus détectés (44 Aloses). Elles se basent sur la distance parcourue entre la dernière détection obtenue à la station aval considérée et la première détection à la station amont considérée. Les distances ont été calculées par différence des points kilométriques (Pk) des stations (moyenne des Pk des hydrophones de la station).

Déplacements d'avalaison et de montaison

Les informations issues des détections permettent de séparer les déplacements de montaison (dirigés vers l'amont) et les mouvements de dévalaison (dirigés vers l'aval) (Figure 36).

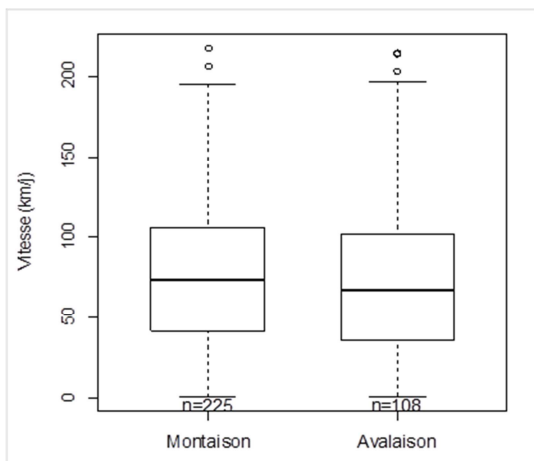


Figure 36 : boxplots des vitesses de montaison et d'avalaison

La vitesse moyenne de montaison est de $78,1 \text{ km/j} \pm 3,07 \text{ km/j}$ (e.s. 0,95) tandis que pour l'avalaison, elle est de $75,2 \pm 4,77 \text{ km/j}$ (e.s. 0,95).

Selon le test de Mann-Whitney bilatéral (H_0 : « il n'existe pas de différence significative de vitesse moyenne entre les déplacements de montaison et d'avalaison », $\alpha = 0,05$), il n'y a pas de différence significative entre les vitesses de montaison et d'avalaison ($U = 11\,520$; $p\text{-value bilatérale} = 0,444$).

Vitesse de migration

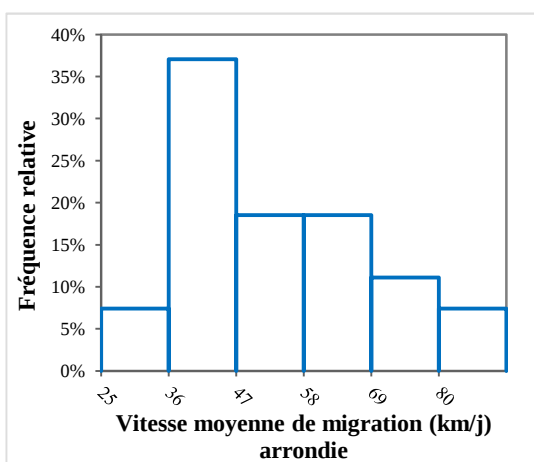


Figure 37 : histogramme des fréquences relatives de vitesse de migration

D'après les patrons de déplacement observés précédemment, les vitesses de déplacement lors des épisodes migratoires peuvent être étudiés à partir de la dernière détection à la station de Cordemais et jusqu'à la première détection à la station de Oudon ou, à défaut, à la station de La Patache (Figure 37).

Cette définition de la vitesse de migration a permis de calculer 27 valeurs de vitesse. La vitesse moyenne de migration est de $53,6 \pm 3,19 \text{ km/j}$ (e.s. 0,95), le maximum de $91,2 \text{ km/j}$ et le minimum de $53,6 \text{ km/j}$.

5 DISCUSSION

5.1 Aspects méthodologiques

Fonctionnement de l'équipement hydroacoustique

L'étude télémétrique a permis d'obtenir un grand nombre de données de détections. Toutefois, au cours de celle-ci, les aires de détection des hydrophones ont été réduites, voire nulles, dans certaines conditions environnementales, notamment lors de forts débits. Ce phénomène est probablement lié au bruit généré par le transport de la charge de fond et de la charge en saltation par le courant.

Dans de tels cas de figure, les aires de détections des hydrophones d'une même station ne couvraient pas la largeur du chenal. En effet, lors des tests, les aires de détection variaient de 0 à 435 en fonction des stations. De plus, les tests de détection effectués près du fond, contrairement à la majorité d'entre eux effectués à 2 mètres de la surface, n'ont pas été concluants. Le système acoustique était donc « poreux ».

L'absence de détection ne permet donc pas d'affirmer que les Aloses n'ont pas transité via l'estuaire pour rejoindre leur site de frayères. En revanche, une détection enregistrée par au moins un hydrophone est forcément due à la présence d'une Alose marquée. Les « fausses détections » sont, en effet, extrêmement rares (*comm. pers.* GRØNNINGSÆTER, A. VEMCO®, 2011).

Certaines détections isolées peuvent être dues non seulement aux conditions de détection défavorables mais également au passage rapide des Aloses et à l'emploi d'émetteurs à délai entre deux transmissions élevé (Annexe, modèles 30-60 s). Cependant, la disposition des hydrophones « en barrière », formant des compartiments, permet de compenser ces absences de détection en se basant sur les stations à proximité. Il est donc très peu probable qu'un individu ait franchi l'ensemble du site d'étude sans avoir été détecté.

Effets du protocole de capture/marquage

D'après l'analyse des deux premières sessions de marquage/capture d'effectifs comparables, la date de capture ne semble pas influencer sur la répartition entre les individus migrants et les individus non détectés à l'amont au sein de l'échantillon marqué et pour la période considérée. Les faibles effectifs capturés et marqués lors des deux dernières dates ne permettent pas de représenter objectivement la population réellement présente dans le fleuve à ces périodes.

Chez l'ensemble des Aloses marquées, hormis deux individus (Annexe 7), une dévalaison vers la station de Paimbœuf a été observée quelques heures après leur relâche. Ce phénomène peut être dû à une réaction au stress provoqué par les étapes de capture/marquage (emploi du filet tramail dérivant, manipulations, protocole de marquage).

5.2 Contexte environnemental

Généralités

Les données environnementales étudiées à Cordemais (salinité, matières en suspension, température et oxygénation) étaient basées sur des moyennes horaires. Celles-ci n'avaient pas pu être validées et corrigées par le GIP Loire Estuaire. Le jeu de données comportait donc un nombre d'enregistrements par jour très variable (de 0 à 24). Dans le cas d'une date caractérisée par un nombre très limité d'enregistrement horaire, la moyenne et l'étendue journalière ne peuvent être représentatives de la totalité des conditions rencontrées lors de la journée. L'ensemble des tendances analysées est donc à modérer.

Le contexte hydrologique de la Loire lors de la période d'étude, et de l'année de manière générale, a été très particulier en comparaison aux années précédentes (faibles débits plus précoces et prolongés).

Les conditions environnementales dans l'estuaire sont, pour la plupart, liées à son hydraulité (localisation et étendu du bouchon vaseux, périodes d'anoxie, ...) (*comm. pers.* BERTIER, C. GIP Loire-Estuaire, 2011). Par conséquent, pour l'année 2011, le bouchon vaseux s'est installé prématurément et était localisé plus en amont que les années précédentes (entre Nantes et Cordemais alors qu'il est habituellement situé entre Cordemais et Paimbœuf).

D'après les témoignages des pêcheurs professionnels fluviaux ligériens (*comm. pers.* VALLEE, M. ; PERRAUD, Y. et BOISNEAU, P. 2011), le comportement de migration et l'abondance de l'Alose semble directement affectés par ces conditions inhabituelles. En effet, les quantités d'Aloses pêchées cette année semblent relativement faibles.

Interactions entre les variables environnementales

D'après le traitement par ACP mené sur les données propres à la période d'étude, le coefficient de marée, la concentration et l'étendue journalière d'oxygène dissous et la concentration et l'étendue journalière de matières en suspension sont liées (par corrélations et anti-corrélations).

Ceci est cohérent avec le fait que lors des petits coefficients de marée, les courants de flot et de jusant sont diminués dans l'estuaire car l'amplitude de marnage est également plus faible. Or, ce ralentissement des courants permet une sédimentation de la matière en suspension et de la matière organique provoquant ainsi l'atténuation voire la disparition du bouchon vaseux (*comm. pers.* BERTIER, C. GIP Loire-Estuaire, 2011).

Cela permettrait ensuite à la demande biochimique en oxygène de chuter grâce à deux phénomènes : diminution de l'activité bactérienne d'oxydation de la matière organique et augmentation de l'activité

photosynthétique du phytoplancton par une meilleure pénétration de l'énergie lumineuse dans l'eau moins turbide (CHAUDON, 2005).

Ceci a d'ailleurs été observé et mis en évidence dans de nombreuses études menées sur l'estuaire de la Loire (CHAUDON, 2005 ; CSEEL., 1984 ; SANCHEZ, 1992).

D'autre part, la concentration en oxygène dissous est apparue comme indépendante de la température de l'eau pendant la période d'étude. Cet élément pourrait s'expliquer par le fait qu'en période estivale, la température ne semble pas être le facteur limitant principal de la concentration en oxygène dissous. Le bouchon vaseux (quantifié par la concentration en MES) serait, en revanche, un facteur limitant majeur.

5.3 Comportements migratoires

Progression des Aloses en migration

D'après l'analyse des fréquences de détection aux différentes stations, trois vagues de montaison peuvent être remarquées dont une majoritaire, en termes d'effectifs, du 22 au 27 mai. Celles-ci sont décalées de 1 à 2 jours vers l'amont, à cause du temps de parcours des individus.

Les fréquences de détection souvent élevées à l'aval permettent d'affirmer que les Aloses restent dans le secteur Paimbœuf/Cordemais un certain temps avant de passer plus brièvement et de manière synchrone en amont.

Patrons de déplacement

Différents patrons de migration de la grande Alose dans sa partie estuarienne ont pu être caractérisés. Ils se décomposent en différentes phases pour la plus grande majorité des individus marqués et détectés :

1. Phase de dévalaison en aval de Paimbœuf : cette phase résultant potentiellement du stress provoqué par la capture et le marquage, peut être fortement supposée même en l'absence de récepteurs situés en aval de Paimbœuf. En effet, pour la majorité des individus marqués, une dévalaison en aval de Paimbœuf suivie d'une période d'absence de détection puis d'une phase de montaison ont été observées (Figure 38).

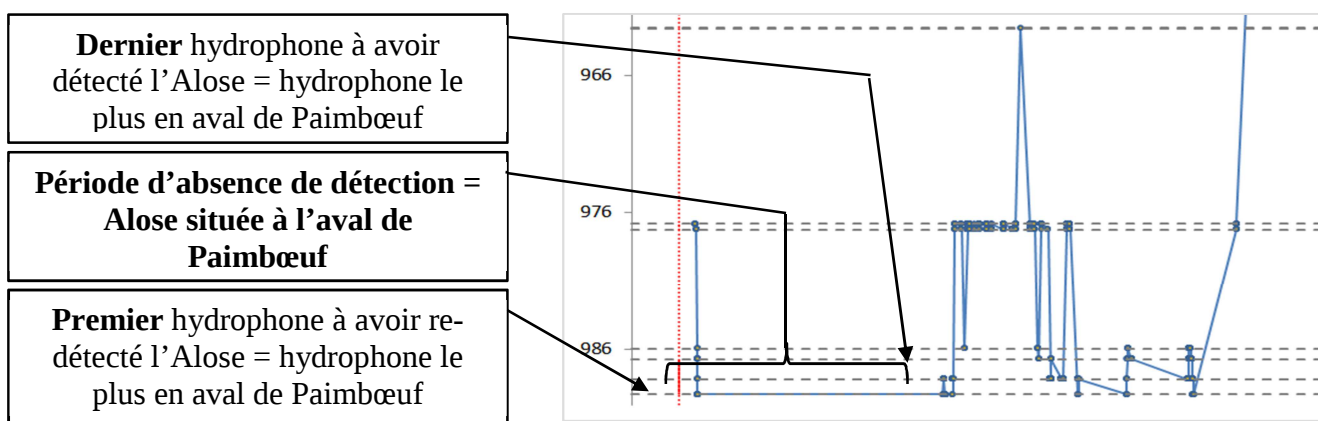


Figure 38 : extrait de patron de détection et mise en valeur d'un comportement de dévalaison en aval de Paimbœuf

2. Phase d'oscillation entre Paimbœuf et Cordemais : cette phase a été plus ou moins longue en fonction de la date de relâche. Elle peut être interprétée comme une phase d'attente. En effet, les individus semblent rester entre Cordemais et Paimbœuf jusqu'à ce que les conditions soient propices à leur migration.
3. Phase de montaison rapide : cette phase de déplacement rapide (74,1 km/j en moyenne) débute à Cordemais et se poursuit au moins jusqu'à La Patache. Trois périodes de montaison rapide ont pu être observées chez les Aloses marquées.

Deux individus (ALAL-1027 et 1038) présentent des détections prolongées à une unique station. Ce phénomène peut s'expliquer par la mort de l'individu et son immobilisation dans la zone de détection des hydrophones de cette station ou par la régurgitation de l'émetteur par le poisson dans une zone couverte par les hydrophones.

