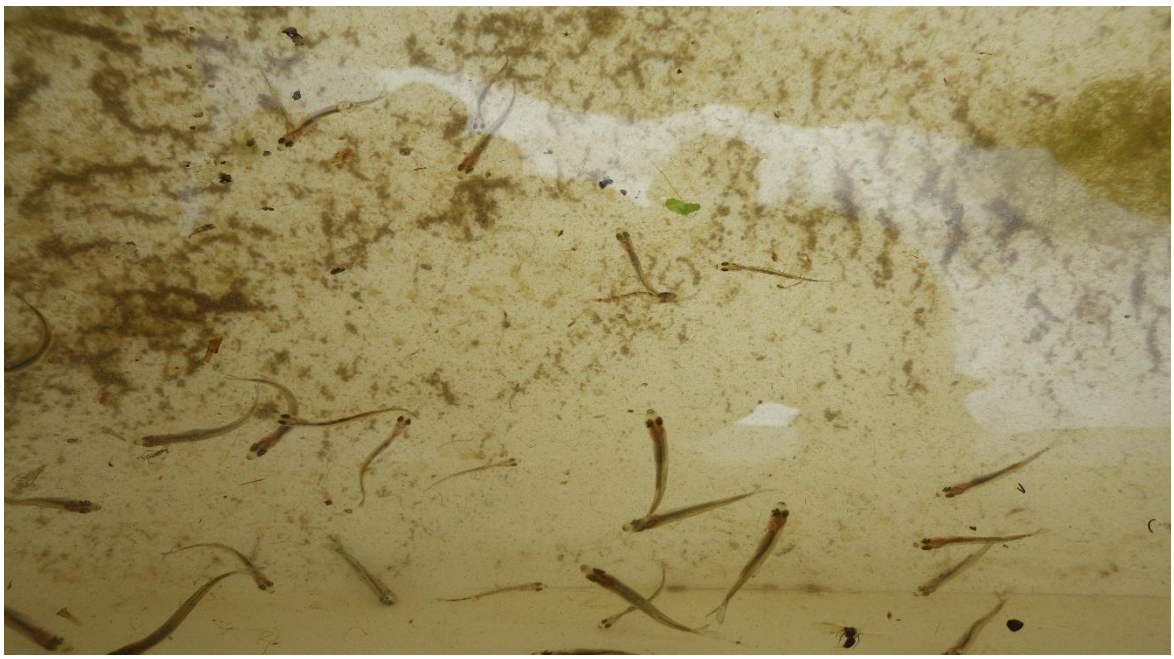
Distribution en mer de la Grande alose et de l'Alose feinte

Apport de la modélisation empirique de niche écologique



Dominante d'approfondissement
Gestion des Milieux Naturels

Présenté par : Chloé DAMBRINE

Stage effectué du : 01/03/17 au 31/08/17

À : Irstea – Centre de Bordeaux, UR EABX, équipe PMA, 50 Avenue de Verdun, 33612 Cestas

Et à : Station de biologie marine de Dinard (C.R.E.S.C.O), 38 Rue du Port Blanc, 35800 Dinard

Maîtres de stage : Géraldine LASSALLE (Irstea) et Thomas TRANCART (MNHN)

Année 2016/2017

Enseignant référent : Christian PIEDALLU

Soutenu le : 14/09/2017

Larves (1 mois) de Grande alose produites à la pisciculture de Bruch (FDPPMA47/MIGADO) puis mises en croissance dans des rivières artificielles à la station d'expérimentation Irstea de Saint-Seurin-sur-l'Isle

Source : Chloé DAMBRINE

ENSAIA, AgroParisTech, Irstea, MNHN

Distribution en mer de la Grande alose et de l'Alose feinte

Apport de la modélisation empirique de niche écologique

Dominante d'approfondissement
Gestion des Milieux Naturels

Présenté par : Chloé DAMBRINE

Stage effectué du : 01/03/17 au 31/08/17

À : Irstea – Centre de Bordeaux, UR EABX, équipe PMA, 50 Avenue de Verdun, 33612 Cestas

Et à : Station de biologie marine de Dinard (C.R.E.S.C.O), 38 Rue du Port Blanc, 35800 Dinard

Maîtres de stage : Géraldine LASSALLE (Irstea) et Thomas TRANCART (MNHN)

Enseignant référent : Christian PIEDALLU

Soutenu le : 14/09/2017

Année 2016/2017

Résumés :

Les deux espèces d'aloses, la Grande alose (*Alosa alosa* Linnæus, 1758) et l'Alose feinte (*Alosa fallax* Lacépède, 1803), qui fréquentent la façade atlantique française sont des espèces en déclin faisant l'objet de mesures coordonnées pour enrayer ce constat. Dans ce contexte, un programme partenarial de recherche « SHAD'EAU » a été mis en place sur les populations d'aloses du Grand Sud-Ouest afin d'identifier les causes de leur raréfaction et d'aider les gestionnaires dans leurs actions de protection. Ce stage s'inscrit dans le volet « mer » de ce programme et a pour but d'enrichir les connaissances sur les habitats qu'occuperaient les aloses durant ce séjour en mer long mais pourtant peu étudié. Grâce à un travail de modélisation approfondi reposant sur les modèles empiriques de niche écologique, ce stage a cartographié les habitats favorables actuels mais aussi dans le contexte du changement climatique futur, pour les aloses, sur la zone Manche-Golfe de Gascogne. Ces habitats, variant saisonnièrement, seraient essentiellement côtiers de mars à aout et localisés plus loin sur le plateau continental à l'automne. Comme attendu, l'Alose feinte semble plus septentrionale ; les habitats favorables à la Grande alose en Manche étant fortement représentés uniquement lors de conditions climatiques particulièrement douces. D'une manière générale, les aloses semblent préférer la partie interne du plateau continental, les habitats à substrats fins (sableux à vaso-sableux) et répondraient positivement à la température. Pour la salinité, la concentration en chlorophylle *a* et la turbidité, les courbes de réponse varieraient plus en fonction du moment de l'année. Le changement climatique testé sous la forme d'un scénario altérant la température, la salinité et la production primaire n'aurait pas d'effet délétère sur les habitats des aloses en mer. En termes de gestion, les habitats identifiés se superposent de manière satisfaisante au réseau d'Aires Marines Protégées.

The two shad species, Allis shad (*Alosa alosa* Linnaeus, 1758) and Twaite shad (*Alosa fallax* Lacépède, 1803), encountered along the French Atlantic shores, are declining but benefit from coordinated conservation measures to stop this decreasing trend. In this context, a joint research program « SHAD'EAU » has been set up for studying shad populations of south-western France to identify the causes of their rarefaction and help environmental managers in their protection actions. This internship belongs to the « marine part » of this program and aims to gain understanding on the marine habitats occupied by this two shad species during their long but under-studied stay at sea. This work relied on a modelling approach based on empirical species distribution models. We mapped the current favorable habitats for these two species, from the English Channel to the south of the Bay of Biscay, but also their potential habitats under future climate change. These habitats, varying seasonally, would be mainly coastal from March to August, and located farther on the continental shelf during autumn. As expected, Twaite shad seemed to be a more northern species; favorable habitats for Allis shad in the English Channel were strongly represented only during particularly warm climate conditions. In general, shads seemed to prefer the internal part of the continental shelf, habitats with fine substrates (sandy to silty-sandy) and would reply positively to a temperature increase. For salinity, chlorophyll *a* concentration and turbidity, response curves exhibited more variations during the year. Climate change tested as a scenario in which temperature, salinity and primary production were altered would not have a deleterious impact on shads' habitats in ocean. In terms of management, habitats identified as favorable by this modeling study overlapped satisfactorily with the network of French marine protected areas.

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Engagement de non plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris a autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux :
  - Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive.
  - Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

❸ Sanction : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

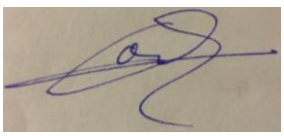
❹ Engagement :

Je soussigné (e) DAMBRINE Chloé

Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Amiens le 27/09/2017

Signature :



Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie ma tutrice de stage Madame Lassalle Géraldine qui a su me consacrer beaucoup de son temps et m'apporter toute l'aide dont j'avais besoin pour concevoir ce travail. Je la remercie également pour la confiance et la sympathie qu'elle m'a témoignées durant ces six mois de stage.

Merci également à mon co-tuteur de stage Monsieur Trancart Thomas qui m'a encadré pendant mon premier mois de stage et qui a réussi à me redonner confiance lorsque j'en avais besoin.

Je remercie aussi Monsieur Paquignon Guillaume pour sa collaboration, tant pour ses conseils pertinents que pour le temps qu'il m'a accordé.

Merci également à Messieurs Nàchon-Garcia David et Lambert Patrick pour leur gentillesse et leur analyse perspicace de mes résultats.

Merci aussi à Madame Acolas Marie-Laure qui m'a emmené à plusieurs reprises sur le terrain et qui m'a permis d'enrichir ce stage.

Merci au personnel de la Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture (DPMA) et de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer), ainsi qu'aux pêcheurs professionnels maritimes et aux observateurs embarqués, à Monsieur Huret Martin, Monsieur Saulnier Erwan et Madame Brind'Amour Anik pour la fourniture des données.

Merci à Messieurs Piedallu Christian et Adam Gilles d'accepter de faire partie de ce jury et de prendre le temps d'évaluer mon travail.

Enfin, merci à ma mère pour sa relecture attentive et à l'ensemble de ma famille pour leur soutien indéfectible dans tout ce que j'entreprends.

Table des matières

REMERCIEMENTS 1

1. INTRODUCTION 7

2. LA ZONE D'ETUDE ET LES DEUX ESPECES D'INTERET 9

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 9
2.2 PRESENTATION DES DEUX ESPECES D'INTERET 10
2.2.1 LA GRANDE ALOSE 10
2.2.2 L'ALOSE FEINTE 12

3. DISTRIBUTION SPATIALE ACTUELLE MODELISEE DES ALOSES 14

3.1 MATERIEL ET METHODES 14
3.1.1 COLLECTION ET TRAITEMENT DES DONNEES PHYSIQUES, BIOGEOCHIMIQUES ET BIOLOGIQUES 14
3.1.1.1 Création de la base de données biologiques à partir des campagnes Obsmer (présences/absences d'aloses sur la période 2003-2016) 14
3.1.1.2 Création de la base de données physiques et biogéochimiques 15
3.1.1.3 Rastérisation et mensualisation des données brutes 17
3.1.2 CONSTRUCTION DES MODELES DE DISTRIBUTION ACTUELLE DES DEUX ESPECES 18
3.1.2.2 Principe général des modèles statistiques et présentation des Modèles Linéaires Généralisés 18
3.1.2.2 Choix du meilleur modèle sur la base de l'AIC, de l'AUC et du rang de la déviance expliquée - Réalisation d'une validation pseudo-indépendante multiple 19
3.1.2.3 Prédictions sur la grille de 20 × 20 km et précautions d'utilisation 20
3.1.3 VALIDATION DU MODELE PAR UN JEU DE DONNEES INDEPENDANT ALLANT DES ANNEES 80 A NOS JOURS 21
3.2 RESULTATS 22
3.2.1 LES MEILLEURS MODELES PAR PERIODE ET PAR ESPECE 22
3.2.2 LA VALIDATION PAR LE JEU DE DONNEES INDEPENDANT 24
3.2.3 LES CARTES DE PREDICTION 24
3.3 DISCUSSION 26

4. PROJECTION DE LA DISTRIBUTION DES ALOSES DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 28

4.1 MATERIEL ET METHODES 28
4.1.1 DESCRIPTION DES CHANGEMENTS ATTENDUS 28
4.1.3 EXTRAPOLATION DU MODELE 29
4.1.4 PROJECTION DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REALISATION DES CARTES 30
4.2 RESULTATS 30
4.3 DISCUSSION 31

5. UTILISATION DES RESULTATS A DES FINS DE CONSERVATION 32

5.1 MATERIEL ET METHODES 32
5.2 RESULTATS 32
5.3 DISCUSSION 34

6. CONCLUSION 35

BIBLIOGRAPHIE 37

LISTE DES CONTACTS 42

ANNEXES 44

ANNEXE 1 : CHAMPS DES 4 TABLES OBSMER POUR LES TRAITS POSITIFS, I.E. TRAITS AYANT ABOUTI A LA CAPTURE ACCIDENTELLE D'ALOSES 45

ANNEXE 2 : CARTES DES PRESENCES D'ALOSES DANS LA BASE OBSMER (PERIODE 2003-2016). LA TAILLE DES POINTS EST DEPENDANTE DU NOMBRE D'ALOSES MESUREES LORS DE L'OPERATION DE PECHE 47

ANNEXE 3 : REGROUPEMENT EN 13 CLASSES DES DONNEES D'HABITATS (CLASSIFICATION EUNIS) PUIS EN 7 ET 4 CLASSES (I.E. ROCK, *SAND*, MUD, SEDIMENTS). LES DEUX DERNIERS REGROUPEMENTS (I.E. 4 ET 7 MODALITES) CORRESPONDENT AUX VARIABLES TESTEES LORS DE LA CONSTRUCTION DES MODELES 48

ANNEXE 4 : COURBES DE REPONSE POUR LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES RETENUES DANS LES MODELES FINAUX 2006-2016 ET 2012-2016, ET POUR LES DEUX ESPECES. POUR LA VARIABLE « HABITAT », PLUS LE BOXPLOT EST LARGE, PLUS LA VARIABILITE DE L'EFFET DE L'HABITAT EN FONCTION DU MOIS EST FORTE. L'EFFET MEDIAN ETANT REPRESENTE PAR LE TRAIT NOIR. LA CORRESPONDANCE DES MODALITES EST DONNEE EN TABLEAU 3 49

ANNEXE 5 : CARTES DE PREDICTION DES HABITATS FAVORABLES POUR LES DEUX ANNEES (EN VERT, 2008 ET 2011, OU 2012 ET 2014), POUR UNE ANNEE PARTICULIEREMENT CHAUDE (EN BLEU, 2011 OU 2014) ET POUR UNE ANNEE PLUTOT FRAICHE (EN ROSE, 2008 OU 2012) POUR LES DEUX ALOSES 53

ANNEXE 6 : PROJECTION DES HABITATS FAVORABLES EN MER POUR LES ALOSES A L'HORIZON DE LA FIN DU SIECLE SELON UN SCENARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE TEL QUE DEFINI EN SECTION *4.1.4*. EN VERT CLAIR SONT REPRESENTES LES HABITATS PREDITS COMME FAVORABLES POUR UNE DES DEUX ANNEES (I.E. 2008 OU 2011 / 2012 OU 2014) ET RESTANT FAVORABLES DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE. LES HABITATS NON FAVORABLES EN 2008 ET 2011 OU 2012 ET 2014 MAIS DEVENANT FAVORABLES POUR LA FIN DU SIECLE SONT EN VERT FONCE. LES HABITATS FAVORABLES POUR UNE DES DEUX ANNEES (I.E. 2008 OU 2011 / 2012 OU 2014) ET DEVENANT DEFAVORABLES SOUS CONTRAINTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT EN ROUGE FONCE 57

ANNEXE 7 : SUPERPOSITION DU RESEAU D'AIRES MARINES PROTEGEES AUX CARTES DE PREDICTIONS MENSUELLES DES HABITATS FAVORABLES. EN VERT : HABITATS FAVORABLES POUR LES DEUX ANNEES (I.E. 2008 ET 2011) ; EN BLEU : POUR UNE ANNEE PARTICULIEREMENT CHAUDE (I.E. 2011) ; EN ROSE : POUR UNE ANNEE PLUTOT FRAICHE MAIS AVEC UN HIVER DOUX (I.E. 2008). LES ZONES EN BLEU HACHUREES CORRESPONDENT AUX AMP. LES ISOBATHES JUSQU'A 300 M DE FOND SONT REPRESENTES PAR DES LIGNES CONTINUES GRISES 61

Table des figures

FIGURE 1. – Schématisation du cycle de vie pour les aloses ouest-européennes

FIGURE 2. – Evolution des effectifs du stock reproducteur de la grande alose sur la Garonne et la Dordogne entre 1987 et 2014

FIGURE 3. – Zone d'étude correspondant à la couverture spatiale des campagnes d'Observations des captures en mer (Obsmer) de l'Ifremer

FIGURE 4. – Illustration de la Grande alose

FIGURE 5. – Distribution historique et actuelle de la Grande alose en Europe

FIGURE 6. – Cycle de vie de la Grande alose

FIGURE 7. – Illustration de l'Alose feinte

FIGURE 8. – Distribution historique et actuelle de l'Alose feinte en Europe

FIGURE 9. – Cycle de vie de l'Alose feinte

FIGURE 10. – Présences (vert) et absences (rouge) d'aloses dans la base Obsmer sur la période 2003-2016. Les isobathes 100 m, 200 m et 300 m sont également représentés sur la carte

FIGURE 11. – Schématisation de la rastérisation effectuée sur une variable quantitative continue (Température de Surface ; TS) et sur une variable qualitative (Habitat en 7 modalités) ; un point rouge symbolise une opération de pêche n'ayant pas capturé d'aloses alors qu'un point vert représente le cas contraire. L'hypothèse est ici que les trois points correspondent à un même mois

FIGURE 12. – Schématisation du choix du seuil pour représenter les habitats les plus favorables aux espèces

FIGURE 13. – Présences du jeu de validation indépendant : données de la thèse de Catherine Taverny (violet), des campagnes halieutiques NURSE, PECOS et SOLDIF (orange) et celles des bases OBIS et GBIF (bleu)

FIGURE 14. – Exemple de courbes de réponse, ici pour le modèle Alosa fallax sur la période 2006-2016. L'axe des Y correspond à la favorabilité des habitats exprimée en %. Une courbe est calculée et représentée pour chaque mois pour les variables quantitatives continues. Pour la variable catégorielle « habitats », la représentation choisie est un box plot. Le trait noir correspond à la médiane. Voir tab. 3 pour la correspondance du code numérique de l'habitat

FIGURE 15. – Prédiction du modèle de la Grande alose sur la période 2006-2016 pour les années 2008 et 2011

FIGURE 16. – Projection des habitats favorables en mer pour la Grande alose (modèle 2006-2016) à l'horizon de la fin du siècle selon un scénario de changement climatique tel que défini en section 4.1.4. En vert clair sont représentés les habitats prédits comme favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011) et restant favorables dans le contexte du changement climatique. Les habitats non favorables en 2008 et 2011 mais devenant favorables pour la fin du siècle sont en vert foncé. Les habitats favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011) et devenant défavorables sous contrainte du changement climatique sont en rouge foncé

FIGURE 17. – Superposition du réseau d'aires marines protégées aux cartes de prédiction mensuelles (mars et novembre) des habitats favorables de la Grande alose pour le modèle 2006-2016. En vert : habitats favorables pour les deux années (i.e. 2008 et 2011) ; en bleu : pour une année particulièrement chaude (i.e. 2011) ; en rose : pour une année plutôt fraiche mais avec un hiver doux (i.e. 2008). Les zones en bleu hachurées correspondent aux AMP. Les isobathes jusqu'à 200 m de fond sont représentés par des lignes continues grises. Voir ann. 7 pour l'ensemble des jeux de cartes mensuelles pour les deux espèces et leurs deux modèles

Table des tableaux

TABLEAU 1. – Description des principaux fleuves se jetant dans la Manche et le Golfe de Gascogne. Le débit annuel moyen et la surface sont donnés pour rendre compte de leur taille respective. Source : pages Wikipédia des différents bassins versants

TABLEAU 2. – Comparaison des variables utilisées lors des deux travaux de modélisation autour de la distribution en mer des aloses. VC signifie variable continue. Les variables retenues dans les modèles finaux de Trancart et al. (2014) sont en italique. Les variables relatives à la sédimentologie et à l'habitat physique sont détaillées en annexe 3

TABLEAU 3. – Simplification de la classification EUNIS en 7 modalités également réparties sur la zone d'étude. Le code fait référence à celui employé dans la figure 14, le tableau 6 et l'annexe 4

TABLEAU 4. – Synthèse du nombre de données après les différents traitements pour la construction des modèles

TABLEAU 5. – Contribution des différentes variables à la déviance expliquée par le modèle pour chaque période et pour les deux espèces. Les cases vides indiquent que la variable n'avait pas été retenue/testée dans le modèle

TABLEAU 6. – Sens de la relation entre la favorabilité de l'habitat et les différentes variables environnementales des modèles synthétisé sur l'ensemble d'une année. Habitat 1 = Circalittoral homogeneous fine (sand and mud). Habitat 6 = Infralittoral rock. Le terme « varié » indique que la relation change fréquemment en fonction du mois de l'année

TABLEAU 7. – Gammes des valeurs prises par les variables environnementales pour les deux modèles et les deux espèces lors de la calibration (section 3.1.2) et de la projection sous contrainte de changement climatique. Les variables en gras sont celles sur lesquelles s'applique le scénario de changement climatique décrit en section 4.1.2

TABLEAU 8. – Estimation de la suffisance du réseau d'AMP pour les deux modèles de chaque espèce sur un pas de temps mensuel. Les valeurs correspondent à des pourcentages

Index alphabétique des sigles

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

AIC : Akaike Information Criterion

AMP : Aire Marine Protégée

AUC : Area Under the Curve

CIEM : Conseil International pour l'Exploration de la Mer

COGEPOMI : COmité de GEstion des POissons Migrateurs

DPMA : Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture

EUNIS : EUropean Nature Information System

GBIF : Global Biodiversity Information Facility

GCM : General Circulation Model

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GIP : Groupement d'Intérêt Public

GLM : Generalised Linear Model

GR3D : Global Repositioning Dynamics for Diadromous fish Distribution

Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

MAIA : Marine protected Areas In the Atlantic arc

MARC : Modélisation et Analyses pour la Recherche Côtière

MARS3D : Model for Applications at Regional Scale

MEECE : Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment

MIGADO : Association MIgrateurs GAronne DOrdogne

OBIS : Ocean Biogeographic Information System

Obsmer : Observations des captures en mer

OdP : Opération de Pêche

PANACHE : Protected Area Network Across the Channel Ecosystem

PNM : Parc Naturel Marin

RCP : Representative Concentration Pathway

ROC : Receiver Operating Characteristic

SIG : Système d'Informations Géographiques

SIH : Système d'Informations Halieutiques

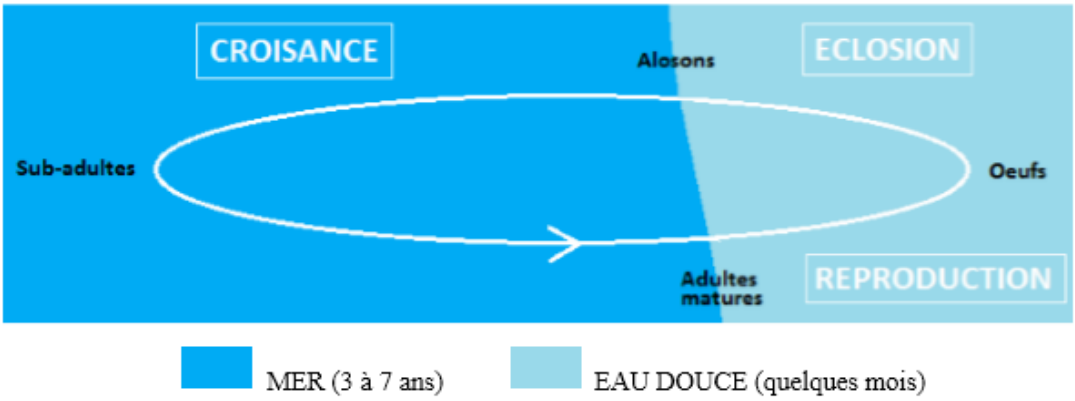
SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

1. Introduction

Les deux aloses de la façade atlantique européenne, la Grande alose (*Alosa alosa* Linnæus, 1758) et l'Alose feinte (*Alosa fallax* Lacépède, 1803), sont des espèces en déclin qui font l'objet de plusieurs statuts de conservation. Elles sont considérées comme « vulnérables » depuis 2010 par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature ; URL www.iucn.fr) au niveau français mais de « préoccupation mineure » aux niveaux européen et mondial (Freyhof & Brooks, 2011). Elles figurent également à l'annexe III de la Convention de Berne relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe de 1989 (www.coe.int/), et aux annexes II et V de la Directive « Habitats-Faune-Flore » (http://eur-lex.europa.eu/) (Bensettiti & Gaudillat, 2002a,b). Il s'agit de poissons migrateurs amphihalins, c'est-à-dire que leur reproduction et leur croissance ont lieu dans des milieux à salinité différente. Plus particulièrement, la reproduction des aloses se passe en milieu continental et la croissance en mer, en faisant ainsi des espèces potamotoques (McDowall, 1988) (fig. 1).

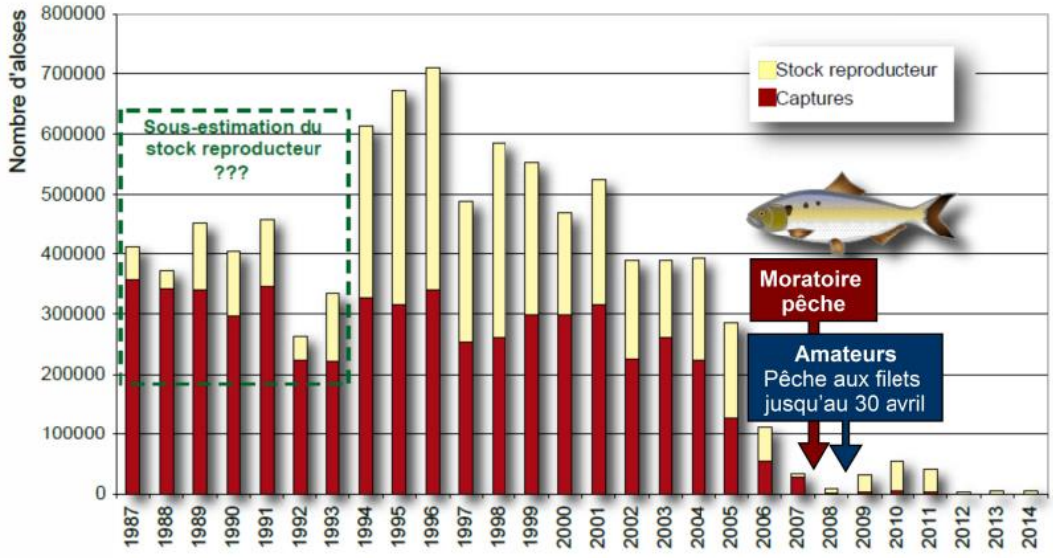
FIGURE 1. – Schématisation du cycle de vie pour les aloses ouest-européennes. Le cycle se lit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre



Au-delà de leur importance patrimoniale, notamment en région Nouvelle-Aquitaine, ces espèces supportaient, et supportent encore partiellement, des activités de pêche récréative et commerciale en milieux fluvial et estuarien. Elles génèrent ainsi des emplois et des profits. Cela est particulièrement vrai pour la Grande alose qui était pêchée de manière importante pour être ensuite commercialisée régionalement. On comptait, par exemple, en 1998 pour l'estuaire de la Gironde, 158 pêcheurs qui produisaient 440 tonnes de poissons pour une valeur de 6,6 millions de francs (Castelnaud *et al.*, 2000).

Ces espèces font l'objet, depuis plusieurs années, de nombreux suivis dans le domaine continental, notamment lors des migrations de montaison, de dévalaison ou lors de la reproduction (e.g Mennesson-Boisneau, 1990 ; Martin-Vandembulcke, 1999 ; Baglinière & Élie, 2000 ; Acolas *et al.*, 2004 ; Lochet, 2006). Tous s'accordent sur le constat d'un déclin important des populations d'aloses sur les principaux fleuves français mais aussi plus largement en Europe (Limburg & Waldman, 2009 ; Rougier *et al.*, 2012 ; ICES, 2015). Les différentes sources de données sur le stock reproducteur du système fluvio-estuarien Gironde-Garonne-Dordogne attestent que la situation se dégrade de façon régulière depuis 1996 (PLAGEPOMI Garonne 2015-2019) (fig. 2). Le rapport d'activité 2015 de l'Association Migrateurs GAronne DOrdogne (MIGADO, 2015) est parlant : « Les effectifs d'aloses, contrôlés en 2015 au niveau des stations de contrôle de Golfech et Tuilières, restent à des niveaux extrêmement faibles avec respectivement 429 et 1605 individus contrôlés […]. L'évolution des effectifs présente une tendance décroissante depuis 1996, année de référence pour l'espèce avec plus de 106 000 aloses contrôlées à Golfech et 87 000 à Tuilières ».

FIGURE 2. – Evolution des effectifs du stock reproducteur de la grande alose sur la Garonne et la Dordogne entre 1987 et 2014. Cette évaluation est calculée en sommant les captures par la pêche, les nombres de géniteurs recensés sur les frayères en aval des premiers obstacles et les nombres de passages sur les premières passes. Depuis l'application du moratoire sur la pêche en 2008, les données de capture correspondent à une estimation des prises accidentelles en estuaire et fleuve par les pêcheurs professionnels et amateurs aux engins. Source : PLAGEPOMI Garonne 2015-2019



Cette raréfaction des aloses a été attribuée aux multiples activités anthropiques s'exerçant sur les cours d'eau comme c'est le cas pour une grande majorité des migrateurs amphihalins (e.g. dégradation des frayères par extraction de granulats, pollution (i.e. chimique, organique et métallique), obstacles à la migration, pêche) (De Groot, 2002 ; Limburg & Waldman, 2009 ; ICES, 2015). Des mesures ont été prises pour limiter ces impacts : passes et ascenseurs à poissons, réhabilitation voire création de frayères et un moratoire sur la pêche sur le territoire Gironde-Garonne-Dordogne-Charente-Seudre-Leyre depuis 2008 pour la Grande alose. Malgré ces mesures, le déclin persiste (MIGADO, 2015).

Si les connaissances sur la vie en eau douce des aloses sont développées, ce n'est pas le cas de leur phase de croissance et de maturation en mer qui dure pourtant plusieurs années. Ainsi, une partie de l'explication de leur raréfaction pourrait se trouver dans le déroulé de la phase marine de leur cycle de vie. A l'heure actuelle, quelques rares études (Taverny & Élie, 2001a ; Acou *et al.*, 2013 ; Trancart *et al.*, 2014) ont pu mettre en évidence l'importance des zones de deltas et d'estuaires pour la répartition en mer des aloses. Les études les plus récentes découlent de l'évaluation de la suffisance du réseau Natura2000 en mer demandée, à la suite de la désignation des zones, par la Commission européenne aux Etats-Membres.

