



La confluence de la Garonne et de la Dordogne au niveau du Bec d'Ambès, formant l'estuaire de la Gironde (© T. Auly, Université de Bordeaux 3).

Estuaires et domaine côtier

Préambule

Les océans couvrent 71 % de la surface de la Terre. Ils jouent un rôle clé dans le cycle global du carbone et déterminent largement différents processus comme la régénération des nutriments, la régulation des gaz et aujourd'hui le changement climatique global [1]. Ils abritent aussi une biodiversité remarquable, dont une partie a une valeur socio-économique considérable, notamment au travers des pêcheries [2]. Tous les océans du monde ont connu des changements majeurs depuis le siècle dernier notamment sous la pression des pêcheries, des pollutions (conséquences ponctuelles des marées noires par exemple) et du changement climatique global (ouverture progressive des Passages du Nord). Les changements climatiques survenus partout sont bien documentés, notamment pour les 50 dernières années [3]. Pourtant, les conséquences biologiques restent relativement mal décrites et insuffisamment comprises [4][5]. Ceci s'explique en partie par le nombre limité d'études à long terme capables de démêler spécialement les réponses biologiques, mais également parce que ces conséquences peuvent varier selon les groupes biologiques et s'exprimer avec un décalage parfois important (une ou plusieurs générations [6]). En outre, ces réponses biologiques peuvent être extrêmement complexes et varient selon les régions [7].

Le Grenelle de la mer définit le littoral comme une *zone charnière* à la rencontre de la terre et de l'océan. Au sens strict, on peut le restreindre à l'estran (partie de terre située entre les niveaux connus des plus basses et des plus hautes mers), mais de manière plus large on le considère comme une interface entre les écosystèmes terrestres, estuariens et marins. Ainsi, c'est un lieu de concentration des impacts, un domaine physique et biologique complexe à forte biodiversité. Du fait de leur position à l'interface continent/océan, les littoraux constituent des écosystèmes soumis à une forte variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques (ex. débit, cycle tidal, température, salinité et matières en suspension [8]). La rencontre de deux masses d'eau, marine et continentale, en fait des écosystèmes riches et complexes, de grande importance écologique et biologique : habitats de nombreuses espèces, zones de nourricerie, zones refuge ou lieu de croissance [9][10][11]. Yanagi estime que 70 % de la ressource halieutique passe une partie de son cycle de vie en zone côtière [12]. C'est le cas également pour les espèces exploitées par les flottilles de pêche d'Aquitaine (cf. chapitre 6.3) : soles, anchois, sardines, bars, maigres ou encore migrants amphihalins dépendent, pour tout ou partie de leurs cycles de vie, du fonctionnement et la connectivité des écosystèmes estuariens, littoraux et côtiers.

L'Aquitaine possède une grande diversité de milieux estuariens et littoraux qui influent aussi fortement sur la structuration physique du domaine côtier dont certaines parties soumises à l'influence des panaches estuariens constituent des zones de frayères propices aux espèces de poissons pélagiques tels que l'anchois ou la sardine [13][14]. Ainsi nous pouvons différencier, l'estuaire de la Gironde (635 km²), le plus grand d'Europe Occidentale, qualifié par Goosen *et al.* d'hétérotrophe [15][16], qui constitue un modèle d'estuaire « *macrotidal' type européen* ». Il est associé aux marais girondins et est

1. Subissant des amplitudes de marée importantes.

connecté aux basses vallées de l'Isle, de la Dordogne et de la Garonne pour une surface totale de bassin-versant de 56 000 km². Au sud de l'Aquitaine, le bassin de l'Adour (16 890 km² de superficie de bassin-versant) est associé aux barthes de l'Adour, zones humides aujourd'hui bien impactées par l'urbanisation et l'agriculture. Entre ces deux grands estuaires, les marais et bassin d'Arcachon prolongé en mer par le banc d'Arguin reçoivent les eaux du bassin de la Leyre et des landes humides et lagunes de Gascogne. Enfin sur les côtes girondine et landaise, courants et étangs de l'arrière-dune complètent la grande diversité des biotopes aquatiques aquitains.

L'adaptation des écosystèmes côtiers, littoraux et estuariens non seulement aux effets du changement climatique, mais plus largement à ceux du changement global est un questionnement majeur pour les équipes de recherche. En effet, le changement climatique ne constitue qu'un des facteurs de modification des écosystèmes aquatiques, en particulier pour ceux qui se situent dans ces domaines d'interface entre la terre et la mer. La pollution des océans vient principalement des influences terrigènes (80 % selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement), le phénomène de littoralisation (augmentation des mouvements migratoires de l'arrière-pays vers la côte) artificialise fortement le trait de côte et conduit à chenaliser les estuaires, à construire dans des zones exposées aux événements extrêmes dont la vulnérabilité aux risques induits par le changement global est accrue par l'élévation du niveau de la mer et/ou par l'augmentation de la fréquence des crues. Il nécessite une meilleure compréhension des processus mis en jeu dans la dynamique des écosystèmes et dans le couplage des socio-écosystèmes pour mieux appréhender l'adaptation des communautés aux facteurs de changement.

L'évolution déjà apparente des paramètres physico-chimiques qui contrôlent les écosystèmes côtiers a été analysée dans le chapitre 1. Nous présentons au début de ce chapitre (6.1) l'impact de l'évolution de ces forçages physiques sur les risques en termes d'érosion et de submersion des littoraux, puis nous montrons les conséquences en termes de modification de biodiversité (6.2) et enfin les impacts sur les ressources exploitées par la pêche et l'aquaculture (6.3).

6.1 Modification du littoral

Coordination : Philippe Bonneton

Rédacteurs : Stéphane Abadie, Philippe Bonneton, Bruno Castelle, Jean Favennec, Cyril Mallet, Aldo Sottolichio

Contributeurs : Vincent Hanquiez, François Hissel, Vanessya Laborie, Philippe Maron, Jean-Pierre Tastet

Les 270 km du littoral aquitain présentent une grande diversité d'entités géomorphologiques, ayant une forte valeur patrimoniale. Cet environnement, modelé par l'action de marées et de houles intenses, est sujet à de forts aléas naturels, tels que l'érosion et la submersion marine. Or ce milieu est soumis à une pression démographique et une urbanisation croissante. Il est donc essentiel d'avoir une bonne connaissance des aléas littoraux aquitains afin d'en limiter les risques, en particulier dans le cadre du changement climatique. Nous présentons dans cette section le fonctionnement des littoraux sableux et rocheux aquitains, ainsi que les aléas d'érosion et de submersion auxquels ils sont actuellement soumis. Nous analysons ensuite l'impact potentiel de l'élévation du niveau marin et des modifications du climat de houle en Aquitaine, liées au changement climatique, sur les aléas érosion et submersion.

Introduction

Le littoral aquitain est caractérisé par une longue façade maritime orientée approximativement nord/sud qui s'étend de l'embouchure de la Gironde à celle de la Bidassoa sur près de 270 km (**Figure 1**). La côte aquitaine est caractérisée par différentes entités géomorphologiques. La plus au nord est l'estuaire de la Gironde, le plus vaste estuaire d'Europe occidentale. Plus au sud, de la Pointe de Grave en Gironde à la Pointe Saint-Martin dans le département des Pyrénées Atlantiques, un long système de plages et dunes sableuses s'étend sur 230 km. Cet environnement est interrompu principalement par le bassin d'Arcachon, le Gouf de Capbreton et l'estuaire de l'Adour. Au sud de l'Aquitaine, les falaises rocheuses de la Côte Basque alternent avec des plages sableuses de poche sur un linéaire de 40 km jusqu'à la frontière espagnole. La côte aquitaine est donc caractérisée par une grande diversité d'entités géomorphologiques et d'écosystèmes associés.

Une caractéristique commune à l'ensemble du littoral aquitain est sa forte variabilité induite par des forçages hydrodynamiques (houle et marée) très intenses. De ce fait ce littoral est sujet à de forts aléas naturels tels que l'érosion et la submersion marine (**Figure 1**). L'érosion concerne aussi bien les côtes sableuses (ex. : Nord Médoc, **Figure 1**) que les falaises du Pays Basque (**Figure 1**), alors que la submersion marine affecte les zones basses estuariennes et lagunaires (ex. : tempêtes Klaus, 2009 et Xynthia, 2010). Ces phénomènes ont des conséquences sociales et économiques de plus en plus importantes, car les espaces littoraux subissent une pression démographique et une urbanisation croissantes liées principalement au développement de l'économie des loisirs et du tourisme.

Dans ce contexte, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des aléas et de la vulnérabilité du littoral aquitain pour pouvoir prévoir et limiter les risques liés aux phénomènes d'érosion et de submersion. Ces enjeux sont renforcés par la problématique du changement climatique et l'évolution des forçages côtiers (**Tableau 1**). En effet, le changement climatique induisant une élévation du niveau moyen de la mer, mais aussi un changement des climats de houle et des caractéristiques des tempêtes, devrait modifier les risques d'érosion et de submersion.



1



2



3



4

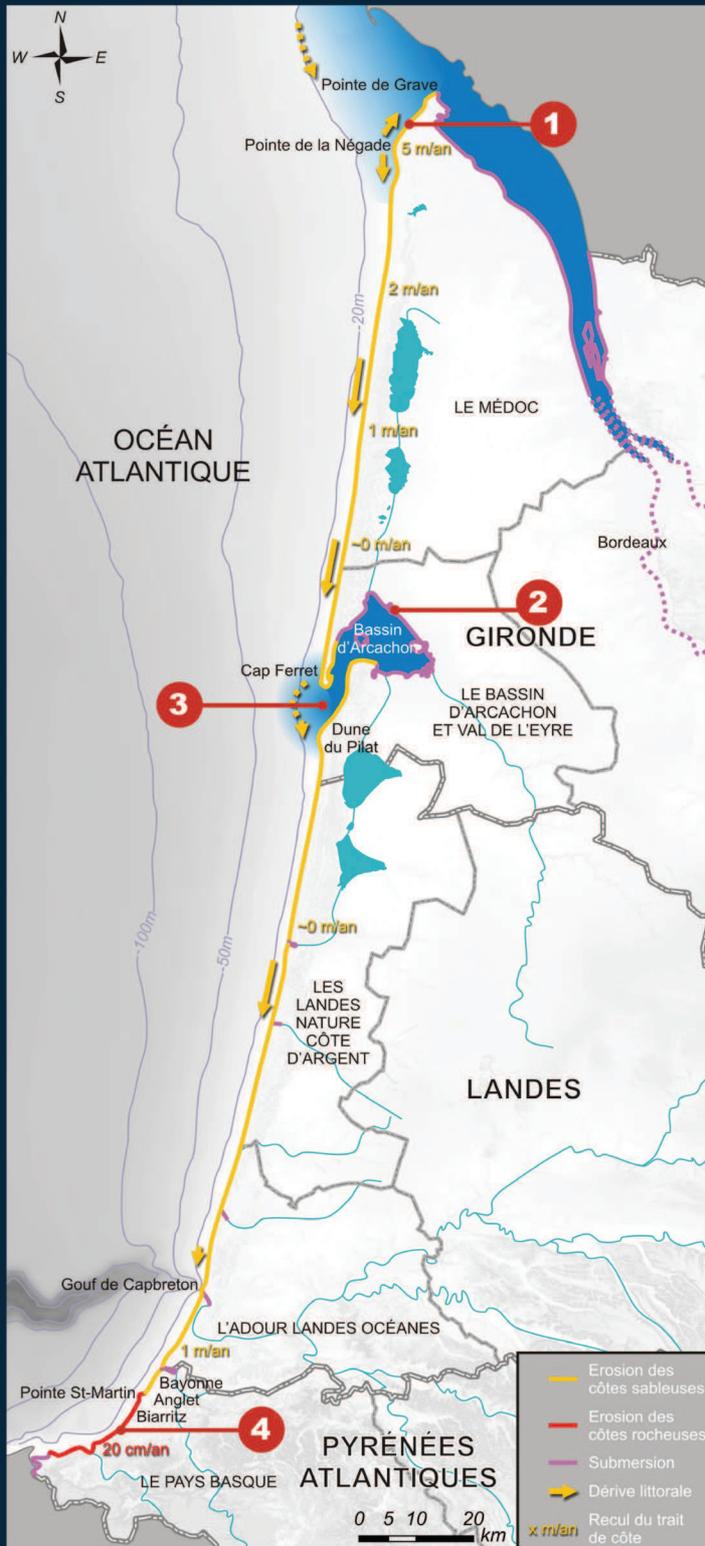


Figure 1 : Littoral aquitain et alsés.

Variable climatique	Importance	Observations (tendances)	Observations (variabilité)	Projections
Niveau marin moyen	Il s'agit d'une variable climatique qui a en général pour effet d'aggraver les aléas de submersion, d'érosion et d'intrusions salines dans les aquifères sur le long terme	Le niveau marin s'élève dans le golfe de Gascogne. Les mesures indiquent des tendances proches de la moyenne globale (de l'ordre de 2mm/an)	La variabilité du niveau marin est liée en premier lieu aux variations de température et de salinité des océans [1]	Chust et al. [2] prédisent des élévations de niveau marin de l'ordre de 0,28 à 0,48m de 2001 à 2100 mais ces évaluations ne prennent pas en compte les incertitudes
Vagues	La direction et la hauteur des vagues sont des paramètres importants pour les aléas de submersion et d'érosion marine	L'augmentation des hauteurs de vagues [3][4] n'a pas été confirmée par la régionalisation de Charles et al. [5][6]	La variabilité des vagues s'explique partiellement par des variables atmosphériques à l'échelle du bassin Atlantique Nord [7][4][5][6]	Baisse de l'énergie des vagues et décalage vers le nord de leur direction en été [5][6]
Surcotes marines	Les surcotes sont un paramètre important pour la submersion marine	Pas d'étude de tendance connue pour la côte Aquitaine	Pas d'étude de variabilité pluriannuelle connue pour l'Aquitaine	Pas d'étude de projection connue pour l'Aquitaine
Vent	Le vent agit sur le transport éolien, principalement lors des tempêtes [8]			Pas d'évidence de changement des régimes de tempêtes [9]
Précipitations	Variable climatique agissant sur l'érosion des sols et donc les apports sédimentaires. Ceci est cependant extrêmement délicat à quantifier			voir Déqué, 2007 [10]

Tableau 1 : Synthèse des effets du changement climatique sur les principaux forçages contrôlant la dynamique du littoral (d'après Le Cozannet et al. [11]).

Les recherches en France concernant l'impact du changement climatique sur l'évolution du milieu littoral se sont développées depuis 10 ans, en particulier dans le cadre des programmes ANR portant sur la vulnérabilité des milieux et le changement global. On peut citer par exemple le projet ANR MISEEVA qui a étudié la vulnérabilité du système côtier à la submersion marine dans le contexte du changement global, avec des applications centrées sur le Languedoc Roussillon. Le projet ANR VULSACO a permis d'avancer dans la compréhension de la vulnérabilité des plages sableuses françaises, avec une des applications concernant la Gironde. Les enjeux aquitains concernés par l'érosion marine et la submersion sont de plusieurs ordres : humains, économiques, sociétaux, environnementaux et patrimoniaux. Au niveau de la région Aquitaine, cette thématique est au cœur des préoccupations des chercheurs du RRLA (Réseau de Recherche Littorale Aquitain) en interaction avec les objectifs plus appliqués de l'Observatoire de la Côte Aquitaine et du GIP littoral Aquitain. Ces derniers acteurs ont ainsi caractérisé l'aléa érosion côtière (y compris les mouvements de terrain) aux horizons 2020 et 2040 dans le cadre de la mise en place de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière, sans toutefois prendre en compte explicitement l'impact du changement climatique.

Dans ce chapitre nous analysons l'impact potentiel des changements climatiques sur les différentes entités du littoral aquitain : côtes sableuses, côtes rocheuses, systèmes lagunaires et estuariens. Au préalable il est nécessaire d'introduire le fonctionnement actuel de ces entités.

I- Fonctionnement des principales entités du littoral aquitain et aléas

Côte sableuse

Évolution globale

Le littoral sableux aquitain s'est formé à la fin de la transgression post-glaciaire, il y a environ 6000 ans, lorsque le niveau marin s'est stabilisé à son niveau actuel (cf. chapitre 2). Lors de cette remontée, l'océan a entraîné de grandes quantités de sédiments détritiques qui s'étaient accumulées sur la plate-forme continentale pendant la période glaciaire. Cette abondance sédimentaire a conduit à la formation des plages et systèmes dunaires que nous connaissons aujourd'hui en Aquitaine [10]. Après une période de quasi-stabilité du littoral sableux, lié à un budget équilibré entre les flux sédimentaires océaniques,

fluviaux et terrestres, commence une période de restriction des apports sédimentaires. Celle-ci s'explique en grande partie par la diminution sur le plateau du stock sableux (transporté par les vagues jusqu'au rivage), et qui actuellement peut se limiter en certains endroits à de simples placages sableux [13]. Cette pénurie de sable se traduit par une érosion globale du littoral depuis au moins deux siècles et peut être – au moins sur certaines sections du littoral – depuis que la mer a atteint son niveau actuel [14]. Cette évolution naturelle a été renforcée par l'action de l'Homme telle que l'extraction de granulats marins ou fluviaux. Le système de plages et dunes sableuses de la côte aquitaine est actuellement globalement en érosion (recul de 1 à 3 m/an ; **Figure 1**) avec une assez forte variabilité spatiale et des vitesses de recul pouvant localement atteindre 6 m/an [15]. L'anthropisation de cet environnement ne devient significative vers le sud qu'à partir de Capbreton, et de manière très prononcée le long du littoral basque.