En supposant que ces émetteurs soient restés immobiles (individu mort retenu par une quelconque structure subaquatique l'empêchant de dériver ou émetteur régurgité et bloqué dans les sédiments), ils peuvent être considérés comme des « tags tests ». L'analyse de leurs détections (Annexe 7) a permis de constater que celle-ci n'est pas constante alors qu'un signal est théoriquement émis toutes les 10 à 30 secondes ou toutes les 30 à 60 secondes en fonction du modèle employé. Cette observation est cohérente avec le caractère variable de la détectabilité des tags en fonction des conditions environnementales.

De plus, sur les 51 Aloses relâchées vivantes et munies d'un émetteur, sept n'ont jamais été détectées. Il pourrait s'agir d'individus ayant dévalé en mer sans avoir été détectés à la station de Paimbœuf ou d'individus morts et hors de portée des aires de détection. Le cas d'Aloses ayant migré mais n'ayant pas été détectées lors de leur migration paraît très peu probable.



Figure 39 : photo de deux Lamproies marines (*Petromyzon marinus* Linnaeus, 1758) et une grande Alose retrouvées dans le contenu stomacal d'un Silure de 45 kg en Loire - source : GABRIS, B. 2010

La prédation d'individus marqués par des poissons carnassiers tels que le Silure (*Silurus glanis* LINNE, 1758) n'est pas à exclure.

En effet, des cas d'Aloses retrouvées dans le contenu stomacal des Silures en Loire ont déjà été constatés (*comm. pers.* BOISNEAU, P. & GABRIS, B. 2011 et Figure 39).

Le départ des 7 individus non détectés et des autres vers des affluents de la Loire situés dans la zone d'étude (entre Paimbœuf et Oudon) paraît peu probable car il n'existe pas de zone de frayère fréquentées connues sur les affluents avals de la Loire (Acheneau, Sèvre Nantaise, Erdre, Hâvre ...) pour diverses raisons (caractéristiques d'habitat inappropriées, absence de continuité piscicole, ...).

Vitesses de migration

Une vitesse de migration moyenne de $53,6 \pm 3,19$ km/j (*e.s.* 0,95) a été calculée sur 27 individus ayant migré avec un maximum à 91,2 km/j et un minimum de 24,8 km/j. Une telle vitesse moyenne de migration permet à la majorité des individus migrants de parcourir l'ensemble du site d'étude en un peu plus d'une journée. Les vitesses de nage peuvent être supérieures si les Aloses ne font pas un trajet linéaire entre les deux stations considérées pour le calcul de la vitesse moyenne.

De plus, il n'existe pas de différence significative entre les vitesses de montaison et de dévalaison. Ceci concorde avec l'absence d'adaptation des Aloses aux vitesses et aux directions de courants lors de leur migration estuarienne constatée sur la Gironde (ROCHARD, 2001).

Les vitesses de migration enregistrées dans le secteur d'étude sont particulièrement élevée et supérieures aux 21 km/j enregistrés par des études précédentes menées sur les pêcheries ligériennes (ROCHARD, 1992 ; MENNESSON-BOISNEAU & BOISNEAU, 1990 in (BAGLINIERE & ELIE, 2000)) ou aux 17-23 km/j constatés sur le Gironde (ROCHARD, 2001). Toutefois ces études s'appuyaient sur une méthode (analyse des données de capture des pêcheries) et un secteur différents (Loire amont et moyenne ou Gironde).

5.4 Relations entre variables environnementales et migration

Certaines tendances entre les périodes de migration et le contexte environnemental étudié à Cordemais ont pu être mises en évidence :

- Les Aloses migrantes semblent réaliser leur phase de montaison rapide **lors des plus faibles coefficients de marée** (« mortes eaux »). Ce premier élément est d'ailleurs confirmé par les pêcheurs professionnels situés dans la limite d'influence de la marée dynamique (*comm. pers. VALLEE, M. & MACE, D., 2011*).
- Les migrations ont également lieu lorsque la **concentration en oxygène dissous est la plus élevée** et que son **étendue journalière est la plus faible**.
- Cette période correspond également à des **chutes de la concentration en matières en suspension** au niveau de Cordemais.

MENNESSON-BOISNEAU et BOISNEAU, 1990 *in* (CHAUDON, 2005) constatent, à l'inverse, des épisodes de migration principalement lors des vives eaux dans l'estuaire de la Loire. Il est donc possible que les Aloses utilisent les forts courants de flots rencontrés lors des vives eaux quand les conditions d'oxygénation ne sont pas limitantes ce qui est généralement le cas puisque l'anoxie n'intervient rarement avant juin-juillet (CHAUDON, 2005) tandis qu'elles deviennent dépendantes des bonnes conditions d'oxygénation, rencontrées pendant les mortes eaux, lors des périodes d'hypoxie comme cela a été le cas lors de la période d'étude.

Concernant l'hydrologie, les variations de débit lors de la période d'étude sont globalement très limitées (de l'ordre d' $1-3 \text{ m}^3/\text{s}$ par jour) ce qui laisse à penser qu'elles seraient difficilement détectables pas les Aloses qui sont situées, pour la majorité, dans une grande masse d'eau entre Cordemais et Paimbœuf avant de migrer.

Une anticipation des phases de migration par rapport au maximum de concentration en oxygène dissous à Cordemais a été notée. Elle pourrait s'expliquer par différents phénomènes :

- Un effet de seuil de la concentration en oxygène dissous : la migration ne se déclencherait pas au maximum de concentration en oxygène dissous mais lorsqu'un certain seuil est dépassé.
- Un effet de pente : le stimulus déclenchant la migration serait alors l'augmentation rapide de l'oxygène dissous et non l'atteinte de sa concentration maximale.
- Le fait que les Aloses se situent généralement en aval de Cordemais (entre Cordemais et Paimbœuf) et non exactement à Cordemais et que la concentration moyenne journalière en oxygène dissous en aval de Cordemais serait plus élevée.
- L'existence d'un variable environnementale, non étudiée, liée et décalée de quelques jours avec la concentration en oxygène dissous.
- L'aspect cyclique et prévisible des marées qui permettent de « prédire » des bonnes ou mauvaises conditions à venir étant données les relations entre variables.

La troisième de ces hypothèses semble la plus réaliste compte tenu des concentrations moyennes journalières d'oxygène dissous à Cordemais et Paimbœuf (Figure 40). En effet, la concentration moyenne journalière en oxygène dissous est globalement plus élevée à Paimbœuf qu'à Cordemais.

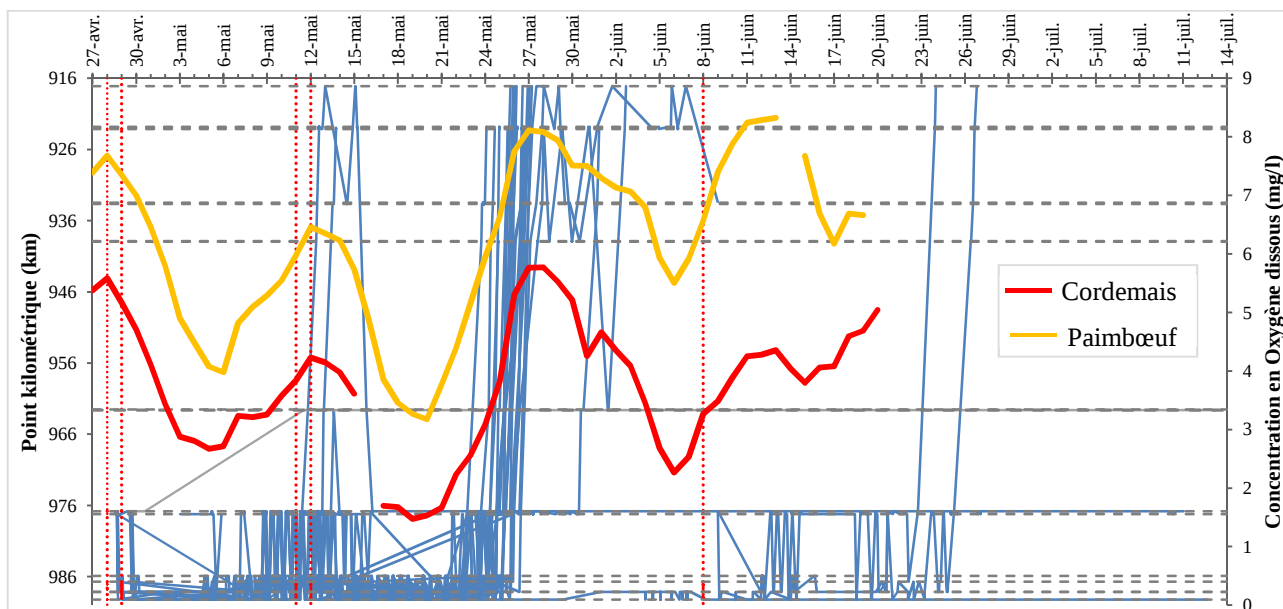


Figure 40 : graphiques de migration (-) et concentrations moyennes journalières en oxygène dissous à Cordemais (-) et Paimbœuf (-)

Dans tous les cas, la concentration en oxygène dissous paraît influencer le comportement migratoire de différentes espèces dans la partie estuarienne des fleuves (CHAUDON, 2005) :

- (1) *Alosa sapidissima* (WLISON, 1811) adopte un comportement d'évitement pour des concentrations en oxygène dissous de 2,5 à 3 mg/l selon CHITTENDEN, 1973 in (TAVERNY, ELIE, & BOET, 2009). Ces concentrations constituent un seuil quasi-infranchissable pour la migration des adultes (TAVERNY, ELIE, & BOET, 2009).
- (2) Le seuil létal pour 50% (LC-50) des individus d'*Alosa sapidissima* est de 1,28 mg/l à 18°C selon CHITTENDEN, 1973 in (TAVERNY, ELIE, & BOET, 2009)
- (3) La concentration minimale en oxygène dissous pour assurer la migration d'au moins 50% des individus d'*Alosa fallax*, pendant leur pic de la montaison se situe à 5,1 mg/l (TAVERNY, ELIE, & BOET, 2009)

Ces seuils annoncés dans la littérature peuvent être comparés aux épisodes migratoires observés lors de la période d'étude (Figure 41).

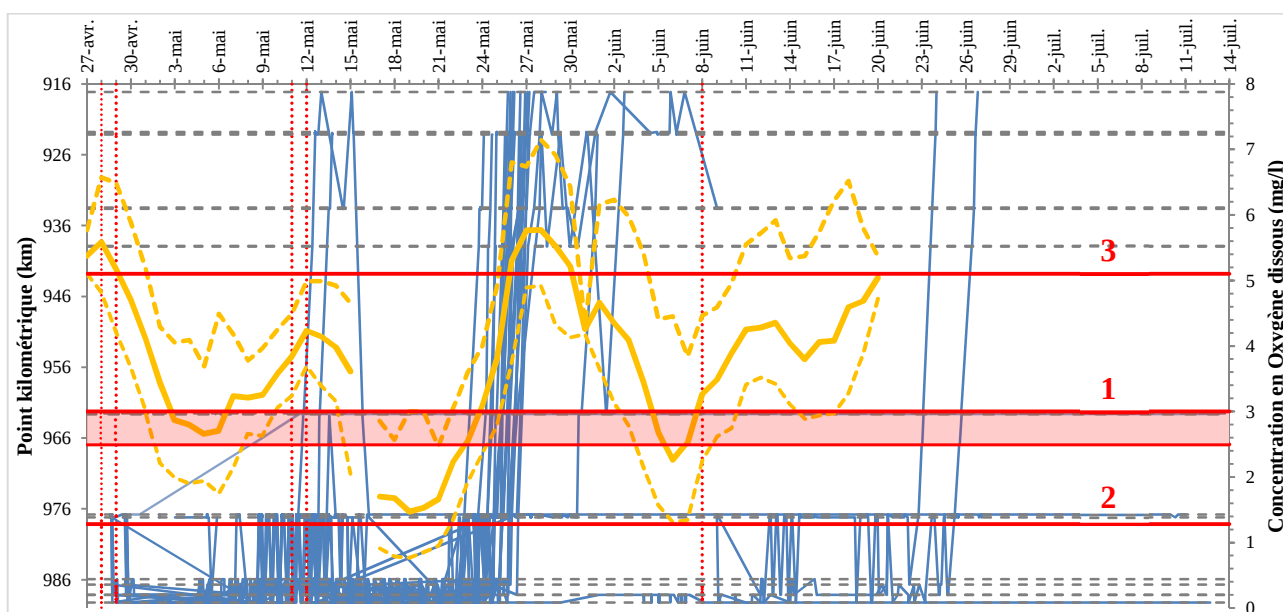


Figure 41 : graphiques de migration (-), concentration (-) et étendue (...) journalière en oxygène dissous à Cordemais et seuils relevés dans la littérature (-)

Lors des années ordinaires, le bouchon vaseux se forme de juin à octobre ce qui correspond à une période de faible activité des migrateurs amphihalins (déplacements plus limités en estuaire) (STEINBACH, 2001). Pour l'année 2011, la période d'hypoxie a très probablement chevauché la période de migration des Aloses. La transparence migratoire de l'estuaire de la Loire et notamment l'action anoxique du bouchon vaseux seraient donc à évaluer.

En effet, certains auteurs supposent qu'il constitue « un des premiers facteurs limitants des populations amphihalines de la Loire » (STEINBACH, 2001) voire qu'il serait susceptible de provoquer la mort d'espèces migratrices amphihalines (SAURIAU, 1991 in (CHAUDON, 2005)).