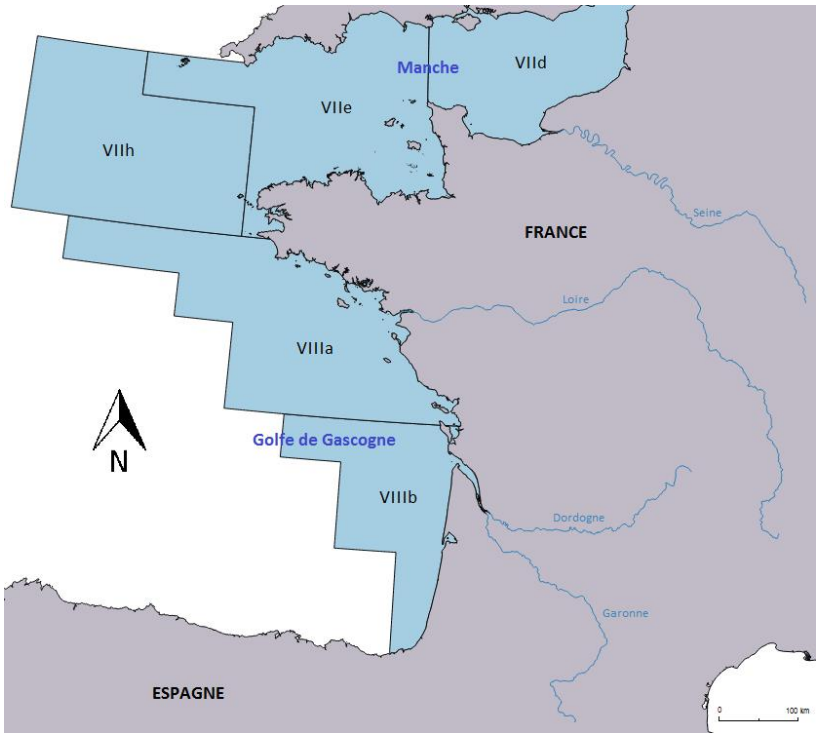
Ainsi, il est complexe de comprendre et de stopper le déclin de ces espèces qui est sans doute multifactoriel et en partie lié à la complexité de leur cycle de vie. Dans ce contexte, un programme partenarial de recherche sur les populations d'aloses du Grand Sud-Ouest « SHAD'EAU » a été monté dans le but d'identifier les causes possibles de fragilité actuelle des deux espèces et d'aider les gestionnaires dans leurs actions de protection. Il existe dans ce programme un volet « mer » dans lequel s'inscrit ce stage. L'intérêt du travail est d'enrichir les connaissances sur les habitats potentiellement occupés par les aloses durant leur séjour en mer. Pour cela, un élargissement du travail de modélisation effectué par Trancart *et al.* (2014) a été effectué : (i) en augmentant l'emprise spatiale du modèle à la zone sud Gascogne (sud Vendée au Gouf de cap Breton) afin de couvrir la quasi-totalité de l'aire de distribution atlantique de ces espèces, (ii) en testant de nouveaux facteurs environnementaux potentiellement explicatifs, notamment des facteurs biotiques, puis (iii) en projetant le modèle à l'horizon de la seconde moitié du XXI^{e} siècle pour simuler l'évolution de la répartition en mer des aloses sous contrainte de changement climatique. Les résultats obtenus ont pour vocation d'être présentés devant des commissions spécialisées comme le COmité de GEstion des POissons MIgrateurs (COGEPOMI) et auprès d'instances intéressées par la problématique des migrateurs en mer, comme l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB ; correspondant migrateurs en mer : Guillaume Paquignon). En ce sens, (iv) l'adéquation entre les habitats préférentiels prédits dans ce stage pour ces espèces et le réseau d'Aires Marines Protégées (AMP) français a été évaluée afin de donner des premiers éléments concernant la suffisance de ce réseau vis-à-vis des aloses.

2. La zone d'étude et les deux espèces d'intérêt

2.1 Présentation de la zone d'étude

Ce stage s'intéresse à la zone Manche-Golfe de Gascogne, plus précisément à l'ensemble de la façade atlantique de la France (fig. 3).

FIGURE 3. – Zone d'étude correspondant à la couverture spatiale des campagnes d'Observations des captures en mer (Obsmer) de l'Ifremer. Sont représentées pour la zone Manche-Golfe de Gascogne les divisions CIEM (Conseil International pour l'Exploration de la Mer) (i.e. VIId, VIIe et VIIh pour la Manche, et VIIIa et VIIIb pour le Golfe). Sources : http://gis.ices.dk/sf/ pour les divisions CIEM ; https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise-large-rivers-and-large-lakes pour les grands fleuves français



La Manche est une mer formant un couloir entre le sud de la Grande-Bretagne et le nord-ouest de la France. Sur toute sa longueur (soit environ 500 km), la largeur varie fortement, allant de 32 à 250 km. Les fonds sont peu accidentés et en pente régulière vers l'ouest. On note, tout de même, la présence d'un ensemble de fosses axiales résultant d'un système fluviatile façonné lors des périodes de régression marine du Quaternaire. Les marées sont fortes et le marnage est renforcé par les faibles profondeurs (en moyenne, 86 m de fond, avec la moitié de la superficie sur des fonds de moins de 50 m). Les sédiments sont globalement grossiers (i.e. sables, graviers et cailloutis, affleurements de roches) mais, proche des côtes, peuvent se former des marais maritimes à partir des vases projetées par le courant. La Manche est caractérisée par une homothermie « habituelle » (i.e. en été jusqu'à 17°C près des côtes et moins de 10°C en hiver) due au brassage de l'eau par les courants de marée et à la topographie irrégulière du fond. En été, la salinité de la quasi-totalité de la Manche est inférieure à 35 ‰ tandis qu'en hiver, l'entrée d'eaux océaniques est plus importante, ce qui engendre des salinités plus élevées. La Manche est l'une des voies de circulation maritime les plus importantes et représente près de 20 % du trafic maritime mondial. On y pêche principalement, le turbot, la sole, le hareng et le maquereau (Pinot, *Manche* [en ligne]).

Le Golfe de Gascogne est une aire marine (de 225 000 km^2) de l'océan Atlantique située entre le nord de l'Espagne et la péninsule bretonne. Sa partie centrale est caractérisée par une plaine abyssale de plus de 4 000 m de fond, très doucement inclinée de l'est vers le sud-ouest. Les plateaux continentaux sont entaillés par de nombreux canyons dont les principaux sont les canyons des Sables d'Olonne, de Saint-Nazaire et d'Audierne qui seraient issus du déversement des eaux turbides des fleuves (respectivement Gironde, Loire

et Seine) lors des régressions quaternaires. Les dépôts de la Loire et de la Gironde sont également à l'origine de la formation de deltas sous-marins, celui de la Gironde s'étendant sur 30 km de rayon. Sur les fonds, on retrouve principalement des sables mais on note le développement de dépôts fins (de la pointe de Penmarc'h jusqu'à l'île d'Oléron) connus sous le nom de « Grande Vasière ». Les eaux de fond s'écartent peu de 11°C, par contre, de longues périodes de calme permettent d'amener les eaux de surface jusqu'à 21°C. La salinité est de 35,5 ‰ au large et plus faible aux débouchés des fleuves surtout lors des crues hivernales. Une pêche côtière y est très présente, avec principalement un recours au chalutage ciblant la langoustine (Pinot, *Golfe de Gascogne* [en ligne]).

Les principaux fleuves se jetant dans la Manche et le Golfe de Gascogne sont du nord vers le sud : la Somme, la Seine, l'Orne, la Vilaine, la Loire, la Charente, le système fluvio-estuarien Gironde-Garonne-Dordogne et l'Adour (tab. 1).

TABLEAU 1. – Description des principaux fleuves se jetant dans la Manche et le Golfe de Gascogne. Le débit annuel moyen et la surface sont donnés pour rendre compte de leur taille respective. Source : pages Wikipédia des différents bassins versants

	Débit annuel moyen (m^3/s)	**Surface du bassin versant (km^2)**	**Embouchure**
Somme	35	6 550	Manche
Seine	480	76 500	Manche
Orne	25	1 611	Manche
Vilaine	70	10 400	Golfe de Gascogne
Loire	900	117 800	Golfe de Gascogne
Charente	140	10 549	Golfe de Gascogne
Garonne	630	28 900	Golfe de Gascogne
Dordogne	350	24 000	Golfe de Gascogne
Adour	360	16 880	Golfe de Gascogne

2.2 Présentation des deux espèces d'intérêt

La Grande alose (*Alosa alosa* Linnæus, 1758) et l'Alose feinte (*Alosa fallax* Lacépède, 1803) sont des clupéidés comme, entre autres, les sardines et les anchois. Il s'agit de petits poissons pélagiques vivant vraisemblablement en bancs dans la colonne d'eau, se nourrissant sur les bas niveaux trophiques (zooplancton et juvéniles de poissons). Elles servent, elles-mêmes, de nourriture à des espèces de poissons piscivores et sont parfois la cible de pêcheries (professionnelles et amateurs) en eau douce.

2.2.1 La Grande alose

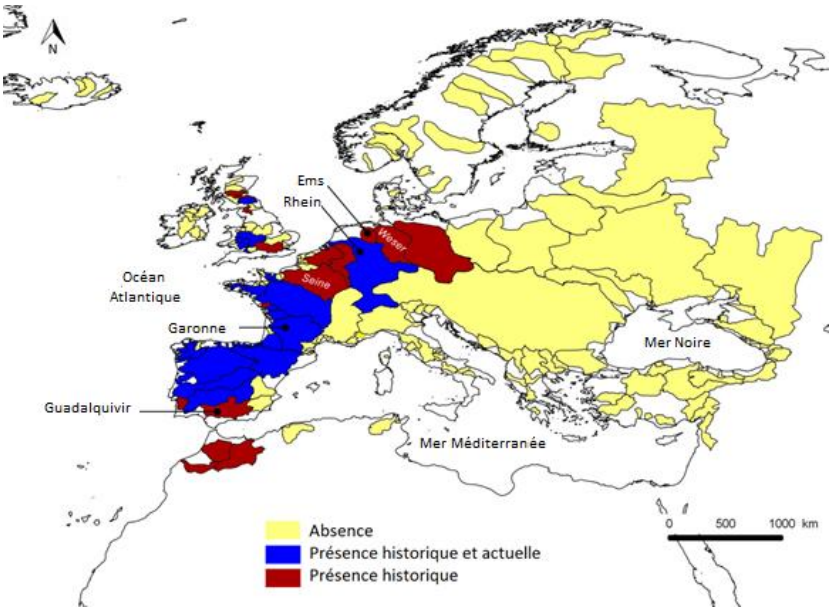
La Grande alose mesure, en moyenne, 52 cm. Elle se distingue par un nombre de branchiospines, sur le premier arc branchial, de 85 à 160, une large tâche noire en arrière de l'opercule, qui peut être suivie d'autres plus petites, son dos bleu profond tournant vers le vert et son ventre et ses flancs blanc argenté (Bensetti & Gaudillat, 2002a) (fig. 4).

FIGURE 4. – Illustration de la Grande alose.
Source : http://riviereesperance.canalblog.com/archives/2009/12/24/15902007.html



Historiquement, la Grande alose était présente en abondance le long de la côte Atlantique, du sud de la Norvège jusqu'au sud du Maroc. Elle ne serait désormais présente que de la Normandie (notamment la Vire) jusqu'au Portugal (voir Lassalle (2008) pour une synthèse) (fig. 5).

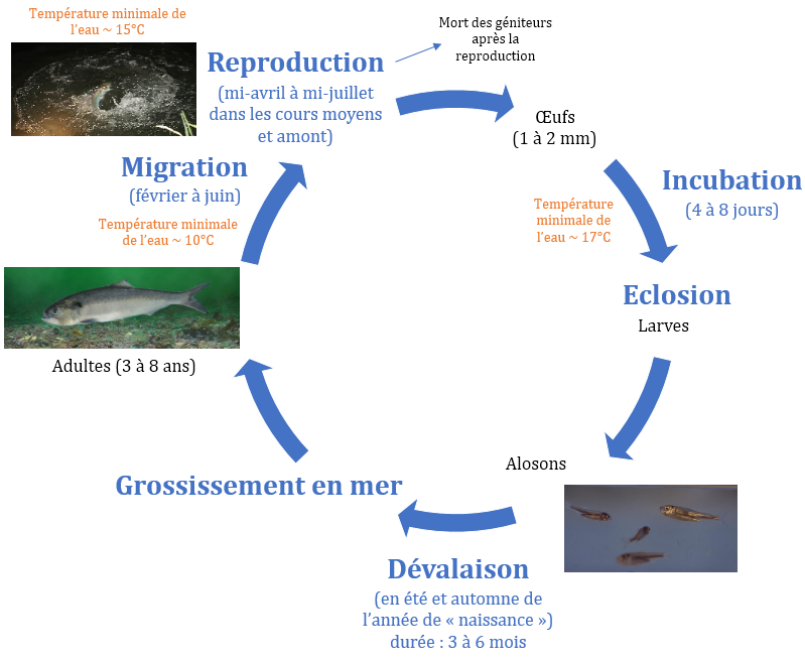
FIGURE 5. – Distribution historique et actuelle de la Grande alose en Europe. Source : base de données EuroDiad 3.2, Cestas, France - http://www.diadfish.org/francais/documents_f.htm#donnees



À l'heure actuelle, la France est le seul pays qui abrite encore des populations de Grande alose significatives, mais néanmoins, en forte régression comme vu en introduction de ce document.

Le mode de vie de la Grande alose, dont une grande partie se passe en mer, peut être décrit succinctement comme tel (Bensetti & Gaudillat, 2002a) : les adultes matures remontent les fleuves pour s'y reproduire relativement haut dans les cours d'eau. Ils fraient sur des sites typiques caractérisés par un substrat grossier et un courant rapide. La ponte a lieu de nuit. Les poissons engendrent la formation d'un tourbillon et émettent des bruits particuliers : c'est le phénomène de « bull » (Cassou-Leins *et al.*, 2000). Quelques semaines après l'éclosion, les alosons commencent leur dévalaison vers la mer. Ils restent peu en estuaires et gagnent rapidement la mer où ils grandiront et matureront pendant 3 à 7 ans (Jatteau *et al.*, 2005, 2006 ; Lochet *et al.*, 2009) (fig. 6). Dans le Golfe de Gascogne, la Grande alose se répartit relativement régulièrement depuis le large de la côte girondine jusqu'au Morbihan, jusqu'à des fonds de 100 m de profondeur et plus (Taverny & Élie, 2001a). Le long des côtes marocaines, les aloses se retrouvaient dans les zones d'upwelling (i.e. remontées d'eaux profondes froides et riches en nutriments), à des profondeurs entre 30 et 50 m (Sabatié & Baglinière, 2001).

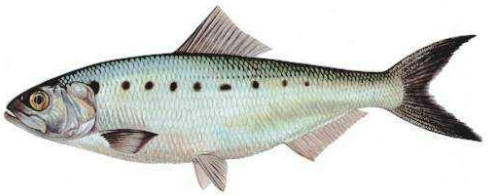
FIGURE 6. – Cycle de vie de la Grande alose. Sources des images : http://www.russfishing.de/ryby.html, https://www.lanuv.nrw.de/alosa-alosa/fr/projekt/massnahmen/monitoring/index.html, http://www.peche-rivieres-quimper.com/grande-alose.html



2.2.2 L'Alose feinte

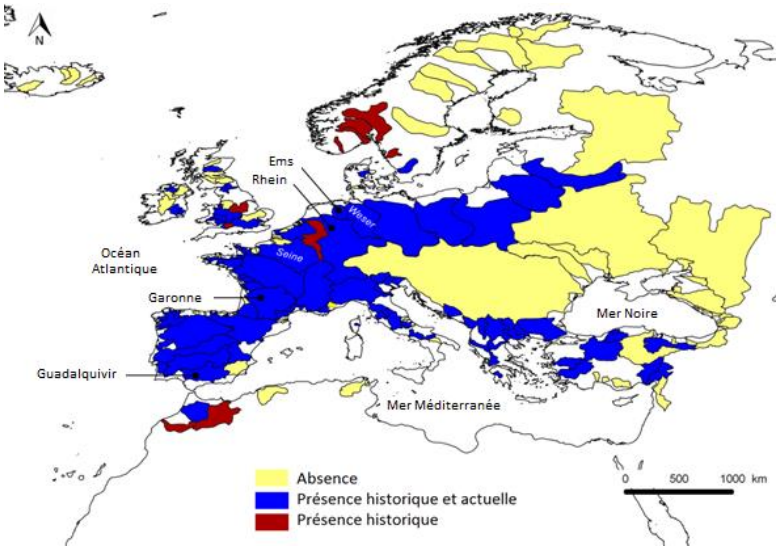
L'Alose feinte est plus petite que la Grande alose. Elle mesure en moyenne 42 cm, possède un nombre de branchiospines inférieur à 60, une rangée de 4 à 8 petites tâches bien marquées en arrière de l'opercule et la teinte bleue de son dos est plus accentuée que chez *Alosa alosa* (Bensettiti & Gaudillat, 2002b) (fig. 7).

FIGURE 7. – Illustration de l'Alose feinte.
Source : http://estuairegironde.pagesperso-orange.fr/peche/estuaire-page-alose.htm



Historiquement, l'Alose feinte était présente de l'Islande au sud du Maroc, et se répartissait sur les pourtours de la mer Baltique et de la Méditerranée. Désormais, pour la partie atlantique de son aire de distribution, on la retrouve depuis l'Elbe, dans le Rhin, les Iles Britanniques jusqu'au Maroc (voir Lassalle (2008) pour une synthèse) (fig. 8).

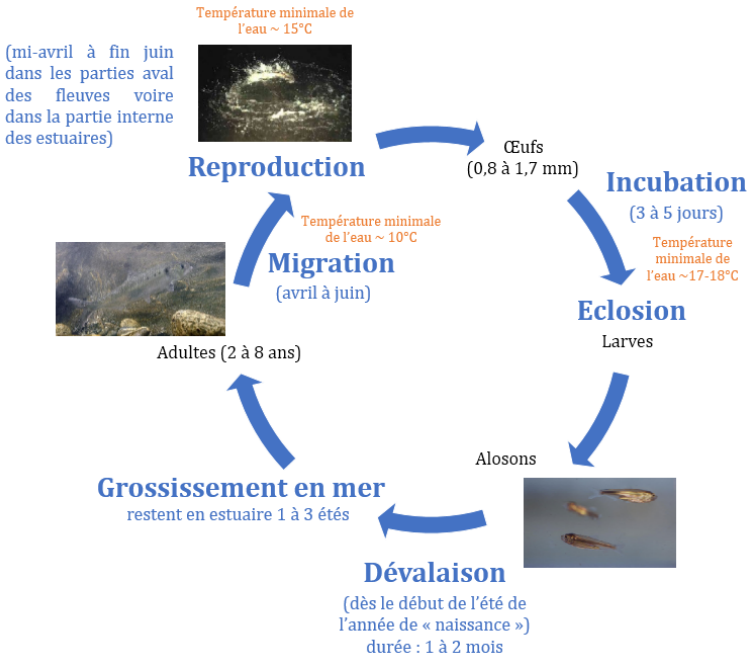
FIGURE 8. – Distribution historique et actuelle de l'Alose feinte en Europe. Source : base de données EuroDiad 3.2, Cestas, France - http://www.diadfish.org/francais/documents_f.htm#donnees



En France, les plus importantes populations d'Alose feinte se situent sur la Loire, la Garonne, la Dordogne et l'Adour.

Son mode de vie est relativement similaire à celui de la Grande alose puisqu'il s'agit aussi d'un migrateur potamotoque (Bensetti & Gaudillat, 2002b). Cependant, il diffère, entre autres, sur la limite amont de la migration de montaison, sur l'importance du compartiment estuarien, et sur les caractéristiques de son séjour marin. En effet, l'Alose feinte se reproduit plus en aval des fleuves que la Grande alose (au maximum entre 250 et 500 km de la mer contre plus de 650 km) (Cassou-Leins *et al.*, 2000) ; elle peut même, dans certains cas, se reproduire dans la partie interne des estuaires. Suite à leur dévalaison, qui débute plus tôt et dure moins longtemps que chez *Alosa alosa*, les alosons vont rejoindre la mer mais peuvent rester plus longtemps en estuaires (jusqu'à 3 étés) (Lochet *et al.*, 2009) (fig. 9). Dans le Golfe de Gascogne, l'Alose feinte fréquente la zone côtière sur des fonds de moins de 50 m (Taverny & Élie, 2001a). C'est également le cas le long des côtes marocaines, où l'Alose feinte reste relativement près des embouchures de fleuves (Sabatié & Baglinière, 2001).

FIGURE 9. – Cycle de vie de l'Alose feinte. Sources des images : http://enquetealose.free.fr/, https://www.lanuv.nrw.de/alosa-alosa/fr/projekt/massnahmen/monitoring/index.html, https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/66996



3. Distribution spatiale actuelle modélisée des aloses

Le but de cette partie était de construire un modèle, autrement dit une combinaison de variables environnementales, reproduisant au mieux la distribution actuelle en mer de chacune des deux espèces. L'ensemble des traitements statistiques et cartographiques a été fait sous le logiciel R version 3.3.2 (R Core Team, 2017).

3.1 Matériel et méthodes

3.1.1 Collection et traitement des données physiques, biogéochimiques et biologiques

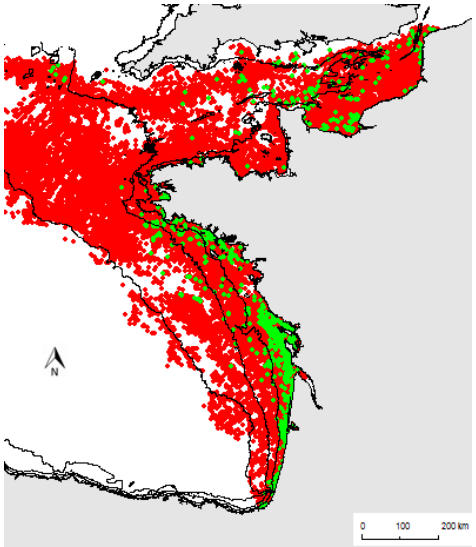
3.1.1.1 Création de la base de données biologiques à partir des campagnes Obsmer (présences/absences d'aloses sur la période 2003-2016)

Les données de présences et absences des deux espèces d'alose sont issues de la base Obsmer du SIH (Système d'Informations Halieutiques ; URL http://sih.ifremer.fr/). Ce projet a été initié en 2003 et associe la DPMA, l'Ifremer et les pêcheurs professionnels maritimes. Le projet est présenté comme tel : « L'objectif est de former des observateurs qui, à bord des navires de pêche professionnels, recueillent des données représentatives de l'activité de pêche afin de permettre aux scientifiques d'améliorer leurs diagnostics sur l'état de la ressource ». Il convient ici de rappeler que les aloses ne sont pas ciblées en mer et qu'elles constituent des prises accessoires (ou captures accidentelles) pouvant être débarquées, ou pas, par le pêcheur en criée.

Trois mois avant le démarrage de ce stage, il a été demandé auprès de la DPMA, pour les divisions CIEM VIIIa, VIIIb, VIId, VIIe, VIIh correspondant au plateau continental français du Golfe de Gascogne et à la Manche, les informations sur les opérations de pêche ayant conduit à la capture d'aloses (i.e. traits positifs) et sur celles n'ayant pas abouti à la capture de ces espèces (i.e. traits négatifs), sur la période 2003-2016, tous engins de pêche confondus (soit 30 au total). Les données transmises se présentaient sous la forme de quatre tables pour les traits positifs (ann. 1). La table TR contenait les informations relatives à la marée (ou sortie en mer d'un navire), la table HH celles relatives aux différentes opérations de pêche (OdP) au cours des marées de la table TR. Les tables SL et HL regroupaient les informations sur les individus pêchés (e.g. taille, nombre).

La spatialisation de l'information dans ces tables portait sur l'opération de pêche : latitude et longitude de début et fin dans le système de coordonnées WGS84. Il convient de préciser qu'une approximation a été faite pour ce stage. Ce sont les coordonnées du milieu de l'opération de pêche qui ont été extraites afin de constituer les points de présences et d'absences dans notre base biologique (fig. 10).

FIGURE 10. – Présences (vert) et absences (rouge) d'aloses dans la base Obsmer sur la période 2003-2016. Les isobathes 100 m, 200 m et 300 m sont également représentés sur la carte. Voir en annexe 2, les cartes par espèce des présences avec une taille de point variant en fonction du nombre d'aloses mesurées par opération de pêche



Dans les quatre tables, les variables suivantes ont été retenues pour la constitution de la base de données biologiques (à noter que les quatre premières informations ont également été fournies pour les points d'absence) :

- le code de la marée et le numéro de l'opération de pêche dans la marée comme identifiants uniques des observations de la base biologique ;
- la date de l'opération de pêche (jour, mois, année) afin d'extraire les variables environnementales des modèles biogéochimiques dont les sorties peuvent être à l'heure ou au jour près ;
- la latitude et la longitude, dans les référentiels WGS84 et Lambert 93, des milieux des opérations de pêche afin de faire le lien avec les données environnementales ;
- le nom de l'espèce afin de construire des bases et des modèles par espèce.

La variable relative aux classes de taille, bien qu'existante, n'a pas été retenue pour l'élaboration des modèles. En effet, la répartition en mer des aloses n'étant que très peu étudiée, nous n'avions pas d'hypothèses à formuler de différences de comportement en fonction des stades de sub-adultes identifiés.

3.1.1.2 Création de la base de données physiques et biogéochimiques

À partir du peu de connaissances disponibles sur les aloses en mer, il a fallu choisir des variables environnementales potentiellement explicatives à tester dans les modèles. Une étude antérieure (Trancart *et al.*, 2014) ayant modélisé la répartition en mer des deux espèces d'alose a permis d'orienter le choix de ces variables. Cette étude avait mis en évidence l'importance des facteurs profondeur, salinité et nature du substrat que nous avons repris, mais auxquels d'autres variables ont été ajoutées. Le tableau 2 compare les variables utilisées dans l'étude de 2014 et dans ce travail de stage.

TABLEAU 2. – Comparaison des variables utilisées lors des deux travaux de modélisation autour de la distribution en mer des aloses. VC signifie variable continue. Les variables retenues dans les modèles finaux de Trancart et al. *(2014) sont en italique. Les variables relatives à la sédimentologie et à l'habitat physique sont détaillées en annexe 3*

Variables testées dans le travail de Trancart *et al.*, 2014	**Variables testées dans ce travail de stage**
Profondeur/bathymétrie (3 classes)	Profondeur/bathymétrie (VC)
Salinité de surface (3 classes)	Salinité de surface et de fond (VC)
Nature du substrat (3 modalités)	Habitat physique (4 ou 7 modalités)
Latitude	
Température de l'eau de surface (6 classes)	Température de l'eau de surface et de fond (VC)
	Concentration en chlorophylle *a* de surface (VC)
	Turbidité de surface (VC)

Les travaux de Taverny & Élie (2001a) ont établi une préférence des deux espèces d'alose pour les faibles profondeurs (particulièrement pour *Alosa fallax* qui ne dépasserait pratiquement pas l'isobathe des 100 m). Ce facteur retenu dans le modèle de Trancart *et al.* (2014) sous forme d'une variable en 3 classes a été de nouveau testé dans cette étude mais comme une variable quantitative continue. La carte de la bathymétrie (SHOM, 2015) a été obtenue sur le site du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). C'est un modèle numérique de terrain de l'ensemble de la façade atlantique française. Son système de coordonnées est en WGS84 et sa résolution de 0,001°.

Les poissons sont poïkilothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle s'adapte à la température de leur milieu. De plus, la température et la salinité sont deux facteurs connus pour impacter la physiologie des poissons en général, en jouant sur leur croissance, leur survie et leur reproduction (Alliot *et al.*, 1983 ; Gaumet, 1994). Dans le cas des aloses, il a été démontré (Talbot, 1954 ; Massmann & Pacheco, 1957 ; Leggett & Whitney, 1972 ; Richkus, 1974 ; Rameye *et al.*, 1976 ; Cassou-Leins & Cassou-Leins, 1981 ; Dautrey & Lartigue, 1983) une influence prépondérante de la température sur l'activité de migration. Enfin, les aloses sont des poissons migrateurs potamotoques donc sensibles aux variations de salinité de leur milieu. Il paraît donc important de tester ces deux facteurs. Dans le modèle de Trancart *et al.* (2014), la latitude s'avère être explicative. Or, cette variable, très corrélée à la température, est plus ambigüe à interpréter que cette dernière. Ainsi, il lui a été préféré, dans ce stage, la température car celle-ci permettait de caractériser

plus sûrement l'enveloppe bioclimatique de ces deux espèces et d'étudier les effets du changement climatique par la suite. Les cartes de la température de l'eau et de la salinité ont été obtenues à partir du modèle hydrodynamique tridimensionnel MARS3D (Model for Applications at Regional Scale ; Lazure & Dumas, 2008) de l'Ifremer. Les sorties de ce modèle sont téléchargeables depuis le site MARC (Modélisation et Analyses pour la Recherche Côtière ; URL http://marc.ifremer.fr/) suite à une demande via un formulaire en ligne, mais seulement à partir de l'année 2006. MARS3D prend en compte la stratification de la colonne d'eau due au gradient de densité (i.e. les eaux les plus chaudes et/ou les moins salées recouvrent les eaux les plus fraiches et/ou les plus salées), la marée car les courants peuvent mélanger les eaux de surface et de fond, et enfin les vents qui peuvent générer des courants par la tension qu'ils exercent en surface. Il faut noter qu'avant 2010, seuls les débits des fleuves Adour, Gironde, Loire et Vilaine étaient pris en compte pour la densité de l'eau de mer. Puis, à partir de cette date, le modèle a utilisé les résultats d'un modèle général de l'océan Atlantique (développé et mis en œuvre par le groupement Mercator Océan ; URL http://www.mercator-ocean.fr/), ce qui permet de prendre en compte les débits de tous les fleuves de la zone. Les résultats du modèle sont horaires, mais la valeur à midi a été retenue comme représentative de l'ensemble de la journée pour limiter le temps de téléchargement (i.e. entre 15 et 16 heures pour télécharger une année à raison d'une seule couche horaire par jour (midi)). Les données sont réparties sur 40 niveaux entre la surface et le fond. Nous avons utilisé les niveaux 1 et 40 (respectivement fond et surface), ces deux niveaux ayant été testés alternativement dans les modèles.