Si l'évolution du niveau marin et le transport des sédiments par le vent ont joué un rôle majeur dans l'évolution de notre littoral depuis la dernière glaciation, ce ne sont plus actuellement les facteurs majeurs contrôlant l'évolution du trait de côte. Par exemple l'élévation du niveau marin de 2 mm/an en Aquitaine n'explique que seulement 5 % du recul observé sur le littoral (estimation METHYS/EPOC, résultats non publiés). Le budget sédimentaire de cet environnement est principalement contrôlé par l'hydrodynamique littorale et plus particulièrement par l'action des vagues et des courants qu'elles induisent, et la disponibilité de stocks sédimentaires. Excepté au niveau des embouchures estuariennes (Gironde et Adour) et lagunaires (bassin d'Arcachon) les courants de marée sont de faibles intensités (<10 cm/s) et contribuent peu au transport sédimentaire. Le principal phénomène contrôlant les flux sédimentaires sur notre littoral est donc le courant parallèle à la côte, dénommé courant de dérive, généré par les vagues lorsqu'elles déferlent avec un angle d'incidence par rapport au rivage. Ce courant transporte de grandes quantités de sable le long du littoral, qu'on appelle dérive littorale. Sur nos côtes, les houles de directions dominantes ouest/nord-ouest vont générer un courant de dérive et une dérive littorale résultante orientée vers le sud pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de m³ par an. Les variations spatiales de ces flux sédimentaires (**Figure 1**) vont déterminer les taux d'érosion ou d'engraissement des plages. Au nord, à la Pointe de la Négade, le changement d'orientation de la côte induit une divergence de la dérive littorale et donc une forte érosion de cette zone (le taux d'érosion peut localement atteindre 5 m/an d'après Aubié *et al.* [16]). De l'Anse du Gulp (située au sud de la Pointe de la Négade) jusqu'à la Pointe du Cap-Ferret, on observe une évolution du trait de côte passant progressivement d'un fort recul de 2 m/an au nord, à une quasi-stabilité au sud. Ceci s'explique par une forte augmentation de la dérive littorale au sud de l'Anse du Gulp puis à une quasi-constance à l'approche du Cap-Ferret. Les plages sableuses sont interrompues par l'embouchure du bassin d'Arcachon. Si à long terme le transport sédimentaire vers le sud induit par les vagues n'est pas interrompu, en revanche les mécanismes sédimentaires dans cet environnement mixte (houle et marée) sont beaucoup plus compliqués. Le transport sédimentaire se réalise en partie par la lente migration de structures morphologiques (bancs sableux, dunes hydrauliques...) du nord vers le sud de l'embouchure, puis vers les plages adjacentes. Au sud de Biscarrosse jusqu'à Capbreton, on observe un trait de côte proche de l'équilibre avec peu de zones en érosion. La dérive littorale moyenne annuelle est orientée vers le sud jusqu'à environ 2 km au nord du Gouf de Capbreton. Du Sud de Capbreton à Anglet, le sens de la dérive fluctue d'un point à un autre car la direction moyenne des houles est frontale. Le Gouf de Capbreton induit une circulation particulière. En effet, à l'approche du Gouf, les houles faiblement ou modérément énergétiques sont réfractées, conduisant à une forte diminution de la dérive littorale au nord du Gouf. Cette convergence des flux sédimentaires entraîne un engraissement des plages au nord du Gouf. Cependant lors de conditions énergétiques (hauteur significative des vagues supérieure à 2-3 m) la dérive littorale peut à nouveau s'orienter vers le sud, et de grandes quantités de sable finissent leur route en tête de canyon.

Dynamique sédimentaire des plages aquitaines

La géomorphologie des plages sableuses aquitaines, synthétisée en **Figure 2**, est caractérisée par un système dunaire [8][17], et deux systèmes de barres sableuses. Le premier, appelé système barre/baïne,

est observé en zone d'estran avec une rythmicité longitudinale d'environ 350 m et une migration dans le sens de la dérive littorale [18][19]. Le deuxième système, en zone subtidale, a une forme plus ou moins prononcée en croissant avec une rythmicité d'environ 700 m [20][21], et une migration dans le même sens mais plus lente que celle du système barre/baine [22].

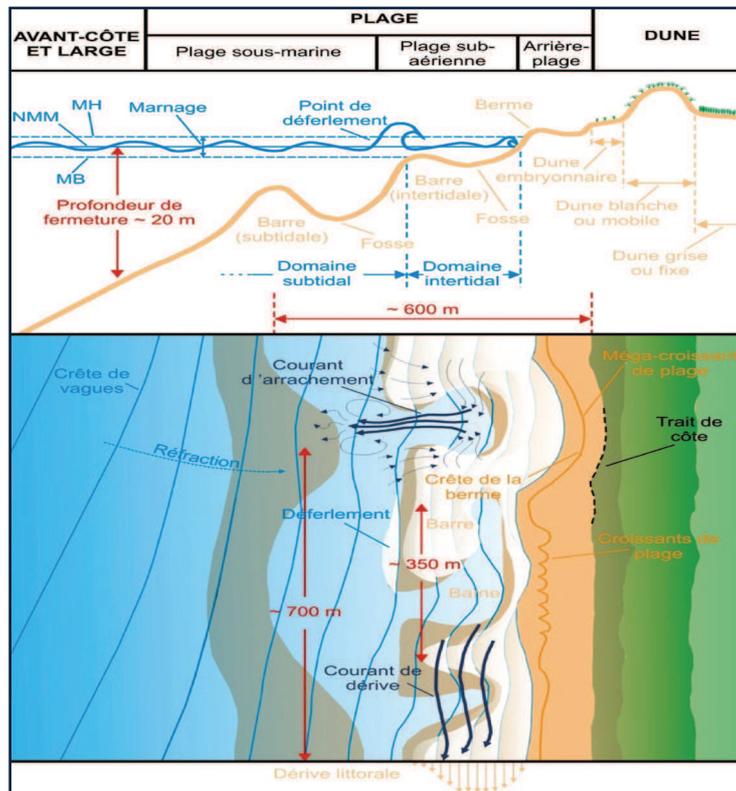


Figure 2 : Morphologie des plages aquitaines et principaux processus hydrodynamiques. MH : marée haute, MB : marée basse, NMM : niveau moyen de la marée.

Les échanges sédimentaires transversaux (perpendiculaires au littoral) jouent un rôle important sur la dynamique de la plage à des échelles de temps inférieures à la décennie. Pendant les épisodes de tempête il y a une prédominance des flux sédimentaires vers le large, qui sont induits par le courant de retour (courant qui vient compenser l'apport de masse des vagues vers la plage). On observe alors une migration rapide (10 m/jour) des barres vers le large et une érosion du haut de plage. Pendant les épisodes de temps calme, il y a une prédominance des flux sédimentaires vers le bord induits par les vagues en eau peu profonde. On observe une migration lente (1 m/jour) des barres vers la côte et une lente reconstruction de la plage, en particulier matérialisée par la formation d'une berme. Ainsi on observe sur le littoral aquitain un quasi-équilibre dynamique du volume de la plage aérienne avec des cycles d'érosion/accrétion à l'échelle des tempêtes [21], à l'échelle saisonnière (en réponse à la forte modulation saisonnière de l'énergie des vagues [19][23]) mais aussi aux cycles de la NAO sur plusieurs années [23]. Cette variabilité de la réponse du trait de côte à des indices climatiques a déjà été documentée sur d'autres sites dans le monde [24][25].

On observe une très forte interdépendance entre les barres sableuses, le haut de plage et la dune. En effet, les plages alimentent les dunes par transit éolien et les dunes réalimentent les plages lors des épisodes d'érosion. Les données sur le littoral aquitain manquent cruellement pour quantifier ces rétroactions. Les barres sédimentaires protègent également la plage en dissipant l'énergie des vagues de tempête au large par déferlement bathymétrique, réduisant ainsi considérablement à la fois l'intensité des processus hydro-sédimentaires en zone de jet de rive et le risque de submersion. *Castelle et al.* [26] ont ainsi montré que la dégénérescence d'une barre sédimentaire suite à un événement extrême avait conduit à une érosion exceptionnelle de la plage pendant plusieurs mois après celle-ci, puisque la barre n'était plus présente et ne protégeait plus la plage. Ceci a de fortes implications quant à l'impact potentiel d'un changement de la

fréquence et de l'intensité des événements extrêmes dans le cadre du changement climatique. Ainsi, il est important de noter que les barres sableuses et le système dunaire sont des éléments « tampon » essentiels à la bonne santé des plages sableuses aquitaines.

Submersion

Sur les plages sableuses d'Aquitaine, caractérisées par la présence constante d'un système plage et dune, il n'y a risque de submersion que lorsque sont réunies les deux conditions suivantes : un cordon de dune littorale bas et étroit, et une zone d'arrière-dune de faible altitude. Sur la majeure partie de la façade sableuse d'Aquitaine, entre le Médoc et l'Adour, ces conditions ne sont pas réunies. En effet le système des dunes littorales y présente la succession suivante : plage, dune bordière de 10 à 25 mètres de haut, arrière-dunes et lettes de 5 à 15 m d'altitude et dunes modernes de 10 à 70 m. Ainsi, la façade sableuse d'Aquitaine est faiblement soumise au risque de submersion ; cependant une analyse plus fine doit être réalisée pour tenir compte de situations particulières : les zones basses qui bordent le bassin d'Arcachon, les estuaires de la Gironde et de l'Adour et les embouchures des courants et exutoires landais : Mimizan, Contis, Vieux Boucau, Huchet, et Capbreton (**Figure 1**). Pour ces zones des Landes, le risque de submersion a donné lieu à une étude du Centre d'Études Techniques de l'Équipement pour la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Landes², et elles font l'objet d'études particulières en 2013 dans le cadre de la mise en place des PPRL et TRI par l'État. Les zones à risque occupent principalement les rives basses de ces émissaires. D'autre part, quelques secteurs de faible extension présentent des zones basses à l'arrière de cordons faibles et/ou en forte érosion, c'est notamment le cas du sud de Soulac (avec forts enjeux), et du secteur Capbreton/Labenne.

Côte rocheuse

La côte rocheuse basque, longue de 40 km se situe au fond du golfe de Gascogne. Elle est limitée au nord par l'embouchure de l'Adour et au sud par l'embouchure de la Bidassoa. Le littoral au nord, entre l'Adour et la Pointe Saint-Martin est constitué de plages sableuses de 4 à 5 kilomètres correspondant à la terminaison méridionale du système de dunes landais. Les falaises de la côte basque dominent des plages de fond de baie, c'est-à-dire situées entre deux caps rocheux. La hauteur de ces falaises varie entre 10 m et 70 m et leur pente est comprise entre 10° et 90°. Jusqu'à la Pointe Sainte-Barbe (Saint-Jean-de-Luz), de petites criques découpent les falaises sub-verticales, atteignant jusqu'à 40 m de hauteur. Plus au sud, les falaises sont interrompues par la baie de Saint-Jean-de-Luz. De Socoa à la baie de Loya, les falaises constituent la Corniche Basque, avec des hauteurs variant entre 20 et 40 m.

Il est délicat de définir une direction générale de la dérive littorale sur la côte basque, les houles dominantes de nord-ouest étant orientées perpendiculairement à la côte. Chaque plage est donc soumise à des conditions de circulations sédimentaires particulières dépendant de la configuration géomorphologique (baie, plage frangeante, platier rocheux, etc.) et des conditions de houles, de marée et de tempête. De manière générale, les transports sédimentaires (sables, graviers surtout) sont préférentiellement cross-shore (transverses) et chaque plage de poche peut être considérée comme étant une cellule sédimentaire fermée vis-à-vis des plages ou baies adjacentes en conditions d'énergie moyenne.

L'aléa érosion côtière se caractérise sur la côte basque par des mouvements de terrain localisés affectant les falaises rocheuses [27]. Les plages situées entre deux pointes rocheuses et non dominées par des falaises (Grande Plage de Biarritz, baies de Saint-Jean-de-Luz et Hendaye) sont soumises à l'aléa érosion de plage et/ou submersion marine.

2. <http://www.land.es.equipement-agriculture.gouv.fr/littoral-r183.html>

Les falaises résultent des processus d'érosion littorale (mouvements de terrain et érosion marine). Au contact des formations géologiques, l'océan façonne une côte sous forme d'une falaise associée à une plate-forme d'abrasion. Cette action marine s'exprime de différentes manières, selon qu'il s'agit de formations dures ou de formations meubles. Dans les formations meubles, elle entraîne principalement des coulées boueuses et la purge des matériaux glissés en falaise. Dans les formations compétentes (dures), elle provoque des phénomènes de dissolution et d'abrasion produisant des cavités et des sous-cavages en pied de falaise. La dynamique marine locale a également une action de déblaiement du pied de falaise, empêchant la formation d'un profil d'équilibre. L'eau douce continentale joue également un rôle important dans les processus d'instabilité de la côte rocheuse aquitaine. Sur le long terme (milliers d'années) elle intervient en effet dans l'altération des matériaux offrant des formations géologiques meubles altérées sur un grand linéaire de côte (« altérites »). Et de manière combinée, l'eau douce est un facteur déclencheur de mouvements de terrain ainsi qu'un agent de transport des matériaux érodés. L'érosion de la côte rocheuse est donc à la fois d'origine marine et continentale.

En moyenne, la côte rocheuse aquitaine recule de 20 cm/an [16]. La vitesse de recul moyenne mesurée sur plusieurs décennies peut localement atteindre plus de 50 cm/an, par exemple dans les fonds de baies souvent constituées de formations meubles (sables ou roches altérées), comme celle d'Erromardie. Le linéaire concerné par une érosion supérieure ou égale à 20 cm/an représente environ 15 % de la côte rocheuse aquitaine. Sur certains secteurs, un événement peut se produire approximativement tous les 10 ans. Le linéaire concerné par un aléa faible représente 45 % (16 km sur un total de 36 km), 42 % (15 km) pour un aléa moyen et 13 % (5 km) pour un aléa fort.

II- Impact potentiel des changements climatiques sur le littoral aquitain

Erosion

Côte sableuse

Si on considère uniquement une lente augmentation du niveau moyen des mers, on peut alors estimer le recul du trait de côte le long des plages sableuses par la loi de Bruun (1962)[28]. En considérant une augmentation du niveau moyen de 0,5 m à l'horizon 2100 et en s'appuyant sur les caractéristiques morphologiques du système plage/dune aquitain, cette loi prédit un recul du trait de côte de seulement 15 m. Toutefois les conditions d'application de cette loi sont limitées et il est généralement admis qu'elle ne représente pas correctement les processus de transfert sédimentaires cross-shore [29]. Par ailleurs, elle ne prend pas en compte les gradients de dérive littorale qui sont souvent le moteur principal de l'évolution du trait de côte sur de grandes échelles spatio-temporelles. À titre d'exemple, sur une section du littoral australien Cowell *et al.* [30] ont montré qu'un petit déficit de 1 % des apports de la dérive littorale a le même impact sur le trait de côte qu'une augmentation du niveau moyen des mers de 0,5 m.

Une approche plus pertinente consiste alors à faire l'hypothèse que le changement climatique va accélérer les tendances évolutives en cours. Les tendances érosives actuelles sur la côte sableuse aquitaine ont été définies en 2011 par l'Observatoire de la Côte Aquitaine dans le document « Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la côte aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte ». C'est l'une des bases sur laquelle s'est appuyé le GIP Littoral Aquitain pour établir la « Stratégie régionale de gestion de la bande côtière ». La méthode utilisée pour estimer les évolutions prévisionnelles s'appuie sur le prolongement des tendances passées (mesures du trait de côte *in-situ* et par photo-interprétation pour la période 1966/2009). Dans l'étude précitée, il a été choisi de ne pas ajouter de facteur d'impact du changement climatique, cependant cet impact se manifeste déjà dans la période de référence, il est donc partiellement pris en compte. La façade sableuse d'Aquitaine a été divisée en une série de tronçons homogènes quant à leur tendance évolutive passée, et pour chacun de ces tronçons ont



Figure 3 : Cartographie de l'aléa érosion côtière sur la côte sableuse aux horizons 2020 et 2040 (Aubié et al. [16]).