Les 17 individus du patron de déplacement E ne sont pas parvenus à migrer et ont dévalé en aval de Paimbœuf. Ces Aloses ont peut-être souffert d'une exposition trop prolongée à une hypoxie/anoxie comme suspecté par différents auteurs (SAURIAU, 1991 in (CHAUDON, 2005)). De plus, des mortalités massives de Lamproies marines (*Petromyzon marinus* LINNE, 1758) ont été constatées, entre Cordemais et Paimbœuf, par les pêcheurs professionnels, et les scientifiques du Muséum lors des sessions de capture/marquage et de maintenance des hydrophones en avril et début mai.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'utilisation de la télémétrie hydroacoustique, sur l'estuaire de la Loire, dans le cadre du projet amphihalins a permis de couvrir une zone géographiquement étendue (72,1 km). Un jeu de données conséquent a été extrait des hydrophones du réseau d'écoute (environ 43 000 détections) présentant néanmoins quelques points faibles à considérer, telle que la porosité relative des barrières acoustique et l'absence de détection de certains individus marqués.

Grâce à l'analyse spatiale et à la mise en relation de ces données avec les conditions environnementales de l'estuaire, différentes étapes de la phase estuarienne de la grande Alose ont pu être caractérisées :

Premièrement, un temps de séjour inégal dans les différents compartiments de l'estuaire. En effet, les Aloses marquées restent majoritairement plus longtemps entre les stations aval (Paimbœuf et Cordemais) avant de migrer rapidement, et de manière synchrone, vers les stations les plus en amont et probablement au-delà.

Trois épisodes migratoires ont également pu être mis en évidence quelle que soit la date de marquage des individus. La vitesse moyenne lors de ces périodes de montaison a été évaluée à $53,6 \pm 3,19$ km/j (*e.s.* 0,95).

Deuxièmement, le déclenchement des épisodes migratoires est apparu comme particulièrement lié (corrélés ou anti-corrélés) à certaines variables environnementales, telles que la concentration en oxygène dissous et la concentration en matières en suspension, elles-mêmes dépendantes du coefficient de marée.

La poursuite en 2012 et 2013 du projet Amphihalin et du volet télémétrie permettra l'exploration de différents champs de recherches :

Au niveau méthodologique et technique :

- de mieux connaître, ou de réduire, la porosité acoustique des différentes stations : en augmentant le nombre d'hydrophones par station, en installant des tags test à des distances variables des hydrophones ou en mettant en place une station de détection très fiable dans la partie amont.
- d'appréhender les causes de la mortalité des individus lors de la phase de capture/marquage afin de tenter de la réduire.

- d'étendre la zone d'étude, principalement en aval de Paimbœuf, grâce à la mise en place de nouveaux hydrophones et ainsi de mieux caractériser la phase de dévalaison qui précède la migration.

Au niveau biologique :

- d'augmenter la précision spatiale de la localisation des individus par des sessions de pistage actif. Ceci permettrait d'étudier leurs déplacements entre les barrières d'hydrophones, notamment lors de la phase d'attente dans l'estuaire aval et de caractériser l'utilisation des différents habitats estuariens.
- d'effectuer une comparaison pluriannuelle des effets des variables environnementales sur la migration trans-estuarienne des Aloses et notamment de s'affranchir du caractère atypique de l'année 2011.
- d'étudier l'ensemble de la période de migration des Aloses dès les premières arrivées de géniteurs en estuaire par des sessions de marquage/capture plus précoces et plus ciblées (en étudiant les variables environnementales « prévisibles »).

Beaucoup d'autres champs d'exploration sont envisageables et demanderaient des études plus approfondies notamment pour la relation entre biométrie et vitesse de migration, la prise en compte de la dimension spatiale des variables environnementales, l'étude journalière des phases de déplacement (en fonction du rythme de marée, des courants, du cycle jour/nuit, position des individus dans la colonne d'eau, ...), ainsi que le comportement à l'intérieur du bouchon vaseux.

Les résultats délivrés par cette première année de marquage sont très encourageants et ont permis d'étudier, sous différents aspects, une phase de vie des espèces amphihalines encore méconnue.

Ils pourraient déboucher, à long termes, sur une meilleure protection de l'espèce par une gestion adaptée de ses habitats (zones d'attente, qualité du milieu aquatique) et une modification des usages impactant, directement (pêcherie) ou indirectement (facteurs favorisant le bouchon vaseux), la migration.

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique global, la présence du bouchon vaseux et les crises d'anoxie qu'il engendre doivent être gérées efficacement afin de garantir la pérennité de la population de grande Alose ligérienne d'autant que cette espèce est déjà menacée par de multiples facteurs (discontinuité écologique, réduction et dégradation de frayères, quantité et qualité de l'eau).

BIBLIOGRAPHIE

- AARESTRUP, K., THORSTAD, E., KOED, A., SVENDSEN, J., JEPSEN, N., PEDERSEN, M., et al. (2010). *Survival and progression rates of large European silver eel *Anguilla anguilla* in late freshwater and early marine phases* (Vol. 9). Oslo: Aquatic Biology.
- AUCLERC, P. (2006). *L'estuaire cet inconnu*. Orléans: Plan Loire Grandeur Nature (2007-2013).
- BACH, J.-M., PAROUTY, T., LEON, C., SENECA, A., CORNU, V., PORTAFAIX, P., et al. (2010). *Recueil de données biologiques 2009*. Consulté le 05 30, 2011, sur "Association Loire Grands Migrateurs": http://www.logrami.fr/sites/all/files/Rapport-Recueil-donn%C3%A9es-biologiques-LOGRAMI-2009_1.pdf
- BAGLINIERE, J., & ELIE, P. (2000). *Les Aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax* spp.) écobiologie et variabilité des populations* (éd. CEMAGREF Editions, INRA Editions). Paris: Institut National de la Recherche Agronomique.
- BOISNEAU, C., BOISNEAU, P., & RUAUX, B. (2011). *Reconstitution des cohortes de grande Alose (*Alosa alosa* L.) en Loire de 1980 à 2010, liens entre indice d'abondance et facteurs environnementaux*. Tours: Université de Tours.
- CHAUDON, A. (2005). *Les crises d'anoxie dans l'estuaire de la Loire : caractérisation et approche de leur incidence sur la transparence migratoire*. GIP. Loire Estuaire.
- CONNORS, K., SCRUTON, D., BROWN, J., & MCKINLEY, R. (2002). *The effects of surgically-implanted dummy radio transmitters on the behaviour of wild Atlantic salmon smolts*. Hydrobiologia.
- CSEEL. (1984). *Rapport final du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire*. Paris: Centre National pour l'Exploitation des Océans.
- GIP Loire Estuaire. (2002). *Observations et suivis environnementaux de la Maine à la Mer*. GIP. Loire Estuaire. Cahier indicateur 2002 - Loire estuaire.
- GIP Loire Estuaire. (2009). *"La Loire estuarienne"*. Retrieved mai 31, 2011, from La Loire en chiffres: http://www.loire-estuaire.org/la_loire/la_loire_en_chiffres.html
- HEUPEL, M., SEMMENS, J., & HOBDA, A. (2006). *Automated acoustic tracking of aquatic animals : scales, design and deployment of listening station arrays*.
- PRIEDE, I. (1991). *Telemetry in assessment of environmental effects on individual fishes*. Aberdeen: University of Aberdeen, Department of zoology.
- ROCHARD, E. (2001). *Migration anadrome estuarienne des géniteurs de grande Alose (*Alosa alosa*), allure du phénomène et influence du rythme des marées*. Paris: Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture.
- ROCHE, P., BALLE, G., BROSSE, L., DELHOM, J., GOMEZ, P., LEBEL, I., et al. (2007). *Etude par radiopistage de la migration de l'Alose dans le Rhône aval, rapport final - synthèse 2004, 2005, 2006*. Lyon: Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.
- SANCHEZ, M. (1992). *Modélisation dans un estuaire à marée*. Université de Nantes. Nantes: Rapport de thèse.
- STEINBACH, P. (2000). *Situation et restauration des populations de poissons migrants amphihalins dans le bassin de la Loire*. Paris: Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture.
- STEINBACH, P. (2001). *Effets cumulés sur les poissons migrants, état et restauration des grands axes de migration du bassin de la Loire* (Vol. 2). Paris: Hydroécologie appliquée.
- STEINBACH, P., GUENEAU, P., AUTUORO, A., & BROUSSARD, D. (1986). *Radio-pistage de Grandes Aloses adultes en Loire*. Paris: Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture.
- TAVERNY, C., & ELIE, P. (2001). *Répartition spatio-temporelle de la Grande Alose (*Alosa alosa*) et de l'Alose Feinte dans le golfe de Gascogne*. Paris: Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture.
- TAVERNY, C., ELIE, P., & BOET, P. (2009). *La vie piscicole dans les masses d'eau de transition : proposition d'une grille de qualité pour la température, l'oxygène dissous, la salinité et la transparence*. Bordeaux: Étude CEMAGREF n° 131.
- THELMA BIOTEL. (2010). *Acoustic Fish Telemetry (standard transmitters, sensor transmitters)*.
- THROSTAD, E., OKLAND, F., ROWSELL, R., & MACKINLEY, S. (2000). *A system for automatic recording of fish tagged with coded acoustic transmitters*.
- VEMCO. (2010). VR2W Receiver User Manual. 22. (a division of AMIRIX Systems Inc.).

LISTE DES FIGURES

La source des figures, lors qu'elle était extérieure, a été précisée en légende de chaque figure.

Figure 1 : place de l'étude télémétrique dans le projet « Amphihalins »	1
Figure 2 : bassin versant de la Loire, site d'étude, principaux affluents et agglomérations - source : EPTB Loire (modifié)	3
Figure 3 : délimitation du site d'étude et des principales agglomérations	3
Figure 4 : photo de Grande Alose - source : LOCHET, A. CEMAGREF Bordeaux	4
Figure 5 : emplacement des stations de mesure SYVEL - source : GIP Loire Estuaire	5
Figure 6 : représentation schématisée du signal émis par les tags acoustiques	6
Figure 7 : carte des stations et des hydrophones déployés sur l'estuaire de la Loire	6
Figure 8 : schéma d'implantation des hydrophones et niveaux théorique de détection	7
Figure 10 : aperçu du format des données de détection	8
Figure 10 : protocole de marquage des géniteurs d'Aloses	8
Figure 11 : période de pêche par rapport à la marée	8
Figure 12 : débit moyen journalier de la Loire à Montjean-sur-Loire et période d'étude	10
Figure 13 : coefficient moyen journalier de marée à Saint-Nazaire	10
Figure 14 : moyenne et étendue journalière de salinité à Cordemais	11
Figure 15 : moyenne et étendue journalière de concentration en MES à Cordemais	11
Figure 16 : moyenne et étendue journalière de concentration en Oxygène dissous à Cordemais	12
Figure 17 : températures moyennes, minimales et maximales journalières à Cordemais	12
Figure 18 : graphique synthétique de l'ACP	13
Figure 19 : nombre d'individus aux différentes phases de l'étude	13
Figure 20 : histogramme des fréquences relatives de longueurs à la fourche	14
Figure 21 : histogramme des fréquences relatives de poids total	14
Figure 22 : histogramme de fréquence relative de coefficient de condition	14
Figure 23 : boxplots des caractéristiques biométriques en fonction des sessions de capture/marquage	15
Figure 24 : fréquences de détection par station et épisodes migratoires	16
Figure 25 : graphique de migration type du patron A (ALAL-1001)	17
Figure 26 : graphique de migration type du patron B (ALAL-1067)	17
Figure 27 : graphique de migration type du patron C (ALAL-1023)	18
Figure 28 : graphique type de migration du groupe C (ALAL-1043)	18
Figure 29 : exemple de deux graphiques de migration pour le patron E (ALAL-1032 et ALAL-1053)	19
Figure 30 : pourcentage de migrants et d'individus non détectés à l'amont par date de capture	19
Figure 31 : boxplots des caractéristiques biométriques des individus migrants et non détectés à l'amont	20
Figure 32 : coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire et patrons de migration	21
Figure 33 : moyenne et étendue journalière de concentration en MES à Cordemais et patrons de migration	21
Figure 34 : moyenne et étendue journalière de concentration en oxygène dissous à Cordemais et patrons de migration	21
Figure 35 : taux de migrant et coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	22
Figure 36 : boxplots des vitesses de montaison et d'avalaison	23
Figure 37 : histogramme des fréquences relatives de vitesse de migration	23
Figure 38 : extrait de patron de détection et mise en valeur d'un comportement de dévalaison en aval de Paimbœuf	25
Figure 39 : photo de deux Lamproies marines (<i>Petromyzon marinus</i> Linnaeus, 1758) et une grande Alose retrouvées dans le contenu stomacal d'un Silure de 45 kg en Loire - source : GABRIS, B. 2010	26
Figure 40 : graphiques de migration et concentrations moyennes en oxygène dissous à Cordemais et Paimbœuf	28
Figure 41 : graphiques de migration, concentration en oxygène dissous à Cordemais et seuils relevés dans la littérature	28