La variable « Nature du substrat » de Trancart *et al.* (2014) a été enrichie pour ne plus être une variable uniquement sédimentaire. Nous avons souhaité mieux caractériser les habitats potentiellement essentiels des aloses en milieu marin. En effet, la nature du sédiment, mais aussi l'exposition du milieu à la houle et aux courants, la position au sein de l'étagement du domaine marin (i.e. circalittoral, infralittoral et intertidal), renseignant sur la présence d'herbiers, sont autant de caractéristiques pouvant influencer le choix d'un habitat par les aloses lors de leur séjour en mer. La carte des habitats physiques (Hamdi *et al.*, 2010) a été obtenue sur le site Sextant de l'Ifremer (URL https://sextant.ifremer.fr/), pour la zone Manche-Golfe de Gascogne. Son système de coordonnées est en Lambert 93 et sa résolution de 100 m. Elle s'appuie sur la typologie EUNIS (EUropean Nature Information System ; Louvel *et al.*, 2013) des habitats marins qui croise trois variables physiques : nature du substrat, zone biologique et tension de cisaillement au fond. Cette classification précise le type de biocénose que l'on est susceptible de trouver dans chaque type d'habitat. Pour la zone d'étude, cette classification recensait 25 classes que nous avons choisi de simplifier en 13 (classification non-testée durant le stage), puis en 7 représentées de façon équivalente en termes de surface (tab. 3) et enfin 4 modalités (i.e. rock, sand, mud et sediments) (ann. 3 pour les regroupements). Ces deux dernières classifications, différentes par leur niveau d'intégration, ont été testées alternativement dans les modèles.

TABLEAU 3. – Simplification de la classification EUNIS en 7 modalités également réparties sur la zone d'étude. Le code fait référence à celui employé dans la figure 14, le tableau 6 et l'annexe 4

	Habitat simplifié (7 modalités)	**Surface (en % du total)**	**Nombre d'opérations de pêche ayant capturé des aloses**	
			Alosa alosa	*Alosa fallax*
1	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)	16,13	225	297
2	Circalittoral mixed to coarse sediments	20,74	88	146
3	Circalittoral rock	11,19	34	18
4	Infralittoral homogeneous fine (sand and mud)	13,70	146	163
5	Infralittoral mixed to coarse sediments	11,38	16	18
6	Infralittoral rock	12,16	20	16
7	Intertidal flats	14,70	10	6

Etant donné que l'alimentation des aloses est majoritairement zooplanctonophage (Taverny & Élie, 2001b), surtout pour la Grande alose (l'Alose feinte étant nettement plus piscivore), le facteur concentration en chlorophylle *a* a été pris en compte comme un proxy de la disponibilité en nourriture.

Enfin, comme la distribution des aloses en mer est principalement restreinte au plateau continental et à sa bande côtière (Taverny & Élie, 2001a), la turbidité a été retenue comme facteur potentiellement explicatif de la répartition en mer de ces deux espèces. En effet, les aloses pourraient être attirées par les panaches de dilution des grands fleuves, en lien notamment avec leur caractère amphihalin. Les cartes de turbidité et de chlorophylle *a* sont issues du modèle tridimensionnel ECOMARS3D de l'Ifremer, qui couple un module

biologique au modèle MARS3D. Les sorties du modèle sont téléchargeables depuis le site MARC via un formulaire en ligne, mais seulement à partir de l'année 2012. Les éléments majeurs et limitants sont simulés : azote, silicium et phosphore (sous leurs formes minérale, détritique et incluse dans la matière vivante) ainsi que l'oxygène dissous. Les diatomées, les dinoflagellés et les nanoflagellés, sous forme de leur contenu en azote, représentent le compartiment phytoplanctonique. Enfin, le zooplancton herbivore est simulé pour prendre en compte la régulation par broutage du stock de phytoplancton. Les sorties du modèle sont quotidiennes (à midi) et sur 30 niveaux. Nous avons travaillé uniquement avec le niveau de surface (i.e. 30). Pour « construire » la variable « Chlorophylle *a* de surface », trois variables du modèle ECOMARS3D ont été utilisées, à savoir : « Concentration en azote des Nanoflagellées», « Concentration en azote des Diatomées» et « Concentration en azote des Dinoflagellées». Une conversion a ensuite été effectuée pour obtenir la concentration en chlorophylle *a* de ses trois groupes à partir de leur contenu en azote. Les facteurs de conversion suivants ont été appliqués : ratio molaire C/N de 6,625, masse molaire du carbone de 12 et rapport C/Chlorophylle *a* de 50:1 selon l'équation ci-dessous (comm. pers. Martin Huret, Ifremer) :

$$Concentration\ en\ chlorophylle\ a = 6{,}625 \times Concentration\ en\ nitrogène \times \frac{12}{50} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Les concentrations ont été sommées pour le niveau 30 afin d'obtenir la variable « Concentration en chlorophylle *a* de surface ».

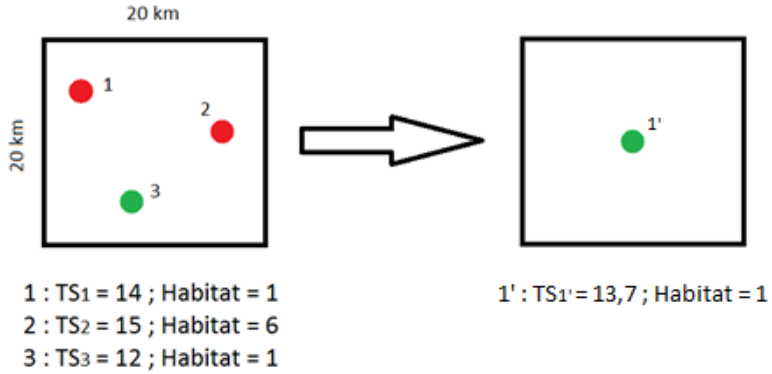
La corrélation entre les variables a été testée afin d'éviter trop de redondance dans l'information portée par les variables pouvant nuire aux performances du modèle. Des corrélations de Pearson ont été calculées entre chaque paire de variables afin de s'assurer que le coefficient de corrélation r n'était pas significativement supérieur à 0,7.

3.1.1.3 Rastérisation et mensualisation des données brutes

Avant tout traitement, une sélection a été effectuée pour limiter le nombre d'absences dans la base finale, la présence d'une alose dans la base Obsmer étant un « événement rare ». Seules les données des 13 engins (sur 30 au total) ayant pêché des aloses et où la bathymétrie était inférieure à 150 m (car aucune alose n'avait été pêchée au-delà) ont été retenues. Ainsi, le nombre d'absences de la base est passé de 54 610 à 42 920. De plus, ces deux espèces sont des espèces à faibles occurrences dans les campagnes Obsmer (seulement 570 OdP avec présences pour *Alosa alosa* et 682 pour *Alosa fallax*). Les données ont donc subi un traitement avant d'être utilisées pour la construction des modèles, afin d'améliorer la représentativité des présences dans le jeu de données. Une grille de pixels de 20 par 20 km a été appliquée sur la zone d'étude (Trancart *et al.*, 2014). Lorsqu'il y avait au moins une OdP ayant capturé une alose dans le pixel, celui-ci était considéré comme une « présence », indépendamment du nombre de traits négatifs. À l'inverse, si l'ensemble des points dans un pixel était des « absences » alors le pixel était considéré comme tel. Les coordonnées des points de présences et d'absences étaient définies comme les centroïdes des pixels. De la même manière, un traitement a également été appliqué aux données physiques associées à ces présences/absences (Keil *et al.*, 2013). Pour les variables quantitatives continues, comme la température par exemple, la valeur que prenait le pixel était la moyenne des valeurs des points dans le pixel. Pour les données qualitatives, le pixel se voyait accorder la modalité la plus fréquemment représentée de cette variable par les points dans le pixel (fig. 11).

Afin de pouvoir tester les éventuels changements de réponse à un facteur abiotique ou biotique en fonction du moment de l'année, la rastérisation décrite ci-dessus a été réalisée par application d'un filtre mensuel sur les données. Ainsi, 12 grilles ont été construites, l'information étant stockée grâce à la création d'une variable « mois ». De même, une variable « bimois » a été créée avec les couples janvier/février, mars/avril, mai/juin, juillet/août, septembre/octobre, novembre/décembre. Ces variables reliées à la saisonnalité interviendront sous la forme d'interaction dans les modèles.

FIGURE 11. – Schématisation de la rastérisation effectuée sur une variable quantitative continue (Température de Surface ; TS) et sur une variable qualitative (Habitat en 7 modalités) ; un point rouge symbolise une opération de pêche n'ayant pas capturé d'aloses alors qu'un point vert représente le cas contraire. L'hypothèse est ici que les trois points correspondent à un même mois



3.1.2 Construction des modèles de distribution actuelle des deux espèces

Parmi les variables explicatives issues des modèles MARS3D et ECOMARS3D, certaines étaient disponibles à partir de 2006 (i.e. température et salinité) et d'autres à partir de 2012 (i.e. concentration en chlorophylle *a* et turbidité). Par conséquent, pour chaque espèce, deux modèles ont été construits, l'un sur l'amplitude 2006-2016 et l'autre sur la période 2012-2016 en vue d'intégrer la concentration en chlorophylle *a* et la turbidité dans les modèles mais sans perdre trop d'informations dans notre jeu de données. Les données biologiques se répartissaient comme décrit dans le tableau 4.

TABLEAU 4. – Synthèse du nombre de données après les différents traitements pour la construction des modèles

	Avant rastérisation				**Après rastérisation**			
	Alosa alosa		*Alosa fallax*		*Alosa alosa*		*Alosa fallax*	
	Absences	Présences	Absences	Présences	Absences	Présences	Absences	Présences
2003-2016	42 920	570	42 920	682	/	/	/	/
2006-2016	38 777	460	38 777	583	3 144	245	3 131	266
2012-2016	20 591	182	20 591	273	2 402	113	2 365	150

3.1.2.2 Principe général des modèles statistiques et présentation des Modèles Linéaires Généralisés

Un modèle statistique est un moyen de décrire les mécanismes qui génèrent un jeu de données. C'est une simplification de la réalité sous forme d'une équation mathématique. Les données qui entrent dans le modèle vont grandement conditionner les effets que l'on pourra étudier et donc la complexité du modèle final (Pierre & Drouineau, 2012).

Un modèle GLM (Generalised Linear Model ; McCullagh & Nelder, 1989) fait le lien entre une variable à expliquer et des variables explicatives afin de quantifier l'influence de celles-ci ou de prédire. C'est une expression mathématique qui relie une variable dont la distribution appartient à la famille des exponentielles (i.e. loi normale, poisson, gamma ou binomiale (Wajnberg, 2011)) à une somme de variables explicatives continues ou qualitatives :

$$f(E(y)) = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \cdots + \beta_n \times x_n + \varepsilon \qquad \text{(eq. 2)}$$

où $E(y)$ est l'espérance de la variable réponse (qui est équivalente à sa moyenne attendue) ; *f(…)* la fonction de lien qui permet d'assurer la linéarité dans le modèle (i.e. y peut être exprimée comme une fonction linéaire de x) et de maintenir les prédictions dans une gamme de valeurs cohérentes avec la variable réponse ; β_0 l'intercept ou ordonnée à l'origine ; $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n$ les paramètres à estimer ; $x_1, x_2, \ldots, x_n$ les variables explicatives et ε le bruit (i.e. ce qui n'est pas expliqué par le modèle, un processus aléatoire).

De manière simplifiée, le GLM, va tenter de faire passer une droite au milieu du nuage de points en s'appuyant sur la méthode du maximum de vraisemblance, c'est-à-dire en cherchant le modèle qui rendra les observations les plus probables. Lorsque l'on utilise ce type de modèle, on fait des hypothèses qui conviennent d'être vérifiées : estimation non biaisée, normalité, homoscédasticité (variance constante) et indépendance du bruit (Pierre & Drouineau, 2012).

Lorsque la variable à étudier est binaire comme c'est le cas ici (i.e. présences (1) et absences (0)), on parle de GLM binomial ou encore de régression logistique. Le modèle cherche à prédire la probabilité de présence de l'espèce en fonction des variables explicatives. La fonction de lien est la fonction « logit » qui permet d'obtenir des prédictions entre 0 et 1. Cependant, les observations rentrées dans nos modèles ont pu être pondérées en utilisant le nombre d'individus capturés accidentellement lors de l'OdP. Ce nombre, plus précisément, correspondait au nombre d'individus mesurés par l'opérateur embarqué. Le postulat a été fait qu'il reflétait partiellement l'abondance des aloses. Cette pondération a été faite grâce à l'argument « *weights* » de la fonction *glm(…)* sous le logiciel R. Ceci a été fait en vue de maximiser la reconnaissance par le modèle des habitats très favorables à l'espèce. Le nombre d'individus n'a pas été utilisé tel quel mais catégorisé en fonction de sa répartition pour chaque espèce. Pour la Grande alose, les absences et les présences pour lesquelles aucun nombre d'individus n'avait été saisi correspondaient à la catégorie 1, 1 individu mesuré à la catégorie 2, ≤ 10 à la catégorie 3 et plus de 10 à la catégorie 5. Pour l'Alose feinte, le seuil de 10 a été changé en 15 car l'occurrence de cette espèce était plus forte.

3.1.2.2 Choix du meilleur modèle sur la base de l'AIC, de l'AUC et du rang de la déviance expliquée - Réalisation d'une validation pseudo-indépendante multiple

Toutes les combinaisons à une, deux, trois ou quatre variables potentiellement explicatives pour la période 2006-2016 et allant jusqu'à six pour la période 2012-2016 ont été écrites, avec les variantes « fond » et « surface » pour la salinité et la température, et uniquement « surface » pour la concentration en chlorophylle *a* et la turbidité. Les travaux de Trancart *et al.* (2014) avaient démontré l'importance de l'interaction des variables avec une échelle temporelle. Ainsi, ces différentes sommes de variables explicatives ont été écrites, sans échelle temporelle et avec deux alternatives d'échelle temporelle : mensuelle (variable « mois ») puis saisonnière (variable « bimois »). Ainsi, 166 combinaisons pour la période 2006-2016 et 465 pour la période 2012-2016 ont été testées et classées à l'aide de différents indices de performance présentés ci-après. Tous les modèles ont été calibrés sur 75 % du jeu de données. Puis, les modèles ont été validés sur les 25 % d'observations restantes pour évaluer leur capacité à reclasser correctement des observations non vues lors de l'apprentissage. Ces étapes ont été faites 200 fois sur 200 jeux de calibration et de validation tirés aléatoirement dans le jeu complet. Il s'agit d'une validation pseudo-indépendante multiple. Les différents modèles ont été hiérarchisés en fonction de leur déviance expliquée en calibration qui doit être la plus haute possible. Pour ce faire, le rang médian de chaque modèle a été calculé sur les 200 itérations, sur la base du critère de déviance expliquée D_e, qui s'obtient de la façon suivante :

$$D_e = 1 - \left(\frac{D_{r\ modèle\ testé}}{D_{r\ modèle\ nul}}\right) \qquad \text{(eq. 3)}$$

avec D_r la déviance résiduelle. Le modèle nul est le modèle avec uniquement l'intercept ou l'ordonnée à l'origine. La déviance résiduelle est le rapport des log-vraisemblances du modèle parfait et du modèle testé (ou du modèle nul) :

$$D_r = -2log\frac{L_m}{L_s} \qquad \text{(eq. 4)}$$

avec L_m et L_s les log-vraisemblances, respectivement pour le modèle parfait et pour le modèle testé (ou le modèle nul). Le modèle parfait est celui pour lequel la probabilité de rencontrer l'espèce vaut 1 là où on la rencontre et inversement. Pour chaque modèle, et à chaque itération, l'AUC (Area Under the Curve) en validation a été aussi calculée à partir de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) (Fielding & Bell, 1997). L'AUC évalue la capacité d'un modèle à correctement classer une espèce comme présente ou absente, en testant toute une gamme de seuil de coupure de probabilités. L'échelle de Swets (1988) indique qu'un AUC compris entre 0,9 et 1 est « excellent », entre 0,8 et 0,9 : « bon » et entre 0,8 et 0,7 : « moyen ». La valeur médiane de l'AUC en validation sur les 200 itérations a été calculée pour chaque modèle. Enfin, l'AIC (Akaike Information Criterion) (Burnham & Anderson, 2002) (i.e. critère pondérant le gain de vraisemblance par le nombre de paramètres du modèle) a été calculé pour chaque modèle sur le jeu complet.

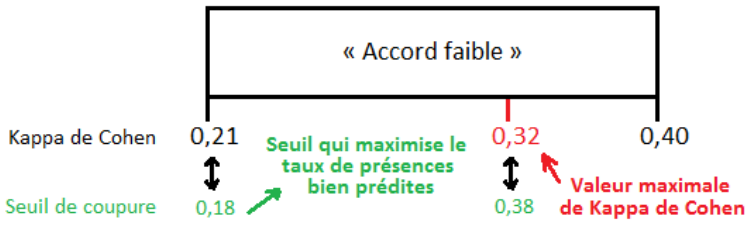
Le meilleur modèle est celui satisfaisant au mieux ces trois critères : meilleur rang médian, plus faible AIC et AUC en validation > 0,7. Pour le meilleur modèle, la contribution de chaque variable explicative a été testée en supprimant à tour de rôle la variable du modèle et en regardant l'écart de déviance expliquée. Plus la déviance expliquée chute après la suppression d'une variable, plus celle-ci est importante dans la combinaison et inversement.

Enfin, les courbes de réponse de chaque variable du modèle ont été représentées grâce à l'argument *« term »* de la fonction *predict(…)*. Les probabilités ont été calculées pour chaque variable du modèle en fixant les autres variables à leur valeur moyenne sur la base des recommandations suivantes : URL ; https://stackoverflow.com/questions/32915628/best-way-to-create-response-curves-for-a-glm-species-distribution-model-in-r.

3.1.2.3 Prédictions sur la grille de 20 × 20 km et précautions d'utilisation

Pour toutes les variables retenues dans les meilleurs modèles, une extraction de leur valeur, en tout centroïde des pixels, a été faite pour chaque jour des années 2008 et 2011 (modèles sur la période 2006-2016) et des années 2012 et 2014 (modèles pour la période 2012-2016) puis moyennée mensuellement. En effet, il a été choisi de représenter pour chaque modèle, et pour chaque espèce, deux années assez contrastées climatiquement pour voir si cela avait une influence sur la répartition des aloses en mer. L'année 2011 est, selon le bilan climatique de Météo France (URL ; http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques), au deuxième rang des années les plus chaudes depuis 1900 (+ 1.1°C/normale) et sèche tandis que l'année 2008 est considérée comme la plus fraîche de ces 10 dernières années avec un hiver cependant très doux. L'année 2014 est, quant à elle, la plus chaude depuis 1900 (+ 1.2°C/normale) mais pluvieuse (en moyenne les précipitations étaient > 10 % à la normale sur toute la France) alors que l'année 2012 est assez proche de la normale, avec tout de même des températures inférieures à la normale dans le Sud-Ouest et des mois de février, avril et juillet plus frais que la normale sur toute la France. Comme pour la phase de validation, la fonction *predict(…)* a été utilisée pour obtenir une probabilité pour l'habitat d'être favorable à l'espèce selon ces différentes conditions annuelles contrastées. Il a été fait le choix de ne représenter sur les cartes que les habitats « les plus favorables » aux aloses (i.e. les habitats avec une probabilité d'être favorable supérieure au seuil de coupure maximisant la classe du Kappa de Cohen). Le Kappa de Cohen calcule la capacité du modèle à re-classifier des observations catégorielles en tenant compte de la chance (Cohen, 1960). Landis *et al.* (1977) ont proposé une échelle de classification pour cet indice. Ainsi, l'indice de Kappa a été calculé pour tous les seuils compris entre 0 et 1 avec un pas de 0,01 sur le jeu complet. La valeur maximale de Kappa appartenait à la catégorie « Accord faible » de l'échelle de Landis *et al.* (1977) pour tous les modèles. Le seuil de coupure correspondant à la borne inférieure de cette classe (i.e. 0,21) a été relevé et utilisé pour la représentation des cartes comme le seuil qui maximise le pourcentage de présences bien prédites (fig. 12).

FIGURE 12. – Schématisation du choix du seuil pour représenter les habitats les plus favorables aux espèces



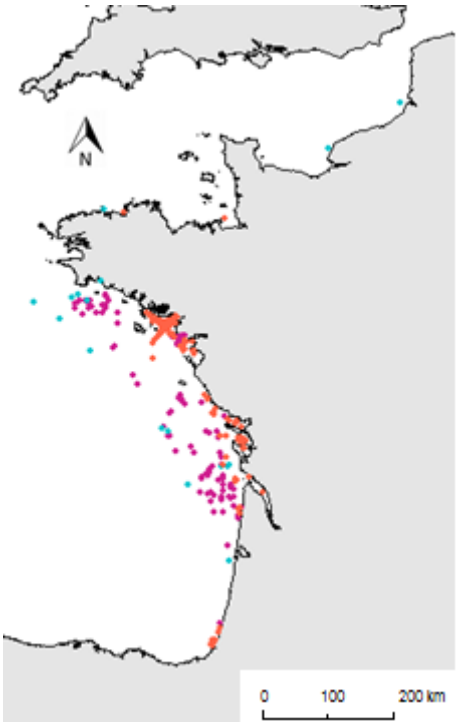
Suite à cela, si pour les deux années, le modèle conclut à la haute favorabilité d'un pixel, ce dernier a été représenté en vert. A l'inverse, si les conclusions diffèrent entre les années, le pixel jugé favorable pour une des deux années a été coloré selon une couleur spécifique à l'année (i.e. rose ou bleu). De plus, il a été rappelé dans les légendes des cartes qu'il s'agit d'une représentation des zones où les variables environnementales seraient favorables à la persistance des espèces mais en aucun cas la représentation de la distribution réelle des espèces ou de possibles zones de concentration des individus.

3.1.3 Validation du modèle par un jeu de données indépendant allant des années 80 à nos jours

Une validation supplémentaire des modèles a été envisagée suite à la redécouverte des documents papiers de la thèse de Catherine Taverny (Taverny, 1991) sur les aloses en mer (i.e. coordonnées des points de pêche, nombre d'aloses pêchées etc.). Partant de là, les autres sources de données de répartition des aloses à la mer pouvant être obtenues dans des délais compatibles avec le stage ont été balayées pour enrichir cette base de données de validation.

Ont été utilisées, les données biologiques de la thèse de Catherine Taverny (Taverny, 1991) (i.e. campagnes Ifremer RESSGASC, SOLDIF et EVOHE entre 1987 et 1989), une extraction des campagnes halieutiques NURSE, PECOS, SOLDIF (entre 1977 et 2008 ; comm. pers. Erwan Saulnier et Anik Brind'Amour) et une consultation des bases OBIS (Ocean Biogeographic Information System ; URL http://www.iobis.org/) et GBIF (Global Biodiversity Information Facility ; URL http://www.gbif.org/) pour construire ce jeu de 417 données de « présences » (fig. 13). Pour associer à ces points, parfois « anciens », des données environnementales, nous avons bénéficié du « rejeu » du modèle ECOMARS3D (zone Golfe de Gascogne) sur la période 1972-2008 (Huret *et al.*, 2013 ; requête auprès de Martin Huret). Les sorties de ce « rejeu » étaient sous la forme de moyenne sur trois jours. Les mêmes techniques d'extraction de données que dans la section *3.1.1.2* ont été utilisées. Concernant la turbidité de surface, cette variable n'était pas fournie par le « rejeu ». Les modèles 2012 n'ont pas pu être validés de cette façon. De nouveau, la fonction *predict(…)* a été employée afin de calculer, selon les meilleurs modèles, la probabilité associée à la combinaison de variables environnementales en chaque point du fichier.

FIGURE 13. – Présences du jeu de validation indépendant : données de la thèse de Catherine Taverny (violet), des campagnes halieutiques NURSE, PECOS et SOLDIF (orange) et celles des bases OBIS et GBIF (bleu)



3.2 Résultats

3.2.1 Les meilleurs modèles par période et par espèce

Pour la période 2006-2016, le meilleur modèle, selon les trois critères de sélection décrits en *3.1.2.2*, est le même pour les deux espèces :

Probabilité de favorabilité de l'habitat ~ Salinité de surface (mois) + Bathymétrie (mois) + Température de surface (mois) + Habitat en 7 modalités (mois) (eq. 5)

L'AIC est bien le plus faible pour ce modèle comparativement aux 165 autres combinaisons de variables testées et ce pour les deux espèces. Pour la Grande alose, la déviance expliquée en calibration est de 27 ± 4,8 % en moyenne et l'AUC médian en validation de 0,74 [0,52 – 0,77] tandis que pour l'Alose feinte, la déviance expliquée en calibration est de 31 ± 5,6 % en moyenne et l'AUC médian en validation de 0,77 [0,55 – 0,79]. Le modèle est donc légèrement plus performant pour *Alosa fallax.*

Pour la période 2012-2016, le modèle retenu parmi 465 combinaisons est de nouveau le même pour les deux espèces :

Probabilité de favorabilité de l'habitat ~ Salinité de surface (mois) + Bathymétrie (mois) + Température de surface (mois) + Concentration en chlorophylle a de surface (mois) + Turbidité de surface (mois) + Habitat en 7 modalités (mois) (eq. 6)

La déviance expliquée moyenne en calibration est de 29 ± 5,7 % pour *Alosa alosa* contre 38 ± 7,2 % pour *Alosa fallax*. L'AUC médian en validation est de 0,63 [0,47 – 0,72] et 0,74 [0,35 – 0,80] pour la Grande alose et l'Alose feinte, respectivement. Les deux modèles pour les deux espèces expliquent entre un quart à un tiers de la variabilité dans le jeu de données. Les modèles « fonctionnent » tous en validation pseudo-indépendante sans être néanmoins « bons » ou « excellents » selon l'échelle de Swets (1988).

Chaque variable lorsqu'elle est testée globalement (fonction *anova(…)*) est significative au seuil de 0,05. On constate que la bathymétrie et l'habitat sont les deux variables qui contribuent le plus à la déviance expliquée du modèle. Elles sont suivies par la température de surface, les autres variables n'apportant que peu au modèle (tab. 5).

TABLEAU 5. – Contribution des différentes variables à la déviance expliquée par le modèle pour chaque période et pour les deux espèces. Les cases vides indiquent que la variable n'avait pas été retenue/testée dans le modèle

Variable environnementale	**Contribution de la variable (rang parmi l'ensemble des variables du modèle)**			
	Modèle 2006-2016		Modèle 2012-2016	
	Alosa alosa	*Alosa fallax*	*Alosa alosa*	*Alosa fallax*
Bathymétrie	2	1	2	2
Température de surface	3	3	3	3
Salinité de surface	4	4	6	6
Habitat en 7 modalités	1	2	1	1
Chlorophylle *a* de surface			4	4
Turbidité de surface			5	5

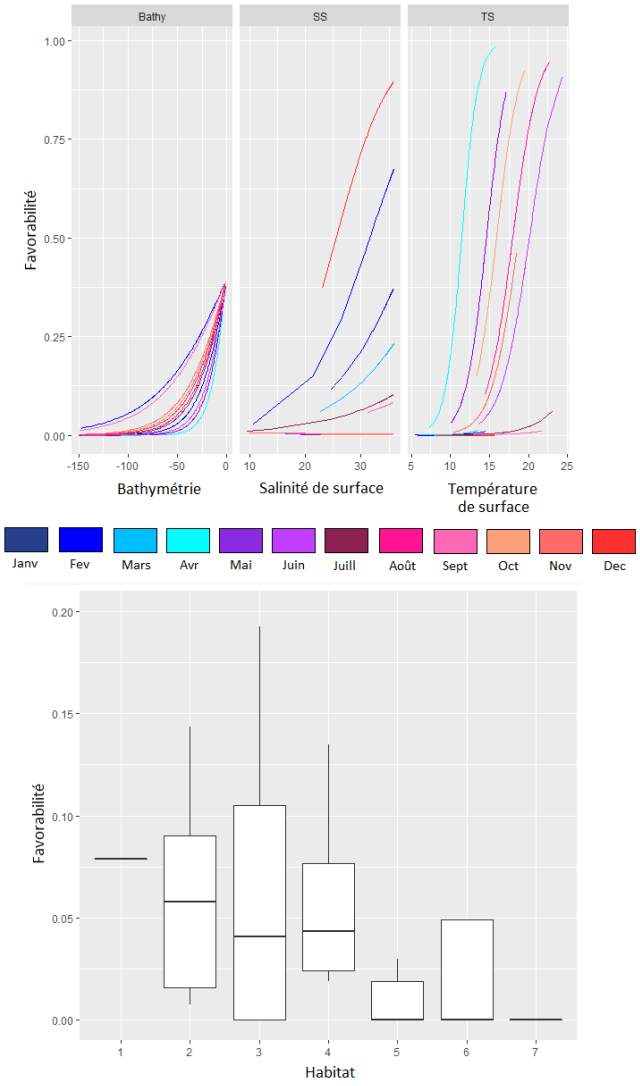
En analysant les pentes des différentes courbes de réponse sur les 12 mois de l'année (tab. 6 pour une synthèse annuelle, fig. 14 pour un exemple de courbe de réponse et ann. 4 pour l'ensemble des courbes de réponse), la favorabilité de l'habitat diminue systématiquement avec la profondeur, est plus élevée pour les habitats à substrats fins et peu lumineux (i.e. modalité « Circalittoral homogeneous fine : sand and mud ») pour l'Alose feinte tout comme la Grande alose avec également la fréquentation pour cette espèce d'habitats moins profonds et riches en laminaires (i.e. « Infralittoral rock ») mais de manière plus variée au cours de l'année (i.e. boxplot plus large indiquant de la variabilité inter-mois). La favorabilité de l'habitat augmente également avec la température à l'exception du mois de décembre pour la Grande alose et de juillet pour l'Alose feinte (mais de manière non significative). Enfin, la réponse à la salinité est plus difficile à

synthétiser et varie tout au long de l'année (i.e. pentes tantôt positives, négatives, faibles ou fortes, significatives ou non). Il en est de même pour la turbidité. Quant à la chlorophylle *a* de surface, la relation est positive en début d'année pour la Grande alose alors qu'elle l'est plutôt en été et hiver pour l'Alose feinte.