été déduits les traits de côte prévisible en 2020 et 2040. Cette projection linéaire des tendances passées comporte bien entendu un degré d'incertitude. Cette évaluation a permis de cartographier l'aléa érosion côtière pour l'ensemble de la côte sableuse aquitaine (**Figure 3**).

Un changement d'intensité de la dérive littorale dans le cadre du changement climatique affectera très certainement ces projections. D'après les projections du forçage des vagues (cf. chapitre 1), qui indiquent une baisse de l'énergie des vagues et un décalage de l'ordre de 5° de leur orientation, il n'est pas évident de conclure sur l'évolution future de la dérive littorale (un changement compensant l'autre). Une autre grande source d'incertitude concerne la disponibilité des stocks sableux sur le plateau ou encore sur les bancs au large de l'estuaire de la Gironde. Ces stocks, essentiels si on veut évaluer de façon fiable le budget sédimentaire du littoral aquitain, sont très mal connus.

Dans certains secteurs, la projection est encore plus incertaine, en particulier au voisinage des embouchures et des estuaires (Soulac, Biscarrosse, Cap-Ferret, Capbreton, Anglet) où le *bypass* de sédiment, même s'il existe, est fortement perturbé. En effet, les passes et bancs tidaux ont des propriétés cycliques. Les bancs peuvent parfois s'accoler au rivage induisant une accrétion massive, et parfois le positionnement des passes proches des littoraux adjacents induit une forte érosion des plages. On connaît assez bien la cyclicité des 2 principales passes du bassin d'Arcachon (environ 80 ans [31]), mais beaucoup moins celle des réseaux « secondaires » de chenaux ni ceux au large de l'estuaire de la Gironde.

Côte rocheuse

L'impact du réchauffement climatique sur l'érosion de la côte rocheuse aquitaine aurait probablement pour conséquences :

- Une plus grande disparition des sédiments des plages de poche, des plages frangeantes et des matériaux en pied de falaise qui contribuent à alimenter l'estran,
- Une augmentation de l'impact des vagues qui intensifierait l'action mécanique d'arrachement et de dégradation des falaises (sous-cavage notamment),
- Une mise en pression de l'eau continentale contenue dans les cavités karstiques (hypothèse de travail).

Des changements de direction de houle ou des tempêtes auraient des conséquences localisées à l'échelle de chaque plage ou baie qui ne sont pas connues à l'heure actuelle. L'augmentation des fréquences de tempêtes conduirait à une augmentation de la vulnérabilité des falaises et des plages.

L'augmentation des pluies pourrait favoriser le ruissellement, la fracturation (effet à court terme, l'eau étant un facteur déclencheur) et l'altération des roches (long terme). Cependant, les modifications éventuelles de ces forçages n'ont pas été étudiées.

De manière plus pragmatique, l'étude précitée d'Aubié *et al.* [16] cartographie le trait de côte de la façade rocheuse aquitaine aux horizons 2020 et 2040 par projection dans le futur des tendances d'évolution passées des instabilités des falaises, des baies et des plages sableuses. Aucune hypothèse relative au changement climatique spécifique n'est faite, cependant l'étude historique permet d'intégrer les tendances éventuellement en cours. Cette étude permet de caractériser les niveaux d'aléas mouvements de terrain et érosion (**Figure 4**).

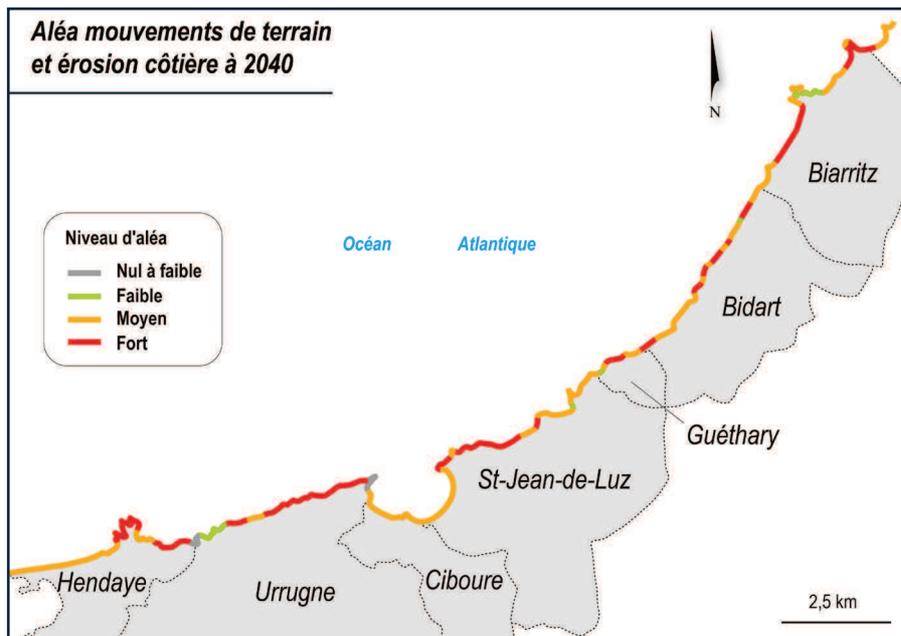


Figure 4 : Cartographie de l'aléa mouvements de terrain et érosion à échéance 2040 sur la côte rocheuse aquitaine (Aubié et al. [16]).

Submersion

Pour les côtes rocheuses basques et les plages sableuses aquitaines l'impact direct des submersions marines est faible par rapport aux autres types d'aléas (mouvements de terrain et érosion). Par conséquent l'impact potentiel du changement climatique sur l'action de la submersion marine sur ces environnements est sans doute négligeable. En revanche, les zones basses estuariennes et lagunaires de la côte aquitaine sont concernées par les risques de submersions marines. Contrairement au littoral ouvert, ce sont des systèmes protégés de la houle océanique, mais soumis fortement à la marée et aux courants associés, ainsi qu'aux apports d'eaux douces par les fleuves.

Estuaire de la Gironde

C'est un environnement qui accumule des sédiments fins et se comble sur le long terme (échelle du siècle et au-delà). Les marais estuariens sont d'anciennes baies, qui se sont comblées au cours des derniers 5 000 ans [32]. Ce sont des zones basses, donc très vulnérables à la submersion. Ces zones ont été progressivement protégées par des digues, qui représentent actuellement 130 km de linéaire (source EuroSION). Lors de la tempête de décembre 1999, la surcote liée à la dépression de 987 hPa et au vent de 130 km/h a été de 2 m environ, inondant une bonne partie des marais, notamment à l'est, à l'emplacement de la centrale Nucléaire du Blayais. Des digues ont cédé, comme dans le marais de Mortagne, en aval de l'estuaire. L'aléa érosion existe donc, mais il est moins bien quantifié dans la littérature scientifique, et semble beaucoup plus faible que sur le littoral ouvert. Lors des ruptures de digues, comme dans le marais de Mortagne en 1999 ou dans l'île Nouvelle plus récemment, des secteurs très localisés subissent des reculs par arrachement ou effondrement de mini-falaises. Ceci montre que les ouvrages de l'estuaire ont une efficacité dans la stabilisation de la ligne de rivage. Les secteurs érodés évoluent ensuite de manière à retrouver un ajustement morphodynamique et un profil d'équilibre avec les agents hydrodynamiques. De manière générale, l'élévation du niveau de la mer aura un fort impact sur la submersion. Dans l'estuaire de la Gironde, cet impact a été évalué récemment par le Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales, dans le cadre du projet THESEUS [33]. Un modèle simplifié de calcul des surcotes à partir des champs de vent et de pression du CLM/SGA a été construit au Verdon. En particulier, les cartes d'inondation correspondant aux périodes de retour de 2 à 100 ans pour les périodes [1960 ; 1999], [2010 ; 2039], [2040 ; 2069] et [2070 ; 2099] sur 3 sites particuliers de l'estuaire ont été produites. Des zones qui ne sont aujourd'hui pas inondées pour de faibles périodes de retour le deviennent à l'horizon 2100, en particulier dans la basse Garonne (Figure 5). À noter que dans cette étude les effets des débits fluviaux et des ruptures de digues n'ont pas été évalués.

Estuaire de l'Adour

Les berges au niveau de Bayonne sont à une cote assez faible ce qui entraîne déjà parfois des inondations. Dans la perspective d'une montée des eaux voire d'une augmentation des événements de pluies extrêmes, ces inondations pourraient devenir assez fréquentes pour justifier des aménagements nouveaux.

Bassin d'Arcachon

C'est une lagune dont le fonctionnement hydrosédimentaire est à mi-chemin entre celui d'une baie tidale et celui d'un estuaire. Il est soumis aux actions conjuguées de la marée, des vents et clapots associés, et des apports d'eau douce. La houle est efficace surtout dans les passes, la flèche sableuse du Cap-Ferret constituant la frontière naturelle entre le domaine océanique et le domaine lagunaire. Les rives de la lagune d'Arcachon sont constituées d'estrans sablo-vaseux et de plages artificielles, bordant des marais et des zones urbaines. Globalement, ce sont des zones basses, vulnérables à la submersion. De nombreux secteurs sont protégés par des ouvrages, perrés ou digues. Les ouvrages sont continus sur la portion externe des rivages, et plus discontinus à l'intérieur du bassin (Figure 6). La tempête Xynthia (27-28 février 2010) a atteint l'ensemble du pourtour du bassin d'Arcachon. La submersion marine a concerné l'ensemble des zones basses du bassin. Les hauteurs d'eau maximales ont atteint 0,90 m sur des distances de plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres ([35], OCA). En ce qui concerne l'érosion, comme pour l'estuaire de la Gironde, celle-ci est plutôt faible à l'intérieur de la lagune, et tout aussi peu documentée dans la littérature. Les zones vulnérables à l'érosion sont le sud de la flèche du Cap-Ferret et le littoral du Pyla-sur-Mer, soit des secteurs sous l'influence des vagues et de l'interaction morphodynamique des courants de marée et des passes. L'intérieur du bassin est plutôt stable, et les secteurs modifiés récemment sont les marais de Certes, Graveyron et Malprat, davantage exposés au clapot et à la submersion suite aux ruptures de digues en 1999 et lors des tempêtes de 2009 et 2010.

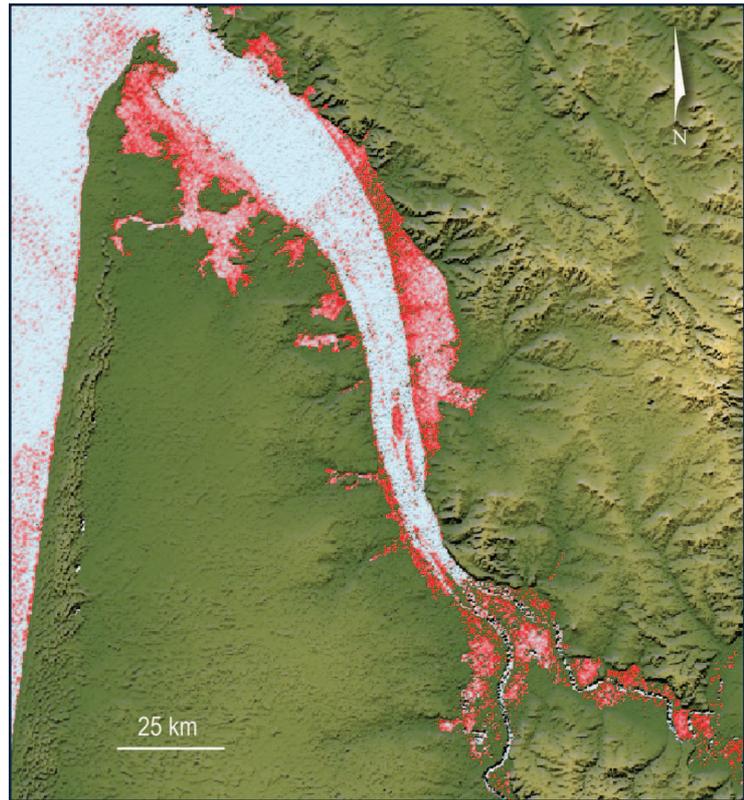


Figure 5 : Cartes des marais et zones vulnérables à la submersion dans l'estuaire de la Gironde (doc. EAUCEA [34]).

Des projets tels que Theseus ou Barcasub, du programme LITEAU, ainsi que les études de mise en place des PPRL et TRI, tentent d'évaluer quantitativement les submersions dans la Gironde ou le bassin d'Arcachon, en considérant les morphologies et configurations actuelles des rivages. Cependant, pour prédire l'impact des changements climatiques sur les estuaires et les lagunes, les incertitudes scientifiques sont encore nombreuses. Outre les incertitudes sur le niveau de la mer et de la houle aux embouchures, il existe des incertitudes sur les régimes fluviaux en amont, qui entraîneront des modifications des flux de matières en suspension. De cet ensemble dépendent les bilans sédimentaires et les ajustements morphologiques des fonds et des berges. Cette incertitude peut s'étendre aux effets en retour sur la modification de l'onde de marée ; sa propagation dans les estuaires ou dans le bassin d'Arcachon peut se trouver significativement transformée, modifiant ainsi la configuration ou l'emplacement des zones vulnérables par rapport à ce qu'elles sont à l'heure actuelle.



Figure 6 : Ouvrages de protection sur les rives du bassin d’Arcachon (d’après P. Laymond, in T. Auly et J. Veiga, 2010, le Bassin d’Arcachon, un milieu naturel menacé ?, Editions Confluences).

Conjonction avec les événements exceptionnels

La tempête du 27 décembre 1999 a été un événement marquant dans l’estuaire de la Gironde, par les niveaux exceptionnels de surcote atteints, ainsi que par son impact en termes de submersion et d’érosion des rives. Pourtant, les niveaux atteints pourraient être encore plus élevés si une conjonction de conditions favorisant la surcote venait à se produire. En extrapolant linéairement les conditions de décembre 1999, il est possible d’estimer sommairement les niveaux théoriques extrêmes pouvant être atteints dans ces conditions exceptionnelles.

Lors de la tempête, la hauteur d’eau enregistrée par les marégraphes au droit de Blaye et Pauillac, a atteint 4,52 m au-dessus du niveau NGF. Le coefficient de marée était de 77, soit une marée moyenne, dans une gamme allant de 20 à 120. Pour un coefficient de 77, le niveau de la marée haute prédit à Pauillac, sous des conditions atmosphériques normales, est de 2,51 m NGF. On peut en déduire que, lors de la tempête de 1999, l’effet de surcote liée à la dépression atmosphérique (987 hPa), et au vent (130 km/h) était de 2,01 m.

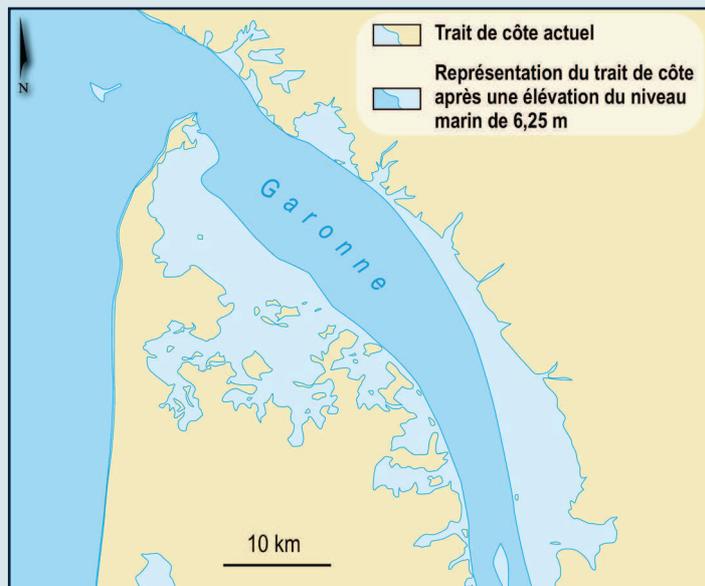


Figure 7 : Estuaire de la Gironde, prévisions de l’élévation du niveau de la mer en 2100. Les zones en bleu, d’altitude inférieure à 6,25 m, sont susceptibles de se trouver en dessous du niveau statique des eaux de l’estuaire dans des conditions de tempête extrême.

La pression atmosphérique minimum enregistrée dans la région lors de la tempête était de 955 hPa. Elle induirait sur l'estuaire, avec les mêmes conditions de vent, une surcote totale de 2,59 m, soit 0,58 m de plus que celle enregistrée en 1999. Par ailleurs, une marée théorique de coefficient 120 (vives-eaux), atteindrait une hauteur de 3,66 m. Si on suppose une conjonction de ces conditions extrêmes de pression et de marée (dépression de 955 hPa, vents de 130 km/h et marée de grandes vives-eaux), le niveau de l'estuaire à Pauillac ou Blaye atteindrait donc à marée haute une hauteur de $2,59 + 3,66 = 6,25$ m, soit 1,73 m de plus que le niveau enregistré en décembre 1999.