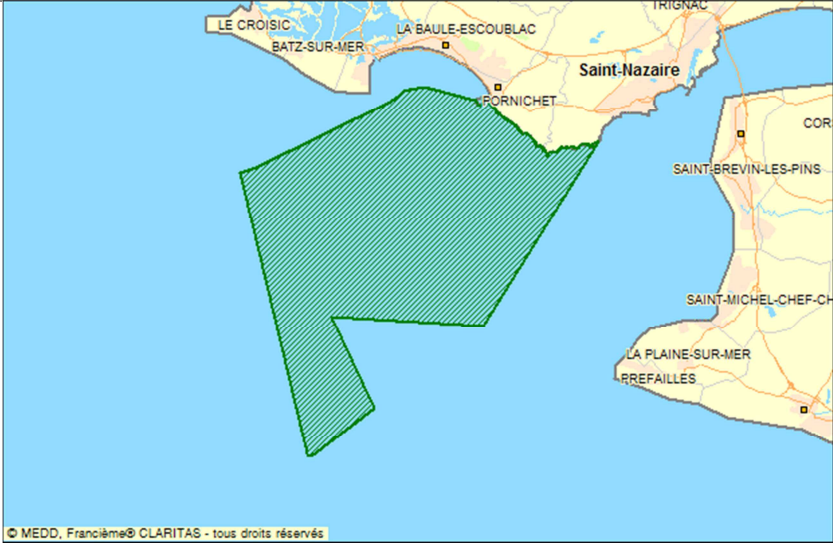
ANNEXES

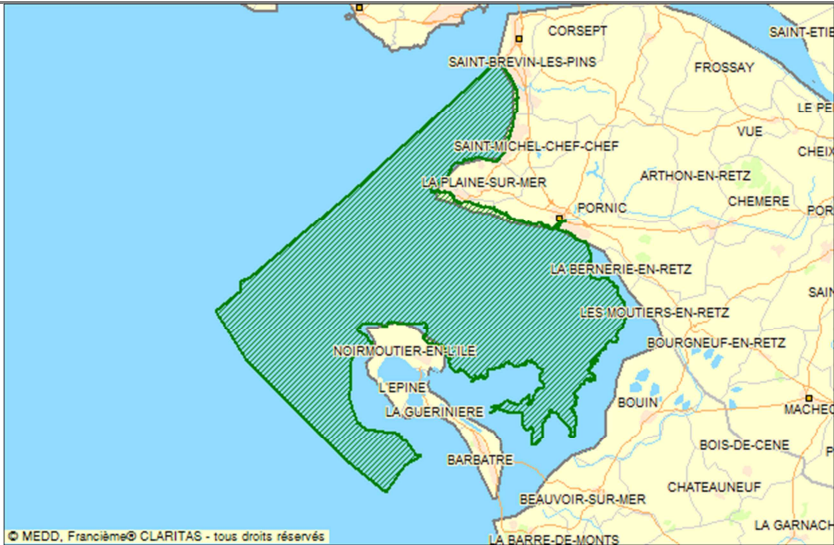
Annexe 1

Statuts des sites Natura 2000 présents ou proches du secteur d'étude

Appellation	ESTUAIRE DE LA LOIRE (FR5200621)
Statut	Site d'Importance Communautaire
Extrait de carte (source : © Francièmes® CLARITAS - Tous droits réservés)	
Superficie	21 760 ha
Caractéristiques pour <u>Alosa alosa</u>	Etape migratoire Site très important pour cette espèce (taille et densité de la population de l'espèce présente sur le site par rapport aux populations présentes sur le territoire national = 2 à 15%)
Source	http://natura2000.environnement.gouv.fr/sites/FR5200621.html

Appellation	VALLEE DE LA LOIRE DE NANTES AUX PONTS-DE-CE ET SES ANNEXES (FR5200622)
Statut	Site d'Importance Communautaire
Extrait de carte (source : © Francièmes® CLARITAS - Tous droits réservés)	
Superficie	16 522 ha
Caractéristiques pour <u>Alosa alosa</u>	Etape migratoire Site important pour cette espèce (taille et densité de la population de l'espèce présente sur le site par rapport aux populations présentes sur le territoire national = inférieur à 2%)
Source	http://natura2000.environnement.gouv.fr/sites/FR5200622.html

Appellation	ESTUAIRE DE LA LOIRE NORD (FR5202011)
Statut	Site d'Importance Communautaire
Extrait de carte (source : © Francièmes® CLARITAS - Tous droits réservés)	
Superficie	18 961 ha
Caractéristiques pour <u>Alosa alosa</u>	Etape migratoire Site très important pour cette espèce (taille et densité de la population de l'espèce présente sur le site par rapport aux populations présentes sur le territoire national = 2 à 15%)
Source	http://natura2000.environnement.gouv.fr/sites/FR5202011.html

Appellation	ESTUAIRE DE LA LOIRE SUD - BAIE DE BOURGNEUF (FR520212)
Statut	Site d'Importance Communautaire
Extrait de carte (source : © Francièmes® CLARITAS - Tous droits réservés)	
Superficie	49 441 ha
Caractéristiques pour <u>Alosa alosa</u>	Hivernage, étape migratoire Site remarquable pour cette espèce (taille et densité de la population de l'espèce présente sur le site par rapport aux populations présentes sur le territoire national = 15 à 100%)
Source	http://natura2000.environnement.gouv.fr/sites/FR5202012.html

Annexe 2

Tableau récapitulatif des données environnementales disponibles sur l'estuaire de la Loire et de leur producteur

Intitulé donnée	Notation (unité)	Lieu de mesure	Période	Résolution	Producteur
Débit de la Loire	Q (m ³ /s)	Montjean-sur-Loire (49)	01/03 au 03/07/2011	Moyenne journalière	DREAL PdL (service hydrométrie)
Coefficient de marée	Coef (sans unité)	Saint-Nazaire (44)	01/03 au 16/07/2011	Moyenne journalière	Port autonome de Nantes-Saint Nazaire
Température de la Loire	T (°C)	Donges, Paimbœuf, Cordemais, Le Pellerin, Trentemoult, Bellevue (44)	01/03 au 20/06/2011 (Cordemais)	Moyenne horaire	GIP Loire Estuaire
Oxygène dissous	O ₂ (mg/l)				
Matières En Suspension	MES (g/l)				
Salinité	Sal (sans unité)				
Hauteur d'eau	H _{eau} (m)	Ancenis, Nantes	01/03 au 27/06/2011	Moyenne horaire	DDT M et L (Service de Prévention des Crues)

Les capteurs de certaines stations possèdent des seuils de saturation au-delà desquels la valeur précise du paramètre ne peut pas être déterminée :

- Le capteur de salinité de Cordemais (déterminée grâce à la conductivité) sature à partir de 15,2.
- Le capteur de MES (déterminé grâce à la turbidité) de Donges, Paimbœuf, Cordemais, Le Pellerin et Trentemoult saturent à partir de 5,6 g/l.

Annexe 3

Caractéristiques techniques des émetteurs hydroacoustiques implantés (THELMA BIOTEL, 2010)

Photographies		
	MP 9 – LONG (2 modèles)	MP 13
Longueur (mm)	28	31
Diamètre (mm)	9	13
Puissance de sortie (dB à 1m)	147	153
Poids dans l'air (g)	5,2	11,4
Poids dans l'eau (g)	3,3	7,3
Délai minimal (s)	10	10
Délai maximal (s)	30	30
Autonomie estimée (j)	267	396
Autonomie garantie (j)	159	237
Nombre de pulse codant	7	7

Annexe 4

Caractéristiques techniques des récepteurs hydroacoustiques (hydrophones) (VEMCO, 2010)

Photographie	
	VR2W
Longueur (mm)	308
Diamètre (mm)	73
Fréquence de réception (kHz)	69
Autonomie (mois)	15
Mémoire (mo)	8
Système de téléchargement	Bluetooth

Annexe 5

Caractéristiques des engins de capture (filets tramail) employés sur les grandes Aloses

Identifiant engin	Longueur	Hauteur (chute)	Flou	Armaille	Effectif capturé	Date d'emploi
FTD 1	160 m	8 m	60 mm	200 mm	3	11/05/2011
FTD 2	200 m	4 m	60 mm	200 mm	26	28 et 29/04/2011
FTD 3	320 m	4 m	60 mm	200 mm	26	11 et 12/05/2011 et 08/06/2011
FTD 4	350 m	4 m	30 mm	200 mm	1	19/05/2011
Filet tramail non identifié					2	19/05/2011

Annexe 6

Détails des résultats d'ACP sur les variables environnementales

Matrice de corrélation (coefficient de corrélation de Pearson)

	Débit moyen journalier de la Loire	Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	Salinité (-)	MES (g/l)	Oxygène dissous (mg/l)	Température (°C)
Débit moyen journalier de la Loire	1	0,025	-0,076	0,152	-0,192	-0,262
Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	0,025	1	-0,045	0,314	-0,458	-0,194
Salinité (-)	-0,076	-0,045	1	-0,538	0,434	-0,414
MES (g/l)	0,152	0,314	-0,538	1	-0,463	0,120
Oxygène dissous (mg/l)	-0,192	-0,458	0,434	-0,463	1	-0,361
Température (°C)	-0,262	-0,194	-0,414	0,120	-0,361	1

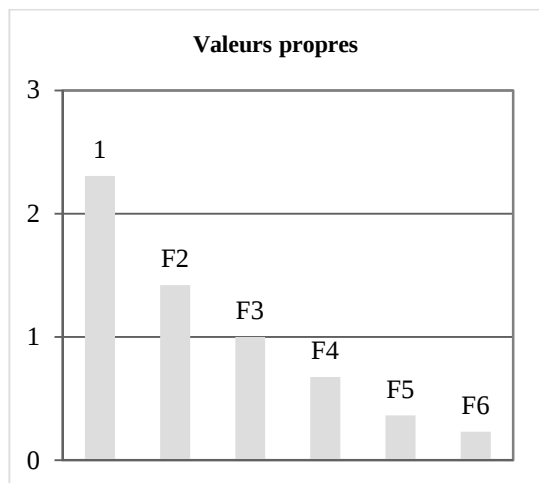
En **gras** : valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral)

En **grisé** : valeurs redondantes ou inutiles

Valeurs propres et axes retenus

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propre	2,306	1,422	1,000	0,677	0,364	0,231
% variance	38,439	23,697	16,666	11,280	6,065	3,852
% cumulé	38,439	62,137	78,803	90,083	96,148	100,000

Axes retenus : F1 et F2



Vecteurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Débit moyen journalier de la Loire	-0,117	-0,481	0,730	-0,354	0,007	0,312
Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	-0,292	-0,497	-0,611	-0,076	-0,257	0,472
Salinité (-)	0,503	-0,248	-0,267	-0,333	0,709	0,036
MES (g/l)	-0,512	-0,134	0,075	0,578	0,613	0,067
Oxygène dissous (mg/l)	0,549	0,086	0,129	0,521	-0,098	0,628
Température (°C)	-0,291	0,659	-0,030	-0,391	0,215	0,529

Coordonnées des variables

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Débit moyen journalier de la Loire	-0,177	-0,574	0,729	-0,291	0,005	0,150
Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	-0,443	-0,592	-0,611	-0,062	-0,155	0,227
Salinité (-)	0,763	-0,296	-0,267	-0,274	0,427	0,017
MES (g/l)	-0,778	-0,159	0,075	0,475	0,370	0,032
Oxygène dissous (mg/l)	0,833	0,102	0,129	0,429	-0,059	0,302
Température (°C)	-0,442	0,786	-0,030	-0,322	0,130	0,254

Cosinus carrés des variables

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Débit moyen journalier de la Loire	0,032	0,329	0,532	0,085	0,000	0,023
Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	0,196	0,351	0,373	0,004	0,024	0,052
Salinité (-)	0,583	0,088	0,071	0,075	0,183	0,000
MES (g/l)	0,605	0,025	0,006	0,226	0,137	0,001
Oxygène dissous (mg/l)	0,695	0,011	0,017	0,184	0,003	0,091
Température (°C)	0,196	0,618	0,001	0,104	0,017	0,065