TABLEAU 6. – Sens de la relation entre la favorabilité de l'habitat et les différentes variables environnementales des modèles synthétisé sur l'ensemble d'une année. Habitat 1 = Circalittoral homogeneous fine (sand and mud). Habitat 6 = Infralittoral rock. Le terme « varié » indique que la relation change fréquemment en fonction du mois de l'année

Variable environnementale	**Sens de la relation résumé sur l'année**			
	Modèle 2006-2016		Modèle 2012-2016	
	Alosa alosa	*Alosa fallax*	*Alosa alosa*	*Alosa fallax*
Bathymétrie	↘	↘	↘	↘
Température de surface	↗	↗	↗	↗
Salinité de surface	varié	varié	varié	varié
Habitat en 7 modalités	6 et 1	1	6 et 1	1
Chlorophylle *a* de surface			↗ décembre à juin	↗ hiver et été
Turbidité de surface			varié	varié

FIGURE 14. – Exemple de courbes de réponse, ici pour le modèle Alosa fallax *sur la période 2006-2016. L'axe des Y correspond à la favorabilité des habitats exprimée en %. Une courbe est calculée et représentée pour chaque mois pour les variables quantitatives continues. Pour la variable catégorielle « habitats », la représentation choisie est un box plot. Le trait noir correspond à la médiane. Voir tab. 3 pour la correspondance du code numérique de l'habitat*



3.2.2 La validation par le jeu de données indépendant

Sur les 417 points du jeu de validation indépendant, 335 ont pu être associés à des valeurs environnementales de température et de salinité de surface (i.e.182 pour *Alosa alosa* et 153 pour *Alosa fallax*). Les 82 autres ne se trouvaient pas dans la zone couverte par le modèle ECOMARS3D. En reprenant le seuil qui maximise le pourcentage de présences bien prédites (*3.1.2.3*), le nombre de présences bien prédites a pu être calculé pour les deux modèles de la période 2006-2016. Pour la Grande alose, 80 % de présences du jeu de validation sont bien prédites. Ce chiffre atteint 86 % pour l'Alose feinte. Les modèles semblent donc bons pour prédire les habitats favorables. Comme indiqué plus haut, les modèles sur la période 2012-2016 n'ont pas pu être validés par cette méthode étant donné que la variable « turbidité » retenue dans les modèles n'était pas disponible dans le « rejeu » d'ECOMARS3D. Cependant, comme vu plus haut, aucun de ces modèles n'échoue en validation pseudo-indépendante sans cependant démontrer de hautes performances.

3.2.3 Les cartes de prédiction

Les quatre jeux de cartes de prédictions sont consultables en annexe 5. Les seuils qui maximisent le taux de présences bien prédites comme expliqué au *3.1.2.3* sont de 0,18 pour les modèles de la période 2006-2016 et pour la période 2012-2016 de 0,16 et 0,11 respectivement pour la Grande alose et l'Alose feinte.

Ici, le choix a été fait de ne présenter dans le corps du document que le jeu de cartes présentant les patrons spatiaux et temporels les plus marqués à savoir les prédictions issues du modèle 2006-2016 pour la Grande alose (fig. 15).

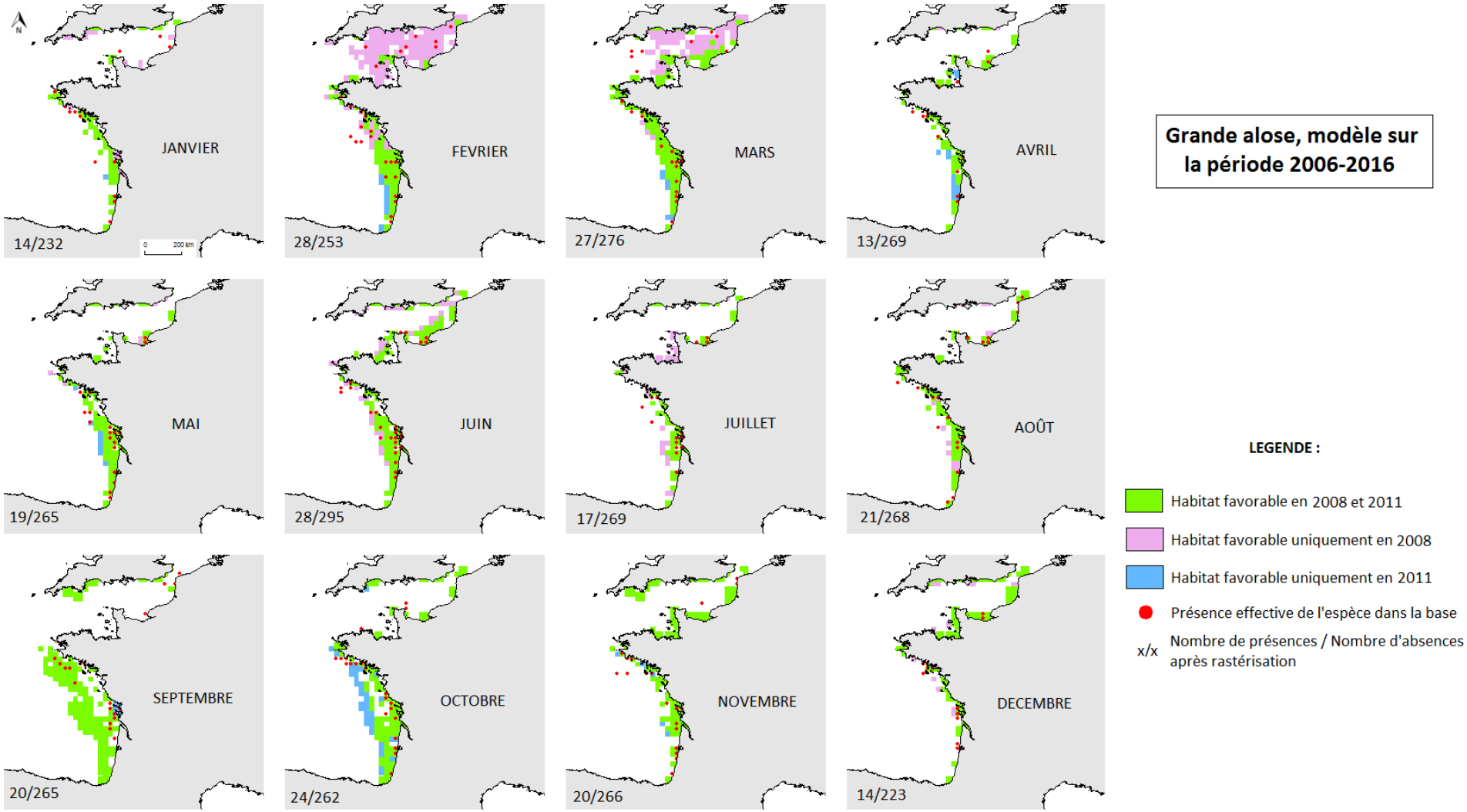
Trois grandes caractéristiques peuvent être notées au cours de l'année et se rapprochent de celles émises par Trancart *et al.* (2014) à l'issue de leur travail de modélisation sur la zone Nord-Gascogne-Manche.

Premièrement, on observe un « cordon » d'habitats favorables à la côte entre mars et août pour les deux espèces. Puis, à l'automne, des habitats favorables sont plus océaniques. Enfin, au mois de décembre, pour l'ensemble des simulations, la proportion d'habitats favorables diminue drastiquement et ces habitats ne sont plus qu'exclusivement côtiers voire littoraux. Par ailleurs, des habitats favorables ressortent plus fréquemment en Manche pour l'Alose feinte (sur les mois d'octobre et novembre plus précisément) en lien avec sa limite nord de répartition connue pour être plus septentrionale.

En lien avec cette faible proportion d'habitats favorables au mois de décembre, il a été vérifié que le nombre d'opération de pêche n'était pas sensiblement inférieur en fin d'année, que les navires ne sortaient pas moins au large du fait des conditions météorologiques et que les sorties ne correspondaient pas qu'à certains types de flottilles capturant accidentellement peu ou pas d'aloses d'après la base Obsmer. Ce patron du mois de décembre n'est donc vraisemblablement pas lié à une tendance dans la « pression d'observations » comme cela pouvait être supposé.

Enfin, on constate que la zone Finistère-Nord et la partie occidentale des Côtes d'Armor comptent très peu d'habitats favorables aux aloses selon les modèles, en lien avec le très faible nombre de captures accidentelles recensées dans la zone par Obsmer. Cette zone se caractérise notamment par des habitats de type « Circalittoral mixed to coarse sediments », même près des côtes, ce qu'on ne retrouve pas ailleurs. De plus, dans cette zone, l'isobathe des 100 m est très proche de la côte. Ces deux éléments pourraient être reliés à la faible favorabilité de cette zone pour les aloses. A l'inverse, la côte landaise (zone non-couverte par le travail de Trancart *et al.* (2014)) qui se caractérise par des habitats sableux avec peu de rivières (i.e. uniquement des « courants » correspondant aux exutoires des grands lacs sud-aquitains) est identifiée par les présents modèles comme favorable aux aloses.

FIGURE 15. – Prédiction du modèle de la Grande alose sur la période 2006-2016 pour les années 2008 et 2011



3.3 Discussion

Travailler avec des bases de données « externes » comme ce fut le cas ici est un exercice complexe à plusieurs égards. Les données Obsmer doivent être demandées à la DPMA en amont du démarrage du stage afin de prendre en compte le délai de traitement des requêtes (i.e. plusieurs semaines) et aussi avec le maximum de détails possibles afin d'éviter les confusions dans la demande et donc des pertes de temps pour les services impliqués. De plus, les sorties des modèles biogéochimiques disponibles via le site MARC étaient volumineuses, car à l'échelle horaire. Il y a donc eu un travail de téléchargement puis d'extraction parmi des milliers de fichiers afin de mettre en correspondance les données de présences/absences avec les variables environnementales à tester. Enfin, l'obtention des données du « rejeu » d'ECOMARS3D a dépendu de contraintes personnelles et professionnelles du chercheur en charge de ce jeu de données.

De plus, certaines données considérées comme intéressantes n'ont pas pu être exploitées. C'est le cas de la variable « durée de l'opération de pêche » présente dans les tables Obsmer. Nous pensions l'utiliser pour pondérer l'importance des « présences » dans la base biologique construite pour ce stage en partant du postulat que les conditions environnementales étaient d'autant plus favorables moins le temps de pêche ayant conduit à la capture d'aloses était long. Malheureusement, cette information remplie par les observateurs en mer n'était pas homogène. Certains rentraient la durée de l'opération de pêche alors que d'autres saisissaient la durée totale de la marée, ce qui a rendu l'utilisation de cette variable impossible. C'est pourquoi le choix a ensuite été fait d'utiliser une variable représentant le nombre d'aloses capturées par opération de pêche. Le nombre total n'étant pas renseigné, nous avons utilisé le proxy du nombre d'aloses mesurées par l'observateur.

Cet exercice a été formateur en soulignant l'importance de l'anticipation et de la précision pour l'obtention des données puis de l'apprentissage du contenu des bases afin de ne pas se tromper sur le sens des variables et donc dans leur utilisation.

Il faut rappeler que ce travail s'appuie sur des données de pêcheries mais qu'aucune ne cible spécifiquement les aloses, celles-ci étant capturées accidentellement. Ceci implique de se poser la question de savoir si ce que l'on observe est lié à la pression d'observation (e.g. saisonnalité d'une pêcherie) ou bien à l'écologie des espèces d'intérêt. Cependant, dans le cadre de ce stage, le fait de travailler sur 14 ans de données et sur tous les engins répertoriés dans la base (soit 30 au total) facilite l'attribution de patrons à l'écologie des espèces et ne nécessite que dans certains cas de revenir à la pression d'observation.

En lien direct avec le point précédent, le nombre d'absences dans la base était non-balancé par rapport au nombre de présences. La rastérisation ajoutée à la pondération des présences ont tenté de pallier à ce constat. D'autres méthodes auraient pu être appliquées afin d'améliorer la balance entre les deux catégories de notre variable réponse (e.g. génération de pseudo-absences ou absences artificielles (Barbet-Massin *et al.*, 2012), sous-échantillonnage dans les absences de la base biologique). Ici, le choix a été fait de rester proche du travail effectué par Trancart *et al.* (2014) afin de gagner en comparabilité et donc en robustesse des conclusions quant à la répartition en mer des aloses et donc de reprendre la méthode de rastérisation de l'information sur des carrés de 20 x 20 km. De plus, cette méthode permettait de limiter l'erreur induite au moment de la construction de la base de données biologique, où les coordonnées des points de « présences » étaient attribuées au milieu du trait de pêche, en favorisant un habitat plus large. Enfin, cela permettait également d'améliorer la robustesse des données environnementales associées à un pixel puisqu'il s'agissait d'une moyenne sur plusieurs jours, mois et années différents.

Les modèles finaux expliquent entre un quart et un tiers de la variabilité dans les observations. Par comparaison, des modèles pour les poissons démersaux expliquaient entre 25 et 74 % de déviance (Llorey *et al.*, 2002 ; Santoul *et al.*, 2005) et entre 16 et 58 % pour des poissons récifaux/estuariens (Vasconcelos *et al.*, 2010). Ces valeurs, dans la partie plutôt basse de la gamme possible pour ces types de modèles, peuvent être dues à l'origine des données d'occurrences comme expliqué plus haut, à la sélection des variables environnementales potentiellement explicatives, à des questions relatives au traitement statistique mais aussi au niveau de population des aloses très bas depuis le milieu des années 90 (MIGADO, 2015), qui pourrait atténuer le message écologique porté par les données.

De plus, il n'est pas facile de savoir quels individus sont capturés et représentés sur les cartes de prédiction au vu du nombre de cohortes qui se mélangent en mer pour ces espèces et du cycle biologique complexe de l'espèce impliquant des allers-retours avec le milieu continental. Mais, on peut dire qu'il est sans doute difficile de « voir » les juvéniles sachant que les engins utilisés pour construire la base de données biologiques ont des mailles trop grandes pour les pêcher, ceci est confirmé par l'analyse des classes de tailles dans la table HL. Il s'agit donc plus vraisemblablement des géniteurs et des sub-adultes en croissance mais qu'on ne peut pas différencier via notre modèle.

Le choix fait pour la partie prédictive (i.e. utilisation des modèles pour calculer la favorabilité des habitats pour deux années contrastées climatiquement) est un compromis entre le temps de traitement de l'ensemble des couches environnementales qu'il aurait fallu pour prédire sur une moyenne décennale 2006-2016 et la problématique du sujet de stage à savoir l'impact du changement climatique. Ce parti-pris donne ainsi des premiers éléments quant à la réponse des aloses dans le contexte du changement climatique. Le plateau continental français du Golfe de Gascogne constitue une zone stable de favorabilité des habitats. En fonction du profil thermique et pluviométrique de l'année de prédiction, les habitats favorables varient principalement à la marge, notamment en Manche et en limite de plateau continental voire sur le talus. Ces habitats sont prédits comme favorables lors d'hivers doux ou d'années chaudes.

En dernier lieu, la période couverte par les données Obsmer est déjà marquée par le changement climatique (GIEC/IPCC, 2014). Il faut donc garder en tête que les données peuvent refléter une distribution « adaptée » des espèces à ce nouveau contexte. Cependant, les données plus anciennes du jeu de validation indépendant ne montrent pas de changements notables dans la répartition et se confondent avec les données plus récentes de la base Obsmer (fig. 10 et fig. 13).

Les points de discussion relatifs à l'écologie des espèces sont principalement détaillés dans la conclusion générale, à l'issue de la présentation des différentes parties du stage. Mais, on peut d'ores et déjà dire que les résultats relatifs au mois de décembre peu favorable à ces espèces sont en accord avec les observations de Nàchon-Garcia *et al.* (2015) en Galice (Espagne) où, sur un suivi entre 1987 et 2013 en criée, le nombre d'aloses débarquées en décembre chutait puis ré-augmentait le mois suivant. Ceci laisserait également supposer, comme dans notre étude, un rapprochement à la côte de ces espèces voire une présence plus estuarienne qu'océanique. Cependant il reste à vérifier que les captures d'autres espèces ne diminuent pas aussi en décembre afin de s'assurer de la signification écologique de ce résultat.

4. Projection de la distribution des aloses dans le contexte du changement climatique

Cette partie avait pour objectif de simuler les effets du changement climatique sur la répartition des habitats favorables en mer des aloses. Pour cela, des conditions environnementales probables dans le contexte du changement climatique ont été appliquées aux modèles finaux afin de calculer la probabilité des habitats d'être favorables aux aloses à l'horizon 2100.

4.1 Matériel et méthodes

4.1.1 Description des changements attendus

Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; GIEC/IPCC, 2014) prévoit une élévation de la température moyenne à la surface du globe (température de l'air et température des océans confondues) comprise entre 0,3°C et 4,8°C à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005 pour tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Concernant les précipitations, les événements extrêmes devraient se multiplier, les régions sèches deviendraient plus sèches et les régions humides plus humides, creusant ainsi les inégalités.

L'Atlas MEECE (Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environnement ; URL http://www.meeceatlas.eu) conclut, pour le Golfe de Gascogne, à une élévation de la température de surface d'environ 3,5°C pour la fin du siècle par rapport à la période 1980-2000 (d'après le scénario A1B), avec une élévation plus importante à proximité des côtes pouvant atteindre 5,9°C. Pour la Mer du Nord (comprenant la Manche), le même groupe de chercheurs prévoit une élévation de la température de surface de 2-3°C d'ici 2100 (d'après le scénario A1B) et répartie uniformément sur toute la zone.

Par ailleurs, les estuaires européens sont de plus en plus nombreux à être soumis à un phénomène de marinisation comme c'est le cas pour l'estuaire de la Gironde (David *et al.,* 2005). Ce phénomène est à mettre en lien avec l'augmentation des prélèvements d'eau pour l'irrigation, la modification du lit des cours d'eau et des phénomènes d'ordre climatique comme l'élévation du niveau marin et un changement de précipitations. L'estuaire de la Seine pourrait être aussi sujet à une remontée du front de salinité à l'horizon 2100 (Projet Messcene ; Bacq *et al.,* 2013).

D'après Bopp *et al.* (2013) et une communication personnelle de l'auteur principal, la production primaire nette du Golfe de Gascogne devrait baisser de 35 à 25 % d'ici la fin du siècle, par rapport aux années 1990, selon la dernière génération de scénarios d'émission de gaz à effet de serre ou RCP « Representative Concentration Pathways » (RCP 8.6, 6.0, 4.5 et 2.6).

4.1.2 Rédaction du scénario d'évolution probable des variables climatiques

Premièrement, il fallait définir un point de départ auquel appliquer des augmentations ou des diminutions de grandeurs correspondant à notre scénario de changement climatique. Le choix a été fait de travailler avec les données de l'année 2012 extraites lors de l'exercice de prédiction (*3.1.2.3*). En effet, cette année est considérée par Météo France comme une des plus proches de la normale dans la dernière décennie et sera prise comme base pour représenter les conditions environnementales actuelles. Ces données seront modifiées selon le scénario décrit ci-après et le modèle appliqué à ce jeu de données.

Au vu de la période de référence tardive (i.e. 2012) retenue, il a été nécessaire de s'informer des changements observés pour affiner les valeurs de température dans le scénario.

D'après le dernier rapport du GIEC (GIEC/IPCC, 2014), l'élévation de la température des océans est plus prononcée pour la couche de surface avec les 75 premiers mètres qui se sont réchauffés d'environ 0,11°C/décennie entre 1971 et 2010.

D'après Le Treut (2013), la zone mésohaline de l'estuaire de la Gironde s'est réchauffée de 2°C entre 1978 et 2011. Enfin, d'après Koutsikopoulos *et al.* (1998), la température de surface du Golfe de Gascogne s'est réchauffée d'environ 1,4°C entre 1972 et 1993. Ainsi, 1,5°C ont été enlevés aux estimations de l'Atlas MEECE pour l'élévation de température de surface à l'horizon 2100 selon le scénario A1B. Ainsi, la température des pixels du Golfe de Gascogne proches des côtes a été augmentée de 4,5°C tandis qu'ailleurs, elle a été augmentée de 2°C par rapport à celles de l'année 2012.

D'après l'étude du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Seine-Aval sur la remontée du front de salinité dans le contexte du changement climatique, les salinités entre 12 et 25 PSU ne vont pas foncièrement remonter vers l'amont. Par contre, celles entre 25 et 30 PSU risquent fortement de devenir supérieures à 30 PSU à l'horizon 2100. Ainsi, les salinités entre 25 et 30 ont été remplacées par une salinité de 31 PSU alors que les autres sont restées inchangées à l'horizon 2100.

Pour la concentration en chlorophylle *a*, il a été fait le choix d'utiliser les prédictions de la publication et de la communication personnelle de Bopp *et al.* (2013) pour l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi, la concentration en chlorophylle *a* a été diminuée de 30 % dans chaque pixel de la zone d'étude à partir de leur valeur en 2012.

4.1.3 Extrapolation du modèle

Comme pour la partie prédiction sur les années climatiquement contrastées (section *3.1.2.3*, éléments non-montrés), il a été vérifié que les valeurs des variables environnementales ne sortaient pas de l'intervalle de calibration du modèle (tab. 7). L'extrapolation est le fait de prédire sur des valeurs en dehors de la gamme sur laquelle le modèle a « appris » les courbes de réponse. En faisant cela, on fait le postulat qu'il n'y a pas de rupture dans la réponse vis-à-vis d'une variable environnementale au-delà de la gamme de calibration. Ainsi, mieux vaut projeter dans une gamme identique, plus restreinte ou légèrement plus large que la gamme de calibration pour rester biologiquement « juste ».

TABLEAU 7. – Gammes des valeurs prises par les variables environnementales pour les deux modèles et les deux espèces lors de la calibration (section 3.1.2) et de la projection sous contrainte de changement climatique. Les variables en gras sont celles sur lesquelles s'applique le scénario de changement climatique décrit en section 4.1.2

Variable	**Calibration**		**Projection**
	Modèle 2006-2016	*Modèle 2012-2016*	
Bathymétrie	[-150 ; -0,9]	[-150 ; -3,2]	[-150 ; -3,2]
Température de surface	[5,5 ; 24]	[5,5 ; 23]	[7 ; 27]
Salinité de surface	[9 ; 36]	[9 ; 36]	[14 ; 36]
Chlorophylle *a* de surface		[0,17 ; 14]	[0,12 ; 9,8]
Turbidité de surface		[0 ; 1,66]	[0 ; 1,28]

On observe uniquement une extrapolation pour la température de surface de l'ordre de 4°C. Comme présenté en *3.1.2.2*, l'emprise spatiale du modèle ne couvrant pas la totalité de l'aire de distribution historique des aloses, elle ne permet donc pas de savoir à partir de quelles températures, la favorabilité de l'habitat commencerait à diminuer. En effet, les courbes de réponse sont le plus généralement en cloche avec un optimum au-delà duquel le caractère suivi diminue avec la température (e.g. pour les poissons migrateurs amphihalins de l'Europe de l'Ouest : Lassalle *et al.*, 2008 ; Lassalle & Rochard, 2009). Cependant, sachant que la Grande alose était présente dans les bassins marocains et que l'Alose feinte se reproduit encore dans des bassins versants méditerranéens, projeter sur la base d'une température maximale de surface de 27°C au lieu de 23°C ne semble pas aberrant biologiquement.

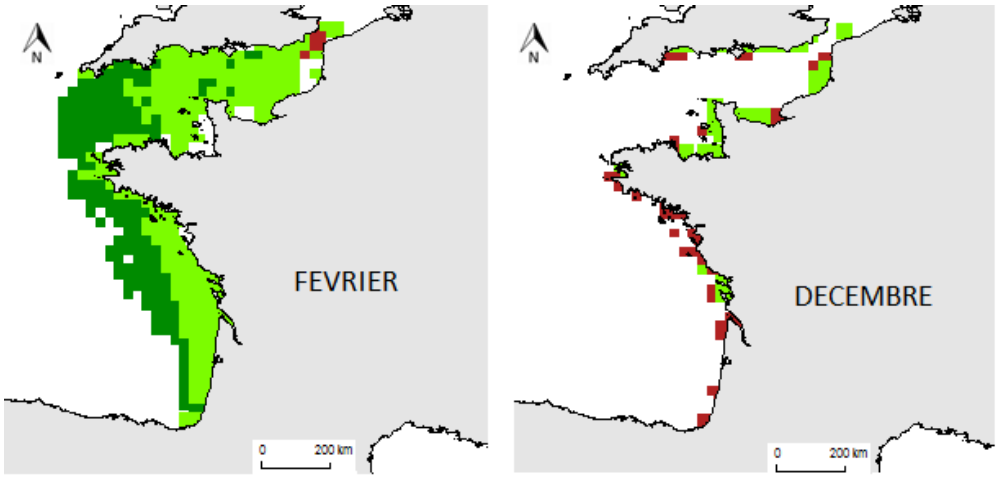
4.1.4 Projection dans le contexte du changement climatique et réalisation des cartes

A l'aide de la fonction *predict(...)*, la répartition des habitats favorables aux aloses a été calculée à l'horizon 2100 selon le scénario décrit ci-dessus. En d'autres termes, pour chaque espèce, les deux modèles finaux (i.e. modèle 2006-2016 et modèle 2012-2016) ont été appliqués sur le jeu de données environnementales de la fin du siècle. Pour mieux apprécier les changements d'habitats favorables susceptibles d'intervenir en contexte de changement climatique, les cartes obtenues ont été mises en vis-à-vis de celles produites pour les paires d'années 2008/2011 et 2012/2014 (fig. 15 et ann. 5). Un code couleur a été mis en place : si l'habitat était favorable pour une des deux années (violet ou bleu de la fig. 15) ou les deux (vert clair de la fig. 15) et qu'il est favorable en 2100, alors le pixel est coloré en vert clair ; si l'habitat était défavorable et qu'il devient favorable, le pixel est coloré en vert foncé ; enfin si l'habitat était favorable pour une des deux années ou les deux et qu'il devient défavorable alors le pixel est représenté en rouge. On représente ainsi les pertes et les gains d'habitat potentiel à l'horizon 2100 sous contrainte de changement climatique.

4.2 Résultats

Les quatre jeux de cartes projetées en contexte de changement climatique sont consultables en annexe 6. Tout d'abord, il faut préciser que ces cartes ne prédisent pas les changements de distribution des espèces mais simplement la modification de la disponibilité des habitats qui leur sont favorables (Guisan & Zimmermann, 2000). Globalement, les changements globaux envisagés ne semblent pas néfastes aux deux espèces et étant donnée la stabilité des habitats favorables, il n'a pas été calculé de pourcentages de perte ou de gain. En effet, les habitats préférentiels actuels seraient préservés et de nouveaux, plus au large, pourraient accueillir ces deux espèces. On remarque néanmoins pour certains mois la « disparition » d'habitats favorables, surtout pour le mois de décembre (déjà peu favorable dans les modèles de la Grande alose) (fig. 16). Après analyse des courbes de réponse pour ces mois-ci, on remarque qu'il s'agit des mois où la relation entre habitat et salinité (ou température) a un signe négatif mais pas nécessairement de manière significative.

FIGURE 16. – Projection des habitats favorables en mer pour la Grande alose (modèle 2006-2016) à l'horizon de la fin du siècle selon un scénario de changement climatique tel que défini en section 4.1.4. En vert clair sont représentés les habitats prédits comme favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011) et restant favorables dans le contexte du changement climatique. Les habitats non favorables en 2008 et 2011 mais devenant favorables pour la fin du siècle sont en vert foncé. Les habitats favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011) et devenant défavorables sous contrainte du changement climatique sont en rouge foncé



4.3 Discussion

Premièrement, les modèles ECOMARS3D et MARS3D n'ont jamais été projetés en SRES (Second Report on Emission Scenario) ou RCP, à savoir les deux générations de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC/IPCC. C'est pourquoi, nous sommes partis sur l'idée d'un « scénario exploratoire » sous la forme de grandes règles d'application (i.e. un pourcentage de changement sur une ou plusieurs variables environnementales appliqué à l'ensemble de la zone ou à une portion spécifique) qui soient fidèles aux études menées sur le changement climatique pour la région Manche-Golfe de Gascogne.

Si l'évolution probable de la température de l'eau à l'issue du XXI^{e} siècle est bien étudiée, même à une échelle régionale (e.g. projet MEECE), ce n'est pas le cas pour la salinité. D'après le dernier rapport du GIEC basé sur un ensemble de modèles bioclimatiques globaux (GIEC/IPCC, 2014), la tendance serait à une baisse de salinité dans l'Atlantique Nord mais les modèles ne couvrent pas les zones côtières utiles à notre travail. Nous n'avons pas trouvé d'exercices de modélisation régionale fournissant des estimations de changement de salinité pour la zone Manche-Golfe de Gascogne. Cependant, comme vu plus haut, une marinisation des fleuves en Europe est déjà observable et va sans doute se poursuivre (David *et al.,* 2005 ; Bacq *et al.,* 2013 ; Chaalali *et al.,* 2013), induisant une remontée d'eau salée plus en amont des fleuves. Ainsi, les changements de salinité à la hausse appliqués concernaient uniquement les zones pouvant être soumises à marinisation.

Quant à l'effet de la température, il convient de rappeler ici que la zone d'étude ne permet pas de connaitre les limites haute et basse de température couvertes par les aloses (*4.1.3*). Ceci ajouté au fait que les courbes de réponse sont majoritairement de type « droites ascendantes », même une élévation substantielle de la température dans notre scenario ne pourrait pas être néfaste aux aloses. Il convenait donc de s'assurer que le scénario thermique était tout de même dans une gamme acceptable biologiquement par les aloses, ce qui était bien le cas.