Il faut souligner que cette estimation a minima tient compte uniquement de la marée et des effets atmosphériques, et ne tient pas compte des effets dus aux vagues se propageant dans l'estuaire. Celles-ci ont été peu étudiées, et leur effet de surcote reste à évaluer précisément. Toutefois, les constats faits à partir du franchissement des digues lors de la tempête de 1999 ont permis d'attribuer à l'action des vagues une surcote de 2,30 m. Enfin, l'apport d'eau douce de la Garonne et la Dordogne en régime de crue peut contribuer également à une élévation globale de la hauteur d'eau, mais celle-ci serait importante surtout en amont du Bec d'Ambès, et serait plus faible en aval.

L'hypothèse du scénario pessimiste du GIEC prévoit une élévation du niveau de la mer de l'ordre du mètre. Si conjonctuellement plusieurs phénomènes se superposent (une tempête d'ouest induisant une surcote, une marée haute, un fort coefficient de marée et enfin une crue de l'ensemble Dordogne-Garonne), alors on pourrait atteindre une surcote totale dépassant largement 6,25 m au milieu de la Gironde. Une telle élévation provoquerait l'invasion par la mer des marais du Médoc, transformant en île la Pointe de Grave ainsi que les marais de la rive droite (**Figure 7**). La situation serait similaire à celle déjà enregistrée par l'estuaire lors de son histoire géologique, il y a 6 000 ans ou il y a 130 000 ans.

III- Adaptations/Mitigations

Côtes sableuses

Les structures en « dur » (épis, brise-lames, etc.) ont la particularité le plus souvent de déplacer le problème d'érosion aux littoraux adjacents. Sur le plan international, les techniques de protection dites « souples » (rechargements de plage, accompagnement de la mobilité des dunes, géotextiles, drainage de plage, [36][37]) sont progressivement apparues à la fin du siècle dernier, traduisant enfin une évolution de la doctrine du génie côtier. Une grande richesse du littoral aquitain est d'avoir été jusqu'à présent peu affecté par la mise en œuvre de structures en dur, et d'être caractérisé par un système plage/dune particulièrement préservé.

La gestion des dunes bordières par l'Office National des Forêts a pour mission d'optimiser les différents services écologiques et sociétaux rendus par les dunes, en particulier le contrôle de la mobilité des sables et la conservation d'écosystèmes originaux et rares par le maintien d'une mosaïque diversifiée et mouvante sans fixation excessive. Ce n'est que récemment que le rôle des dunes en matière de défense contre les risques d'origine marine (érosion et submersion) a été officiellement pris en compte dans les stratégies d'aménagement du territoire. En effet la dune influence le comportement de la plage par le maintien d'une partie du sédiment au plus près de la plage, ce qui contribue au soutien du budget sédimentaire côtier, facteur clé des tendances évolutives. Le système de dune joue donc un rôle « tampon » essentiel dans la réponse de la plage. À titre d'exemple, *Castelle et al.* [38] ont montré sur une section du littoral australien qu'une plage bordée par une dune végétalisée résistait beaucoup mieux aux épisodes de tempête que des plages sans dune ou des plages présentant des ouvrages de protection côtière (récif artificiel, épis).



Figure 8 : Plantation d'oyats sur la dune littorale sud de Lacanau.

D'autres mesures dites souples existent. Le rechargement de plage, réalisé par exemple sur le littoral basque, est efficace le long des plages sableuses en particulier si celles-ci ne sont pas soumises à un transit littoral trop important (le rechargement est sinon diffusé assez rapidement). C'est le cas par exemple des plages d'Anglet qui ont été régulièrement rechargées en sables issus des dragages de l'embouchure de l'Adour durant les dernières décennies. L'efficacité de cette méthode est démontrée pour ce site qui a fait l'objet de clapages réguliers à un taux approximatif de 500 000 m³/an entre 1980 et 1990. Durant cette période, les plages se sont réengraissées de manière continue, tandis que l'arrêt ultérieur de ces clapages a rapidement entraîné une érosion significative des plages sous marine [39]. Le choix des stocks sableux pour l'extraction (plateau, estuaire, etc.) doit aussi tenir compte de nombreux facteurs environnementaux et écologiques. Lorsque le transit sédimentaire est interrompu par une structure en dur (e.g. digue), un système de *bypass* de sédiment peut être mis en place comme c'est le cas depuis 2008 à Capbreton. Sur un système similaire sur le littoral australien, *Castelle et al.* [40] ont montré à partir de 30 ans de données que ce système, si le sable était rejeté en zone de déferlement, était beaucoup plus efficace que le rechargement de plage classique. De plus, il est possible d'estimer (e.g. mensuellement) les quantités à pomper en fonction des données de houle et de gérer les quantités de sable pompé par le système de *bypass* pour reproduire au plus proche la dérive littorale naturelle [40], ce qui répond complètement aux recommandations sur les nouvelles pratiques à développer en ingénierie côtière [36]. D'autres méthodes souples ne semblent pas adaptées aux plages sableuses d'Aquitaine. La mise en place de récifs artificiels est très coûteuse et ces structures n'induisent typiquement une avancée du trait de côte, assez localisée, que de l'ordre de la dizaine de mètres [41]. Les systèmes de drainage ne semblent pas non plus adaptés aux plages ouvertes et très énergétiques du littoral aquitain.

L'analyse de l'impact du changement climatique doit tenir compte de la capacité d'ajustement du système plage/dune face aux perturbations. Le système plage/dune évolue constamment pour s'adapter aux diverses contraintes : les formes sont modifiées par les processus qu'elles influencent à leur tour. Cette aptitude à réagir aux perturbations est nommée résilience, elle permet d'assurer la continuité fonctionnelle du système en le rapprochant de la situation initiale (exemple post-tempête). Cette « auto défense » n'est opérationnelle que lorsque le système dispose de tous ses compartiments (de la plage immergée à la dune bordière) et de tous ses attributs fonctionnels (échanges transversaux et longitudinaux...). Les systèmes tronqués (absence des entités « tampon ») perdent cette capacité d'ajustement : c'est par exemple le cas lorsque les échanges entre plages et dunes sont interrompus par des murs d'enrochements. Cette capacité d'ajustement n'est possible que si le système dispose d'un « espace de liberté » pour se développer : les équipements rigides proches du littoral réduisent, ou suppriment, la résilience du système.

En Aquitaine, une réflexion a été menée depuis 2009 pour prendre en compte l'érosion côtière dans la gestion du littoral. Le GIP Littoral Aquitain, réunissant l'ensemble des gestionnaires issus des collectivités et des services de l'État, a finalisé cette étude en juin 2012 et proposé une stratégie régionale de gestion de la bande côtière³ en cohérence avec la stratégie nationale adoptée par l'État le 2 mars 2012⁴.

Quatre familles de mode de gestion sont identifiées :

- Évolution naturelle surveillée ;
- Accompagnement des processus naturels ;
- Lutte active contre l'érosion ;
- Repli stratégique - relocalisation des activités, des biens et des personnes.

Ces familles regroupent toutes les possibilités d'intervention sur le littoral (souples, dures, etc.). À ces familles d'action il faut rajouter le cas de l'inaction (absence de gestion) qui est un non-choix.

3. <http://www.littoral-aquitain.fr/spip.php?rubrique20>

4. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Strategie_nationale_de_gestion_integree_du_trait_de_cote.pdf

Côtes rocheuses

Les commentaires précédents relatifs à l'adaptation et à la mitigation des côtes sableuses s'appliquent également aux côtes rocheuses, en particulier aux plages de poche et frangeantes.

En termes d'ouvrage ou de méthode de protection face aux instabilités des falaises, il est en revanche plus délicat de distinguer les notions de solutions souples et dures.

Dans l'outil didactique du projet ANCORIM⁵ consacré aux solutions douces de protection des côtes, toutes les solutions géotechniques classiquement utilisées pour stabiliser les falaises (végétalisation, géogrilles, filets, bétonnage, cloutage, etc.) sont considérées comme potentiellement souples si leur impact négatif reste peu important compte tenu de leur faible emprise spatiale et de la réversibilité de la méthode et des matériaux employés.

Sur les falaises, les méthodes de stabilisation combinent souvent plusieurs parades géotechniques entre elles et associent des solutions plus « souples » telle que le drainage qui réduit le rôle de l'eau continentale, ou la végétalisation qui limite le ruissellement et l'érosion des sols (attention toutefois à ne pas favoriser l'installation d'espèces invasives). Ces interventions souples permettent de maintenir une fonctionnalité naturelle des falaises vis-à-vis de l'érosion et notamment un recul contrôlé permettant une alimentation des stocks sédimentaires des plages adjacentes (de poche et frangeantes).

Efficacité des « ouvrages »

La côte Aquitaine comporte relativement peu d'ouvrages en comparaison d'autres régions côtières françaises. Cette caractéristique s'explique par le long linéaire sableux peu urbanisé qui s'étend du nord de la Gironde au Sud des Landes. Les ouvrages se situent principalement sur la côte Basque (Hendaye, Saint Jean de Luz, Biarritz, Anglet) et au nord de la Gironde (Soulac, Le Verdon). Au niveau des Landes, les principaux sites sont Capbreton et les abords des courants landais. D'une façon générale, toutes les zones à enjeux urbains ou portuaires font l'objet d'ouvrages de protection en dur.

Les ouvrages côtiers aquitains regroupent les typologies suivantes selon leurs vocations (protection face à l'érosion, la submersion, etc.) :

- Des épis en enrochement dont la fonction est de limiter le transit sédimentaire le long de la côte (Anglet, Capbreton, Lacanau) et ce, afin de stabiliser localement la plage.
- Des jetées (digues à talus à carapace en blocs béton cubiques, Hendaye, Bayonne) dont la fonction est de stabiliser l'embouchure locale.
- Des brises lames (digue verticale mixte de Saint Jean de Luz) qui protègent les zones en arrière de l'ouvrage de l'action des houles.
- Des ouvrages de front de mer (perrés de Capbreton, de Soulac, tubes conteneurs à l'Amélie/Soulac [42]) qui sont censés jouer un double rôle vis-à-vis de la submersion et de l'érosion.

Dans la plupart des cas, bien que la fonction primaire de l'ouvrage soit au moins partiellement remplie, il existe des effets secondaires qui peuvent être néfastes. Ainsi, il est communément admis que les épis contribuent à augmenter l'érosion à une certaine distance en aval de l'ouvrage par rapport à la dérive littorale. De même, les jetées d'embouchure imposent une dynamique sédimentaire complexe parfois mal contrôlée (ex. : Bayonne, [39]).

Sur la côte rocheuse basque, les stratégies de protection mises en œuvre contre les mouvements de terrains sont des parades géotechniques classiquement utilisées qui sont plus ou moins souples suivant

5. <http://ancorim.aquitaine.fr/>

les sites (maçonnerie, cloutage, béton projeté, drainage, profilage, curage, géotextile, végétalisation, etc.). Face à l'érosion et à la submersion, on retrouve les mêmes types de parades que pour la côte sableuse et les zones basses : épis, digues, perrés, rechargements, etc.

De nombreuses parades souples sont entreprises sur le littoral aquitain pour limiter l'érosion marine et éolienne (rechargement de plage, brise-vent, végétation, etc.).

Le changement climatique peut avoir une influence sur la fonction de l'ouvrage ainsi que sur sa stabilité structurelle. Trmal et Lebreton [43] donnent un exemple de cet effet sur une digue à talus (e.g. Bayonne). Il est aisé de comprendre que la remontée du niveau d'eau moyen due au changement climatique aurait une influence certaine sur les débits de franchissement de l'ouvrage avec des aléas associés dans la zone protégée et pour les usagers de la digue. Pour revenir à l'état de service initial il conviendrait alors de rehausser l'ouvrage d'une hauteur supérieure à la remontée du niveau d'eau comme le montrent les simulations de Trmal & Lebreton [43]. Les formules de dimensionnement qui permettent de calculer les poids des enrochements naturels ou artificiels des carapaces d'ouvrages dépendent également de la hauteur de houle en pied d'ouvrage. Or dans le cas des ouvrages français et donc aquitain, qui sont en général construits en faible profondeur relative, la hauteur de houle est écrêtée par le déferlement. Une hausse du niveau d'eau moyen permettrait le passage d'une houle dimensionnante plus énergétique qui pourrait nécessiter en certains endroits le changement de la carapace actuelle pour des blocs plus lourds.

Conclusion

Au niveau des plages sableuses et des embouchures aquitaines, soumises à des vagues de fortes amplitudes et où les fonds sédimentaires sont extrêmement mobiles, la caractérisation des flux sédimentaires et de l'évolution morphologique des fonds sableux représente un véritable défi scientifique et technique. Pour mieux caractériser le budget sédimentaire et prévoir l'évolution du littoral aquitain, il est nécessaire de disposer de davantage d'information sur les stocks sableux disponibles sur le plateau et surtout sur l'évolution morphologique des côtes à une fréquence suffisamment élevée (périodicité mensuelle mais incluant aussi l'observation d'événements exceptionnels comme les tempêtes). Ceci va demander la mise en œuvre d'observations régulières associant des suivis lidar avec le développement de méthodes permettant de cartographier la bathymétrie littorale et son évolution, à partir de systèmes vidéos terrestres et de l'imagerie satellitaire multi – et hyper-spectrale. L'étape finale est l'assimilation de ces données dans un modèle prédictif d'évolution morphodynamique du trait de côte à l'échelle de l'Aquitaine.

Les instabilités des falaises et l'érosion de la côte rocheuse aquitaine dépendent de trois agents essentiels : 1) le rôle de l'eau douce (altération des roches, déclenchement des mouvements de terrain, et transport de matériaux), 2) les stocks sédimentaires des plages de poche et frangeantes et 3) l'action des vagues (impact et déblaiement des matériaux). Un enjeu majeur de la compréhension de l'impact du réchauffement climatique vis-à-vis de l'érosion des côtes rocheuses est donc d'étudier de manière quantitative l'évolution de chacun de ces paramètres selon des approches combinant les suivis quantitatifs *in-situ* (plages, falaises) et les outils de modélisation (géotechniques et hydrosédimentaires).

6.2 Biodiversité marine

Coordination : Benoit Sautour

Rédacteurs : Guy Bachelet, Philippe Boet, Nathalie Caill-Milly, Iker Castège, Aurélie Chaalali, Valérie David, Yolanda Del Amo, Marie-Noëlle de Casamajor, Jean D'Elbée, Xavier De Montaudouin, Roger Kantin, Mario Lepage, Eric Rochard, Benoit Sautour.

À l'échelle du golfe de Gascogne et de ses zones côtières et littorales, les suivis de la biodiversité montrent d'importantes variations annuelles d'abondance et de répartition géographique des espèces en relation avec le climat. Ces évolutions font apparaître des phases brutales d'accélération en relation avec des variations de même type des forçages climatiques ou en relation avec l'existence d'effets de seuil chez les organismes. Cet environnement subit des impacts d'autant plus marqués qu'il est proche de la limite biogéographique de nombreux peuplements. Les tendances actuelles montrent que la biodiversité va évoluer vers une augmentation de représentativité des espèces tempérées chaudes, une modification de la phénologie des espèces (modification de la saisonnalité du développement, raccourcissement de la phase larvaire planctonique mais parfois plusieurs reproductions par an...) et de la productivité des écosystèmes.

Introduction

Si les conséquences du changement climatique global sont maintenant avérées (ex. marinisation des systèmes littoraux, réchauffement des eaux de surface (SST) : [1][2][3][4][5]), la question de son impact sur les organismes aquatiques peuplant ces zones reste posée. Dans un environnement donné (ici estuarien et/ou marin), c'est un ensemble de facteurs qui conduit aux variabilités écologiques observées. Deux faits sont à présent bien connus à ce sujet : premièrement, le climat affecte non seulement les abondances de certaines espèces mais également leur répartition ; deuxièmement, l'origine du phénomène est liée à un mélange de variables météorologiques. Les caractéristiques physiques de l'atmosphère et de l'océan telles que la température, la pression, le vent, les précipitations, l'agitation de la mer, sont liées entre elles de manière plus ou moins forte et déterministe. Au-delà des variations à court terme, les conditions atmosphériques et océaniques montrent des tendances à plus ou moins long terme de l'ordre de la décennie ou du siècle. C'est le cas bien connu sur de vastes échelles pour le Pacifique (phénomène ENSO : El Niño Southern Oscillation) et pour l'Atlantique (oscillation NAO : North Atlantic Oscillation). Ces deux indices ENSO et NAO reposent sur la mesure de la différence de pression atmosphérique entre deux stations ponctuelles géographiquement éloignées en latitude. Leur avantage réside dans l'étendue géographique prise en compte et la simplicité de leur interprétation météorologique et climatique.