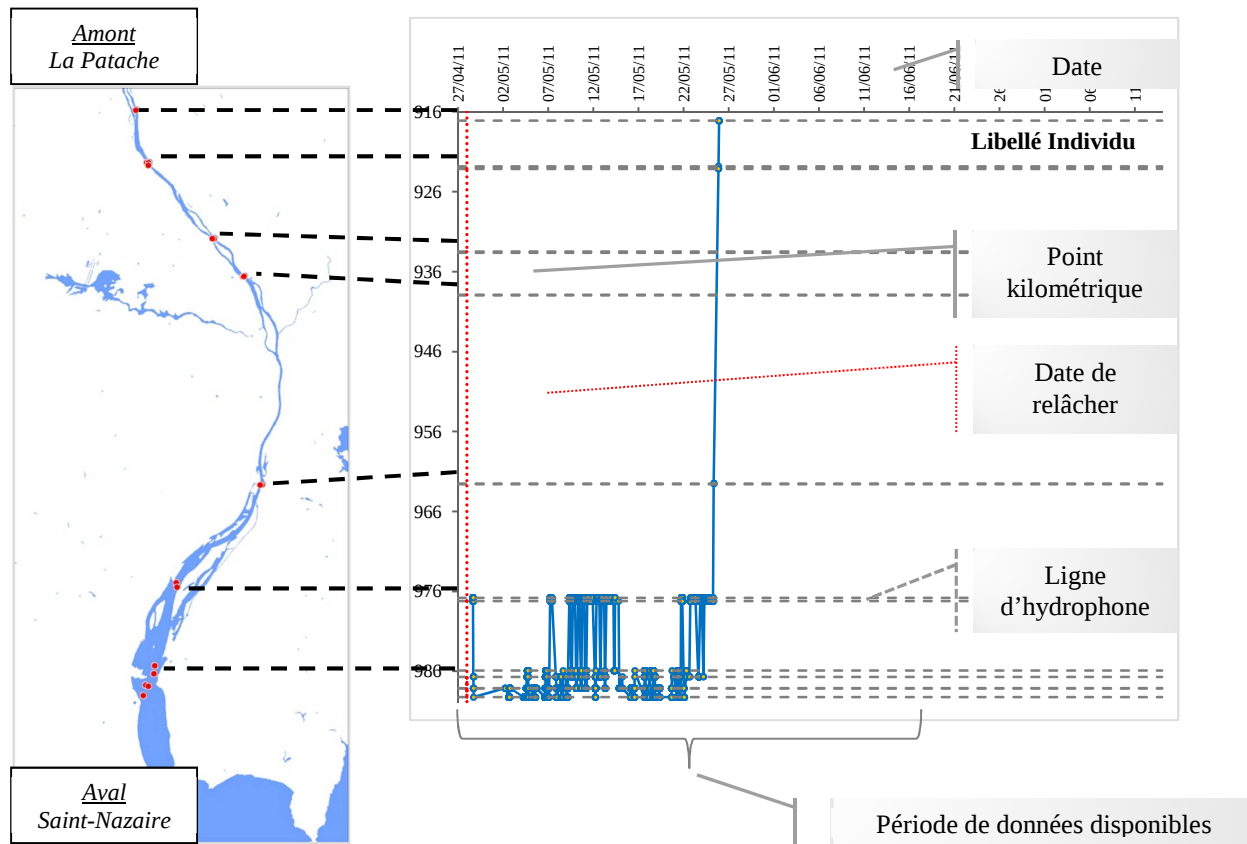
Contribution des variables (en %)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Débit moyen journalier de la Loire	1,366	23,150	53,218	12,500	0,006	9,760
Coefficient moyen de marée à Saint-Nazaire	8,513	24,690	37,310	0,577	6,619	22,291
Salinité (-)	25,274	6,162	7,145	11,085	50,203	0,131
MES (g/l)	26,241	1,789	0,562	33,388	37,577	0,443
Oxygène dissous (mg/l)	30,117	0,739	1,673	27,139	0,954	39,378
Température (°C)	8,489	43,470	0,092	15,311	4,642	27,997

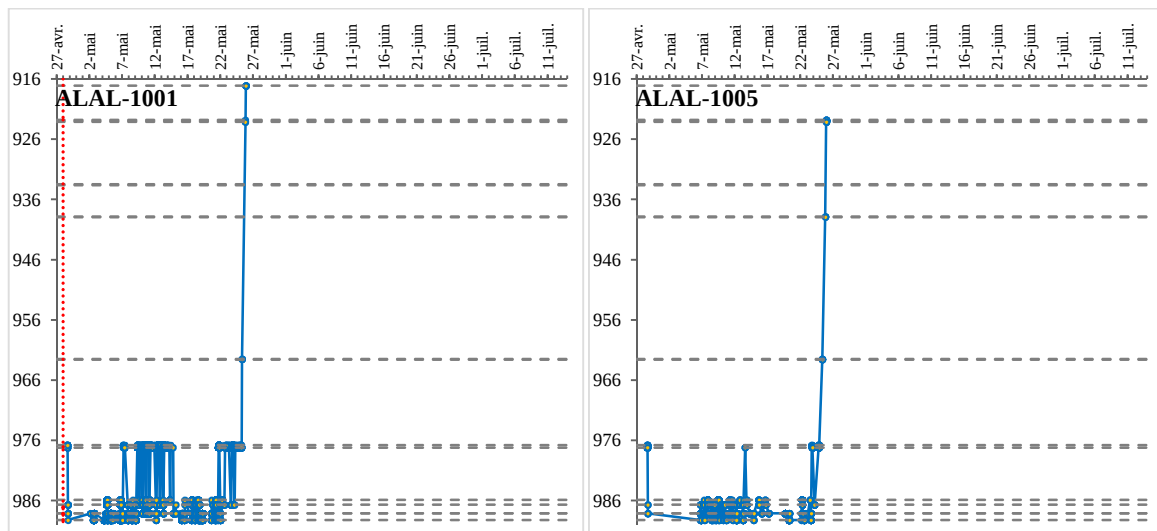
Annexe 7

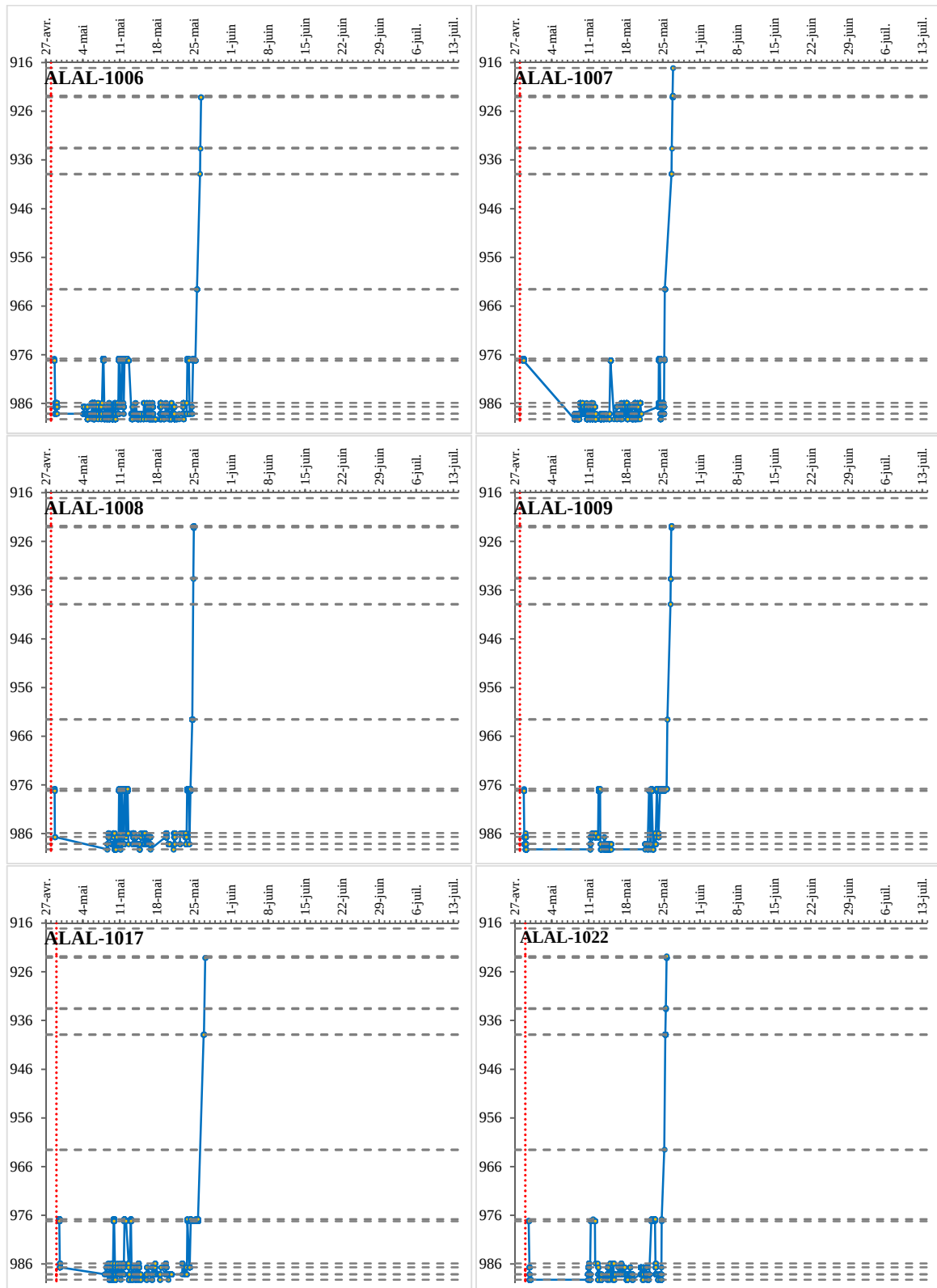
Graphiques de migration des Aloses marquées