La Grande alose a fait l'objet de nombreux travaux de modélisation sur les impacts attendus du changement climatique, via sa composante thermique, sur sa répartition continentale (Lassalle *et al.,* 2008 ; Rougier *et al.,* 2015) et il semblerait que cette espèce soit capable de se repositionner pour aller chercher des habitats qui lui sont nouvellement favorables. Quant à l'Alose feinte, ce serait, d'après Lassalle (2008), l'une des rares espèces migratrices amphihalines européennes qui, avec le Mulet Porc (*Liza ramada*), aurait une balance positive entre gains et pertes d'habitats favorables à l'échelle de son aire de répartition. Ainsi, il est apparu que le changement climatique ne serait pas une contrainte majeure pour les aloses, du moins lorsqu'étudié sous sa composante thermique. Les conclusions en mer semblent corroborer ces éléments. Néanmoins, des interrogations subsistent pour ces espèces au cycle de vie si complexe sur le découplage entre les signaux marins et continentaux du fait du changement climatique (e.g. Lin *et al.,* 2017). Les signaux marins pourraient notamment enclencher la migration de montaison pour des conditions continentales non-optimales.

5. Utilisation des résultats à des fins de conservation

Ce travail sur l'aspect « conservation » a été initié après discussion avec des membres de l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB ; corres. Guillaume Paquignon). En effet, ces zones de protection comme, par exemple, les Aires Marines Protégées (AMP) ont des leviers d'action au travers de leur plan de gestion pour protéger les migrateurs amphihalins et donc les aloses. Cependant, le premier prérequis est d'estimer la part d'habitats essentiels (e.g. reproduction, nourriceries, refuge, repos…) pour les espèces d'intérêt qui sont intégrés dans le réseau d'AMP.

À la suite de ce travail de stage sur la modélisation de la distribution en mer des aloses, nous avons croisé les cartes d'habitats favorables actuels avec la couche SIG (Système d'Information Géographique) représentant les limites des AMP dans les eaux françaises afin de calculer des pourcentages de recouvrement. Il s'agit d'une analyse de la suffisance du réseau d'AMP français vis-à-vis des aloses, comme cela a pu être fait pour les mammifères marins dans la même région (Lambert *et al.*, 2017).

5.1 Matériel et méthodes

Les délimitations des AMP françaises ont été obtenues sur les portails cartographiques MAIA (Marine protected Areas In the Atlantic arc ; réseau d'AMP Iroise > frontière espagnole ; http://www.maia-network.org/accueil) et PANACHE (Protected Area Network Across the Channel Ecosystem ; réseau d'AMP Manche > Parc Naturel Marin d'Iroise ; http://www.panache.eu.com/accueil_panache).

Web services MAIA :	**Web services PANACHE:**
http://datacarto.maia-network.org/WMS/1/maia	http://datacarto.panache.eu.com/WMS/1/panache
http://datacarto.maia-network.org/WFS/1/maia	http://datacarto.panache.eu.com/WFS/1/panache

Ont été omises les zones de protection aviaires comme les sites Natura2000 issus de la Directive Oiseaux. Ont ensuite été superposées les cartes de prédiction des habitats favorables actuels pour les deux modèles et pour les deux espèces (fig. 15 et ann. 5). Le nombre de centroïde compris dans la délimitation des AMP a été compté puis multiplié par la surface d'un pixel, à savoir 400 km² (20 x 20 km). La surface ainsi obtenue a été divisée par la surface totale des pixels composant l'AMP et ramenée en pourcentage pour évaluer le taux de recouvrement.

5.2 Résultats

Tout d'abord, nous rappelons que les modèles expliquent entre un quart et un tiers de la déviance expliquée, les résultats ci-après sont donc à pondérer.

En moyenne, le réseau d'AMP couvre un tiers des habitats favorables annuels de la Grande alose et de l'Alose feinte (fig. 17 et tab. 8). Les mois de septembre et d'octobre marqués par un éloignement à la côte des habitats favorables (au-delà de l'isobathe des 300 m) présentent des taux de recouvrement faibles. De même, les mois de février et mars qui comptent une surface d'habitats favorables très importante (là encore de la côte jusqu'à l'isobathe des 300 m mais également en Manche) ont un taux de recouvrement bas. Par contre, les mois de migration (entre avril et août) caractérisés par un rapprochement des espèces à la côte sont relativement bien intégrés dans le réseau d'AMP puisqu'on dépasse la moyenne annuelle.

FIGURE 17. – Superposition du réseau d'aires marines protégées aux cartes de prédiction mensuelles (mars et novembre) des habitats favorables de la Grande alose pour le modèle 2006-2016. En vert : habitats favorables pour les deux années (i.e. 2008 et 2011) ; en bleu : pour une année particulièrement chaude (i.e. 2011) ; en rose : pour une année plutôt fraiche mais avec un hiver doux (i.e. 2008). Les zones en bleu hachurées correspondent aux AMP. Les isobathes jusqu'à 300 m de fond sont représentés par des lignes continues grises. Voir ann. 7 pour l'ensemble des jeux de cartes mensuelles pour les deux espèces et leurs deux modèles

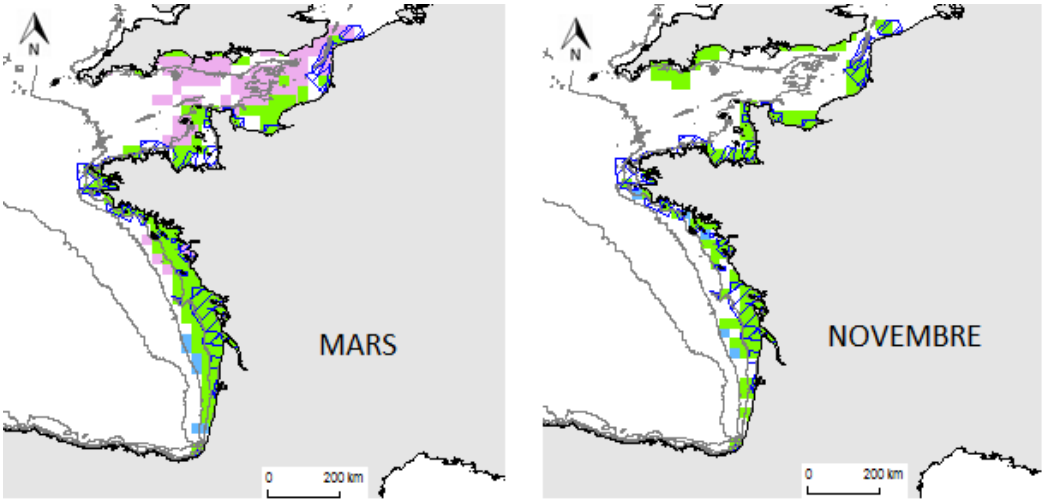


TABLEAU 8. – Estimation de la suffisance du réseau d'AMP pour les deux modèles de chaque espèce sur un pas de temps mensuel. Les valeurs correspondent à des pourcentages

Mois	**Pourcentage des habitats favorables dans les AMP françaises**			
	Modèle 2006-2016		Modèle 2012-2016	
	Alosa alosa	*Alosa fallax*	*Alosa alosa*	*Alosa fallax*
Janvier	44	23	54	26
Février	19	18	15	19
Mars	24	22	29	23
Avril	47	47	26	49
Mai	40	55	62	66
Juin	30	47	32	42
Juillet	45	52	50	51
Août	51	44	49	48
Septembre	13	39	9	35
Octobre	27	26	26	18
Novembre	42	21	36	16
Décembre	42	45	56	58
TOTAL	**35**	**37**	**37**	**38**

5.3 Discussion

D'après les seuils de 20 et 60 % définis en 1997 (Evans, 2012 ; Aish & Lepareur, 2014), le réseau actuel d'AMP semble « suffisant » (i.e. plus de 20 % des habitats favorables aux espèces se trouvent dans un site protégé) mais sans être « très suffisant » (i.e. moins de 60 % des habitats favorables se trouvent dans un site protégé) pour les deux espèces d'aloses. Ce constat est en adéquation avec les conclusions d'Acou *et al.* (2013) sur la suffisance du réseau Natura2000 en mer vis-à-vis de ces espèces inscrites en Annexe II de la directive « Habitat-Faune-Flore ». En effet, lors de cette étude, le réseau a été jugé « suffisant » mais il a été recommandé d'augmenter le statut de certains sites (i.e. baie de Seine et du Mont-Saint-Michel pour l'Alose feinte et la Rade de Brest pour la Grande alose). De plus, cette étude a permis de mettre en évidence différentes unités de gestion (i.e. la Manche et le Golfe de Gascogne pour l'Alose feinte et, pour la Grande alose, une zone autour de la Nivelle, une dans le Golfe de Gascogne et une en Bretagne/Normandie) avec des groupes sans doute génétiquement homogènes, même si le phénomène est un peu moins marqué pour *Alosa alosa*. L'étude a souligné l'importance des estuaires pour ces espèces (i.e. transit, stabulation, préparation au passage en eau douce) et demande de les prendre en compte dans les documents d'objectifs des zones Natura2000 concernées, principalement dans le volet « qualité de l'eau ».

En règle générale, les habitats sont plutôt côtiers et les zones de protection couvrent bien les habitats favorables, sauf particularité pour la Grande alose avec une zone favorable sur le plateau continental et une partie du talus, du sud de Brest jusqu'au large de l'estuaire de la Gironde. Ce constat pourrait alimenter la réflexion en cours pour la définition de sites Natura2000 au large et la mise en place de mesures de protection adaptées. En effet, l'évaluation de la suffisance du réseau Natura2000 en mer avait déjà mis en évidence la nécessité d'enrichir le réseau au-delà des eaux territoriales de la métropole pour l'habitat « Récif », les mammifères et les oiseaux marins (Aish & Lepareur, 2014).

6. Conclusion

Ce stage a amélioré les connaissances sur la répartition en mer des deux espèces d'aloses, et ce, sur l'ensemble de la façade atlantique française, ce qui n'était pas le cas avec les études précédentes (Taverny & Élie, 2001a ; Trancart *et al.*, 2014).

Ce sont principalement les variables physiques (i.e. habitat en 7 modalités et bathymétrie) qui contribuent le plus à expliquer la répartition en mer des aloses. Ainsi, le changement climatique, lorsque testé par une modification de variables « proximales » comme la température et la salinité, n'aurait qu'un faible impact sur la disponibilité des habitats en mer pour les aloses. De même, la diminution de la production primaire, en lien avec le changement climatique, ne serait pas un facteur limitant pour les aloses, même si cette diminution est estimée autour de 30 % pour l'Atlantique Nord (Bopp *et al.*, 2013). Des études en domaine continental sur la répartition de ces espèces dans les bassins versants européens ont abouti aux mêmes conclusions (Lassalle, 2008 ; Lassalle *et al.*, 2008 ; Rougier *et al.*, 2015). D'après ces auteurs, le changement climatique, testé sous sa composante thermique, n'altère que peu, voire pas, la favorabilité des habitats continentaux de ces deux espèces, tout comme la fonctionnalité des populations de Grande alose. Cependant, ces modèles sont à améliorer puisque les problématiques en lien avec les modifications des débits (e.g. réduction globale, intensification des étiages) et donc, *in fine* des panaches de dilution des fleuves, sont globalement peu prises en compte dans ces travaux de modélisation. En effet, il reste délicat de convertir des changements de précipitation et d'évapotranspiration prédits par les GCMs (General Circulation Models) en modifications des débits (voir Prospective « Explore 2070 »).

Ce travail confirme les travaux de Taverny & Élie (2001a) : les aloses préfèrent les faibles profondeurs (i.e. <50 m) mais dans une moindre mesure pour la Grande alose qui, à certaines périodes de l'année (i.e. principalement septembre et octobre), fréquente des habitats plus proches du talus continental. Comme évoqué, ce résultat est à mettre en relation avec la définition de sites Natura2000 au large en cours par les États de l'Union Européenne.

Comme attendu, l'Alose feinte est plus septentrionale. D'ailleurs, elle est de plus en plus observée vers les Pays Baltes mais ces apparitions sont généralement plutôt associées à l'amélioration de la qualité de l'eau qu'au changement climatique. On constate également qu'*Alosa alosa* est capturée en Manche dans la base Obsmer. Ces observations se traduisent par des habitats prédits favorables lors des années à hiver doux.

Les deux espèces d'aloses répondraient positivement à la température. Dans le même sens, la Grande alose a été qualifiée de tolérante à la température (Hundt *et al.*, 2015). Des tests sur des larves et des embryons d'*Alosa alosa* ont montré que le seuil de 80 % de survie se situerait à 24,8°C et que la Grande alose, durant ses jeunes stades, serait plus impactée par les températures froides que chaudes (i.e aucune survie n'ayant était observée pour des températures inférieures à 10°C) (Jatteau *et al.*, 2017). Cependant, des expériences menées sur la tolérance à l'hypoxie et à la température des juvéniles de 3 mois ont montré une sensibilité accrue aux déficits en oxygène (dès 60 % de saturation) pour des températures de 25°C alors qu'à 20°C la sensibilité à l'hypoxie n'apparaît qu'à partir de 30 % de saturation (Jatteau & Fraty, 2012). Il en va de même pour l'Alose feinte. En effet, une étude sur l'impact de la température sur les larves a démontré que celles-ci présentaient une croissance plus élevée et un meilleur taux de survie lorsqu'elles étaient soumises à des températures entre 24 et 28°C par rapport aux essais à 20°C (Navarro *et al.*, 2014).

Les deux espèces fréquenteraient particulièrement les substrats fins (i.e sables et vases) dans des milieux ouverts, ou des bras, de mer bénéficiant d'une biocénose diversifiée (e.g polychètes, bivalves, échinodermes) selon les caractéristiques données par la classification EUNIS à l'habitat « Circalittoral homogeneous fine : sand and mud ». Cependant, il existe une particularité pour la Grande alose qui pourrait préférer à certaines périodes de l'année des habitats moins profonds, rocheux et riches en laminaires.

Le réseau d'AMP français est jugé « suffisant » pour les aloses d'après les seuils détaillés et discutés par Evans (2012) et Aish & Lepareur (2014) mais il pourrait être amélioré, notamment pour protéger les habitats fréquentés en automne et situés plus loin sur le plateau voire même sur une partie du talus. De plus, comme suggéré par Acou *et al*. (2013), il serait intéressant d'entamer des discussions avec le Royaume-Uni en vue de créer des zones de protection internationales qui seraient bénéfiques aux aloses en Manche, voire également avec l'Espagne pour la partie sud Gascogne.

Malgré la faible probabilité de rencontre des aloses dans la base Obsmer, il serait intéressant de connaitre l'origine natale des poissons capturés afin de savoir s'ils proviennent d'une même population qui pourrait déjà être impactée en milieu continental, notamment par la pêche. C'est par exemple le cas en Amérique du Nord où les pêches accessoires de gaspareau (*Alosa pseudoharengus*) et d'alose d'été (*Alosa aestivalis*) semblent s'exercer exclusivement sur un unique stock génétique, ce qui complique les efforts de restauration entrepris (Hasselman *et al.*, 2016). De plus, il serait également intéressant d'évaluer les débarquements en criée pour ces espèces afin de compléter les données de répartition en mer (base FranceAgrimer). Dans la base Obsmer, s'étalant sur 14 années, on sait qu'au minimum 4 % des aloses capturées ont été débarquées, d'après la colonne précisant la destination des captures accidentelles (i.e. rejet, débarquements, ou rejet/débarquements).

Les résultats de ce travail de stage pourront être utilisés pour affiner les processus en mer simulés dans des modèles mécanistes individu-centré comme, par exemple, le modèle GR3D (Global Repositioning Dynamics for Diadromous fish Distribution) (Rougier *et al.*, 2015). En effet, ce modèle, calibré et paramétré sur la Grande alose, a été créé pour évaluer les effets du changement climatique sur la dynamique de population et la distribution de cette espèce. Il couple deux dimensions spatiales : un domaine continental (i.e. les bassins versants du sud de l'Espagne au sud de la Scandinavie) et un domaine marin (i.e. un bassin marin pour chaque bassin versant). Ce travail pourrait permettre d'affiner le compartiment marin en identifiant des zones peu fréquentées, comme c'est le cas pour la zone Finistère-Nord et la partie occidentale des Côtes d'Armor ou encore des périodes où les habitats sont moins favorables, comme par exemple le mois de décembre. De même, ce travail de stage fait écho au post-doctorat actuellement en cours sur la microchimie des otolithes d'aloses dont le but est de savoir si les individus en mer restent à proximité de leur fleuve de naissance (comme c'est pour l'instant modélisé par GR3D) ou bien s'ils se mélangent dans des zones de croissances communes comme tendraient à le suggérer les résultats de modélisation de distribution en mer (i.e. les habitats favorables ne sont pas sous la forme d'agrégats pouvant être isolés). Un premier travail de microchimie sur des individus capturés en rivière a démontré un homing marqué pour la Grande alose (Martin *et al.*, 2015). Actuellement, les premières analyses de la signature isotopique (Sr^{87}/Sr^{86}) des otolithes de Grande alose capturées en mer lors de la thèse de Catherine Taverny (Taverny, 1991 ; même individus que ceux référencés dans la base de validation indépendante) ne permettent pas de corroborer ce résultat. On s'attendait à des différences entre signatures isotopiques dans les otolithes bien marquées, au moins entre les fleuves du Golfe et les fleuves bretons, mais ce n'est pas le cas. Il faudra donc attendre des analyses complémentaires d'autres éléments, comme par exemple le baryon, pour espérer répondre à cette question. Finalement, un travail de thèse démarrera à l'automne 2018 afin d'assurer ce couplage entre le modèle GR3D et les sorties des modèles de distribution en mer, ainsi que pour raffiner les paramètres et processus du modèle sur la base de ces nouvelles connaissances.

Il semble que les zones fréquentées en mer par les aloses dans les années 80 soient sensiblement les mêmes qu'actuellement (fig. 10 et fig. 13). Un travail pourrait être effectué pour alimenter ces aspects évolutifs. Le nombre de branchiospines des aloses capturées durant la thèse de Catherine Taverny (Taverny, 1991) pourrait être comparé à celui d'aloses pêchées de nos jours afin d'évaluer une possible évolution de leur régime alimentaire (i.e. plus le nombre de branchiospines est important, plus l'alimentation se fait sur des proies planctoniques de petite taille et inversement), hypothèse parfois évoquée pour expliquer le déclin des aloses. Cette évolution pourrait être notable, même en seulement trente ans, puisqu'il a déjà été observé une augmentation du nombre de branchiospines chez l'Alose feinte, en seulement deux-trois générations, pour s'adapter à l'ingestion de proies plus fines dans les lacs de Killarney (O'Maoileidigh *et al.*, 1988).

Ainsi ce travail de stage, tout en répondant à certaines questions, ouvre des pistes de travail dans d'autres domaines comme la biologie, l'halieutique ou la modélisation, mais toujours en lien avec la restauration des aloses.

Bibliographie

ACOLAS M.L., BÉGOUT-ANRAS M.L., VÉRON V., JOURDAN H., SABATIÉ M.R. & BAGLINIÈRE J. L. 2004 — An assessment of the upstream migration and reproductive behaviour of allis shad (*Alosa alosa* L.) using acoustic tracking. — *ICES Journal of Marine Science*, vol. 61, n°8, p. 1291-1304.

ACOU A., LASNE E., RÉVEILLAC E., ROBINET T. & FEUNTEUN E. 2013 — *Programme de connaissances « Amphihalins Natura2000 en mer ». Evaluation de la suffisance du réseau Natura2000 en mer pour les espèces amphihalines et éléments de réponse aux recommandations émises en zone atlantique*. — Stations marines de Dinard et Concarneau : Rapport de synthèse du Muséum National d'Histoire Naturelle. — 25 p.

AISH A. & LEPAREUR F. 2014 — *Critères et principes directeurs pour l'extension du réseau Natura 2000 au-delà de la mer territoriale pour les récifs (1170).* — Muséum National d'Histoire Naturelle/Service du Patrimoine Naturel : Rapport SPN 2014-14. — 33 p.

ALLIOT E., PASTOUREAUD A. & THEBAULT H. 1983 — Influence de la température et de la salinité sur la croissance et la composition corporelle d'alevins de *Dicentrarchus labrax*. — *Aquaculture*, vol. 31, n°2-4, p. 181-194.

APRAHAMIAN M.W., BAGLINIÈRE J.L., SABATIE M.R., ALEXANDRINO P., THIEL R. & APRAHAMIAN C.D. 2003 — *Biodiversity, status, and conservation of the world's shads.* — Bethesda : Karin E. Limburg and John R. Waldman. — 370 p. (American Fisheries Society, vol. 35).

BACQ N., LEMOINE J.P., MOUSSARD S., LE HIR P. & LOBRY J. 2013 — *Modélisation des fonctions écologiques de l'Estuaire de la Seine et ScÉNarios d'Évolution*. — Rapport final projet MESSCENE, rapport du GIP Seine-Aval, projet financé par la fondation de France. — 69 p.

BAGLINIÈRE J.L. & ÉLIE P. 2000 — *Les aloses (*Alosa alosa *et* Alosa fallax spp.*)* — Paris : Cemagref-INRA. — 292 p. (Hydrobiologie aquaculture).

BARBET-MASSIN M., JIGUET F., ALBERT C.H. & THUILLER W. 2012 — Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? — *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, n°2, p. 327-338.

BEGUER M. 2005 — *Analyse de l'importance relative du régime thermique et des caractéristiques des bassins versants dans la distribution des assemblages de poissons migrateurs amphihalins de l'Europe de l'Ouest*. — Bordeaux : Université de Bordeaux 1. — 33 p. (Mémoire de Master 2).

BENSETTITI F. & GAUDILLAT V. 2002a — 1102 – *Alosa alosa*, la Grande alose. — Dans : *Cahiers d'habitats Natura2000, connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire*. Tome 7 : espèces animales. Ministère de l'Agriculture de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales — Paris : La documentation française. — 353 p.

BENSETTITI F. & GAUDILLAT V. 2002b — 1103 – *Alosa fallax*, l'Alose feinte — Dans : *Cahiers d'habitats Natura 2000, connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire*. Tome 7 : espèces animales. Ministère de l'Agriculture de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales — Paris : La documentation française. — 353 p.

BOPP L., RESPLANDY L., ORR J.C., DONEY S. C., DUNNE J.P., GEHLEN M. & TJIPUTRA J. 2013 — Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. — *Biogeosciences*, vol. 10, n°10, p. 6225-6245.

BURNHAM K.P. & ANDERSON D.R. 2002 — *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. — New York : Springer-Verlag. — 488 p.

CASSOU-LEINS J.J & CASSOU-LEINS F. 1981 — *Recherche sur la biologie et l'halieutique des migrateurs de la Garonne et principalement de l'alose :* Alosa alosa *L.* — Toulouse : Institut National Polytech. — 398 p. (Thèse de doctorat).

CASSOU-LEINS J.J., CASSOU-LEINS F., BOISNEAU P. & BAGLINIÈRE J.L. 2000 — La reproduction. — Dans : *Les aloses (*Alosa alosa *et* Alosa fallax *spp.) : écobiologie et variabilité des populations.* — Paris : Cemagref-INRA, p. 73-92.

CASTELNAUD G., ROCHARD E. & GAZEAU C. 2000 — *Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde : suivi des captures 1998 et étude de la faune circulante 1999.* — Cemagref. — 180 p.

CHAALALI A., BEAUGRAND G., BOËT P. & SAUTOUR B. 2013 — Climate caused abrupt shifts in a European macrotidal estuary. — *Estuaries and Coasts*, vol. 36, n°6, p. 1193-1205.

COGEPOMI. 2014 — *PLAGEPOMI Garonne 2015-2019.* — Dreal Aquitaine. — 106 p.

COHEN J. 1960 — A coefficient of agreement for nominal scales. — *Educational and Psychological Measurement*, vol. 20, n°1, p. 37-46.

DAUTREY L. & LARTIGUE P. 1983 — *Recherches sur la migration des aloses (*Alosa alosa*) et des truites de mer (*Salmo trutta*) en Garonne (site de Golfech)*. — Toulouse : Institut National Polytech. — 212 p. (Thèse de doctorat).

DAVID V., SAUTOUR B., CHARDY P. & LECONTE M. 2005 — Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary (France). — *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 64, n°2-3, p. 171-184.

DE GROOT S.J. 2002 — A review of the past and present status of anadromous fish species in the Netherlands: is restocking the Rhine feasible? — *Hydrobiologia*, vol. 478, n°1-3, p. 205-218.

EVANS D. 2012 — Building the European Union's Natura 2000 network. — *Nature conservation*, vol. 1, p. 11-26.

FIELDING A.H. & BELL J.F. 1997 — A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. — *Environmental Conservation*, vol. 24, n°1, p. 38-49.

FREYHOF J. & BROOKS E. 2011 — *European Red List of Freshwater Fishes*. — Luxembourg : Publications Office of the European Union. — 61 p.

GAUMET F. 1994 — *Contribution à l'étude des capacités d'adaptation au milieu et de croissance chez le turbot (*Scophthalmus maximus*) en fonction des facteurs écologiques, salinité et température*. — Rennes : Université de Rennes 1. — 189 p. (Thèse de doctorat).

GIEC/IPCC. 2014 — *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse*. — Genève : GIEC. — 161 p.

GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC Seine-Aval. 2017 — *Les effets du changement climatique : de l'échelle globale à l'échelle locale*. — GIP Seine-Aval. — 26 diapositives.

GUISAN A. & ZIMMERMANN N.E. 2000 — Predictive habitat distribution models in ecology. — *Ecological Modelling*, vol. 135, n°2-3, p.147-186.

HAMDI A., VASQUEZ M. & POPULUS J. 2010 — *Cartographie des habitats physiques EUNIS - Côtes de France.* — Convention Ifremer/AAMP n° 09/12177764/FY.

HASSELMAN D. J., ANDERSON E. C., ARGO E. E., BETHONEY N.D., GEPHARD S.R., POST D.M. & PALKOVACS E.P. 2015 — Genetic stock composition of marine bycatch reveals disproportional impacts on depleted river herring genetic stocks. — *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 73, n°6, p. 951-963.

HUNDT M., SCHIFFER M., WEISS M., SCHREIBER B., KREISS C.M., SCHULZ R. & GERGS R. 2015 — Effect of temperature on growth, survival and respiratory rate of larval allis shad *Alosa alosa*. — *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, vol. 416, n°27.

ICES. 2015 — *Report of The Workshop on Lampreys and Shads (WKLS).* — Lisbonne : ICES — 206 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2013 — *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* — Cambridge : Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — 1535 p.

JATTEAU P. & FRATY R. 2012 — *Étude de la tolérance à l'hypoxie des juvéniles de grande alose (*Alosa alosa*)*. — Cestas : Irstea. — 18 p.

JATTEAU P., RIMOND F., BONS, S. & LE BARH R. 2015 — *Suivi des alosons dans les parties aval de la Garonne et de la Dordogne – Année 2014*. — Cestas : Irstea. — 24 p.

JATTEAU P., HÉROIN D., BONS S., LA BARH R. & LAMBERT P. 2016 — *Suivi des alosons dans les parties aval de la Garonne et de la Dordogne - Année 2015*. — Cestas : Irstea. — 24 p.

JATTEAU P., DROUINEAU H., CHARLES K., CARRY L., LANGE F. & LAMBERT P. 2017 — Thermal tolerance of allis shad (*Alosa alosa*) embryos and larvae: Modeling and potential applications. — *Aquatic Living Resources*, vol. 30, n°2, 8 p.

KEIL P., BELMAKER J., WILSON A.M., UNITT P. & JETZ W. 2013 — Downscaling of species distribution models: a hierarchical approach. — *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 4, n°1, p.82−94.

KOUTSIKOPOULOS C., BEILLOIS P., LEROY C. & TAILLEFER F. 1998 — Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. — *Oceanologica Acta*, vol. 21, n°2, p. 335-344.

LAMBERT C., VIRGILI A., PETTEX E., DELAVENNE J., TOISON V., BLANCK A. & RIDOUX V. 2017. — Habitat modelling predictions highlight seasonal relevance of Marine Protected Areas for marine megafauna. — *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 141, p. 262-274.

LANDIS J.R., KOCH G.G. & LAWTON J. 1977 — The measurement of observer agreement for categorical data. — *Biometrics*, vol. 33, n°1, p. 159 à 174.

LASSALLE G. 2008 — *Impacts des changements globaux sur la distribution des poissons migrateurs amphihalins, une approche par modélisation à l'échelle continentale*. — Bordeaux : Université Bordeaux 1. — 244 p. (Thèse de doctorat).

LASSALLE G., BÉGUER M., BEAULATON L. & ROCHARD E. 2008 — Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: an approach using biogeographical models. — *Biological Conservation*, vol. 141, n°4, p. 1105-1118.

LASSALLE G. & ROCHARD E. 2009 — Impact of the 21st century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. — *Global Change Biology*, vol. 15, n°5, p. 1072-1089.

LAZURE P. & DUMAS F. 2008 — An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). — *Advances in Water Resources*, vol. 31, n°2, p. 233-250.

LEGGET W.C. & WHITNEY R.R. 1972 — Water temperature and the migrations of American shad. — *Fishery Bulletin*, vol. 70, n°3, p. 659-670.

LE TREUT H. 2013 — *Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique*. — Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux : LGPA-Editions. — 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).

LIMBURG K.E. & WALDMAN J.R. 2009 — Dramatic declines in North Atlantic diadromous fishes. — *BioScience*, vol. 59, n°11, p. 955-965.

LIN H.Y., BUSH A., LINKE S., POSSINGHAM H.P. & BROWN C.J. 2017 — Climate change decouples marine and freshwater habitats of a threatened migratory fish. — *Diversity and Distributions*, vol. 23, n°7, p. 751-760.

LLORET J., GIL DE SOLA L., SOUPLET A. & GALZIN R. 2002 — Effects of large-scale habitat variability on condition of demersal exploited fish in the north-western Mediterranean. — *ICES Journal of Marine Science*, vol. 59, n°6, p. 1215-1227.

LOCHET A. 2006 — Dévalaison des juvéniles et tactiques gagnantes chez la Grande alose *(Alosa alosa)* et l'Alose feinte *(Alosa fallax)* : Apports de la microchimie et de la microstructure des otolithes. — Bordeaux : Université Bordeaux 1. — 220 p. (Thèse de doctorat).

LOCHET A., BOUTRY S. & ROCHARD E. 2009 — Estuarine phase during seaward migration for allis shad *Alosa alosa* and twaite shad *Alosa fallax*. — *Ecology of Freswater Fish*, vol. 18, n°2, p. 323-335.