I- Les impacts

Une variabilité en relation avec des indices climatiques à grande échelle

À grande échelle spatiale (golfe de Gascogne) les suivis ont notamment été réalisés sur les communautés de prédateurs supérieurs (cétacés et oiseaux marins). Ceux-ci sont connus pour être de bons indicateurs de la structuration du réseau trophique et des communautés qui le composent [6][7].

Les informations recueillies¹ ont permis de montrer d'importantes variations annuelles d'abondance et de répartition géographique des espèces en relation avec le climat² : 40 % à 60 % des variations temporelles sont « expliquées » par celui-ci.

À l'échelle des zones côtières et littorales³, les communautés de prédateurs supérieurs ont été suivies (poissons) ainsi que leurs proies planctoniques. Les schémas concordants des évolutions du climat d'une part et des communautés de proies et de prédateurs d'autre part ont permis de confirmer récemment l'importance des forçages globaux sur le fonctionnement de l'écosystème [10].

Des évolutions non linéaires

Les évolutions des écosystèmes en réponse au changement climatique sont rarement linéaires du fait d'une variabilité des forçages climatiques elle-même non linéaire, mais aussi du fait de l'existence, pour les organismes, de barrières thermiques/physiologiques qui conduisent fréquemment à des changements abrupts dans les populations [11][12][13]. Une étude récente [10] portant sur différents compartiments biologiques de l'estuaire de la Gironde (des producteurs primaires aux prédateurs supérieurs : phytoplancton, zooplancton et poissons) a permis la mise en évidence de deux changements climatiques rapides et importants (fin des années 1980 et fin des années 1990, Figure 1) qui se sont répercutés de l'environnement (physico-chimie) jusqu'aux organismes (y compris prédateurs supérieurs : poissons).

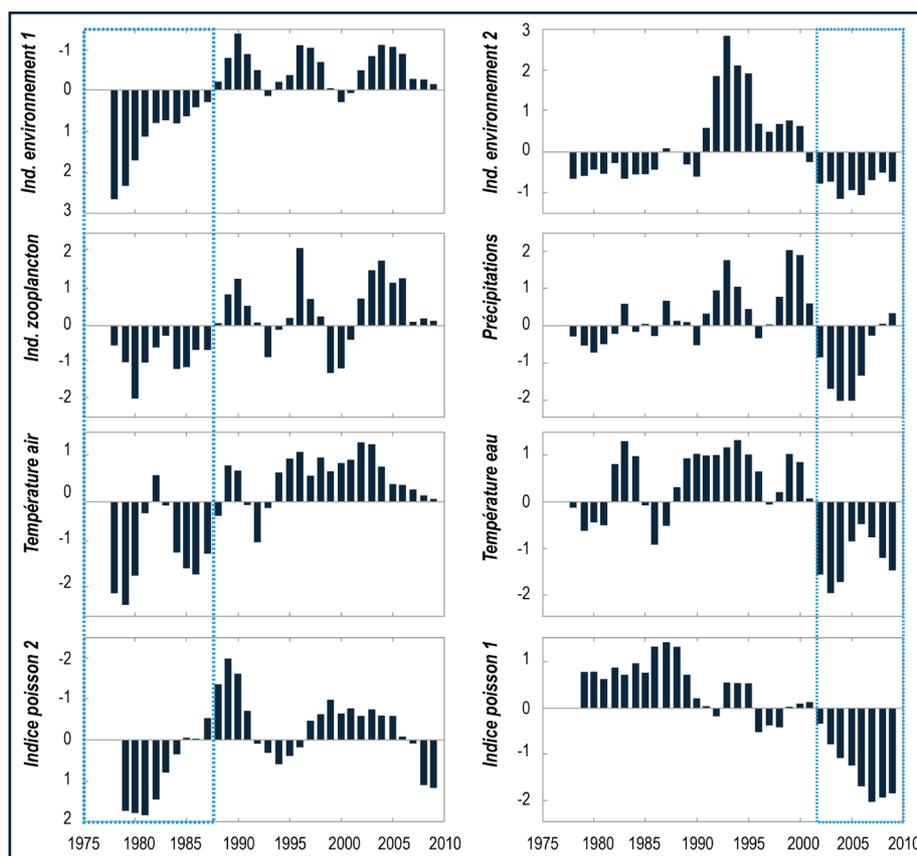


Figure 1 : Estuaire de la Gironde, évolution temporelle (respectivement de haut en bas) : À droite : d'un indice (ACP) descripteur de la physico-chimie du système, de la diversité/composition de la communauté zooplanctonique, d'une série de données locales de températures de l'air et d'un indice (ACP) reflétant la composition de l'ichtyofaune ; À gauche : d'un second indice décrivant la physico-chimie du système, des données de précipitations locales, des températures de surface de la mer et d'un second indice poissons.

1. Suivant un protocole standardisé depuis 1976 : Castège et Hémerly, [8], coopération technique des Douanes, Affaires Maritime et Marine Nationale.

2. Index climatique SBC : Hémerly *et al.* [9].

3. Chronique de données estuaire de la Gironde (protocole standardisé, 34 ans).

Le premier changement serait principalement lié à une intensification du réchauffement global perceptible sur les températures de surface de la mer (SST : [14][15][16]) alors que le second répondrait à la hausse de température des océans après ~2000 [16] et/ou à un changement de circulation atmosphérique principalement associé aux vents méridionaux affectant *in fine* le patron local des précipitations [1].

Les modifications peuvent aussi s'exprimer en relation avec les événements extrêmes comme par exemple la canicule de 2003 qui peuvent constituer de relativement « bons témoins » de ce que sera le climat futur et d'une partie des impacts attendus. Les conséquences particulières de cette canicule ont pu être observées sur les compartiments planctoniques avec notamment un développement anormalement important de cyanophycées [17].

Les grandes tendances récentes d'évolution de la biodiversité

À l'échelle des zones littorales, la modification des habitats en relation avec le climat est une des causes majeures de la modification de biodiversité. Celle-ci est notamment induite par la diminution des apports en eau douce, l'élévation du niveau de la mer et une fragmentation des habitats qui en découle et se superpose à l'impact induit par les activités humaines. La diminution des apports en eau douce se traduit par une marinisation des systèmes et une réduction des habitats estuariens, qui conduisent à une colonisation accrue par les espèces marines [10][18]. La fragmentation des habitats, liée par exemple à l'assèchement des zones humides, en réduisant la connectivité entre les populations locales, est une des causes notables de la perte de biodiversité des communautés benthiques et pélagiques. Enfin, l'élévation du niveau de la mer impacte les trajectoires d'évolution de ces systèmes. Celles-ci ont, par exemple, été bien étudiées pour les zones de marais maritimes⁴ dont les trajectoires montrent une possible adaptation due à l'accrétion ([19] : 3,7 mm an⁻¹), mais aussi des d'effets « négatifs » (marais de Gipuzkoa : [20]). Si l'accrétion est inférieure à l'élévation de la mer, l'habitat disponible pour certaines espèces peut diminuer. Ce pourrait être le cas pour *Zostera noltii*, dont l'habitat pourrait être réduit significativement à la fin du XXI^e siècle sur les estuaires basques [21]. Il faut rappeler que cette espèce est très répandue dans le bassin d'Arcachon, dans lequel la surface des herbiers diminue depuis 2007, sans que les causes ne soient clairement identifiées.

De manière plus précise les conséquences se font sentir sur tous les compartiments biologiques. Le développement des *communautés phytoplanctoniques* de surface a décliné de manière significative sur l'ensemble des côtes métropolitaines françaises [1] et pour ce qui nous concerne aussi bien en milieu côtier que milieu littoral depuis les années 1990 jusqu'à l'époque actuelle (ex : côtes du Pays Basque [22] et estuaire de la Gironde [23]). Cette décroissance n'est pas linéaire et montre une accélération nette en 2001 [1]. En revanche, une augmentation de la biomasse a été détectée entre 0 et 50 m de profondeur, pour la même période dans les eaux côtières du Pays Basque, avec une augmentation de 6,2 10⁻³ µg·L⁻¹·an⁻¹ [24], ce qui suggère une modification de la distribution verticale des communautés phytoplanctoniques durant la période (probablement en relation avec l'évolution de la structure verticale de la colonne d'eau, cf. Chapitre 1).

Une attention particulière doit être portée au phytoplancton toxique dont les blooms (épisodes de forte prolifération) semblent de plus en plus fréquents, ce qui est souvent mis en relation avec le changement climatique actuel. Les efflorescences observées sur le littoral aquitain doivent être regardées de la même manière en relation, aussi, avec la dispersion des panaches fluviaux pouvant influencer les zones littorales adjacentes. La mise en relation de faits avérés reste à faire afin de caractériser les moteurs de ces évolutions, ex. : fortes concentrations en phytoplancton toxique dans le panache de l'Adour – panache pouvant remonter vers le Nord (Arcachon) – modification du régime de vents dans l'Atlantique nord [1][25].

4. Les marais maritimes sont des marais de basse altitude, à très faible pente et partiellement submergés par la mer. Ils sont en général créés par accumulation de vase dans des zones peu soumises à l'érosion marine.

L'évolution des *communautés zooplanctoniques* des zones littorales (estuaire de la Gironde : chronique de 34 ans, **Figure 2**) n'a pas révélé d'évolution significative des abondances des espèces dominantes [18]. En revanche, une remontée des populations vers l'amont (avec une hypothèse forte de colonisation de l'estuaire fluvial ; travaux en cours) en lien avec la marinisation du système est avérée, ainsi que l'établissement d'espèces introduites (ex : les crustacés copépodes *Acartia tonsa* et *Pseudodiaptomus marinus*) qui proliféreraient maintenant en relation avec leurs caractéristiques thermophiles et/ou la salinisation du milieu ([26] et Sautour et Dessier, non publié).

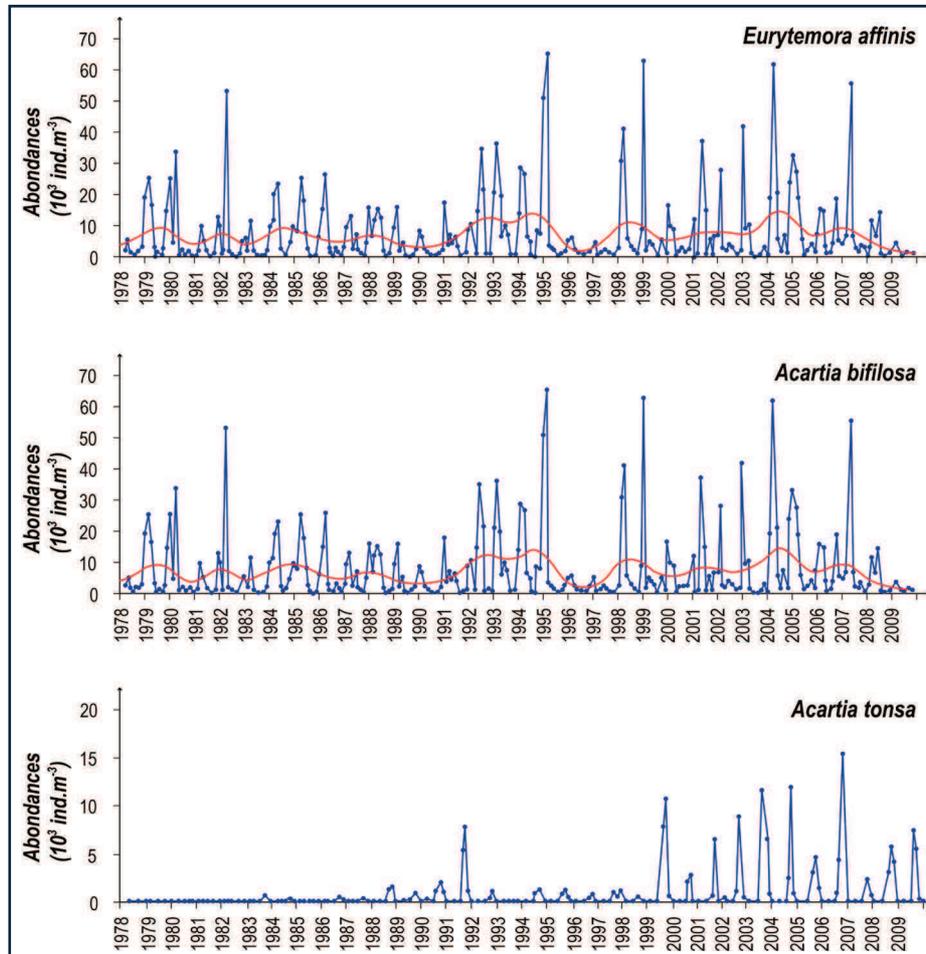


Figure 2 : Estuaire de la Gironde : évolution des abondances de trois espèces de copépodes entre 1978 et 2009 dans la zone centrale de l'estuaire (entre Pauillac et Blaye, PK 52). *Eurytemora affinis* et *Acartia bifilosa* sont des espèces autochtones, *Acartia tonsa* a été introduit dans l'estuaire en 1983 (probablement via des eaux de ballast). Après une période de colonisation modérée, cette dernière présente depuis le début des années 2000 des densités estivales importantes dans cette zone de l'estuaire. Données brutes en bleu : valeurs mensuelles et moyennes mobiles (9 mois) en rouge, d'après [23].

Ces dernières années (depuis 2010) sont aussi marquées, notamment dans les parties les plus « marines » des eaux littorales, par des modifications notables de représentation de groupes zooplanctoniques habituellement « peu représentés » dans ces zones et provenant du golfe de Gascogne (exemples les plus marquants : les physalies en 2011 ou encore les cténaïres en 2012). L'invasion des physalies, organismes complexes extrêmement dangereux proches des méduses, pendant l'été 2011 est actuellement interprétée comme une illustration possible d'un changement de régime des vents et des courants. L'Aquitaine n'avait certainement jamais connu de tels phénomènes, le centre antipoison de Bordeaux enregistrant près de 1 000 cas d'envenimation (**Figure 3**). Il reste à savoir s'il s'agit d'un événement isolé et accidentel ou d'une tendance liée au changement global et si l'augmentation de représentativité d'autres groupes originaires du golfe de Gascogne (ex. : cténaïres) est susceptible d'avoir la (les) même(s) cause(s) (modification du régime des vents ? température ?).

Figure 3 : Communiqué de presse InVS, ARS Aquitaine et CHU de Bordeaux du 18/07/11 : Depuis plusieurs années, les plages d'Aquitaine sont le témoin de l'apparition d'animaux marins venimeux habituellement peu présents sur nos côtes. À l'approche de l'été, alors que le littoral se remplit peu à peu de touristes et de familles, l'ARS Aquitaine, en collaboration avec le Centre Antipoison et de Toxicovigilance du CHU de Bordeaux et l'Institut de Veille Sanitaire via sa cellule en région Aquitaine (Cire), entament une campagne d'information et de sensibilisation aux envenimations marines par physalie, méduse pélagique et vive. Même si aucun décès en lien avec ce type d'envenimation n'a été rapporté à ce jour en France, les effets toxiques de ces organismes marins peuvent entraîner des complications chez certaines victimes. Ainsi, l'ARS Aquitaine, le Centre Antipoison et de Toxicovigilance du CHU de Bordeaux et la Cire Aquitaine appellent les baigneurs à la vigilance. Une surveillance sanitaire, aux plans toxicologique et épidémiologique, sera d'ailleurs assurée tout au long de la saison estivale.

Les animaux marins VENIMEUX
MESURES DE PRÉVENTION SANITAIRE

LA MÉDUSE PÉLAGIQUE
La méduse pélagique est un animal marin se trouvant dans l'eau. Elle est pourvue de tentacules responsables de brûlures cutanées douloureuses. Taille = 10 cm

EN CAS D'ENVENIMATION
→ Ne pas frotter la peau directement avec la main
→ Retirer les tentacules en rinçant la peau à l'eau de mer, en appliquant de la mousse à raser (à défaut du sable sec) puis en les décollant avec un carton rigide
→ En cas de malaise ou de signe autre, se rendre au poste de secours ou appeler le 15
Ces animaux restent venimeux même échoués sur le sable

LA PHYSALIE
La physalie est un animal marin flottant au dessus de l'eau. Elle possède des tentacules très longs responsables de brûlures cutanées très douloureuses, mais aussi parfois de signes plus graves (ex. perte de connaissance, gêne respiratoire, ...). Taille = 10 à 20 cm

LA GRANDE VIVE
La grande vive est un poisson qui s'enfouit dans le sable. Elle possède une arête dorsale venimeuse sur laquelle on peut marcher, entraînant une piqûre très douloureuse. Taille = 20 à 40 cm

EN CAS D'ENVENIMATION
→ Marcher dans le sable chaud, puis appliquer de la glace si possible
→ Désinfecter la plaie au poste de secours le plus proche

Logos: Centre Antipoison et de Toxicovigilance de Bordeaux, InVS Institut de Veille Sanitaire, ARS Aquitaine
Collaboration IFRIMER - Photos : M.N. De Guzman - Publication mai 2011

L'évolution des communautés de poissons est essentiellement marquée par une présence accrue d'espèces marines (ex. l'anchois ou le sprat dans l'estuaire de la Gironde [27]) en réponse à l'augmentation des températures et à la marinisation du système. Cette augmentation des températures est également la cause avancée pour expliquer le déclin de certaines espèces d'eaux dites tempérées jusqu'à leur quasi-disparition, comme c'est notamment le cas de l'éperlan ([28], Figure 4).