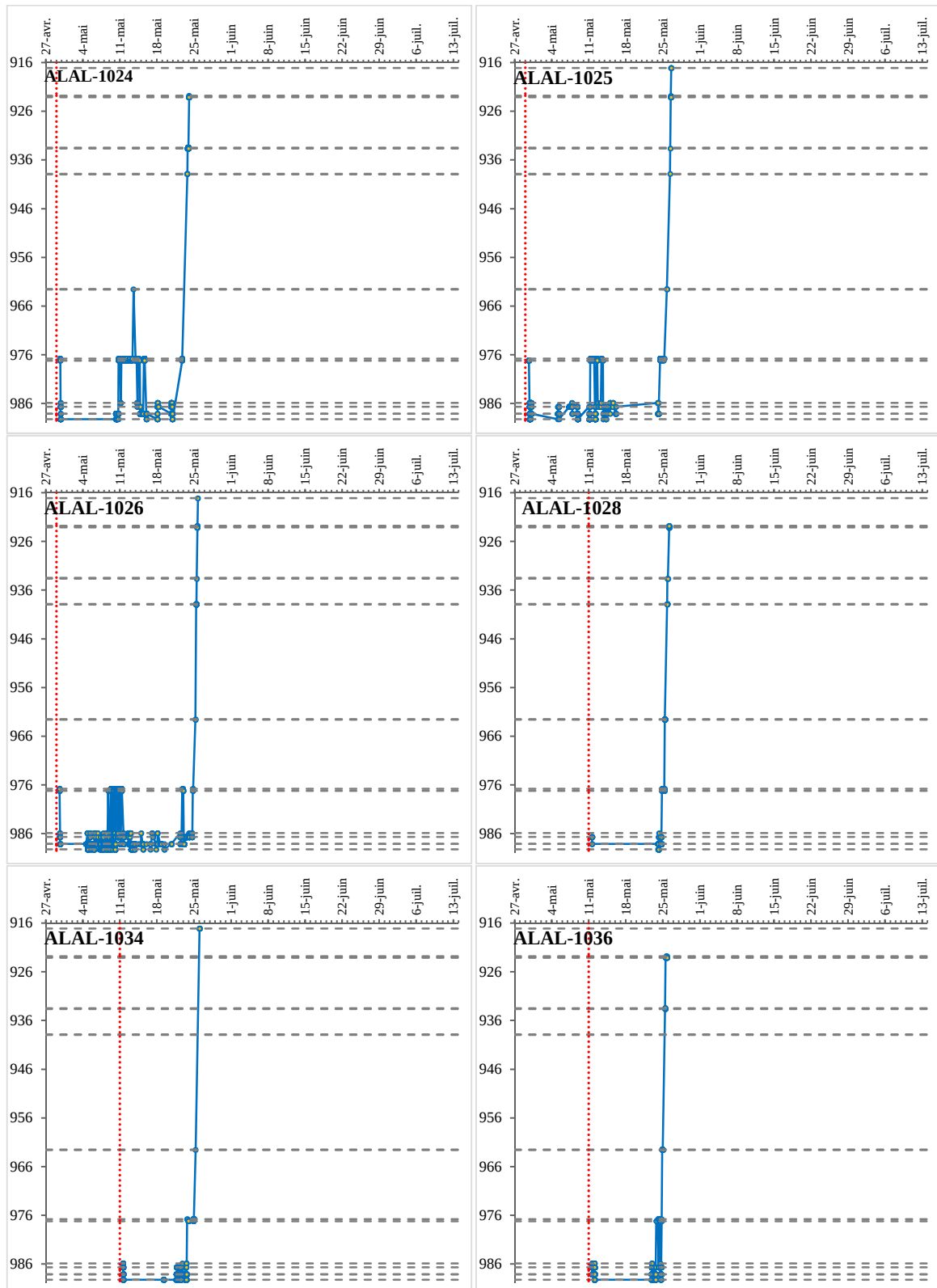
Légende

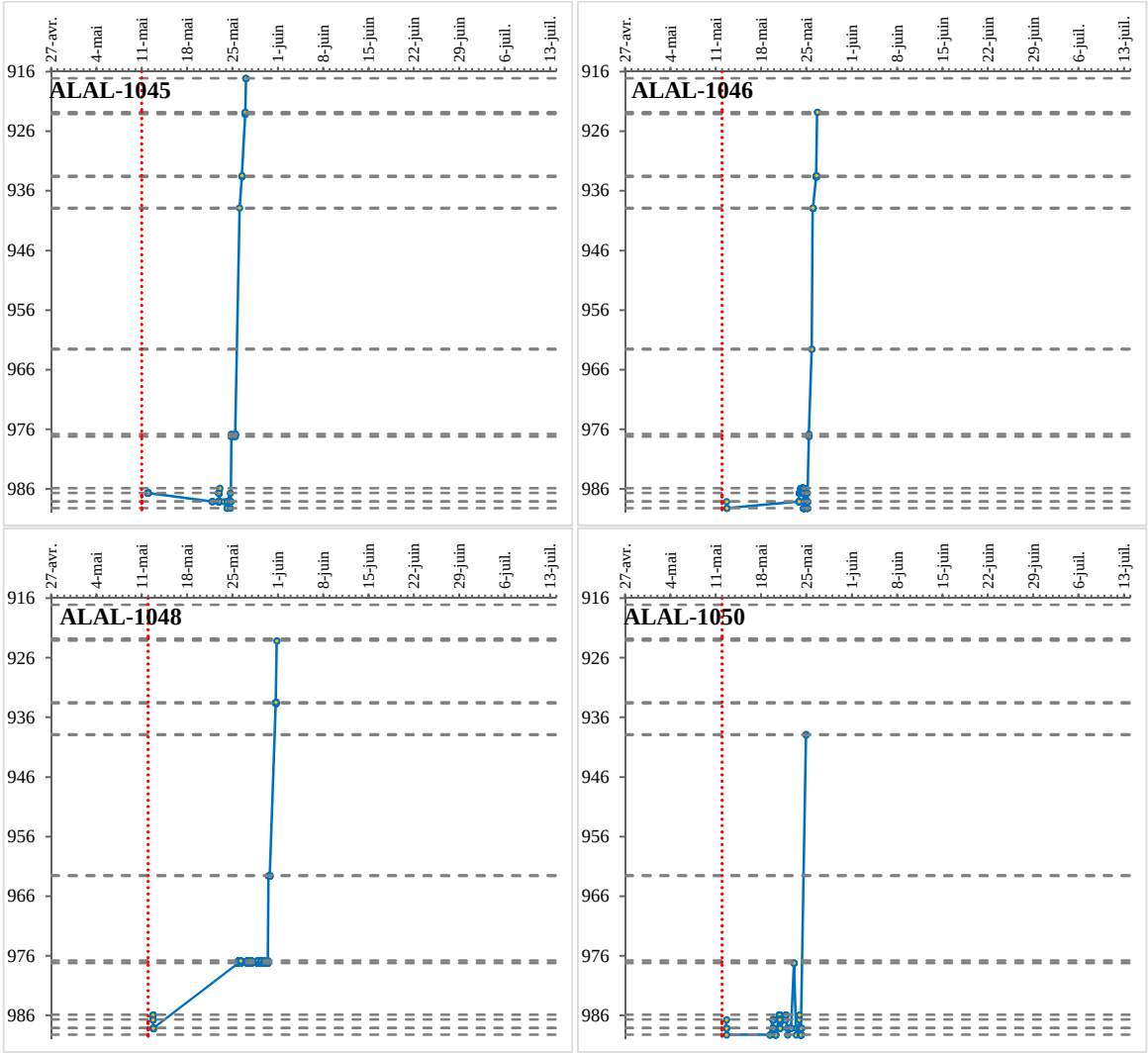


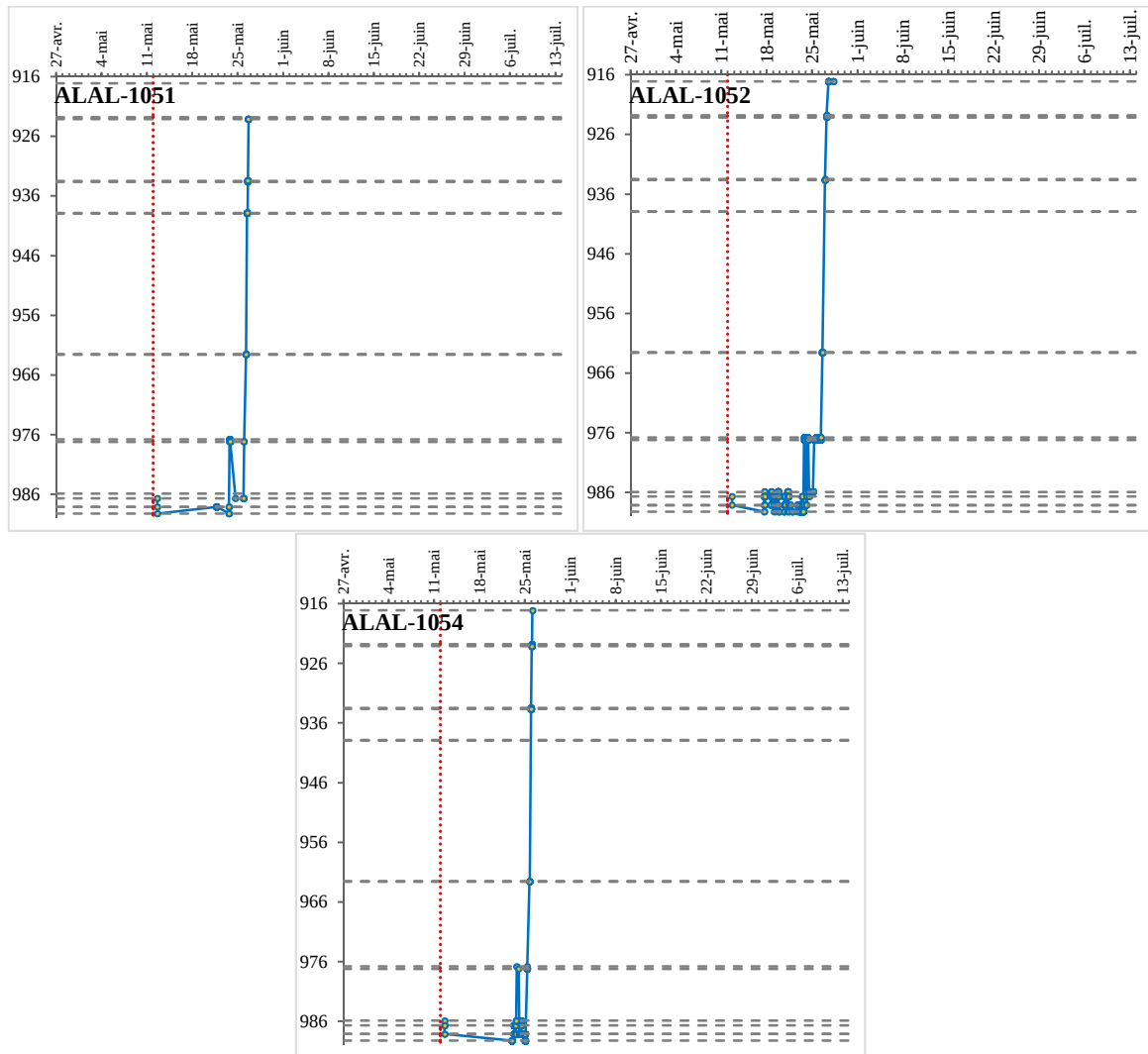
Patron A



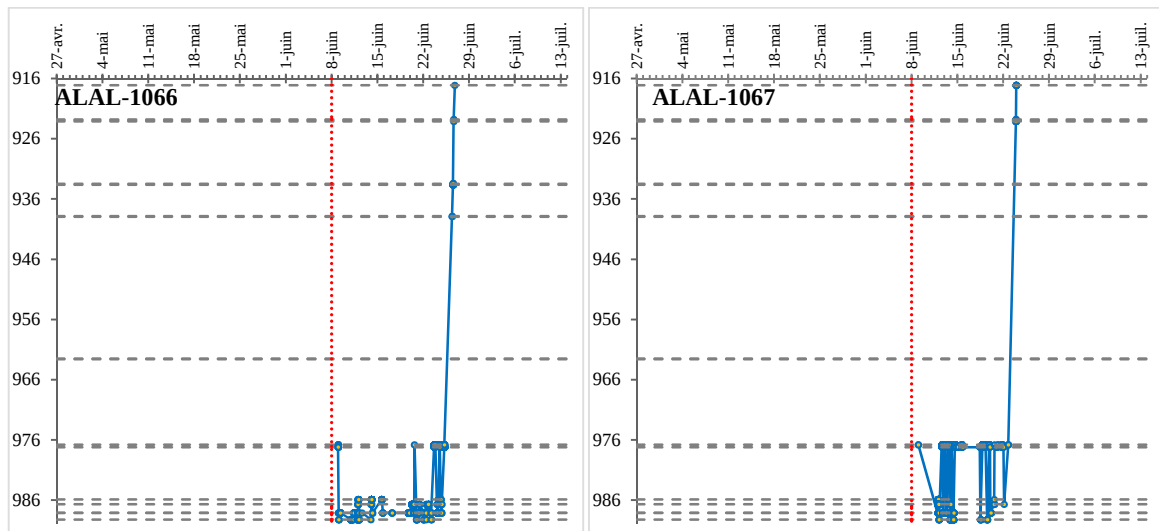




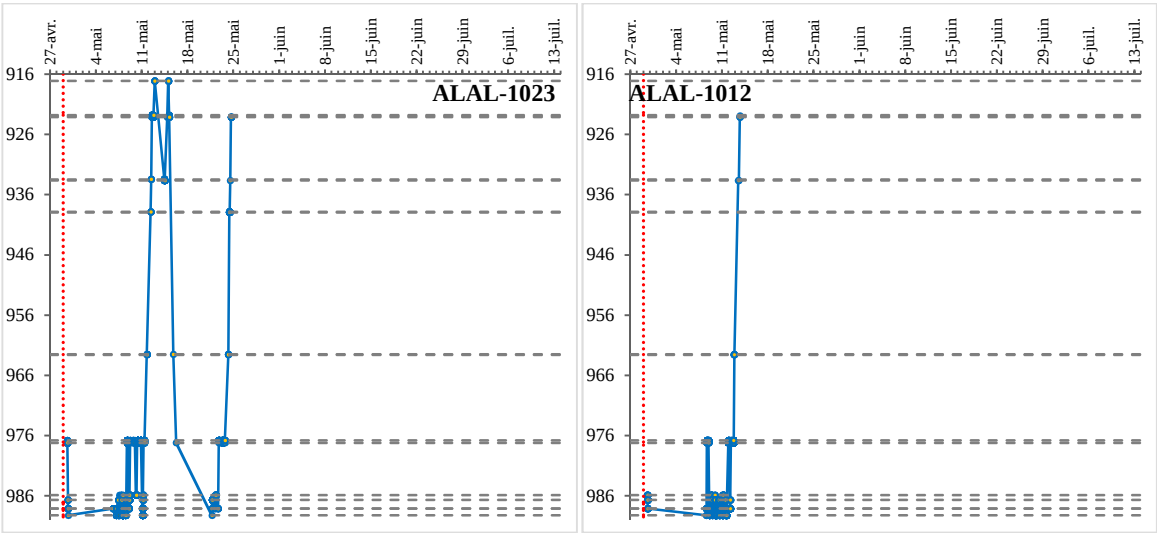




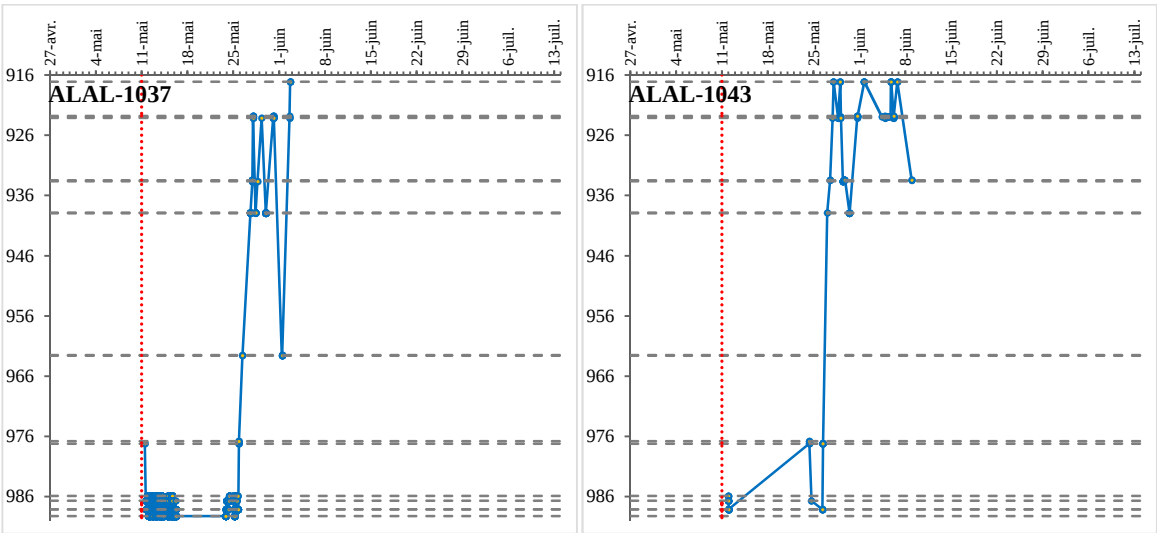
Patron B



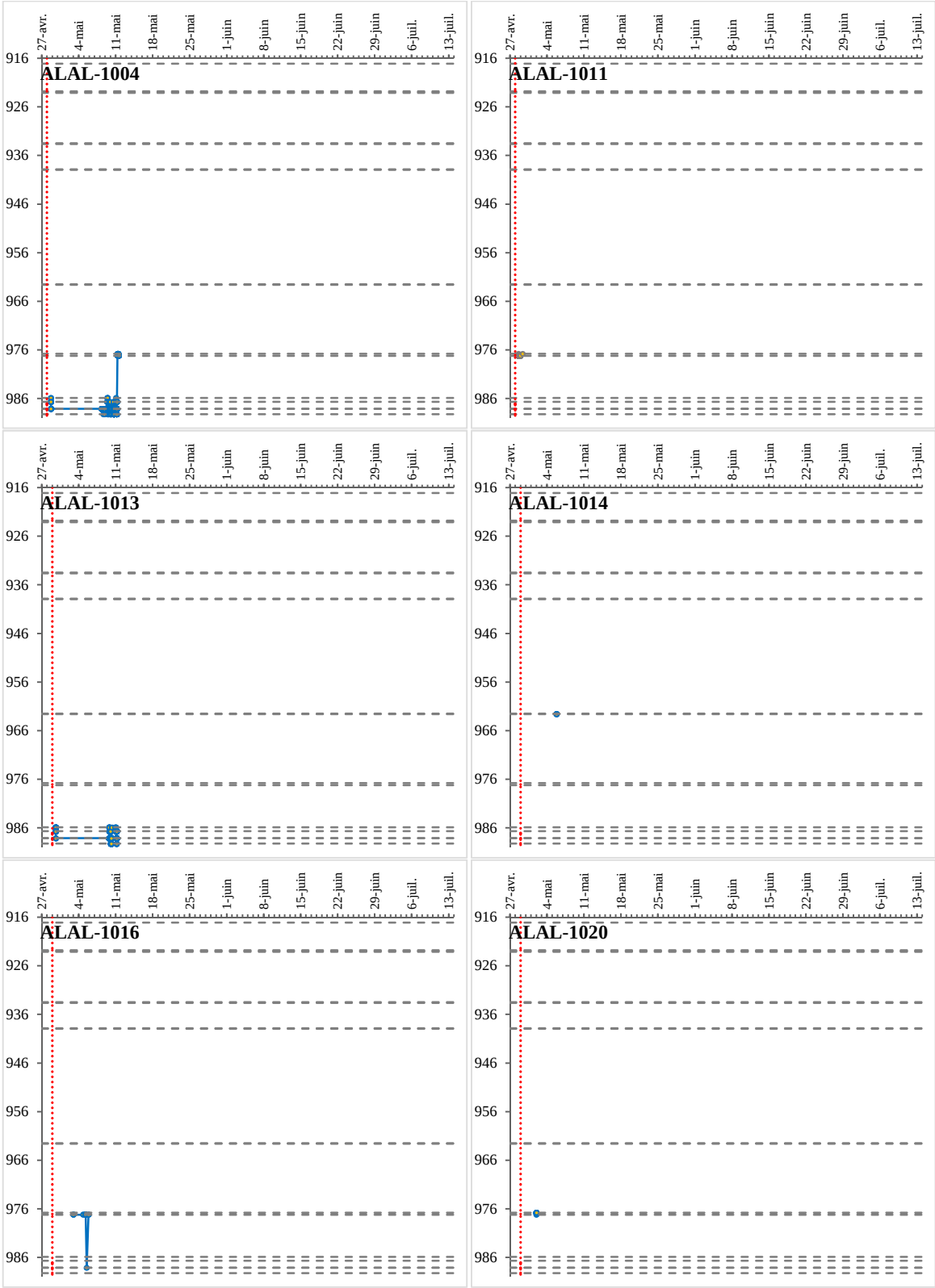
Patron C

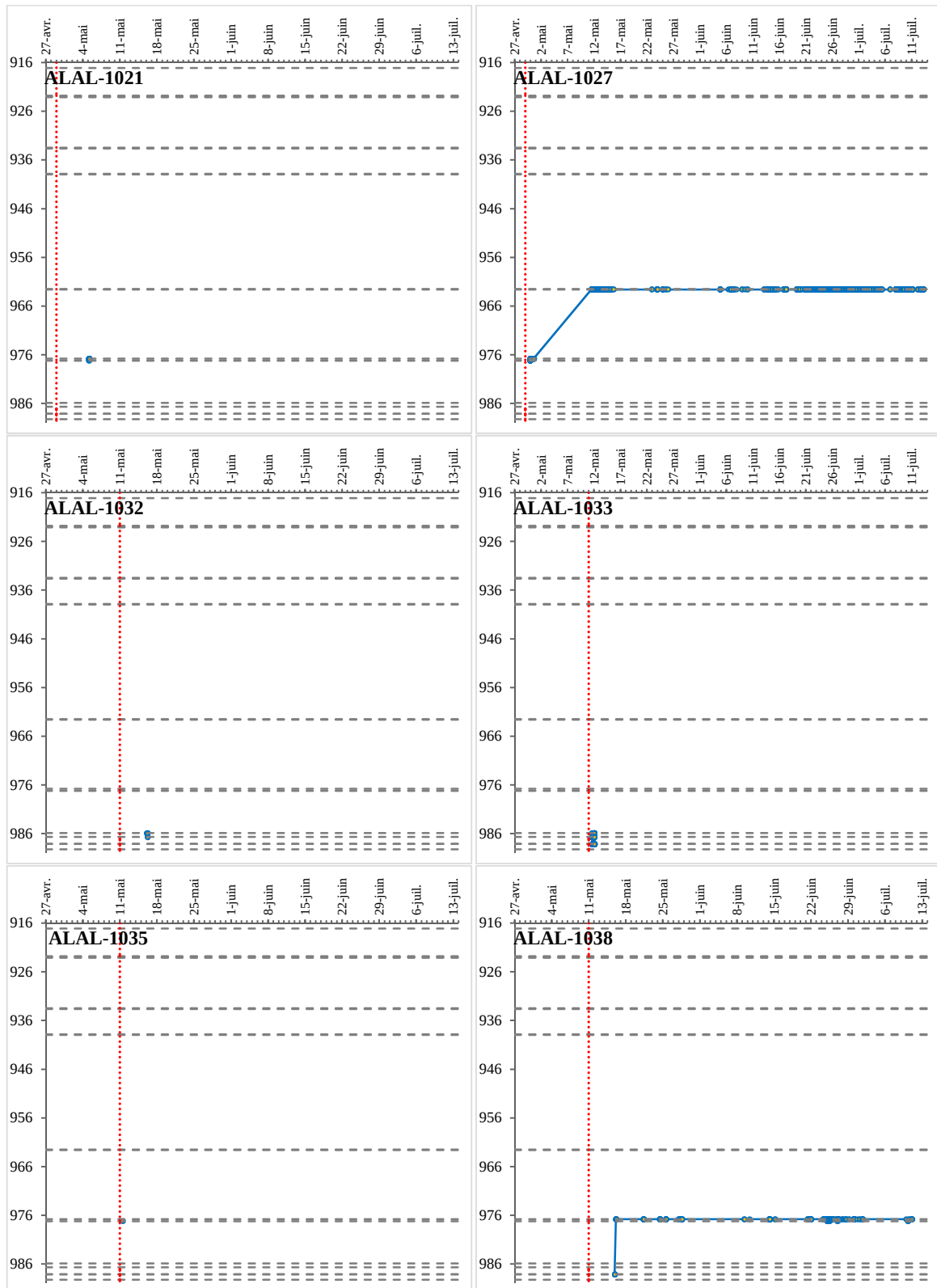


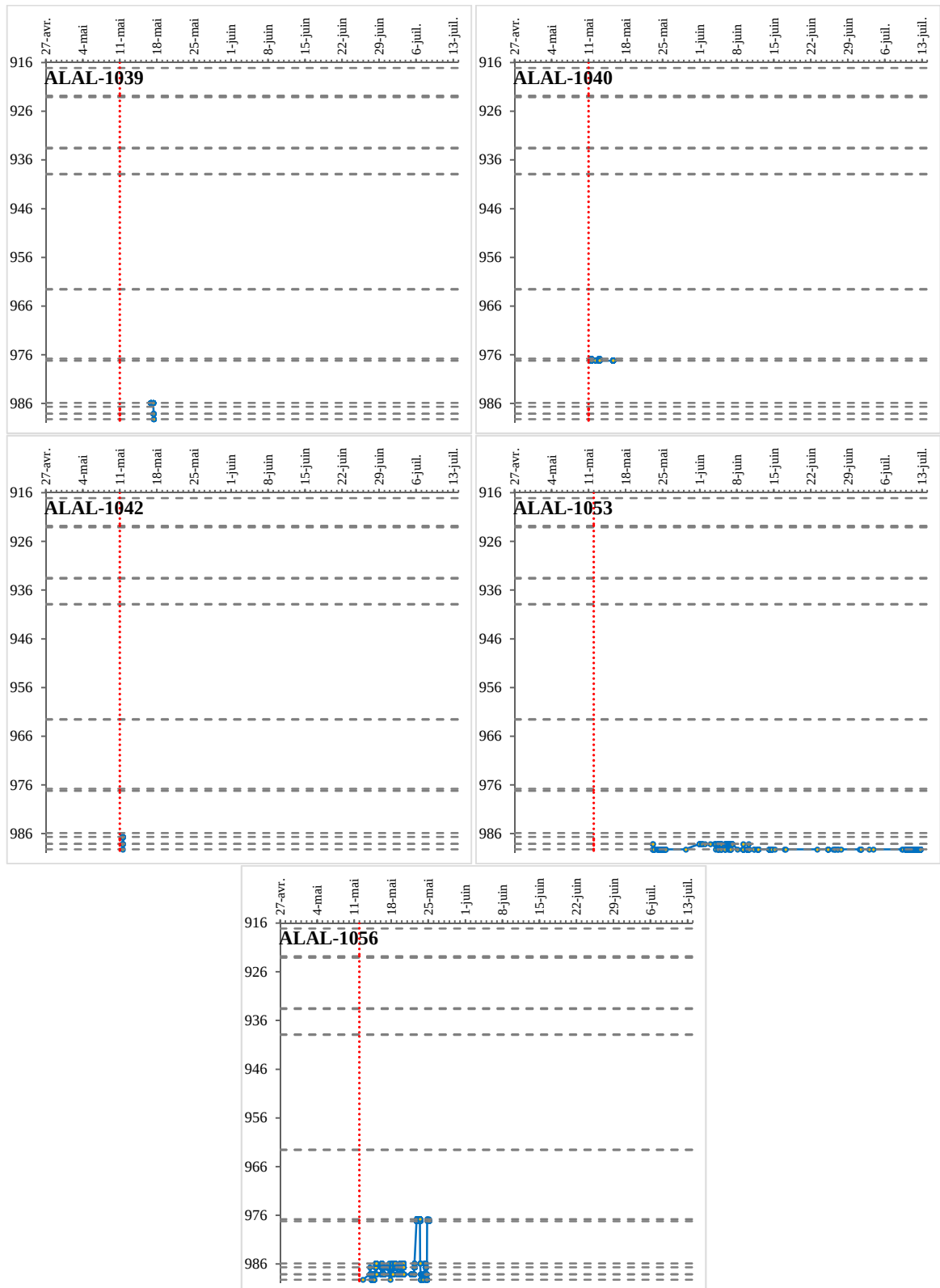
Patron D



Patron E