LOUVEL J., GAUDILLAT V. & PONCET L. 2013 — *EUNIS, European Nature Information System, Système d'information européen sur la nature. Classification des habitats. Traduction française. Habitats terrestres et d'eau douce*. — Paris : MNHN-DIREV-SPN, MEDDE. — 289 p.

MARTIN-VANDEMBULCKE D. 1999 — *Dynamique de population de la grande alose (*Alosa alosa. *L. 1758) dans le bassin versant Gironde-Garonne-Dordogne (France) : analyse et prévision par modélisation.* — Toulouse : INPT. — 115 p. (Thèse de doctorat).

MASSMANN W.H. & PACHECO A. L. 1957 — Shad catches and water temperature in Virginia. — *The Journal of Wildlife Management*, vol. 21, p. 351-352.

MCCULLAGH P. & NELDER J.A. 1989 — *Generalized linear models*. — Londres : Chapman and Hall. — 526 p.

MCDOWALL R.M. 1988 — *Diadromy in fishes: migrations between freshwater and marine environments*. — Christchurch : Croom Helm. — 308 p.

MENNESSON-BOISNEAU C., BOISNEAU P. & BAGLINIÈRE J.L. 1990 — Description d'une frayère et comportement de reproduction de la grande Alose (*Alosa alosa* L.) dans le cours supérieur de la Loire. — *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, n°316, p. 15-23.

MIGADO. 2014 — *Rapport d'activités : Résumé des actions techniques de l'Association MIGADO pour la gestion et la restauration des poissons migrateurs sur le bassin de la Dordogne et de la Garonne*. — No. MI.GA.DO. 18GD-14-RT. — 22 p.

MIGADO. 2015 — *Rapport d'activités : Résumé des actions techniques de l'Association MIGADO pour la gestion et la restauration des poissons migrateurs sur le bassin de la Dordogne et de la Garonne*. — No. MI.GA.DO. 1 RT2015. — 22 p.

NÀCHON-GARCIA D.J., MOTA M., ANTUNES C., SERVIA M.J. & COBO F. 2015 — Marine and continental distribution and dynamic of the early spawning migration of twaite shad, *Alosa fallax* (Lacépède, 1803), and allis shad, *Alosa alosa* (Linnaeus, 1758), in the Northwest of the Iberian Peninsula. — *Marine and Freshwater Research*, vol. 67, n°8, p. 1229-1240.

NAVARRO T., CARRAPATO C. & RIBEIRO F. 2014 — Effects of temperature, salinity and feeding frequency on growth and mortality of twaite shad (*Alosa fallax*) larvae. — *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, vol. 412, n°7.

O'MAOILEIDIGH N., CAWDERY S., BRACKEN J.J., & Ferguson, A. 1988 — Morphometric, meristic character and electrophoretic analyses of two Irish populations of twaite shad, *Alosa fallax* (Lacepede). — *Journal of Fish Biology*, vol. 32, n°3, p. 355-366.

PIERRE M. & DROUINEAU H. 2012 — *Modélisation statistique : modèles linéaires et modèles linéaires généralisées*. — Bordeaux : Université Bordeaux 1. — 111 diapositives.

PINOT J.P. — *Manche* [en ligne], consulté le 27 mars 2017. Disponible sur : http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/manche/

PINOT J.P. — *Golfe de Gascogne* [en ligne], consulté le 27 mars 2017. Disponible sur : http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/golfe-de-gascogne/

RAMEYE L., KIENER A., SPILLMANN C.P. & BIOUSSE J. 1976 — Aspects de la biologie de l'alose du Rhône. Pêche et difficultés croissantes de ses migrations. — *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, n°263, p. 50-76.

R CORE TEAM. 2017 — *R: A language and environment for statistical computing*. — Vienne : R Foundation for Statistical Computing, URL http://www.R-project.org/.

RICHKUS W.A. 1974 — Factor influencing the seasonal and daily patterns of alewife (*Alosa pseudoharmgus*) migration in a Rhode Island River. — *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 31, p.1485-1497.

ROUGIER T., LAMBERT P., DROUINEAU H., GIRARDIN M., CASTELNAUD G., CARRY L., APRAHAMIAN M., RIVOT E. & ROCHARD E. 2012 — Collapse of allis shad, *Alosa alosa*, in the Gironde system (southwest France): environmental change, fishing mortality, or Allee effect? — *ICES Journal of Marine Science*, vol. 69, n°10, p. 1802-1811.

ROUGIER T., DROUINEAU H., DUMOULIN N., FAURE T., DEFFUANT G., ROCHARD E. & LAMBERT P. 2014 — The GR3D model, a tool to explore the Global Repositioning Dynamics of Diadromous fish Distribution. — *Ecological modelling*, vol. 283, p. 31-44.

ROUGIER T., LASSALLE G., DROUINEAU H., DUMOULIN N., FAURE T., DEFFUANT G., ROCHARD E., LAMBERT P. 2015 — The combined use of correlative and mechanistic species distribution models benefits low conservation status species. — *PLoS* ONE, vol. 10, n°10, 21 p.

SABATIÉ R. & BAGLINIÈRE J.L. 2001 — Quelques traits bioécologiques des aloses du Maroc ; un patrimoine culturel et socio-économique récemment disparu. — *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, n°362-363, p. 903-917.

SANTOUL F., MENGIN N., CEREGHINO R., FIGUROLA J. & MASTORILLO S. 2005 — Environmental factors influencing the regional distribution and local density of a small benthic fish: the stoneloach (*Barbatula barbatula*). — *Hydrobiologia*, vol. 544, n°1, p. 347-355.

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE. 2015 — *MNT Bathymétrique de façade Atlantique*. — SHOM (Projet Homonim).

SWETS J.A. 1988 — Measuring the accuracy of diagnostic systems. — *Science*, vol. 240, n° 4857, p. 1285-1293.

TALBOT G.B. 1954 — Factors associated with fluctuations in abundance of Hudson River shad. — *Fishery Bulletin of the Fish & Wildlife Service*, vol. 56, p. 373-413.

TAVERNY C. 1991 — *Contribution à la connaissance de la dynamique des populations d'aloses (Alosa alosa et Alosa fallax) dans le système fluvio-estuarien de la Gironde : pêche, biologie et écologie. Etude particulière de la dévalaison et de l'impact des activités humaines*. — Bordeaux : Université Bordeaux 1. — 507 p. (Thèse de doctorat).

TAVERNY C. & ÉLIE P. 2001a — Répartition spatio-temporelle de la Grande alose *Alosa alosa* (Linné, 1766) et de l'Alose feinte *Alosa fallax* (Lacépède, 1803) dans le Golfe de Gascogne. — *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, n°362-363, p. 803-821.

TAVERNY C. & ÉLIE P. 2001b — Régime alimentaire de la Grande alose *Alosa alosa* (Linné, 1766) et de l'Alose feinte *Alosa fallax* (Lacépède, 1803) dans le Golfe de Gascogne. — *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, n°362-363, p. 837-852.

TRANCART T., ROCHETTE S., ACOU A., LASNE E. & FEUNTEUN E. 2014 — Modeling marine shad distribution using data from French bycatch fishery surveys. — *Marine Ecology Progress Series*, vol. 511, p. 181-192.

VASCONCELOS R.P., REIS-SANTOS P., MAIA A., FONSECA V., FRANCA S., WOUTERS N. & CABRAL H.N. 2010 — Nursery use patterns of commercially important marine fish species in estuarine systems along the Portuguese coast. — *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol.86, n°4, p. 613-624.

WAJNBERG E. 2011 — *Introduction au Modèle Linéaire Généralisé (Generalized Linear Model ; GLM)*. — Nice : Université de Nice-Sophia-Antipolis. — 9 p.

Liste des contacts

Contact	Titre/fonction	Adresse	Téléphone	Mail
ACOLAS Marie-Laure	Chargée de recherche en écologie de la réhabilitation	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 09 03	marie-laure.acolas@irstea.fr
ADAM Gilles	Chargé de mission « Poissons Migrateurs »	Site de Bordeaux Service Patrimoine Naturel - DREAL Nouvelle-Aquitaine	05 56 93 32 97	gilles.adam@developpement-durable.gouv.fr
BRIND'AMOUR Anik	Chargée de recherche en écologie	Ifremer – UR EMH rue de l'Ile d'Yeu BP 21105 44 311 Nantes	02 40 37 41 60	anik.brindamour@ifremer.fr
DAVERAT Françoise	Responsable de l'équipe « Poissons Migrateurs Amphihalins »	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 08 06	francoise.daverat@irstea.fr
DE ROTON Gwenola	Chargée de mission « Natura2000, habitats et fonctionnalités »	DIRM 4 rue du Colonel-Fabien BP 34 76 083 Le Havre	02 32 85 38 64	gwenola.de-roton@afbiodiversite.fr
EYNAUDI Amandine	Chargée de mission « Patrimoine Naturel »	AFB - Parc naturel marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis BP 80031 17 320 Marennes	05 46 36 70 49	amandine.eynaudi@afbiodiversite.fr
FEUNTEUN Éric	Responsable de la Station Marine de Dinard et directeur du CRESCO	CRESCO - 38 rue du port Blanc 35 800 Dinard	02 23 18 58 81	feunteun@mnhn.fr
HURET Martin	Chercheur en écologie marine	Ifremer – UR LBH ZI de la Pointe du Diable - CS 10070 - 29280 Plouzané	02 98 22 41 36	martin.huret@ifremer.fr
JATTEAU Philippe	Ingénieur d'études en conservation des poissons migrateurs	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 08 08	philippe.jatteau@irstea.fr

LAMBERT Patrick	Chargé de recherche en modélisation et dynamique de populations	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 08 09	patrick.lambert@irstea.fr
LASSALLE Géraldine	Chargée de recherche en hydrobiologie et écologie aquatique	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 08 02	geraldine.lassalle@irstea.fr
NÀCHON GARCIA David-José	Post-doctorant en science des otolithes	Irstea Bordeaux – UR EABX - équipe PMA 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 27 07	david-jose.nachon-garcia@irstea.fr
PAQUIGNON Guillaume	Chargé de mission « Patrimoine naturel marin Antenne Atlantique »	AFB - 1 rue Fondaudège 33 000 Bordeaux	05 56 11 17 05	guillaume.paquignon@afbiodiversite.fr
ROCHARD Éric	Directeur de l'UR EABX	Irstea Bordeaux – UR EABX - 50 avenue de Verdun 33 612 Cestas	05 57 89 08 00	eric.rochard@irstea.fr
SAULNIER Erwan	Doctorant équipe « Ecologie et santé des écosystèmes »	Agrocampus-Ouest 65 rue de Saint-Brieuc CS 84215 35 042 Rennes	06 02 41 62 61	esaulnie@agrocampus-ouest.fr
TRANCART Thomas	Chargé de recherche	CRESCO - 38 rue du port Blanc 35 800 Dinard	02 23 18 58 85	thomas.trancart@mnhn.fr

Annexes

Annexe 1 : Champs des 4 tables Obsmer pour les traits positifs, i.e. traits ayant abouti à la capture accidentelle d'aloses……..45

Annexe 2 : Cartes des présences d'aloses dans la base Obsmer (période 2003-2016). La taille des points est dépendante du nombre d'aloses mesurées lors de l'opération de pêche……47

Annexe 3 : Regroupement en 13 classes des données d'habitats (classification EUNIS) puis en 7 et 4 classes (i.e. **rock**, *sand*, mud, sediments). Les deux derniers regroupements (i.e. 4 et 7 modalités) correspondent aux variables testées lors de la construction des modèles…….....48

Annexe 4 : Courbes de réponse pour les variables environnementales retenues dans les modèles finaux 2006-2016 et 2012-2016, et pour les deux espèces. Pour la variable « habitat », plus le boxplot est large, plus la variabilité de l'effet de l'habitat en fonction du mois est forte. L'effet médian étant représenté par le trait noir. La correspondance des modalités est donnée en tableau 3…….49

Annexe 5 : Cartes de prédiction des habitats favorables pour les deux années (en vert, 2008 et 2011, ou 2012 et 2014), pour une année particulièrement chaude (en bleu, 2011 ou 2014) et pour une année plutôt fraiche (en rose, 2008 ou 2012) pour les deux aloses……...53

Annexe 6 : Projection des habitats favorables en mer pour les aloses à l'horizon de la fin du siècle selon un scénario de changement climatique tel que défini en section 4.1.4. En vert clair sont représentés les habitats prédits comme favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011 / 2012 ou 2014) et restant favorables dans le contexte du changement climatique. Les habitats non favorables en 2008 et 2011 ou 2012 et 2014 mais devenant favorables pour la fin du siècle sont en vert foncé. Les habitats favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011 / 2012 ou 2014) et devenant défavorables sous contrainte du changement climatique sont en rouge foncé……...57

Annexe 7 : Superposition du réseau d'aires marines protégées aux cartes de prédictions mensuelles des habitats favorables. En vert : habitats favorables pour les deux années (i.e. 2008 et 2011) ; en bleu : pour une année particulièrement chaude (i.e. 2011) ; en rose : pour une année plutôt fraiche mais avec un hiver doux (i.e. 2008). Les zones en bleu hachurées correspondent aux AMP. Les isobathes jusqu'à 200 m de fond sont représentés par des lignes continues grises……61

Annexe 1 : Champs des 4 tables Obsmer pour les traits positifs, i.e. traits ayant abouti à la capture accidentelle d'aloses

*** TABLE marée (TR)**

Variables :

- year : année de départ de la marée
- proj : données anonymes
- trpCode : code marée
- vslLen : classe de taille auquel appartient la longueur du navire mètres (m)
- vslPwr : données anonymes
- harbour : données anonymes
- foNum : nombre d'opérations de pêche dans la marée
- daysAtSea : nombre de jours de mer
- vslId : données anonymes
-

*** TABLE OP (HH)**

Toutes les opérations de pêche des marées sélectionnées dans la table marée.
Lors de l'importation dans excel, mettre la colonne "rect" en caractère sinon certains rectangles seront considérés comme des puissances de 10.

Variables :

- year : année de départ de la marée
- proj : données anonymes
- trpCode : code marée
- staNum : numéro de l'opération de pêche dans la marée
- catReg : fraction échantillonnée dans l'opération de pêche (All = rejet+débarquement, Non = OP non échantillonnées, Dis = rejets, Lan = débarquements)
- sppReg : exhaustivité dans l'échantillonnage des espèces (All = échantillonnage exhaustif, Par = échantillonnage partiel, Non = pas d'échantillonnage)
- date : date de l'opération de pêche
- time : heure de l'opération de pêche
- foDur : durée de l'opération de pêche (min)
- latIni : latitude de l'opération de pêche (départ)
- lonIni : longitude de l'opération de pêche (départ)
- area : division CIEM dans laquelle a eu lieu l'opération de pêche
- rect : rectangle dans lequel a eu lieu l'opération de pêche
- waterDep : profondeur de la pêche
- foCatNat : métier au niveau national : engin + espèce-cible
- foCatEu5 : métier DCR niveau 5 : engin + groupe d'espèce-cible (voir référentiel pour les correspondances)
- foCatEu6 : métier DCR niveau 5 : engin + groupe d'espèce-cible + gamme de maillage et dispositif sélectif
- meshSize : taille de la maille
- selDev : présence d'un dispositif sélectif
- meshSizeSelDev : taille de la maille dans le dispositif selectif.

*** TABLE capture (SL)**

Variables :

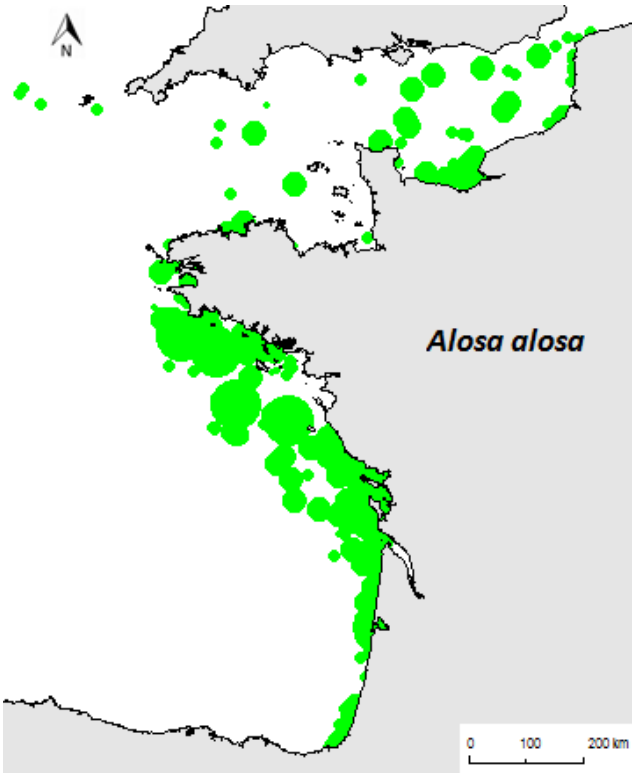
- year : année de départ de la marée
- proj : données anonymes
- trpCode : code marée
- staNum : numéro de l'opération de pêche dans la marée
- spp : nom scientifique de l'espèce
- catchCat : fraction de la capture (LAN = débarquement, DIS = rejet)
- commCat : catégorie commerciale
- wt : poids élevé à l'opération de pêche (g) en poids vifs
- subSampWt : poids de la capture correspondant aux individus mesurés (g)
- lenCode : unité dans laquelle l'espèce a été mesurée.

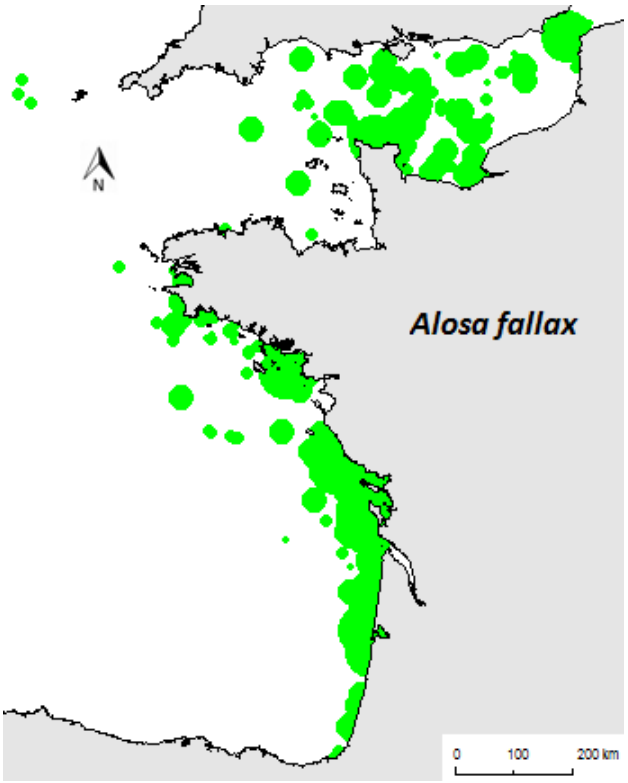
*** TABLE taille (HL)**

Variables :

- year : année de départ de la marée
- proj : données anonymes
- trpCode : code marée
- staNum : numéro de l'opération de pêche dans la marée
- spp : nom scientifique de l'espèce
- catchCat : fraction de la capture (LAN = débarquement, DIS = rejet)
- commCat : catégorie commerciale
- sex : sexe des individus
- lenCls : borne inférieure de la classe de taille en mm (exemple 210 pour les individus mesurant entre 21 et 22 cm) cf guide de la mensuration sur le site du SIH pour connaître les longueurs mesurées (collecte des données - observation à la mer - documentation)
- lenNum : nombre d'individus de la classe de taille (mesurés)

Annexe 2 : Cartes des présences d'aloses dans la base Obsmer (période 2003-2016). La taille des points est dépendante du nombre d'aloses mesurées lors de l'opération de pêche

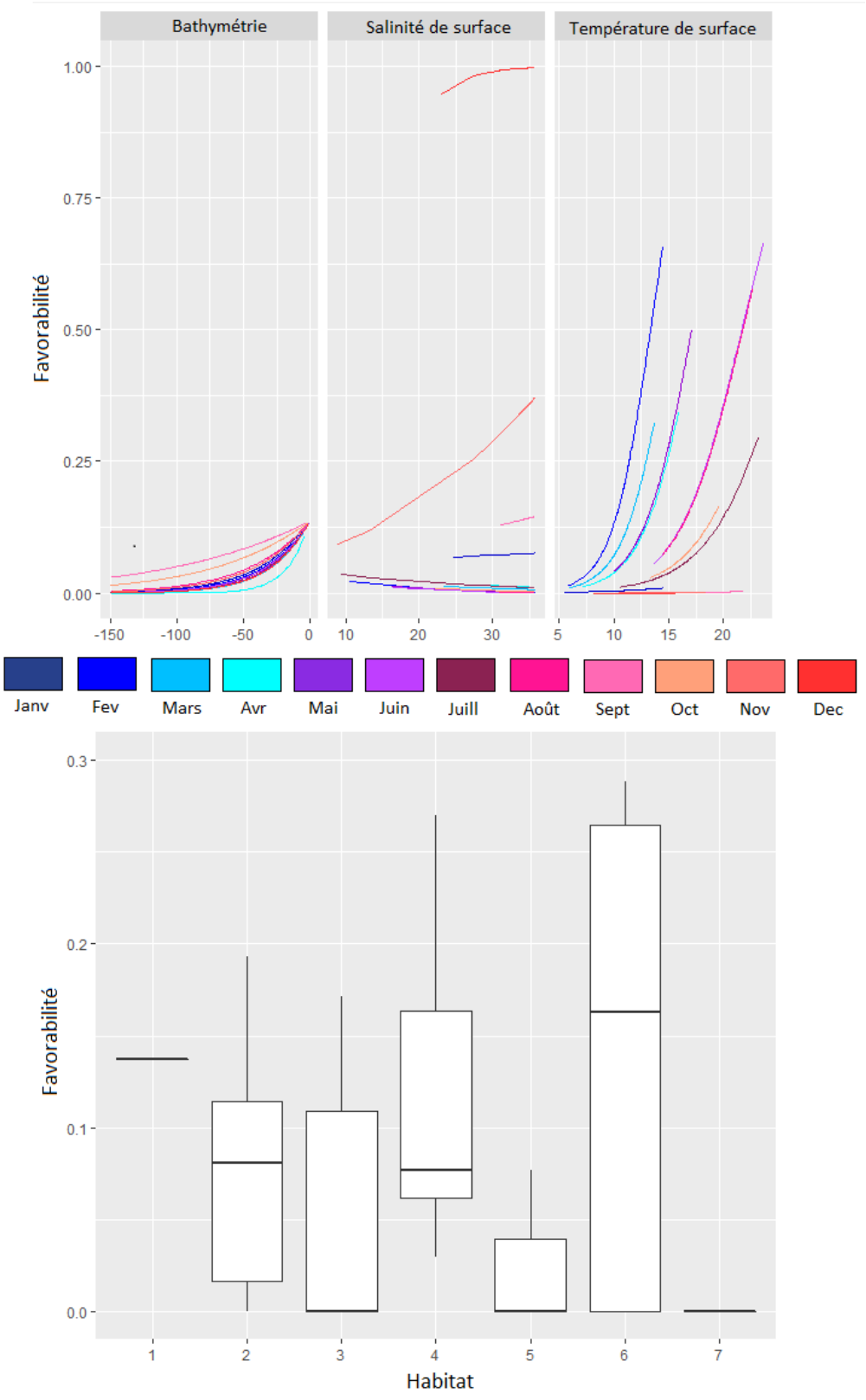




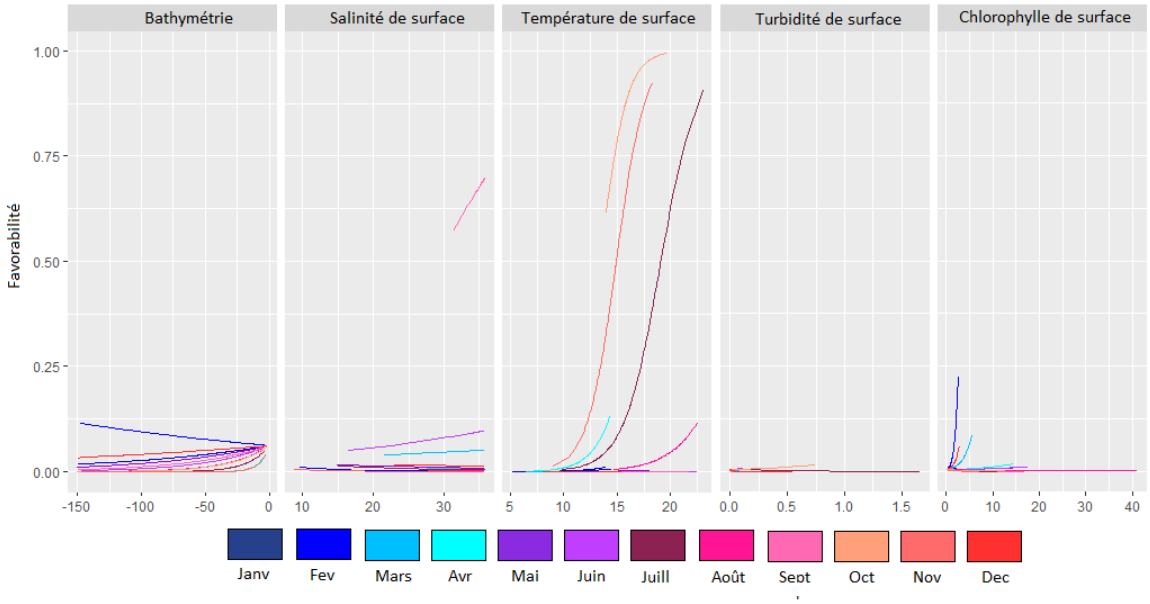
Annexe 3 : Regroupement en 13 classes des données d'habitats (classification EUNIS) puis en 7 et 4 classes (i.e. **rock**, *sand*, mud, sediments). Les deux derniers regroupements (i.e. 4 et 7 modalités) correspondent aux variables testées lors de la construction des modèles

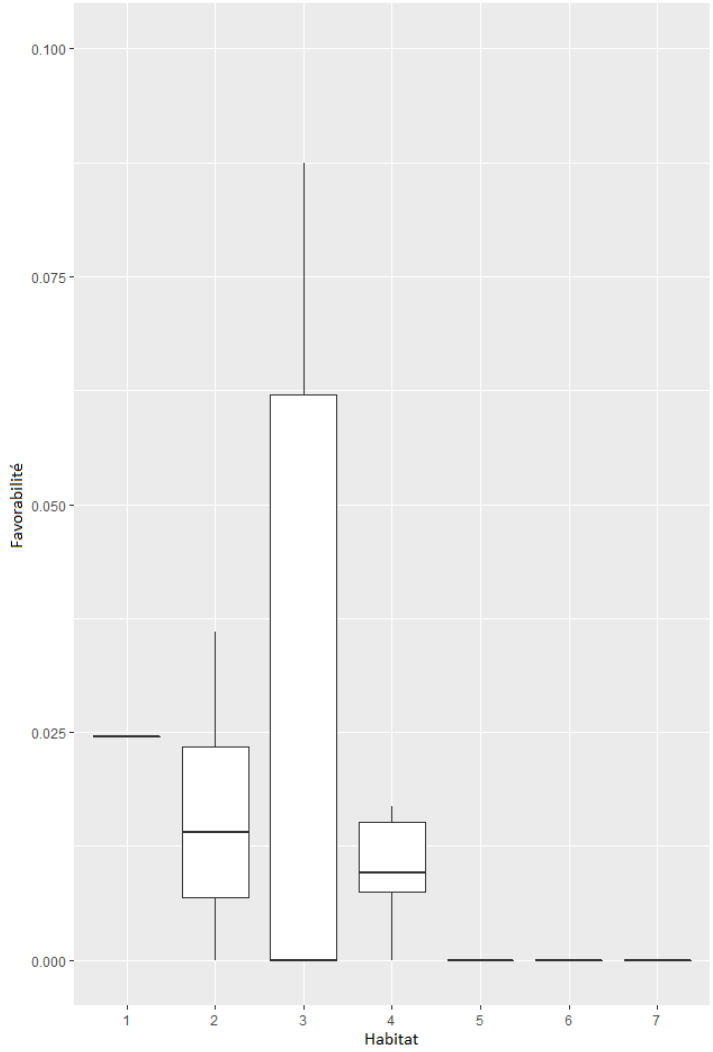
HABITAT CLASSIFICATION EUNIS	HABITAT SIMPLIFIE (13)	HABITAT SIMPLIFIE (7)
A1 : Littoral rock and other hard substrat	**Intertidal flats**	Intertidal flats
A2 : Littoral sediment	**Intertidal flats**	Intertidal flats
A2.3 : Littoral mud	**Intertidal flats**	Intertidal flats
A3.1 : High energy infralittoral rock	**High/moderate energy infralittoral rock**	Infralittoral rock
A3.2 : Moderate energy infralittoral rock	**High/moderate energy infralittoral rock**	Infralittoral rock
A3.3 : Low energy infralittoral rock	**Low energy infralittoral rock**	Infralittoral rock
A4.1 : High energy circalittoral rock	**High/moderate energy circalittoral rock**	Circalittoral rock
A4.2 : Moderate energy circalittoral rock	**High/moderate energy circalittoral rock**	Circalittoral rock
A4.3 : Low energy circalittoral rock	**Low energy circalittoral rock**	Circalittoral rock
A5.13 : Infralittoral coarse sediment	Infralittoral coarse sediment	Infralittoral mixed to coarse sediments
A5.14 : Circalittoral coarse sediment	Circalittoral coarse sediment	Circalittoral mixed to coarse sediments
A5.15 : Deep circalittoral coarse sediment	Circalittoral coarse sediment	Circalittoral mixed to coarse sediments
A5.23 : Infralittoral fine sand	*Infralittoral sand*	Infralittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.24 : Infralittoral muddy sand	*Infralittoral sand*	Infralittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.25 : Circalittoral fine sand	*Circalittoral sand*	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.26 : Circalittoral muddy sand	*Circalittoral sand*	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.27 : Deep circalittoral sand	*Circalittoral sand*	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.33 : Infralittoral sandy mud	Infralittoral mud	Infralittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.34 : Infralittoral fine mud	Infralittoral mud	Infralittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.35 : Circalittoral sandy mud	Circalittoral mud	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.36 : Circalittoral fine mud	Circalittoral mud	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.37 : Deep circalittoral mud	Circalittoral mud	Circalittoral homogeneous fine (sand and mud)
A5.43 : Infralittoral mixed sediments	Infralittoral mixed sediments	Infralittoral mixed to coarse sediments
A5.44 : Circalittoral mixed sediments	Circalittoral mixed sediments	Circalittoral mixed to coarse sediments
A5.45 : Deep circalittoral mixed sediments	Circalittoral mixed sediments	Circalittoral mixed to coarse sediments