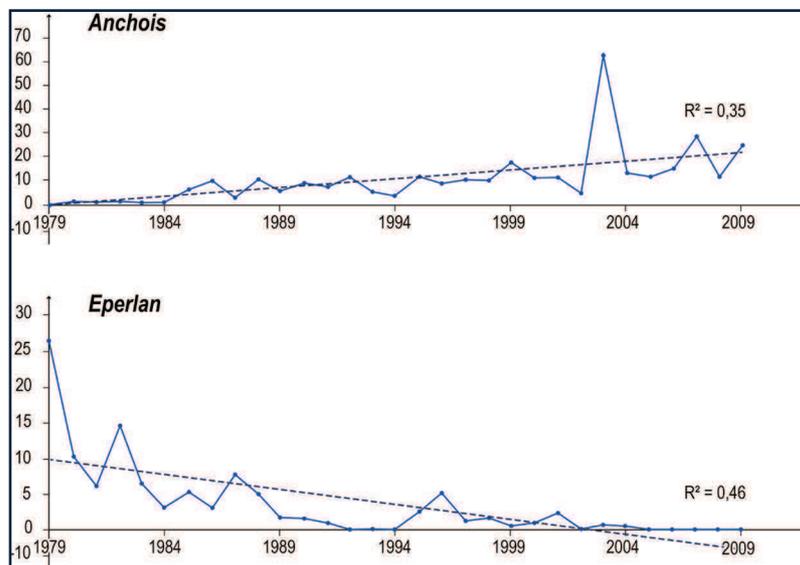


Figure 4 : Estuaire de la Gironde : évolution des abondances de l'anchois (espèce marine) et de l'éperlan (espèce d'eau tempérée) entre 1979 et 2009 dans la zone centrale de l'estuaire (entre Pauillac et Blaye, PK 52). Valeurs annuelles et tendances linéaires.

Enfin, l'apparition de nouveaux vecteurs d'épizooties⁵ est une autre caractéristique de l'évolution actuelle des écosystèmes littoraux qui sont aussi marqués par la recrudescence de maladies d'organismes marins (ex. : huîtres et Dermo [*Perkinsus marinus*] et MSX [maladie à spores plurinucléaires], palourdes et perkinsose [*Perkinsus olseni*]), qui sont directement mises en relation avec l'augmentation des températures.

5. Propagation rapide d'une maladie contagieuse dans une population animale.

Modifications des aires de répartition

Les modifications de biodiversité observées dans un écosystème donné sont la conséquence de différents processus amenant à une modification de la représentation des espèces : dynamique de population, relations proies-prédateurs, déplacement de l'aire de distribution en relation avec la modification de l'habitat, introduction d'espèces, évolution de la distribution des températures... Quels que soient les environnements et les communautés biologiques, une des évolutions majeures actuellement bien identifiée est la modification de diversité spécifique en relation avec l'élévation des températures, qui a pour effet direct une modification des aires de distribution des espèces à grande échelle spatiale (remontée des isothermes et facilitation d'implantation d'espèces invasives thermophiles).

Évolution des isothermes et modification des limites biogéographiques

Le golfe de Gascogne et ses zones littorales subissent des impacts d'autant plus marqués qu'ils se situent à proximité de la limite entre provinces biogéographiques (boréales [ou tempérées froides]) et (lusitaniennes [ou tempérées chaudes]) et constituent ainsi la limite biogéographique de nombreuses populations. L'effet du réchauffement climatique le plus souvent attendu est un glissement des limites de distribution des espèces vers le nord, associé à un remplacement des espèces d'eaux froides par des espèces d'eaux chaudes. Il est ainsi possible d'envisager l'effet d'une augmentation de température sur la modification de répartition d'une espèce donnée.

Le compartiment planctonique est concerné par ce changement avec une remontée vers le nord des espèces tempérées froides [28] et l'arrivée ou le développement plus marqué d'espèces plus thermophiles tant dans le golfe de Gascogne qu'en zone littorale [29][30].

Les espèces appartenant au phytoplancton toxique n'échappent pas à la règle, comme par exemple le genre *Ostreopsis* (Figure 5), identifié dans le golfe de Gascogne et connu sous les tropiques pour être à l'origine d'intoxications alimentaires sévères par accumulation de toxines (palytoxines⁶) dans la chaîne alimentaire⁷. Dans des conditions favorables, *Ostreopsis* peut se multiplier dans de grandes proportions et donner lieu à des efflorescences, qui constituent depuis 2008 un problème émergent pour les eaux littorales de Méditerranée française⁸. Les cas repérés ont permis d'identifier comme facteurs favorables : la présence de substrats durs, des eaux peu profondes, des températures élevées (> 26 °C), une mer calme et l'absence de vent pendant plusieurs jours.

Les invertébrés benthiques des substrats rocheux sont aussi concernés. De nombreux représentants de ce groupe se situent en limite d'aire de répartition sur les côtes aquitaines et plus particulièrement sur la Côte Basque [31]. Beaucoup d'entre eux, sont originaires de Méditerranée ou de l'Atlantique du Sud-est. L'accumulation d'eaux chaudes au sud du golfe de Gascogne se traduit par des conditions favorables, pour la colonisation des habitats locaux, par les larves pélagiques, conditions qu'elles ne retrouvent pas dans les régions plus septentrionales. Bien qu'il n'y ait pas de suivi récurrent de ces espèces (les données restent ponctuelles [32][33]), cette méridionalisation est connue de longue date [34] mais semble s'accroître au cours des dernières décennies [35].

6. Les palytoxines figurent parmi les toxines naturelles les plus toxiques connues.

7. Les risques identifiés sont principalement sanitaires. Ils ont été documentés par des avis récents de l'Anses et de l'InVS :

- Inhalation ou contact sur la peau, pour les personnes exposées aux aérosols marins ou effectuant des activités nautiques dans le secteur affecté par un épisode d'efflorescence (signes variés : bénins jusqu'à pouvant justifier une courte hospitalisation ; irritations et/ou des difficultés respiratoires).

- Ingestion, pour les personnes ayant consommé des produits de la mer ayant été en contact avec *Ostreopsis*, avec un risque d'intoxication potentiellement mortel en cas notamment d'ingestion de gastéropodes, échinodermes ou tuniciers (aucune intoxication à ce jour en Europe).

8. Affectant en général des secteurs limités, elles sont caractérisées par la présence de mucilage sur les rochers et les macroalgues littorales, de mousse couleur marron à la surface de l'eau, accompagnés de signes de souffrance voire de mortalité de certains organismes marins.

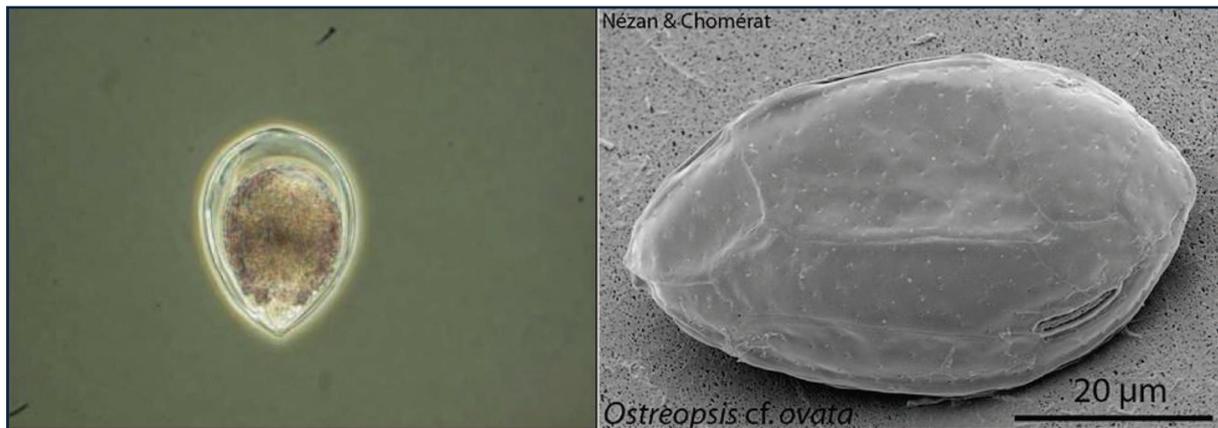


Figure 5 : Phytoplancton toxique, *Ostreopsis ovata* : algue microscopique (50 µm) unicellulaire (groupe des dinoflagellés), benthique et épiphyte (cliché IFREMER, Nézan et Chomérat).

Deux groupes biologiques illustrent particulièrement bien cette méridionalisation [31][36] : les mollusques opisthobranches et les cnidaires. Chez les Cnidaires, parmi les Octocoralliaires deux espèces originaires de l'Atlantique du sud-est (côtes africaines) côtoient les espèces Aquitaines : *Paramuricea grayi* (Johnson, 1861) dans la zone circalittorale du large et *Eunicella gazella* (Studer, 1878) dans les zones infra- à circa-littorales. Chez les mollusques opisthobranches, des espèces particulièrement remarquables, endémiques de la Méditerranée sont signalées en Aquitaine (**Figure 6**) : *Peltodoris atromaculata* (Bergh, 1880) et *Marionia blainvillea* (Risso, 1818).

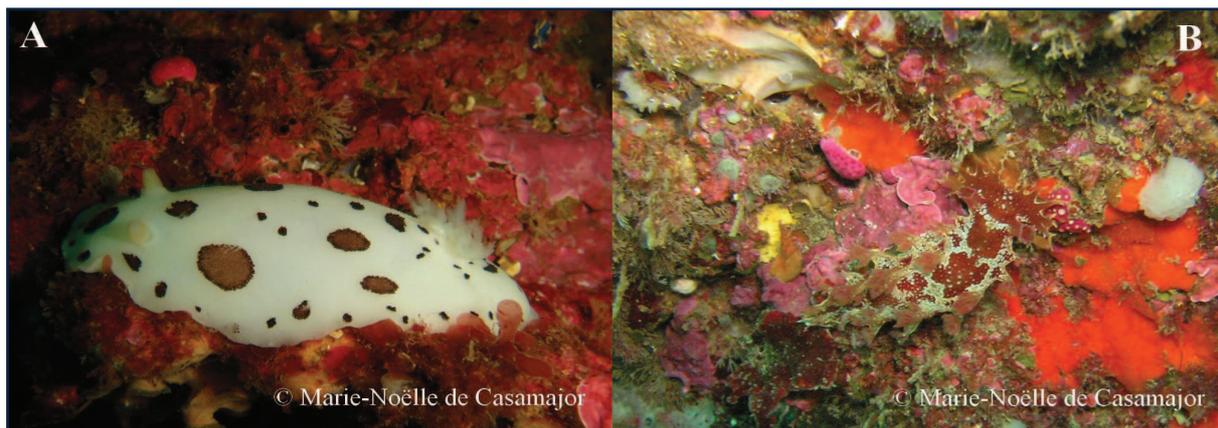


Figure 6 : Macrofaune benthique, (A) *Peltodoris atromaculata* (Bergh, 1880) et (B) *Marionia blainvillea* (Risso, 1818) observés sur les plateaux rocheux de la côte basque.

Les poissons représentant d'espèces tropicales inconnues des eaux européennes avant les années 1960 sont de plus en plus souvent observés dans le golfe de Gascogne. Les premiers à être signalés appartenaient à des espèces vivant entre 200 et 600 m de profondeur venues grâce au courant de pente sud nord.

Ces espèces sont à présent régulièrement observées dans le golfe depuis 1975 (14 espèces tempérées chaudes sont recensées pour 13 espèces d'eaux tempérées froides et 27 en limite de répartition dans le golfe). Sur le plateau continental, les espèces tropicales n'ont été signalées qu'à partir de 1981 et en moins grand nombre : plus de 65 % d'entre elles dans le sud-est du golfe dont les eaux se réchauffent ([37] – **Figure 7**). De la même manière, la distribution spatiale des communautés de poissons estuariens (estuaire de la Gironde) présente actuellement un changement brusque latitudinal en relation avec le réchauffement des eaux marines et les pressions anthropiques à plus petite échelle [38].

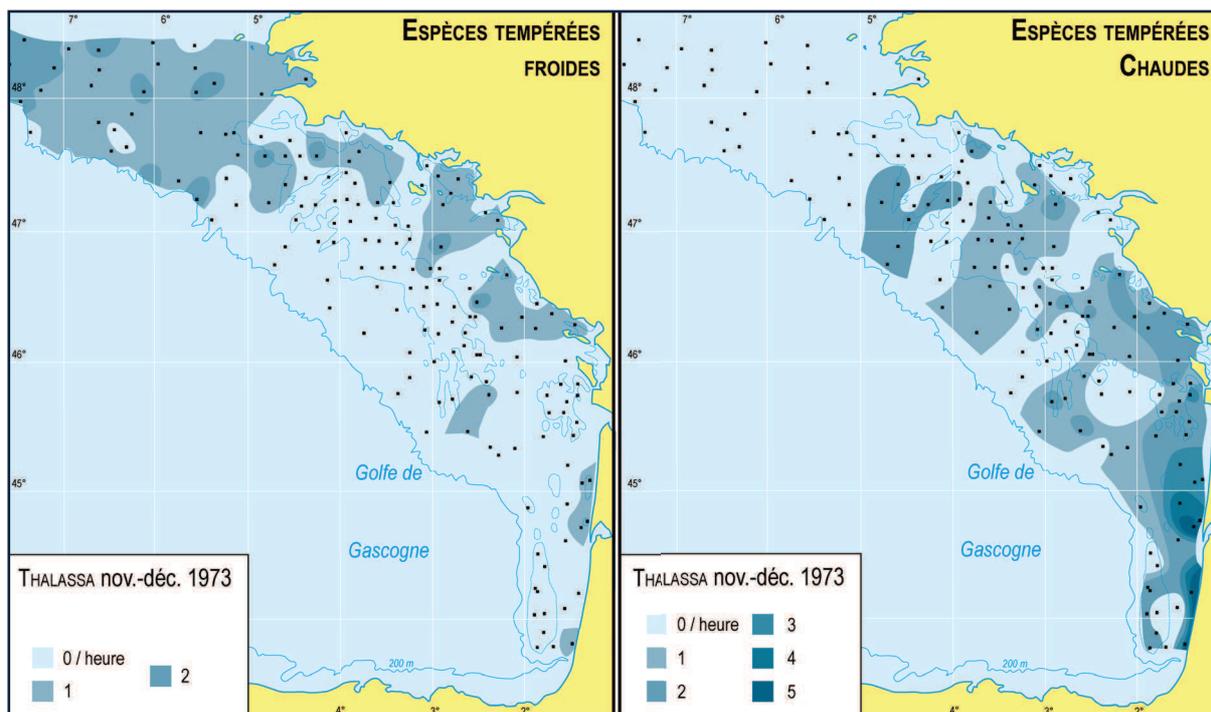


Figure 7 : Espèces en limite de leur aire de répartition dans le golfe de Gascogne. À gauche : espèces tempérées froides ; À droite : espèces tempérées chaudes [37].

L'avifaune. Pour le sud du golfe de Gascogne, les changements climatiques apparaissent aussi comme une cause majeure des évolutions observées chez les populations d'oiseaux marins [8]. De très fortes décroissances apparaissent chez les espèces préférant essentiellement les eaux tempérées froides telles que l'océanite tempête *Hydrobates pelagicus* et le pingouin torda *Alca torda* (Figure 8). Des disparitions temporaires, au moins en Aquitaine, se produisent chez le macareux moine *Fratercula arctica*.