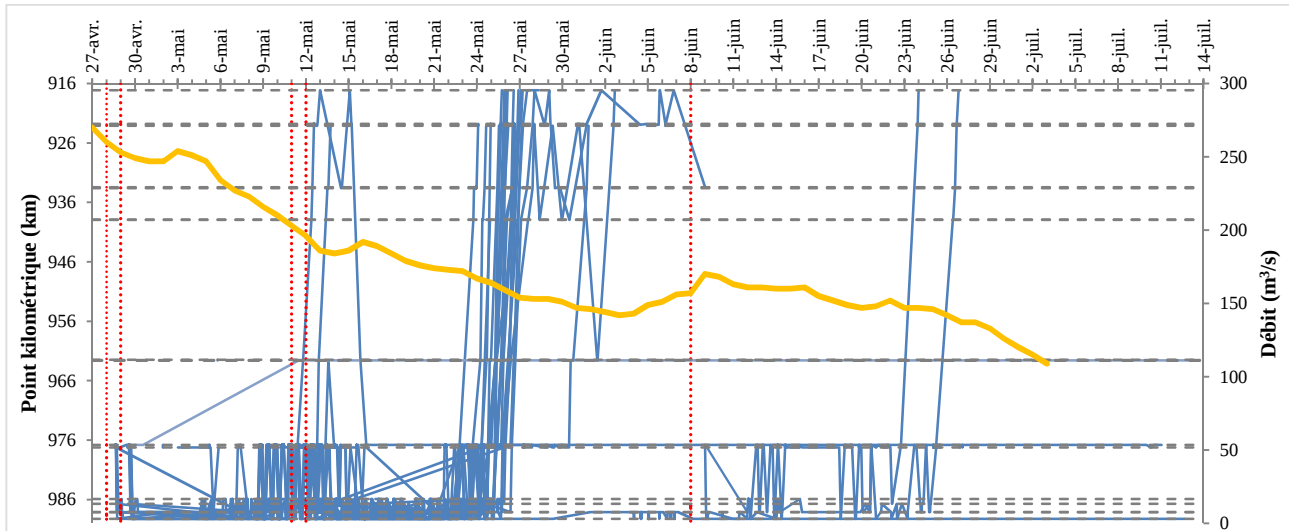




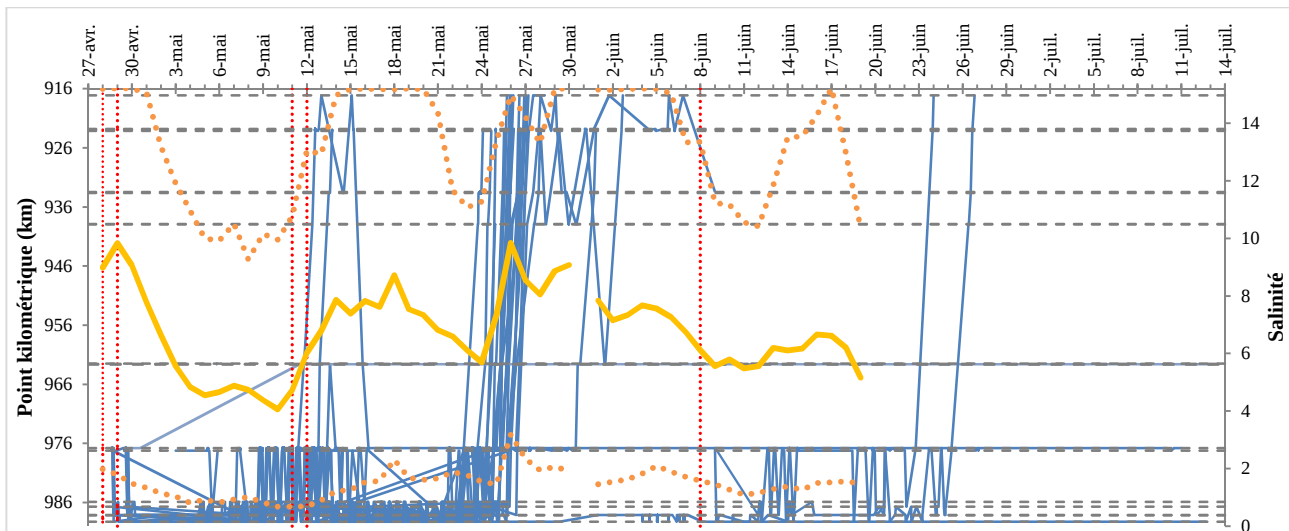


Annexe 8

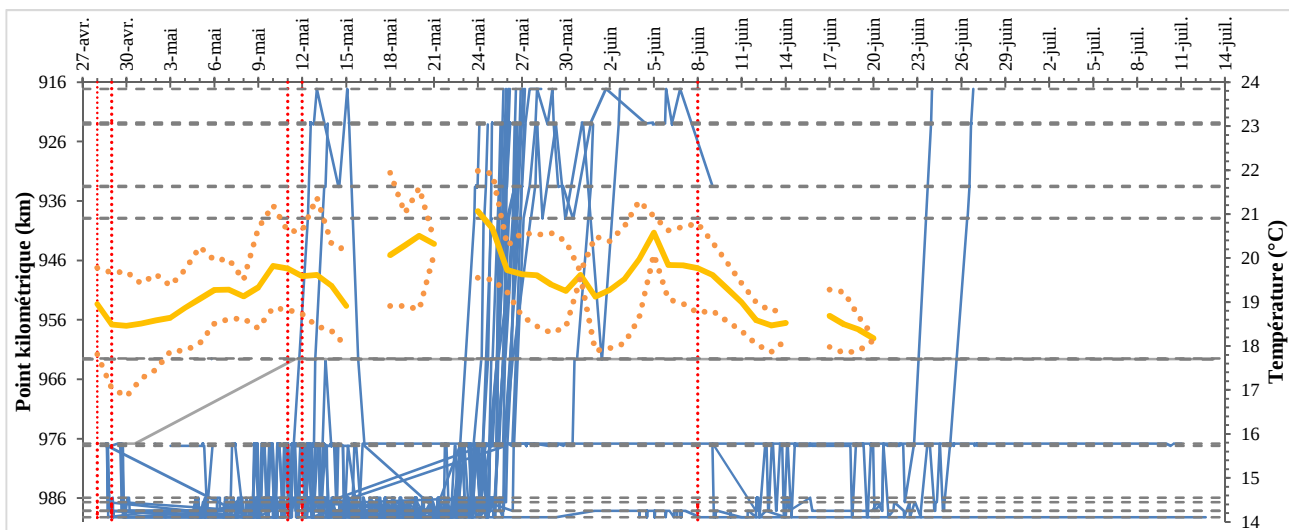
Graphes de patrons de migration et de variables environnementales



Débit moyen journalier de la Loire à Montjean-sur-Loire et patrons de migration



Moyenne et étendue journalière de salinité à Cordemais et patrons de migration



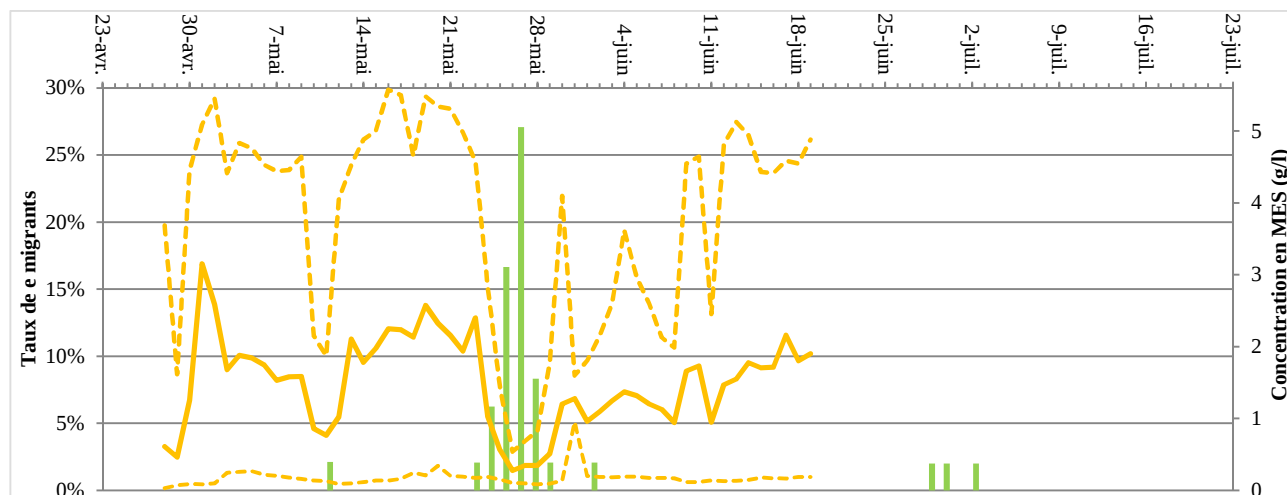
Moyenne et étendue journalière de température à Cordemais et patrons de migration