Annexe 4 : Courbes de réponse pour les variables environnementales retenues dans les modèles finaux 2006-2016 et 2012-2016, et pour les deux espèces. Pour la variable « habitat », plus le boxplot est large, plus la variabilité de l'effet de l'habitat en fonction du mois est forte. L'effet médian étant représenté par le trait noir. La correspondance des modalités est donnée en tableau 3

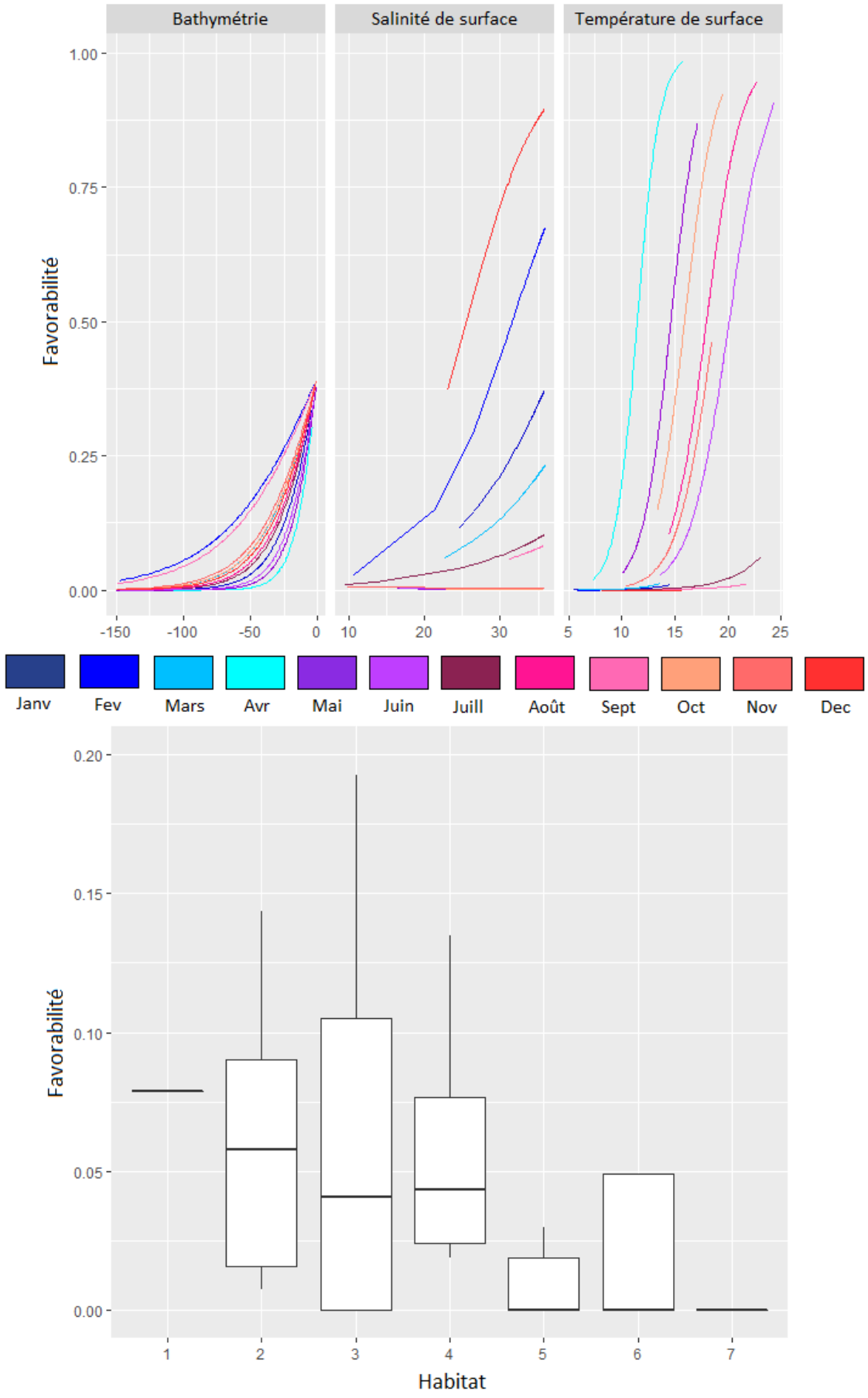


Grande alose, modèle sur la période 2006-2016

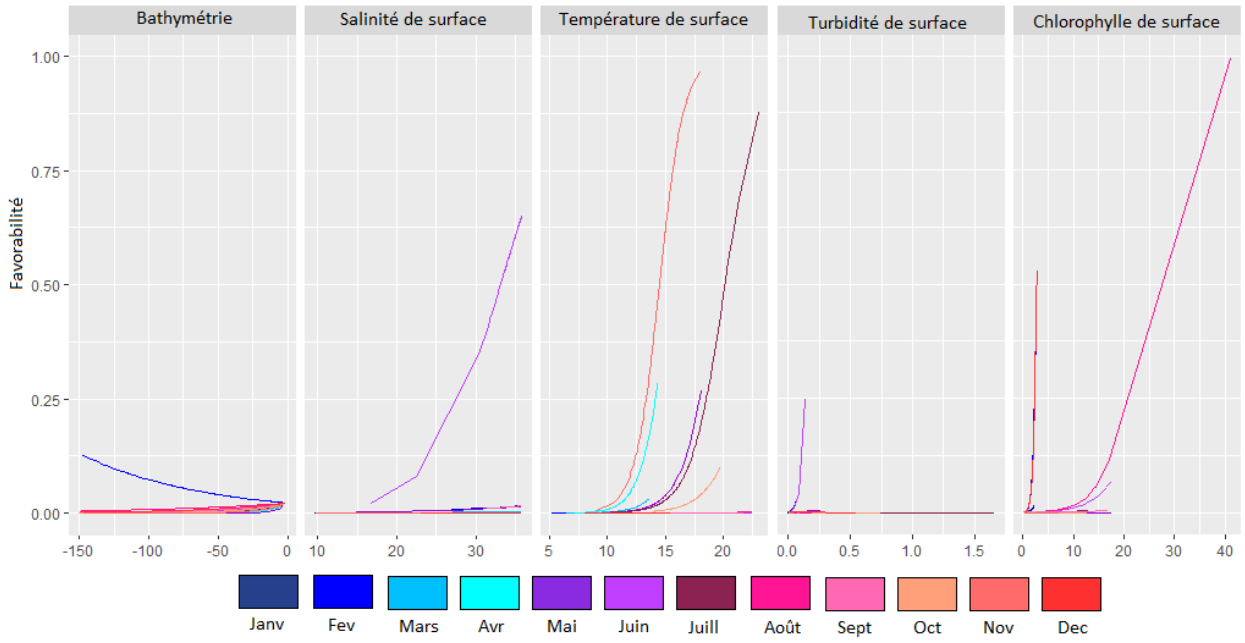


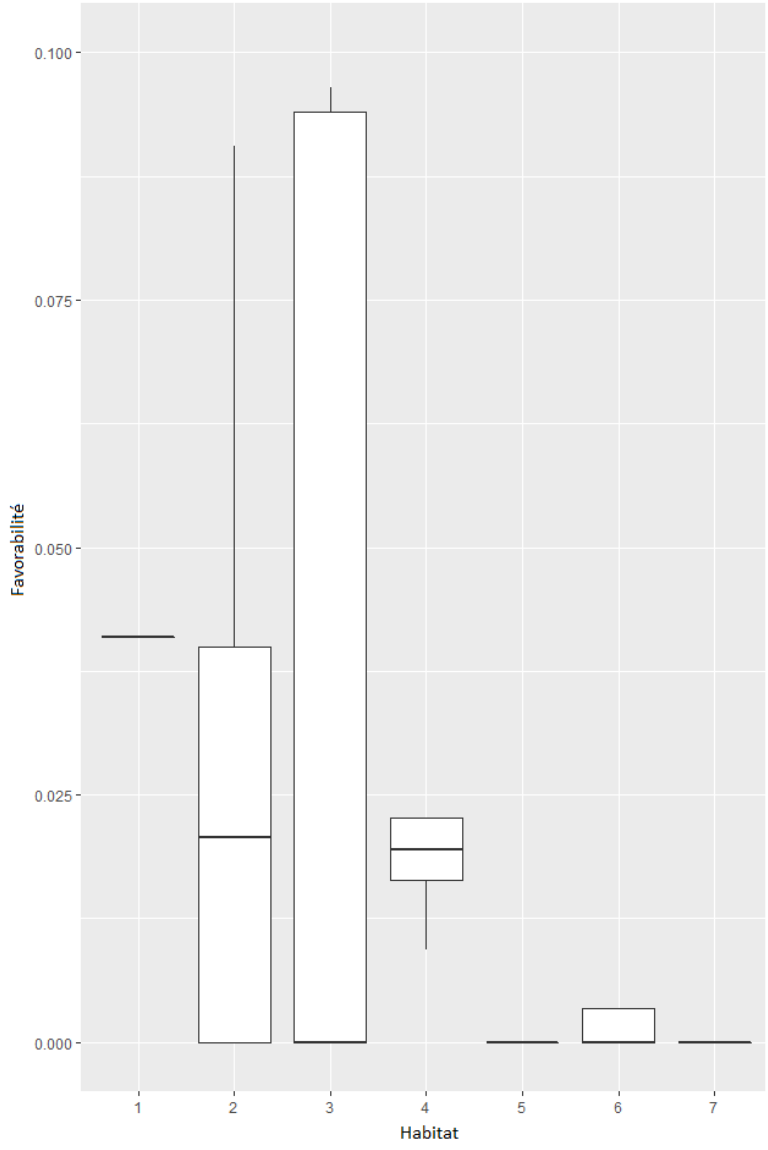


Grande alose, modèle sur la période 2012-2016



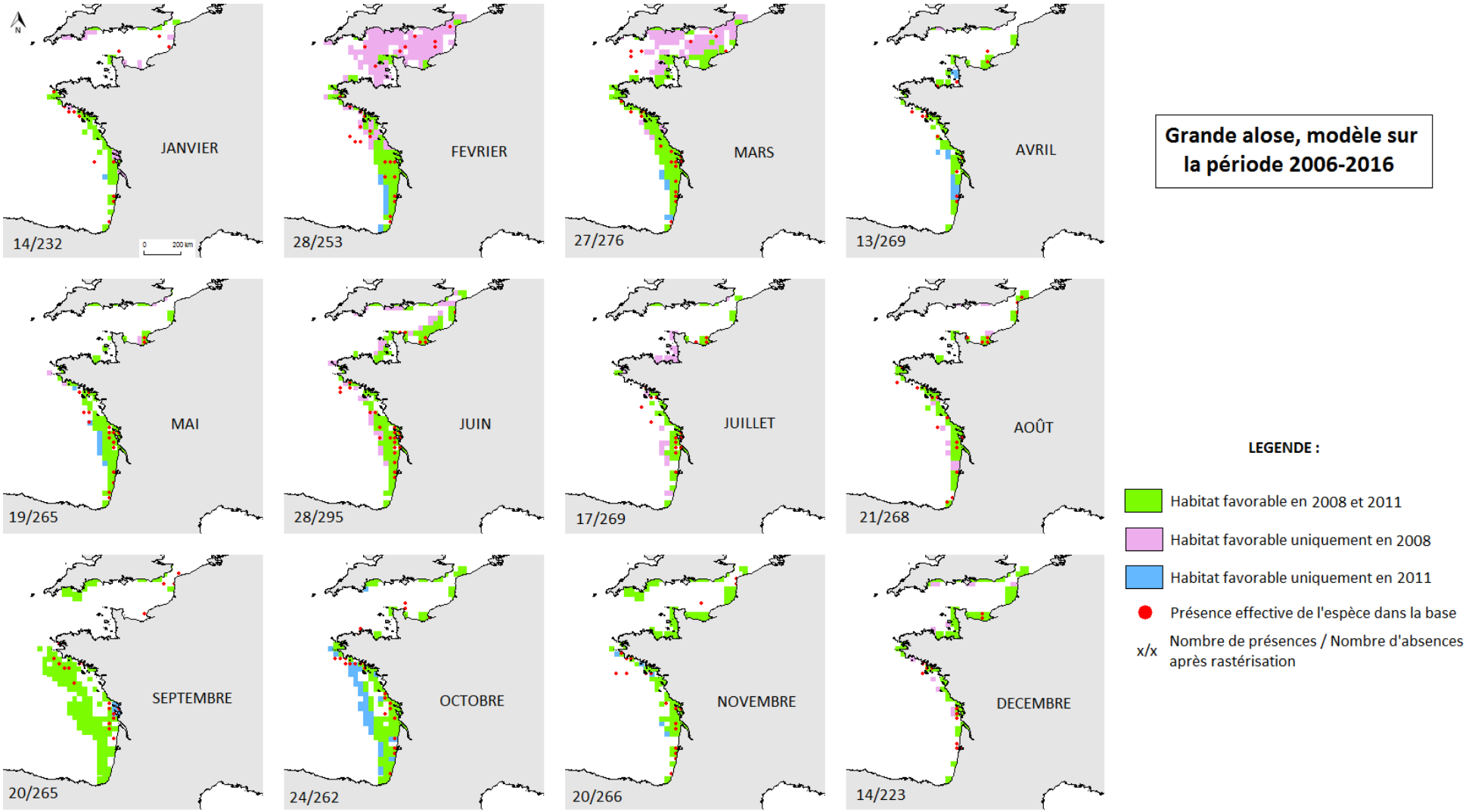
Alose feinte, modèle sur la période 2006-2016

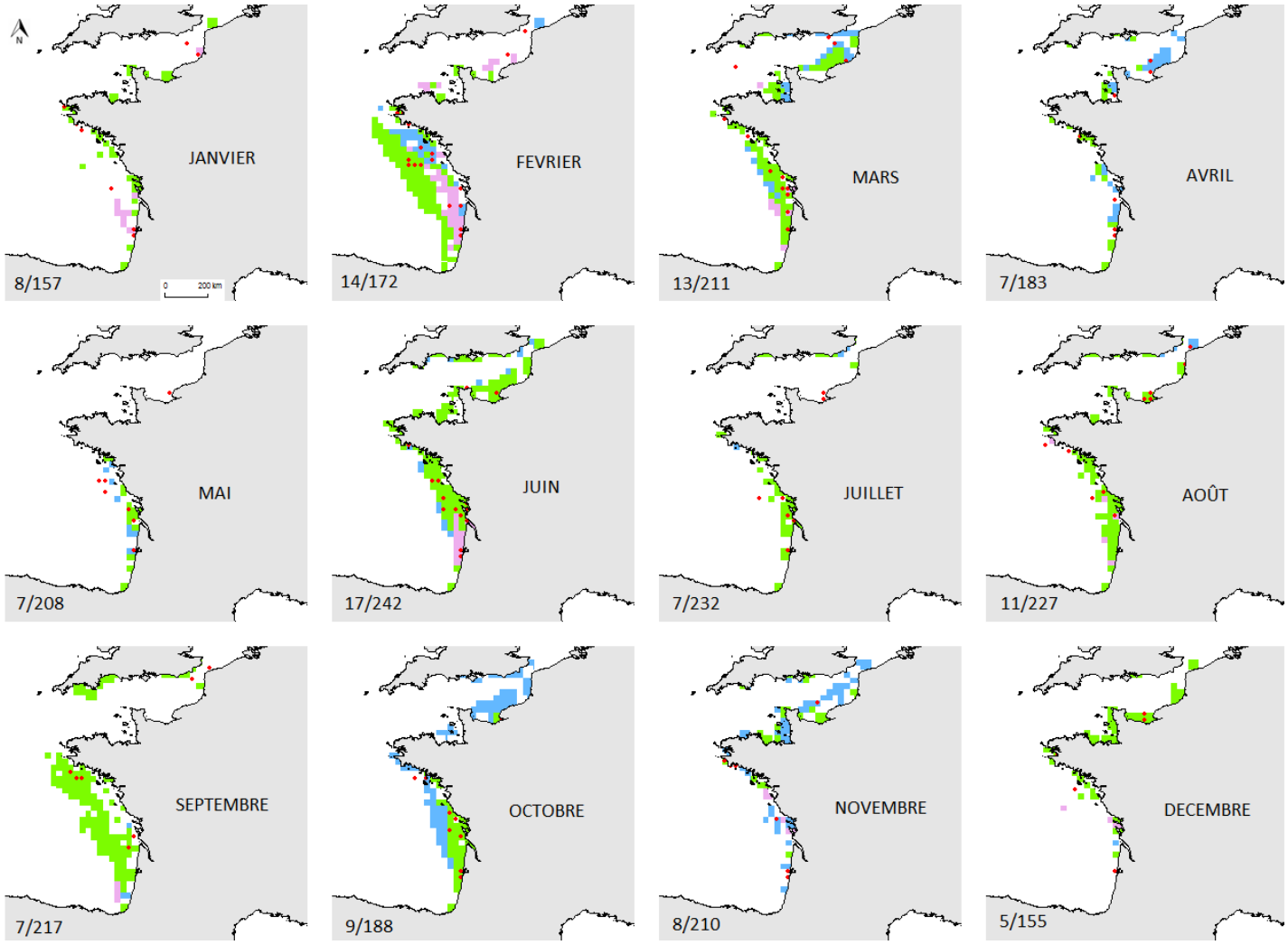


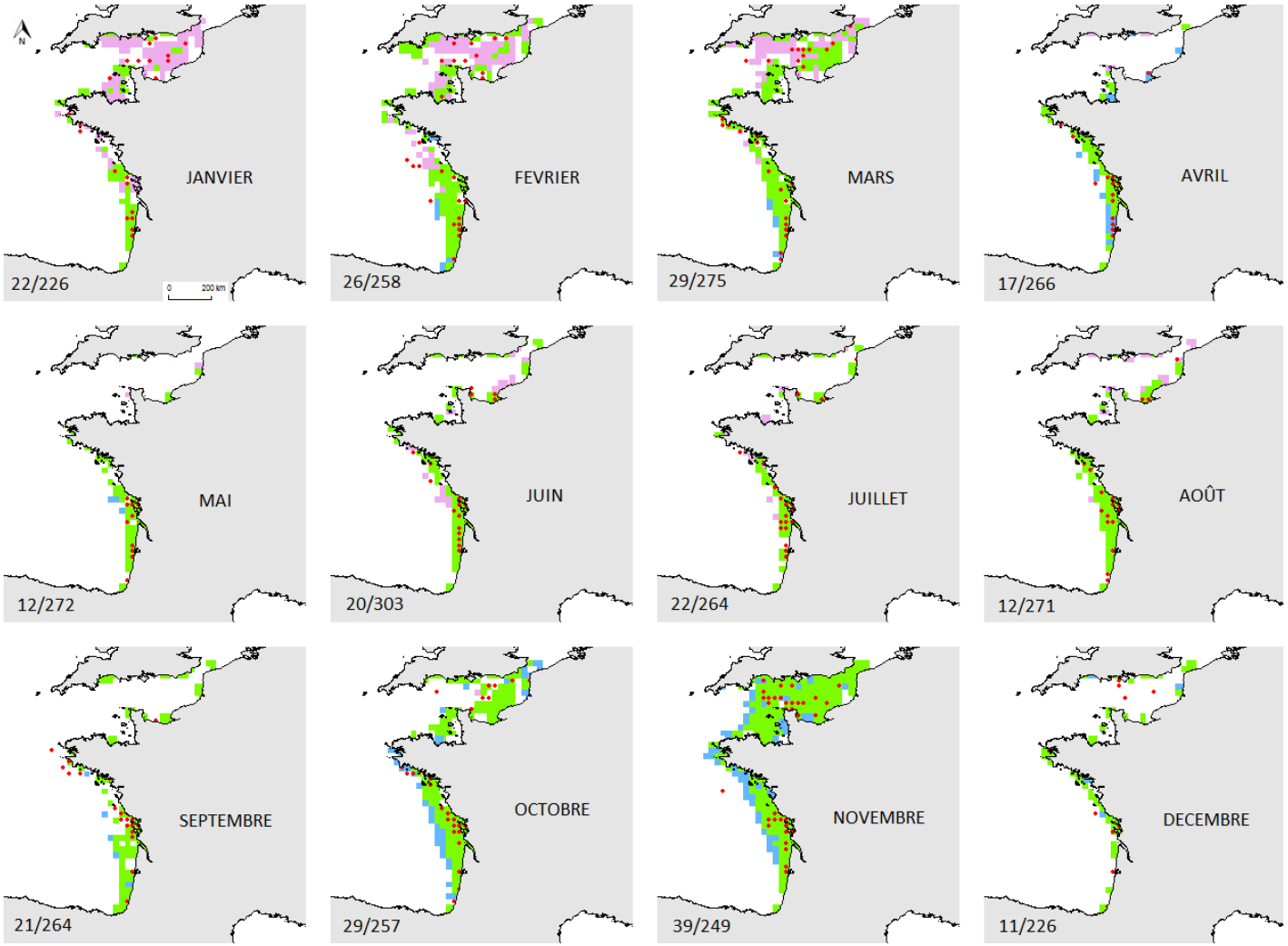


Alose feinte, modèle sur la période 2012-2016

Annexe 5 : Cartes de prédiction des habitats favorables pour les deux années (en vert, 2008 et 2011, ou 2012 et 2014), pour une année particulièrement chaude (en bleu, 2011 ou 2014) et pour une année plutôt fraiche (en rose, 2008 ou 2012) pour les deux aloses



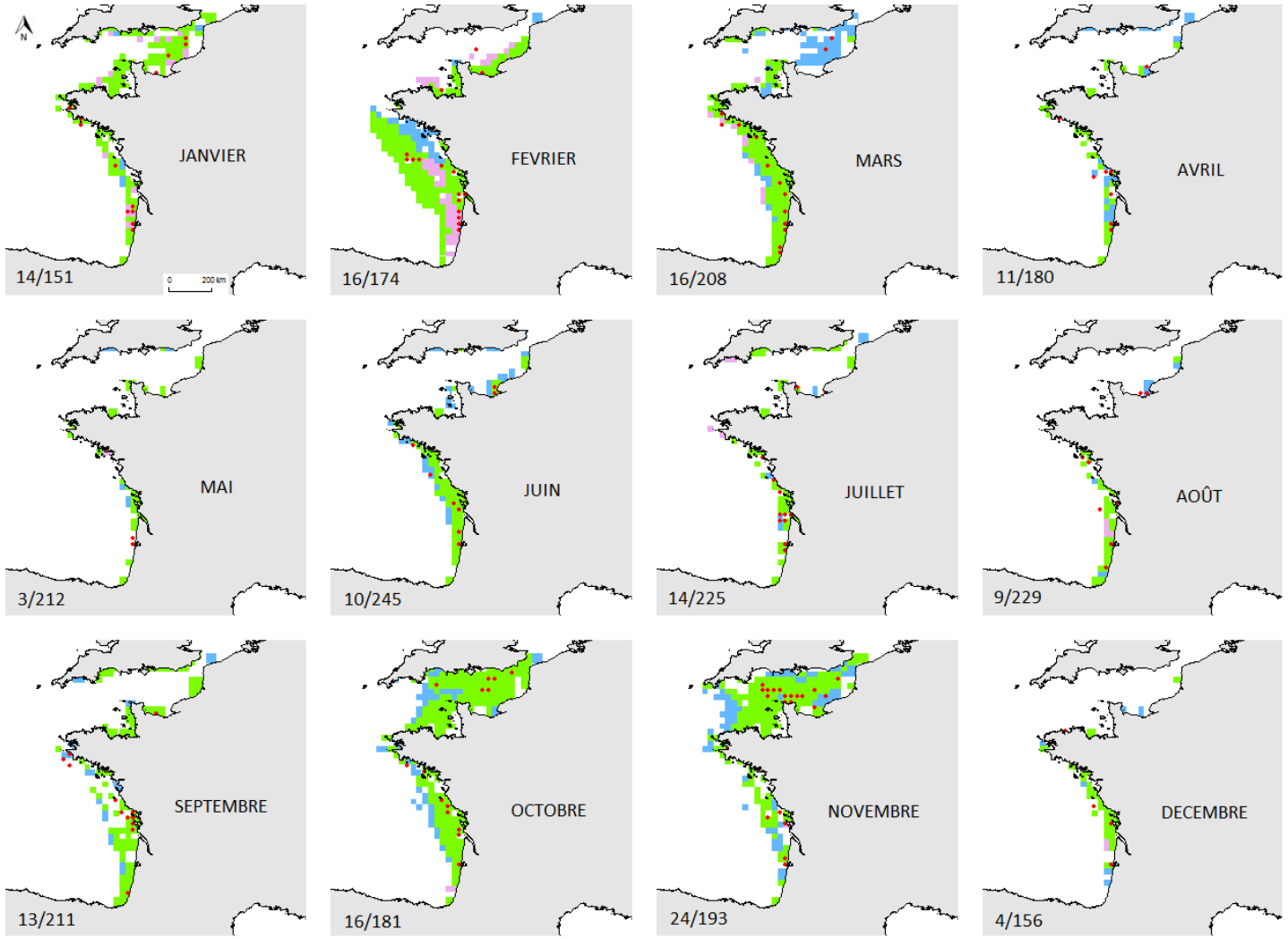

JANVIER
8/157
FEVRIER
14/172
MARS
13/211
AVRIL
7/183
MAI
7/208
JUIN
17/242
JUILLET
7/232
AOÛT
11/227
SEPTEMBRE
7/217
OCTOBRE
9/188
NOVEMBRE
8/210
DECEMBRE
5/155
Grande alose, modèle sur la période 2012-2016
LEGENDE :
Habitat favorable en 2012 et 2014
Habitat favorable uniquement en 2012
Habitat favorable uniquement en 2014
Présence effective de l'espèce dans la base
x/x
Nombre de présences / Nombre d'absences après rastérisation



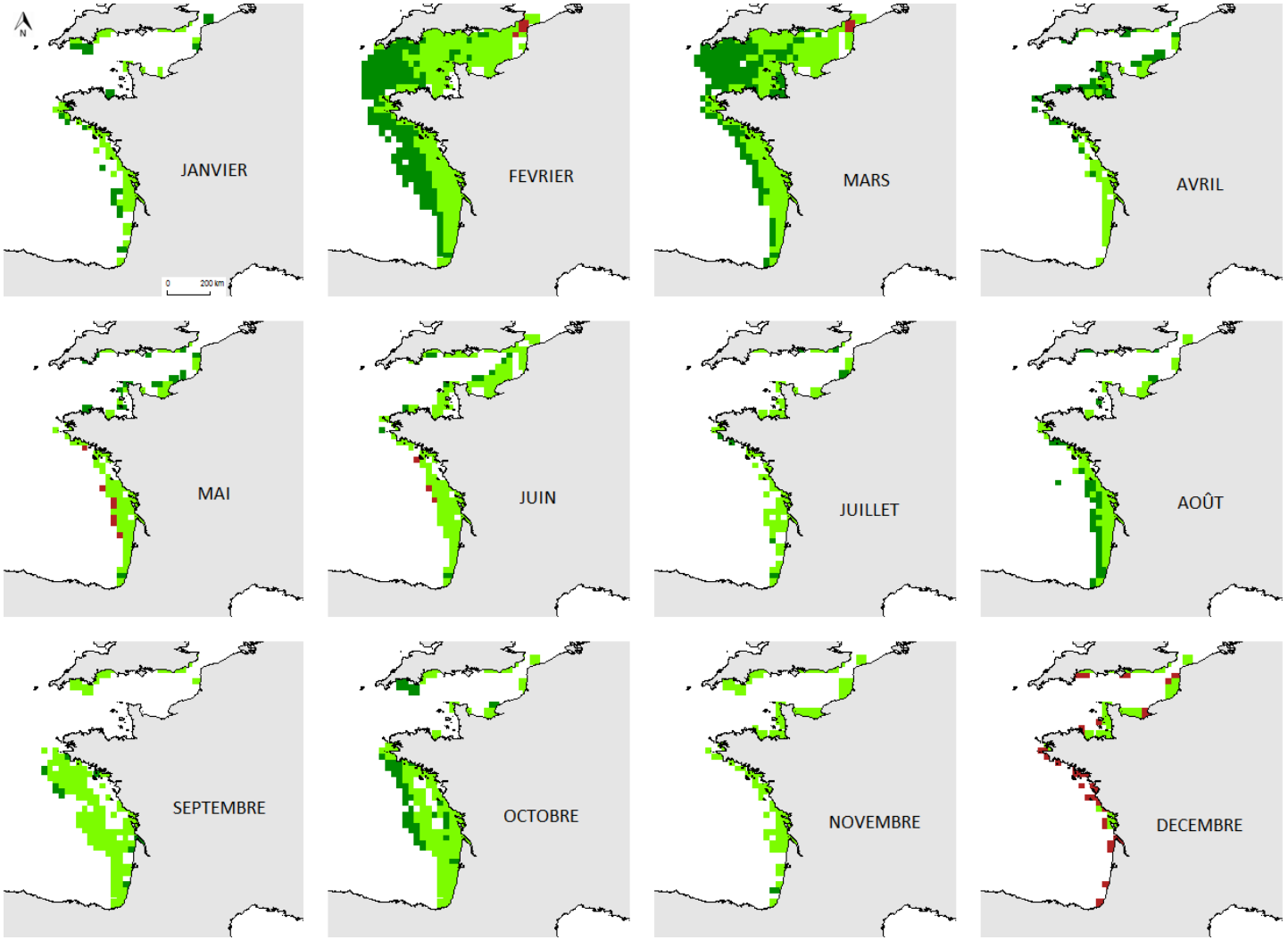
Alose feinte, modèle sur la période 2006-2016