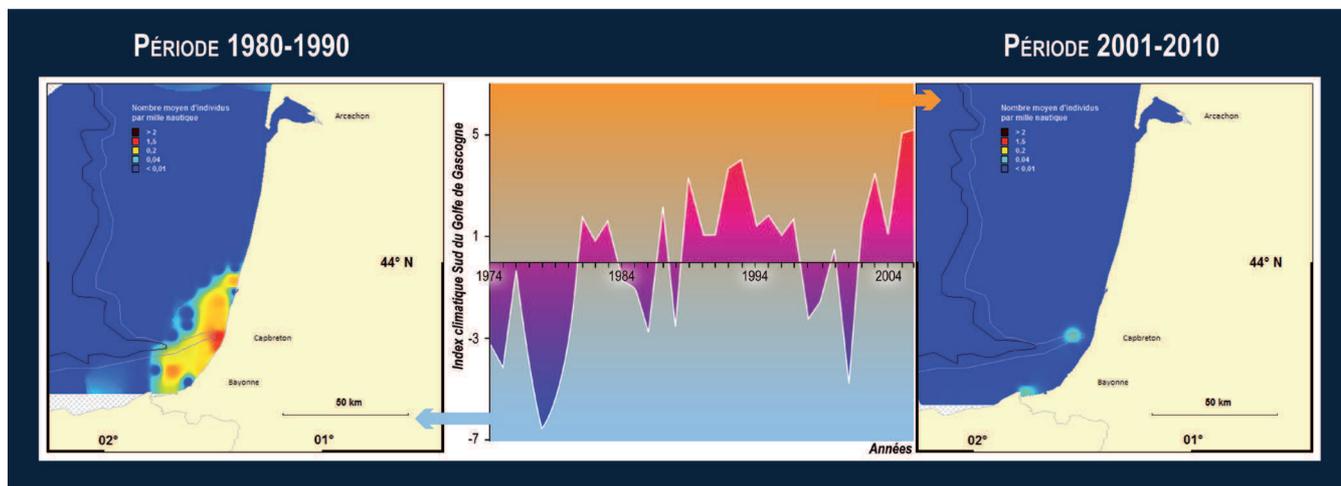


Figure 8 : Exemple de la diminution d'une espèce boréale, le Pingouin torda, hivernant dans les eaux d'Aquitaine (d'octobre à avril) en relation avec les changements océano-climatiques (index SBC) [6].

L'évolution d'abondance des mammifères marins présente de fortes corrélations avec les changements océano-climatiques observés en Aquitaine [8]. Une disparition temporaire dans les eaux d'Aquitaine de l'orque épaulard *Orcinus orca*, espèce caractéristique des eaux tempérées froides est à signaler alors que l'espèce était régulièrement observée jusque dans les années 1980. En revanche, les espèces liées aux eaux tempérées chaudes comme le dauphin commun *Delphinus delphis* [39], affichent globalement une tendance à la croissance de leurs populations (Figure 9).

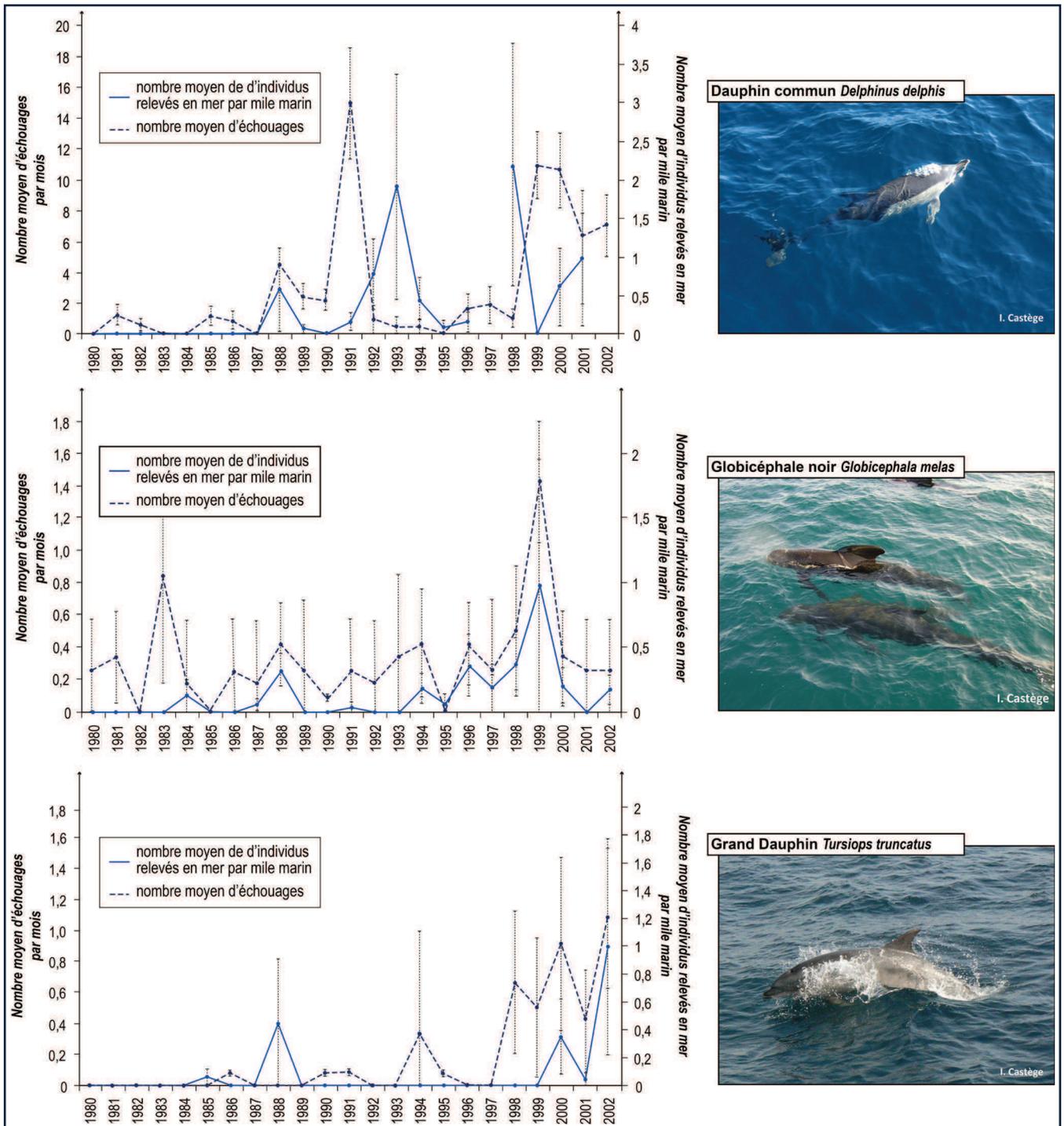


Figure 9 : Augmentation de l'abondance en mer (traits pleins) et des échouages (traits pointillés) de mammifères marins en Aquitaine. De haut en bas : Dauphin commun *Delphinus delphis* ; Globicéphale noir *Globicephala melas* ; Grand Dauphin *Tursiops truncatus* [39].

Évolution des températures et espèces invasives

En milieu marin, comme dans les écosystèmes terrestres et dulcicoles, les espèces *non-indigènes*, introduites volontairement (aquaculture) ou accidentellement (coques des navires, eaux de ballast, transferts d'espèces aquacoles, etc.) par les activités humaines, constituent l'une des principales causes d'atteinte à la biodiversité. Gouletquer *et al.* [40] ont ainsi recensé 104 espèces introduites (tous phyla confondus, végétaux et animaux, des protistes aux poissons) sur les côtes françaises de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord. Ces introductions se sont fortement accélérées à partir des décennies 1960-1970. Malgré diverses réglementations nationales et internationales, ce phénomène est loin de se

ralentir puisque, une décennie après l'évaluation de Gouletquer *et al.*, un nouveau recensement réalisé dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin fait état de 143 espèces « exotiques » sur les côtes Manche-Atlantique, soit un accroissement de près de 40 % en 10 ans ! Les sites conchylicoles, les estuaires et les ports, où s'exerce l'essentiel des activités anthropiques en mer, constituent des « hot spots » d'introduction d'espèces. Dans notre région, le bassin d'Arcachon et l'estuaire de la Gironde hébergent ainsi respectivement un minimum de 68 et 18 espèces non-indigènes.

Sachant que l'essentiel des espèces introduites (et maintenant établies) dans nos écosystèmes provient de régions tempérées-chaudes, le risque d'un accroissement du rythme de développement de ces espèces dans nos régions est extrêmement probable dans le cas d'un réchauffement des eaux. Des températures plus élevées peuvent favoriser l'établissement de nouvelles espèces exotiques, y compris celles qui arrivent actuellement mais qui ne trouvent pas pour l'instant des conditions optimales à leur implantation.

Fort heureusement, la plupart des espèces introduites ont peu d'impact (au moins, apparemment) et contribuent simplement à accroître la biodiversité. Certaines peuvent cependant devenir invasives (ou envahissantes), excluant alors des espèces autochtones ou modifiant le fonctionnement des écosystèmes. L'huître japonaise *Crassostrea gigas* – dont l'introduction volontaire a certes été positive pour les économies locales – est devenue l'une des espèces marines les plus envahissantes sur les côtes européennes. À la faveur du réchauffement climatique amorcé, elle se reproduit à des latitudes de plus en plus élevées, y compris en Scandinavie à la faveur d'étés particulièrement chauds, et entre en compétition avec les moulières en Mer du Nord. Dans notre région, en particulier dans le bassin d'Arcachon, malgré les fortes mortalités de naissain observées ces dernières années, cette espèce constitue des récifs d'individus « sauvages », dont le développement modifie la biodiversité benthique locale, en permettant l'installation de certaines espèces et en éliminant d'autres [41].

Évolution des températures et parasites

Les études cherchant à identifier l'impact d'un réchauffement climatique sur les *organismes parasitaires marins* sont encore très rares à l'échelle internationale. Les travaux concernant l'impact du changement climatique sur la diversité des parasites et leur impact sur d'autres espèces suivent pour la plupart un raisonnement basé sur l'extrapolation : une estimation expérimentale du taux de reproduction et d'émission des parasites en fonction de la température permet d'envisager ce que deviendraient ces taux, dans un milieu naturel se réchauffant. Ce qui est vrai pour les systèmes parasites-hôtes qui ont co-évolué depuis des millénaires le devient peut-être moins dans le cas d'espèces nouvellement introduites dans les écosystèmes, parasites et/ou hôtes. Dans ce cas la relation est plus fragile et mène très souvent à des pathologies sévères. Les deux espèces de bivalves les plus produites dans le monde, l'huître japonaise et la palourde japonaise, sont aussi les deux bivalves les plus produits en Aquitaine. La palourde japonaise subit l'emprise d'un parasite qui développe chez elle une maladie, la Perkinsose. Ce parasite se développe plutôt dans des conditions « chaudes » : si en Bretagne le nombre de parasites est de l'ordre de 10^3 cellules par gramme de chair, il atteint 10^4 en Aquitaine (Arcachon) [42]. Des mortalités significatives sont attendues lorsque ce nombre passe à 10^5 comme cela a été le cas en Espagne. Une augmentation de température apparaît donc dans ce cas comme une menace pour cette espèce et la pêche associée.

Modification de la phénologie

Les caractéristiques des populations de divers groupes biologiques (insectes, mollusques, oiseaux...) s'exprimant à l'échelle annuelle (phénologie) sont, de manière globale, actuellement modifiées principalement sous l'effet des changements : 1) des caractéristiques du cycle climatique saisonnier (début de période chaude plus précoce, débits, régimes de vents) et 2) de l'amplitude des variations thermiques annuelles (ex. [42][43]). Les travaux sont souvent menés à l'échelle de populations : les changements observés varient de manière importante suivant les groupes fonctionnels considérés [44] et ont un impact sur le fonctionnement de l'écosystème.

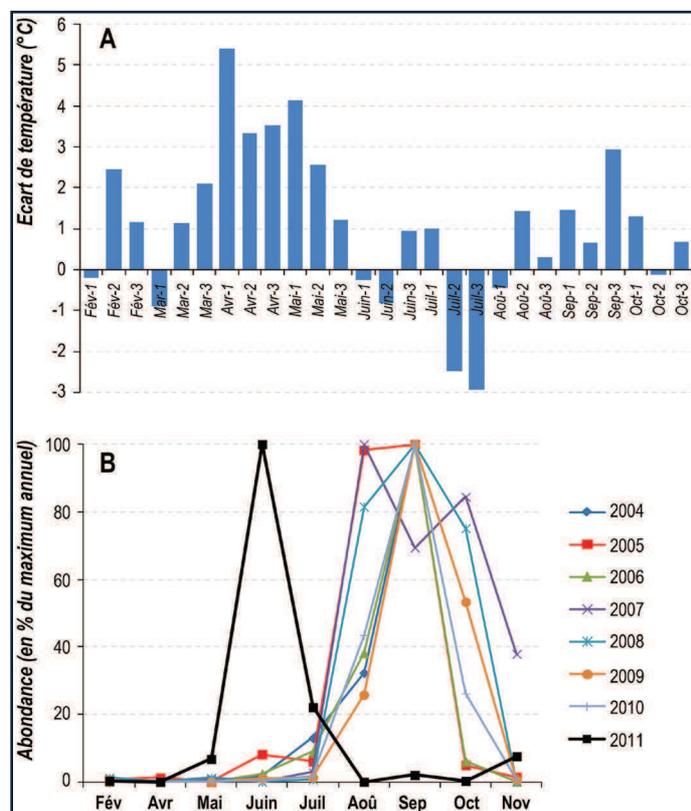
Les traits d'histoire de vie des organismes et la dynamique de leurs populations sont affectés. Ceci a été, en particulier, étudié chez les poissons estuariens, notamment en relation avec leur phase migratoire [45]. À l'échelle populationnelle, certains effets sont maintenant bien connus : l'augmentation des températures et la modification du cycle saisonnier ont ainsi des conséquences sur la survie des organismes (œufs de poissons et ensuite indirectement développement des larves et des alevins durant leurs premiers jours et mois de vie), sur la croissance des organismes notamment ectothermes qui est plus rapide et a pour conséquence une augmentation du nombre de cohortes annuelles [18].

La base du réseau trophique est profondément impactée notamment *via* la modification de dynamique des floraisons phytoplanctoniques en relation avec la réduction des apports en eau douce [18][23]. La diminution des apports en nutriments (ex. bassin d'Arcachon [17]), particulièrement marquée durant les années sèches (printemps 2002) induit des limitations par le silicium très précoces et en conséquence des floraisons de flagellés également plus précoces (alors que la phénologie du développement des diatomées semble globalement inchangée [44]⁹).

Cette tendance est aussi soutenue par une stratification accrue des eaux de surface (modifications de température et de turbulence) induisant une augmentation des abondances de dinoflagellés et une diminution de celles des diatomées [46]. Par ailleurs, les apports continentaux, plus concentrés en composés dissous et particuliers, exacerbent par ailleurs les risques de sous oxygénation, d'eutrophisation et de contamination des écosystèmes [47], phénomène amplifié par une modification du temps de résidence des masses d'eau qui conduit aussi à une maturation accrue du réseau trophique.

La temporalité des relations trophiques est elle aussi perturbée par la modification des cycles saisonniers de développement des consommateurs par rapport à une situation de « normalité » (ex. : crustacés en Gironde : maturité sexuelle atteinte plus rapidement chez les mysidacés ou encore les *Corophium*, Figure 10).

Figure 10 : Les températures anormalement élevées lors du printemps 2011, avec des écarts de +2,6 à +5,4 °C des moyennes décennales de début avril à mi-mai par rapport à la normale (A, écarts des températures de l'air à Bordeaux par rapport à la période 1981-2000 ; données Météo France), ont été à l'origine d'un développement précoce en 2011 (juin) par rapport aux années 2004-2010 (août-septembre) chez le crustacé amphipode *Corophium volutator* (B) qui colonise les vasières intertidales de l'estuaire de la Gironde (Bachelet, non publié).



9. Lien possible avec la recrudescence de dinoflagellés toxiques, ou le développement important de *Phaeocystis* sp en 2010 ?

De manière globale, le développement de certains consommateurs primaires (planctoniques) plus précoce [18] alors que celui des consommateurs d'ordre supérieur semble moins modifié quel que soit le milieu envisagé [48], renforce le risque de décalage temporel entre périodes de présence des proies et des prédateurs. Cette désynchronisation effective des périodes de développement des communautés de proies et de prédateurs [49] qui conduit à un « mismatch » peut annuler le lien trophique et avoir des répercussions sur l'ensemble du fonctionnement du réseau trophique [50]

Relations hôtes/parasites : les espèces parasitaires chez qui on peut observer une émission de larves quand l'eau atteint 17 °C ([51], bassin d'Arcachon) qui est multipliée par 6 au-dessus de 19 °C (mais s'annule de nouveau au-delà de 23 °C), une augmentation de production de larves est donc attendue ainsi qu'un possible décalage de la période d'émission ; la question de la présence dans le milieu de l'hôte au stade de développement adéquat dans cette nouvelle fenêtre temporelle restant posée (Figure 11).

Les modifications explicitées ci-dessus en termes de diversité spécifique et de phénologie ont un impact direct sur le fonctionnement de l'écosystème au travers notamment d'une modification potentiellement profonde des relations trophiques qui constituent un lien extrêmement structurant.