Annexe 9

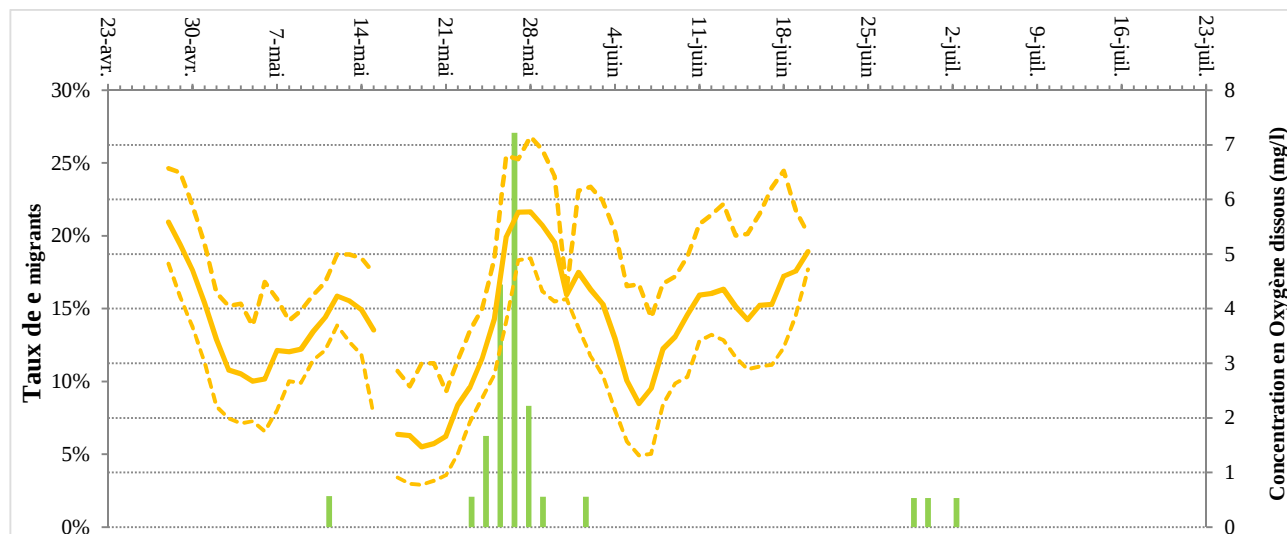
Graphes de taux de migrants (continue **verte**) et de variables environnementales en moyenne journalière (continue **orange**) et étendue journalière (pointillée **orange**)

Coefficient de marée : : traité dans le corps du rapport

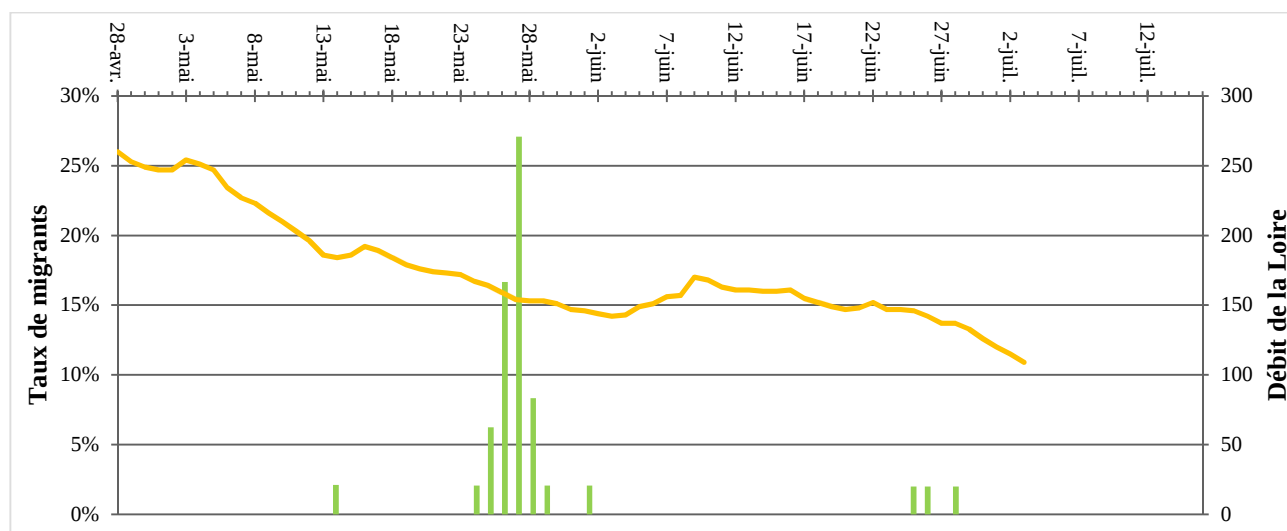
Matières en suspension



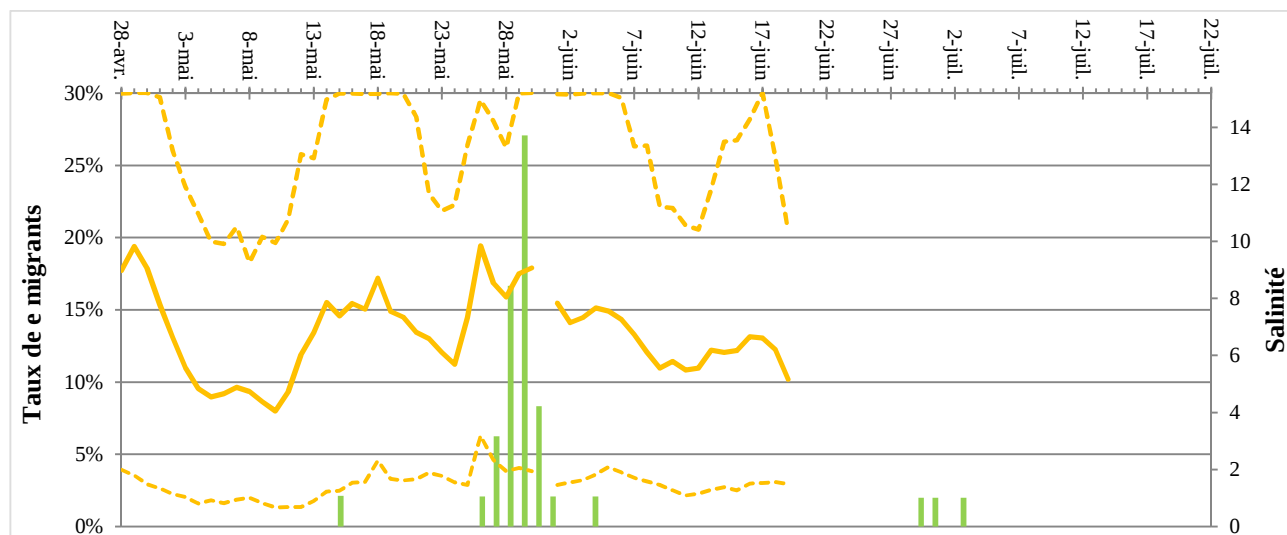
Oxygène dissous



Débit de la Loire



Salinité



Température