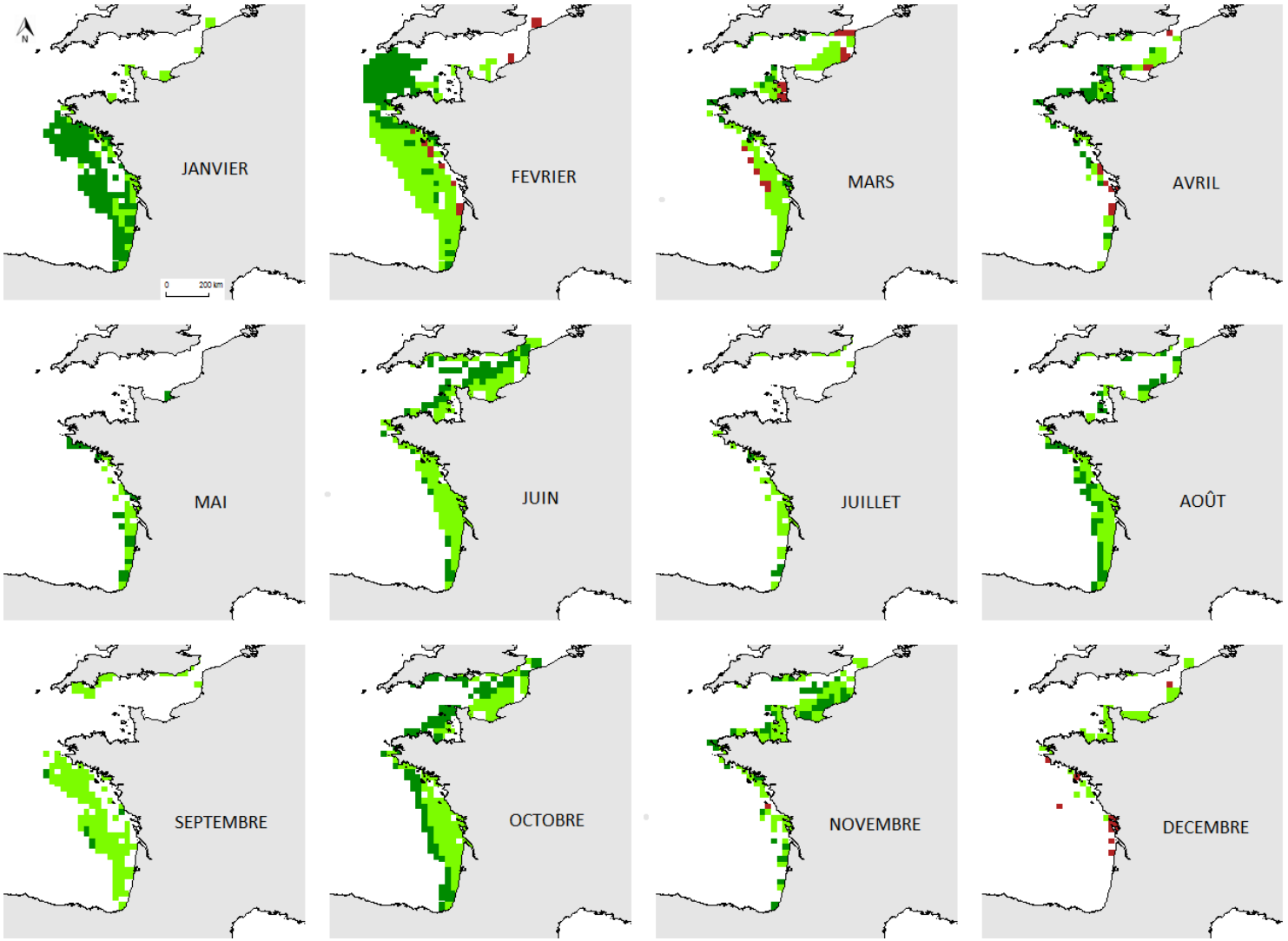
LEGENDE :

- Habitat favorable en 2008 et 2011
- Habitat favorable uniquement en 2008
- Habitat favorable uniquement en 2011
- Présence effective de l'espèce dans la base
- x/x Nombre de présences / Nombre d'absences après rastérisation


JANVIER
14/151
FEVRIER
16/174
MARS
16/208
AVRIL
11/180
MAI
3/212
JUIN
10/245
JUILLET
14/225
AOÛT
9/229
SEPTEMBRE
13/211
OCTOBRE
16/181
NOVEMBRE
24/193
DECEMBRE
4/156
Alose feinte, modèle sur la période 2012-2016
LEGENDE :
Habitat favorable en 2012 et 2014
Habitat favorable uniquement en 2012
Habitat favorable uniquement en 2014
Présence effective de l'espèce dans la base
x/x
Nombre de présences / Nombre d'absences après rastérisation

Annexe 6 : Projection des habitats favorables en mer pour les aloses à l'horizon de la fin du siècle selon un scénario de changement climatique tel que défini en section *4.1.4*. En vert clair sont représentés les habitats prédits comme favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011 / 2012 ou 2014) et restant favorables dans le contexte du changement climatique. Les habitats non favorables en 2008 et 2011 ou 2012 et 2014 mais devenant favorables pour la fin du siècle sont en vert foncé. Les habitats favorables pour une des deux années (i.e. 2008 ou 2011 / 2012 ou 2014) et devenant défavorables sous contrainte du changement climatique sont en rouge foncé

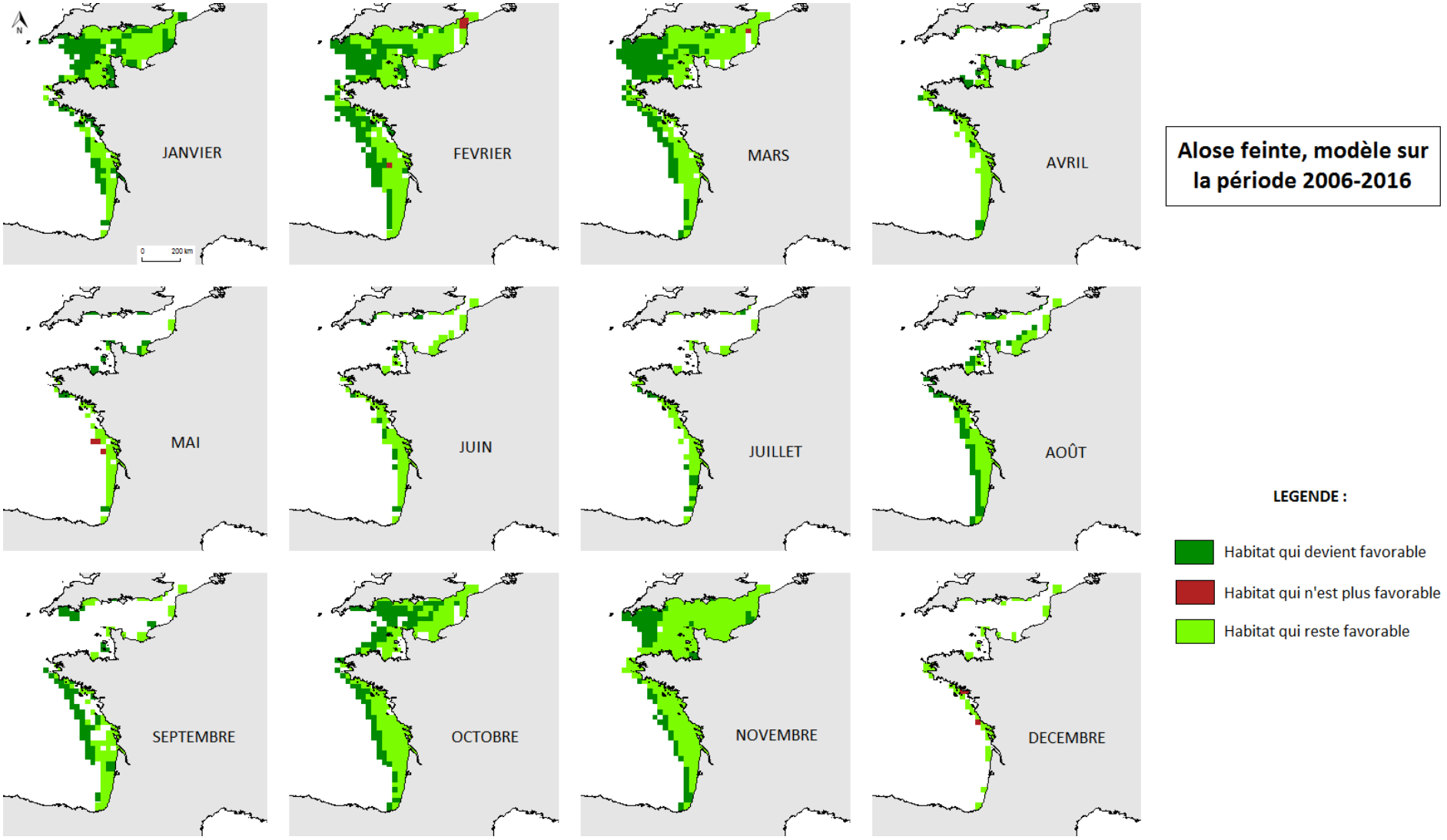


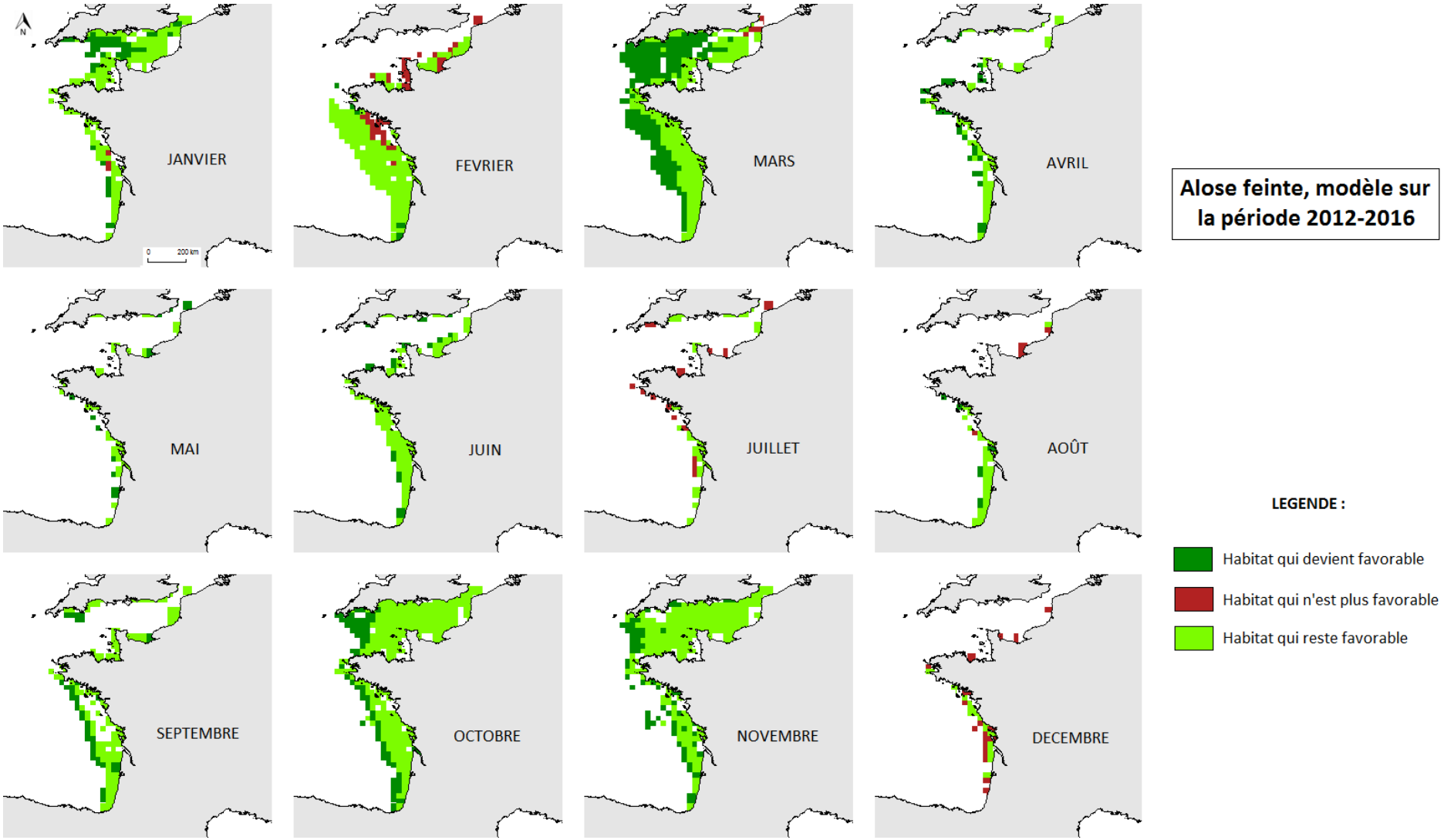


Grande alose, modèle sur la période 2012-2016

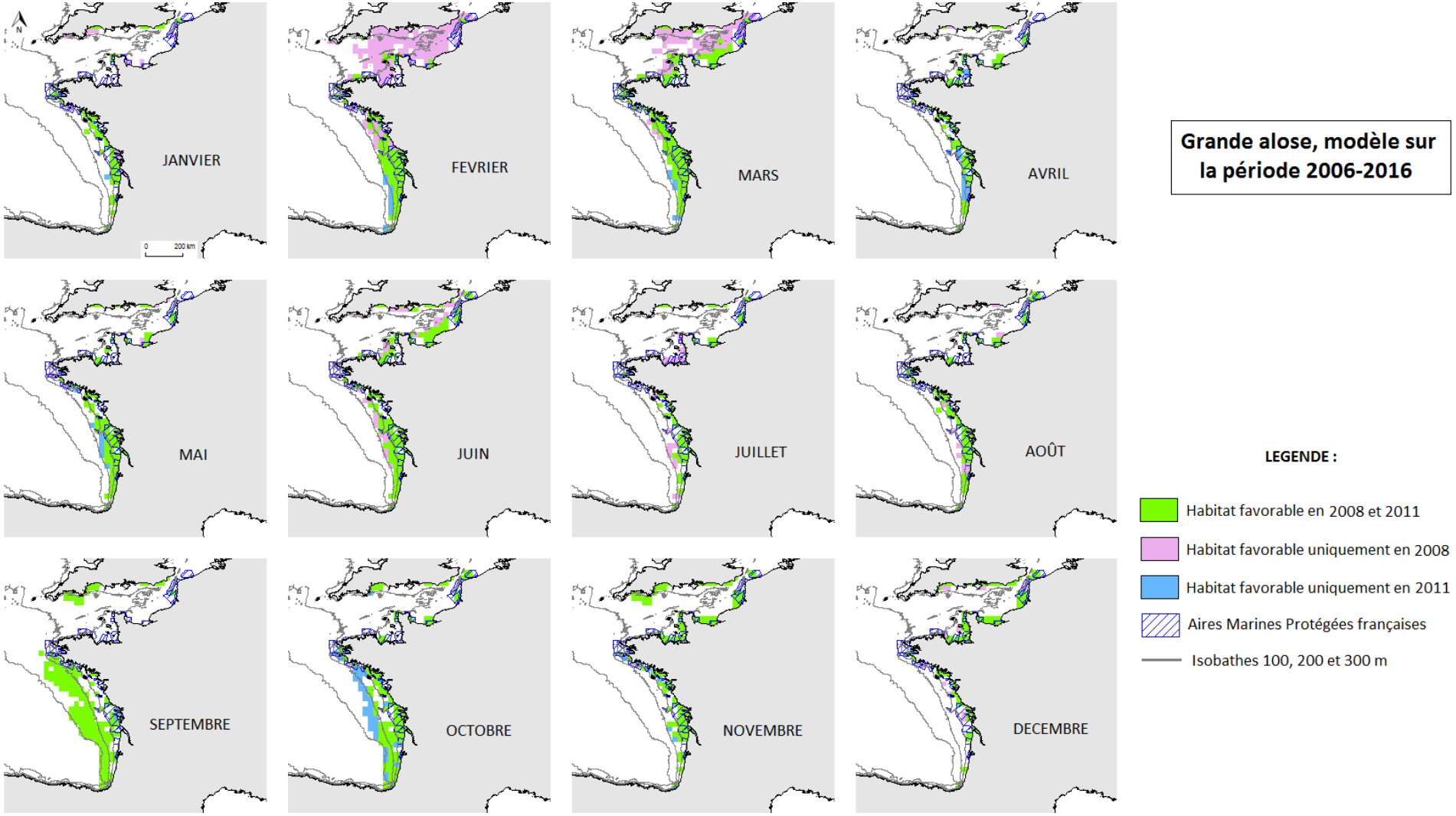
LEGENDE :

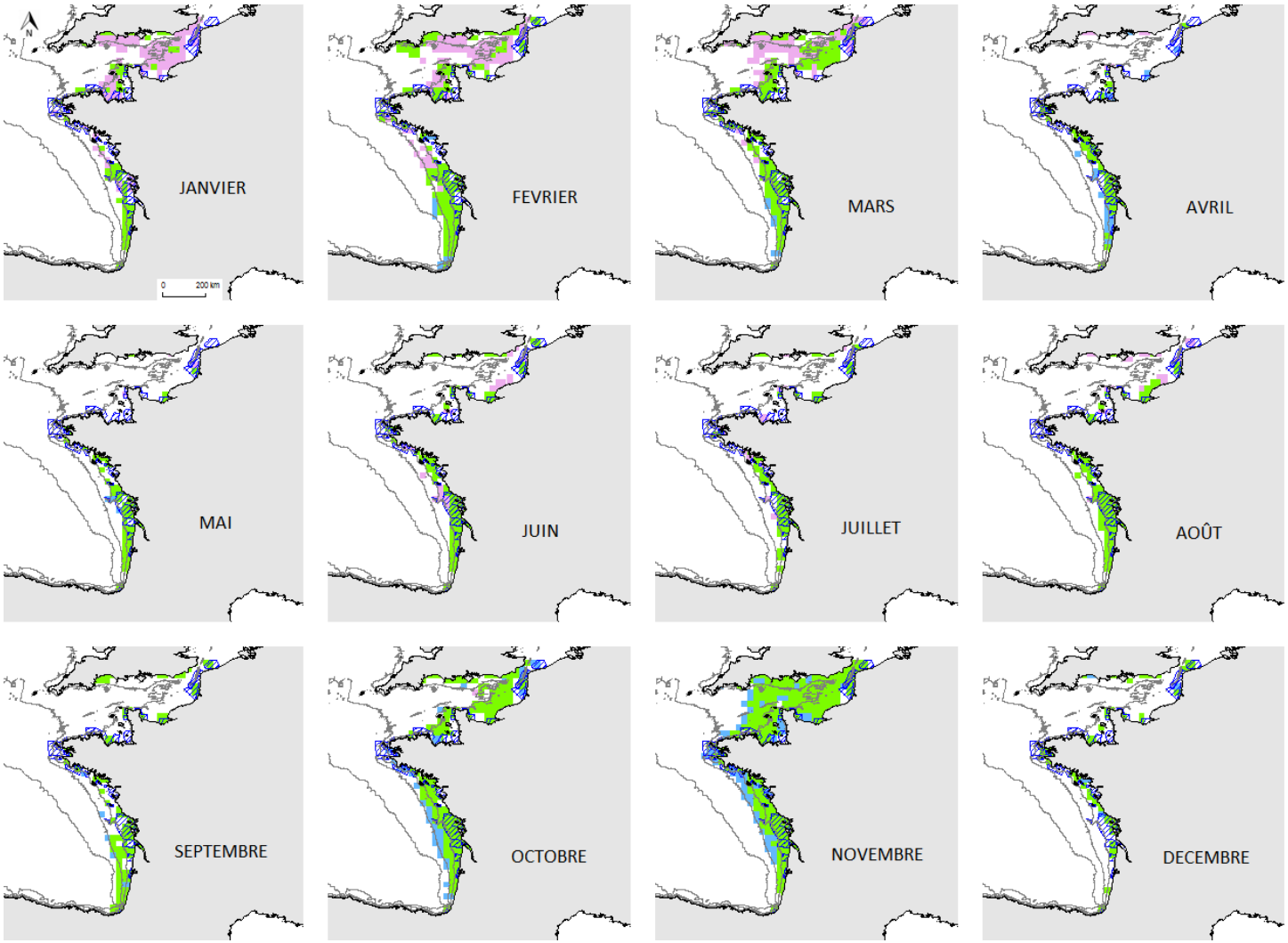
- Habitat qui devient favorable
- Habitat qui n'est plus favorable
- Habitat qui reste favorable

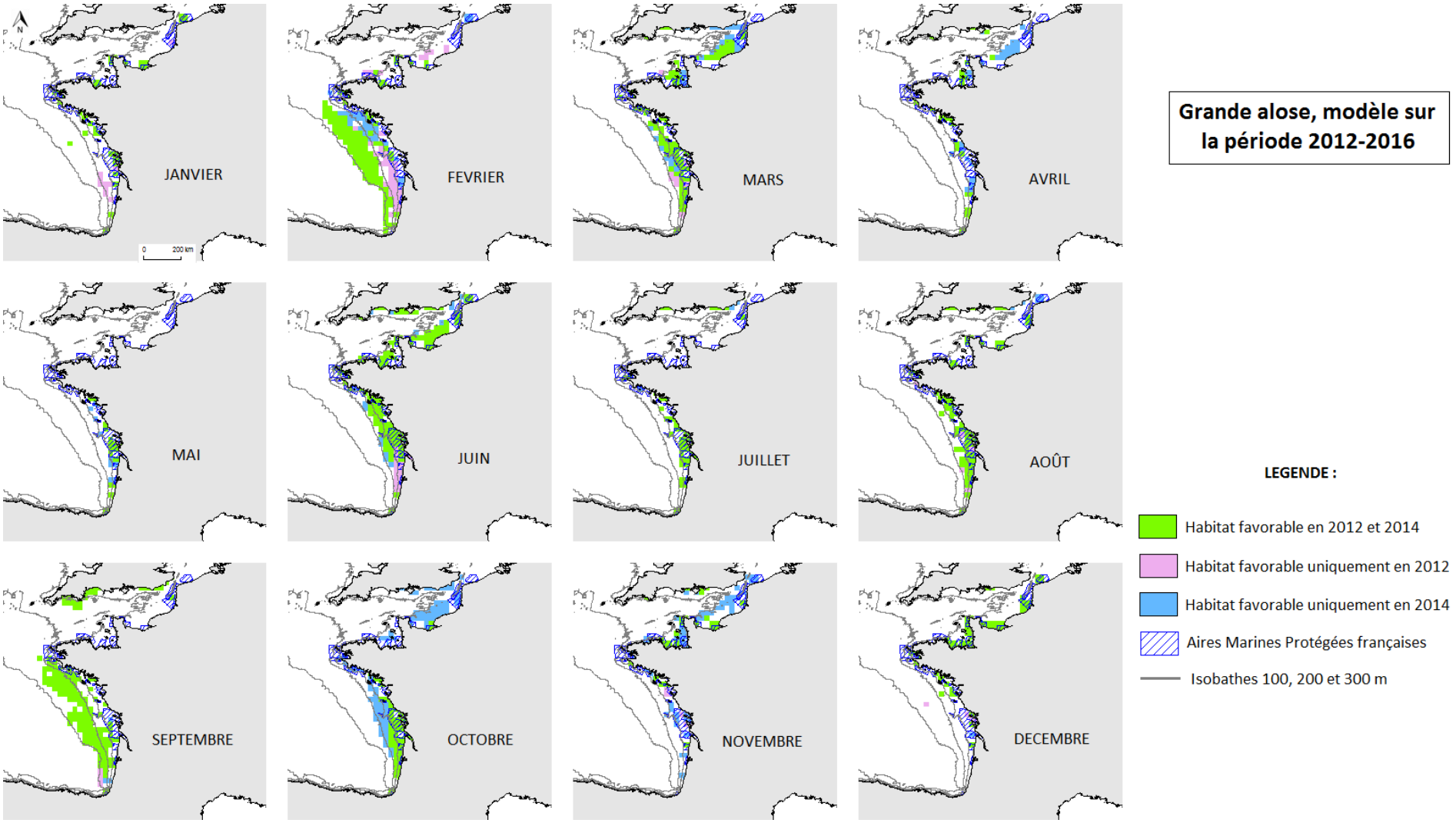

JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOÛT
SEPTEMBRE
OCTOBRE
NOVEMBRE
DECEMBRE
0 200 km
Alose feinte, modèle sur la période 2006-2016
LEGENDE :
Habitat qui devient favorable
Habitat qui n'est plus favorable
Habitat qui reste favorable

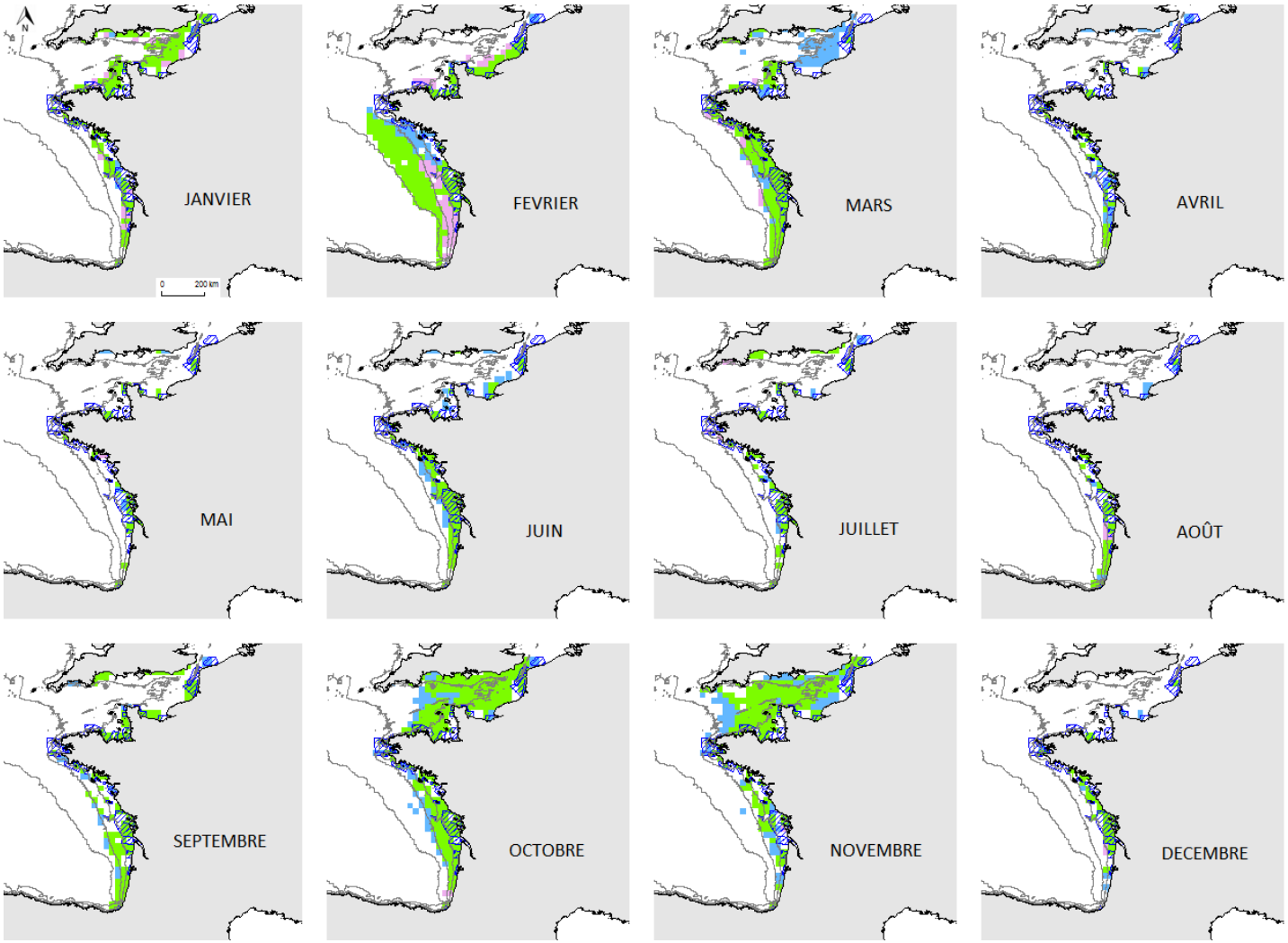

JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOÛT
SEPTEMBRE
OCTOBRE
NOVEMBRE
DECEMBRE
0
200 km
Alose feinte, modèle sur la période 2012-2016
LEGENDE :
Habitat qui devient favorable
Habitat qui n'est plus favorable
Habitat qui reste favorable

Annexe 7 : Superposition du réseau d'aires marines protégées aux cartes de prédictions mensuelles des habitats favorables. En vert : habitats favorables pour les deux années (i.e. 2008 et 2011) ; en bleu : pour une année particulièrement chaude (i.e. 2011) ; en rose : pour une année plutôt fraiche mais avec un hiver doux (i.e. 2008). Les zones en bleu hachurées correspondent aux AMP. Les isobathes jusqu'à 300 m de fond sont représentés par des lignes continues grises




JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOÛT
SEPTEMBRE
OCTOBRE
NOVEMBRE
DECEMBRE
0 200 km
Alose feinte, modèle sur la période 2006-2016
LEGENDE :
Habitat favorable en 2008 et 2011
Habitat favorable uniquement en 2008
Habitat favorable uniquement en 2011
Aires Marines Protégées françaises
Isobathes 100, 200 et 300 m


JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOÛT
SEPTEMBRE
OCTOBRE
NOVEMBRE
DECEMBRE
0 200 km
Grande alose, modèle sur la période 2012-2016
LEGENDE :
Habitat favorable en 2012 et 2014
Habitat favorable uniquement en 2012
Habitat favorable uniquement en 2014
Aires Marines Protégées françaises
Isobathes 100, 200 et 300 m


JANVIER
FEVRIER
MARS
AVRIL
MAI
JUIN
JUILLET
AOÛT
SEPTEMBRE
OCTOBRE
NOVEMBRE
DECEMBRE
0 200 km
Alose feinte, modèle sur la période 2012-2016
LEGENDE :
Habitat favorable en 2012 et 2014
Habitat favorable uniquement en 2012
Habitat favorable uniquement en 2014
Aires Marines Protégées françaises
Isobathes 100, 200 et 300 m