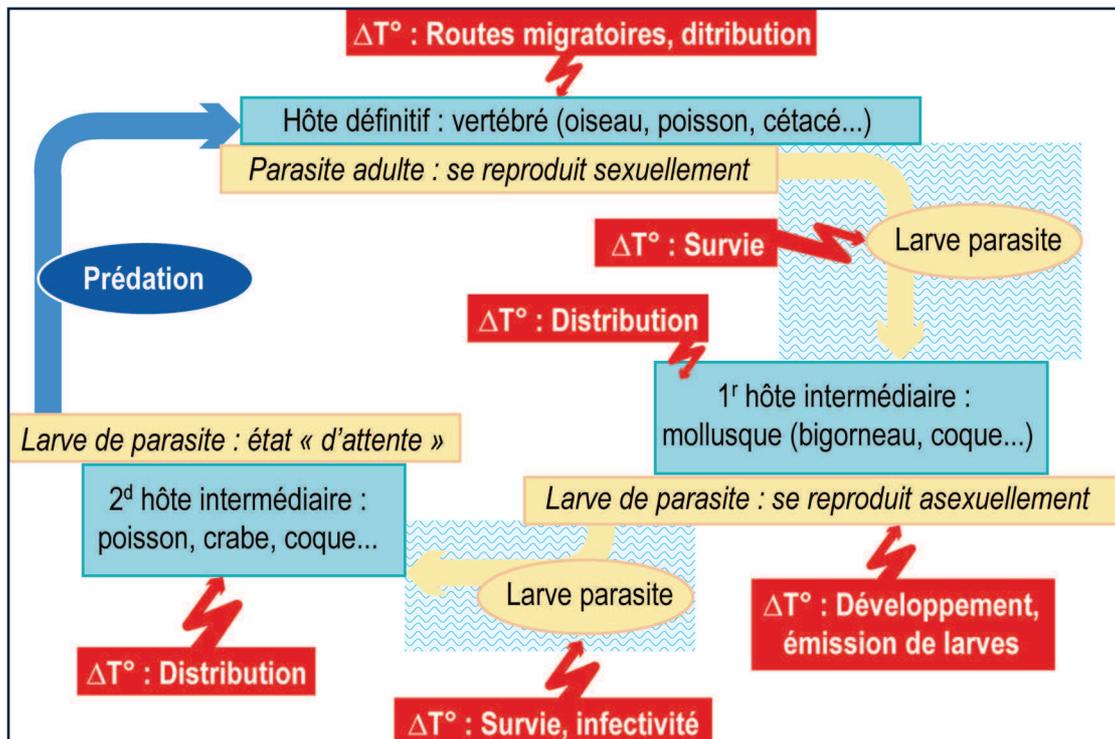


Figure 11 : Cycle théorique d'un parasite trématode passant par trois organismes hôtes et deux phases larvaires libres : le parasite adulte se reproduit sexuellement dans un vertébré. Ses œufs sont émis dans l'eau avec les fèces de l'hôte et la larve va devoir trouver le 1^{er} hôte intermédiaire, un mollusque. Le parasite y sporule et va émettre de nouvelles larves qui vont infecter le 2^d hôte intermédiaire. Le cycle sera complet quand cet hôte sera ingéré par l'hôte définitif. En rouge : les différentes étapes où la température de l'environnement a une importance particulière.

II- Prédications et Incertitudes

Les changements explicités ci-dessus s'amplifieront encore vraisemblablement au regard des différents scénarios climatiques prévus.

Les facteurs importants de l'évolution de l'environnement sont : la température (modification des aires de répartition des espèces, de la phénologie...), la diminution des débits et l'élévation du niveau de la mer (modification de l'habitat, érosion des zones littorales, marais maritimes...) ¹⁰. Les impacts possibles sur le milieu marin à partir de prédictions pour la fin du XXI^e siècle indiquent une augmentation de la température de la mer, entre 0 et 100 m de profondeur, entre 0,015 et 0,020 °C an⁻¹ [24] ainsi qu'une élévation du niveau de la mer (Côte Pays Basque outre Bidassoa, [24]) entre 29 et 49 cm estimée même jusqu'à une valeur extrême de 62 cm (sur le niveau de la marée maximale astronomique) avec une période de retour de 50 années [52].

Le golfe de Gascogne constitue la limite biogéographique de nombreuses populations et l'impact à venir sur la biodiversité de ces changements océano-climatiques risque d'y être d'autant plus prononcé. Les évolutions actuelles (cf. sections précédentes) montrent que la biodiversité va évoluer vers une augmentation de représentativité des espèces tempérées chaudes, une modification de la phénologie des espèces et de la productivité des écosystèmes.

Le phytoplancton, base de la productivité des écosystèmes marins (99 % de la matière organique utilisée dans les réseaux trophiques marins), subira des effets antagonistes dus au réchauffement : augmentation de la stratification thermique des eaux, réduction des apports en nutriments d'origine continentale, diminution du mélange vertical mais aussi augmentation de la fréquence des événements exceptionnels (ex. : tempêtes). Les conséquences ¹¹ seront très variables suivant les environnements et leurs caractéristiques climatiques et hydrodynamiques. À l'échelle globale la production primaire phytoplanctonique diminuerait de 2 à 20 % d'ici à la fin du 21^e siècle ([53], scénario A2). La modification de dominance diatomées/dinoflagellés, doit amener à une évolution vers le développement de phytoplancton de plus petite taille, avec pour conséquence une augmentation de représentativité du microzooplancton et de manière globale une augmentation du nombre de maillons trophiques. Les conséquences attendues sont liées à une réduction de l'efficacité de transfert de matière et d'énergie vers les maillons trophiques supérieurs pélagiques et benthiques (diminution de l'exportation de matière vers le fond), dont les maillons exploités par l'homme. Cette évolution combinée à l'exploitation des ressources marines pélagiques pourrait amener au développement accru de méduses (prédateurs supérieurs : [54]).

La sensibilité aux variations de pH et de CO₂ est principalement documentée chez les organismes invertébrés et chez les poissons. Celle-ci est hautement variable d'une espèce à l'autre et certains effets sont encore peu connus. Néanmoins les connaissances actuelles permettent de dégager un consensus indiquant une recomposition des communautés [49].

Difficulté de déconvolution des signaux

Les organismes vivants étant des témoins intégrateurs de la variabilité de l'environnement, les modifications observées sont toujours dues à l'action combinée de différents facteurs du milieu. La relation entre la variabilité d'un facteur environnemental pris isolément et les modifications de biodiversité qui lui sont attribuées est donc souvent difficile à caractériser avec précision. Ainsi, les observations de biodiversité faites en relation avec l'évolution de température sont à interpréter en considérant que (1) des paramètres environnementaux autres que la température sont aussi modifiés (précipitations,

10. Mais aussi pluviosité, régime de vents, upwellings.

11. Conséquences complexes à déterminer du fait de la multiplicité des effets induits et des échelles spatiales et temporelles impliquées.

débites fluviaux dans les zones sous influence continentale, apports en nutriments et éléments minéraux, circulation des eaux, turbidité, etc.), (2) toutes les espèces ne réagissent pas de la même manière à ces modifications et (3), conséquence du précédent point, le réseau d'interactions entre espèces, construit sur une durée correspondant à la coévolution des espèces, peut être profondément altéré.

Parmi les facteurs de l'environnement influant sur la biodiversité il est important de mentionner les facteurs anthropiques « régionaux », comme par exemple les accidents pétroliers (ex. : Erika et Prestige dans le golfe de Gascogne), dont les impacts ont été notoires sur les oiseaux marins [55][56], dont les effets sur l'environnement ne peuvent être traités séparément des évolutions océano-climatiques actuelles, ou encore les zones de réchauffement ponctuel des eaux (ex. : eaux de refroidissement de centrale nucléaire), qui doivent maintenant être considérées comme des zones « réservoirs » d'espèces thermophiles (majoritairement à déterminer) dont les frontières avec le milieu naturel sont de plus en plus ténues en raison du réchauffement global des eaux.

Rareté des prédictions et manque de données

Les difficultés de caractérisation des causes d'évolution de la biodiversité en relation avec les caractéristiques environnementales, dont le climat, rendent difficiles les prédictions. À ce premier verrou s'ajoute le manque quasi récurrent de données acquises sur des durées suffisamment longues permettant de préciser les évolutions à partir d'états dits « de référence ».

Les travaux permettant de prédire l'évolution de la biodiversité se multiplient néanmoins et permettent de confirmer les évolutions décrites pour la période actuelle en abordant les conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes (ex : [13]). À l'échelle de l'Aquitaine l'ampleur de l'évolution attendue peut être perçue à partir des changements prévus pour les communautés benthiques des côtes rocheuses basques pour lesquelles les variables climatiques (température, précipitations, NAO, etc.) expliquent une part de variabilité plus grande que les sédiments ou la pollution dans la variabilité de biodiversité observée [57]. Les conséquences pourront être observées pour de nombreux organismes de cette communauté benthique :

- La communauté de macro-algues de la côte rocheuse basque, structurée (entre 0 et 15 m) par l'algue *Gelidium corneum*¹², verra sa biomasse diminuer au cours de ce siècle [24] en relation avec les changements prédits pour les facteurs déterminant son développement (lumière, température et houle : [58]) ;

- Pour d'autres algues (*Saccorhiza polyschides*, *Laminaria*, *Fucus*, *Bifurcaria*) ou animaux benthiques (*Patella*, *Balanus*, *Littorina*), pour lesquels la température s'avère être un facteur déterminant, les aires de distributions seront modifiées [59] : *Patella rustica* et *Pollicipes pollicipes* s'étendront vers le nord, et des espèces comme *Patella vulgata*, *Nucella lapillus*, *Semibalanus balanoides*, *Pelvetia canaliculata*, *Fucus vesiculosus*, *Fucus serratus* et *Laminaria ochroleuca* disparaîtront du golfe de Gascogne [59].

Acquisition de données - modélisation

Chroniques de données

La première démarche consisterait à effectuer des inventaires faunistiques dans des environnements représentatifs et avec des fréquences d'acquisition cohérentes avec les échelles de variabilité des compartiments biologiques suivis et des paramètres environnementaux susceptibles de les impacter. Ces observations, doivent être soutenues et confrontées à des approches similaires à plus large échelle spatiale afin d'identifier, dans les variations, ce qui relève du global ou du local.

12. Utilisée pour la production d'agar sur toute la côte basque.

Ces dispositifs relèvent parfois de la surveillance lorsque les organismes peuvent impacter la santé humaine. Un dispositif de surveillance et d'alerte a ainsi été mis en place en Méditerranée française, à l'initiative des autorités sanitaires nationales¹³. *Ostreopsis* (microalgue) a été observée à l'heure actuelle une seule fois sur le littoral Aquitain en 2007 (IFREMER, Saint-Jean-de-Luz) en faible quantité (40 cellules/litre). Ces dispositifs impliquent que les espèces recherchées soient connues dans la zone étudiée ou puissent potentiellement s'y développer (lien avec les activités d'observation mentionnées ci-dessus).

Ces suivis effectués à petite échelle spatiale doivent être menés en parallèle d'acquisition de données à une échelle plus large (échelle du golfe de Gascogne, de l'Atlantique Nord, avec des outils adaptés et pour des variables environnementales porteuses d'informations à ces échelles).

Relation environnement/organismes

Cette acquisition récurrente doit s'accompagner de travaux spécifiques sur des modèles biologiques permettant de caractériser les impacts croisés des facteurs environnementaux agissant en synergie ou de manière antagoniste sur les êtres vivants (approches expérimentales et de terrain).

De même des travaux en écologie fonctionnelle devraient être promus afin de pouvoir mieux caractériser l'effet des modifications de biodiversité en termes de fonctionnement de l'écosystème.

Cette dernière approche permettrait en outre, en croisant avec des approches similaires faites dans d'autres écosystèmes, de dégager les principales évolutions fonctionnelles actuelles des environnements.

Modélisation

Ces deux types d'acquisition permettraient de compléter de manière utile les approches de modélisation prédictive, actuellement incomplètes du fait de la difficulté à caractériser les effets et à les quantifier.

De manière globale les prédictions devraient s'appuyer dans l'avenir sur une modélisation croisée hydrodynamique/processus écologiques/biogéochimiques, encore trop peu développée.

Une approche par les modèles de niche à large échelle sur l'ensemble des espèces est actuellement en cours de développement régionalement, avec, en perspective, une approche théorique par des modèles mécanistes pour une prise en compte plus réaliste de la dispersion et de la dynamique des extinctions/colonisation.

Conclusion

En Aquitaine l'impact à venir des changements océano-climatiques sur la biodiversité sera d'autant plus prononcé que le golfe de Gascogne se situe à proximité de la limite entre provinces biogéographiques boréales tempérées froides et tempérées chaudes et constitue ainsi la limite de distribution de nombreuses populations. L'effet du réchauffement climatique le plus souvent observé est donc un glissement des limites de distribution des espèces vers le nord, associé à un remplacement des espèces d'eaux froides par des espèces d'eaux chaudes, ceci, du phytoplancton (dont phytoplancton toxique : présence d'*Ostreopsis*) aux mammifères marins (raréfaction de l'orque, présence accrue du

13. La présence d'*Ostreopsis* (microalgue) en quantité importante peut conduire à une interdiction de baignade et de consommation des produits de la mer. L'examen de différents épisodes a montré que les concentrations d'*Ostreopsis* dans l'eau ayant donné lieu à l'observation d'effets sanitaires vont de quelques milliers à un million de cellules par litre.

dauphin commun), en passant par le zooplancton, les invertébrés benthiques (notamment cnidaires), les poissons (présence d'espèces tropicales) ou encore l'avifaune (décroissance importante d'espèces d'eaux tempérées froides, ex. : pingouin torda). Outre cette évolution, l'introduction volontaire ou accidentelle d'espèces non-indigènes par les activités humaines, constitue l'une des principales causes d'atteinte à la biodiversité. Les sites conchylicoles, les estuaires et les ports, où s'exerce l'essentiel des activités anthropiques en mer, constituent des « hot spots » d'introduction d'espèces. Sachant que l'essentiel des espèces introduites (et maintenant établies) dans nos écosystèmes provient de régions tempérées-chaudes, le risque d'un accroissement du rythme des implantations nouvelles est extrêmement probable dans le cas d'un réchauffement des eaux. À l'échelle des espèces les traits d'histoire de vie sont modifiés, notamment la saisonnalité du développement. Ceci a des répercussions sur le fonctionnement de la base du réseau trophique avec une modification de la dynamique des floraisons phytoplanctoniques en relation avec la réduction des apports en eau douce, jusqu'au développement plus précoce de certains consommateurs primaires alors que celui des consommateurs d'ordre supérieur semble moins modifié. Cette variabilité dans la réponse renforce le risque de décalage temporel entre périodes de présence des proies et des prédateurs en annulant les liens trophiques.

6.3 Ressources exploitées par la pêche et l'ostréiculture

Coordination : Nathalie Caill-Milly, Patrick Prouzet

Rédacteurs : Isabelle Auby, Angel Borja, Iker Castège, Guillem Chust, Nathalie Caill-Milly, Marie-Noëlle De Casamajor, Jean d'Elbée, Nicolas Goñi, Mario Lepage, Danièle Maurer, Gilles Morandeau, Patrick Prouzet, Jean-Claude Quéro, Tristan Renault

Contributeurs : Marie-Laure Bégout, Gérard Biais, Roger Kantin, Muriel Lissardy, Florence Sanchez

En Aquitaine, l'exploitation des ressources de la mer (pêche et ostréiculture) est caractérisée à double titre par une forte dépendance à la bande côtière et aux estuaires. D'une part, près de 80 % des navires de pêche aquitains exercent une activité dans un rayon d'action inférieur à 12 milles. D'autre part, la région présente également, dans sa zone littorale et dans les estuaires, des habitats essentiels pour le bon déroulement des cycles biologiques pour les espèces exploitées à la côte mais également au large.

Après un rapide descriptif de l'activité de pêche (engins mis en œuvre, saisonnalité des captures...), un bilan des connaissances actuelles de l'impact du changement climatique pour les espèces d'importance halieutique en Aquitaine est présenté. La synthèse repose sur les derniers travaux scientifiques disponibles pour chacune de ces espèces.

Une vision synthétique des effets du changement climatique sur les espèces exploitées demeure délicate car de nombreux facteurs (y compris des facteurs non liés au climat) difficilement dissociables influent simultanément sur les populations. De plus, il ressort un manque de connaissances sur l'effet cumulé des changements liés au climat sur les différentes phases du cycle biologique de chacune des espèces d'intérêt halieutique en Aquitaine. Alors qu'au sein du golfe de Gascogne, les côtes d'Aquitaine présentent déjà un caractère méridional, de nouvelles espèces à affinité tropicale sont observées depuis plusieurs années. Les informations recueillies mettent néanmoins en évidence à l'échelle régionale des enjeux de gestion au niveau d'habitats essentiels.

Ce chapitre permet de faire le point sur les orientations de recherche à envisager pour améliorer l'état des connaissances sur les effets de changements climatiques sur les communautés d'intérêt halieutique et les perspectives de gestion pour le maintien de l'activité économique qui en découle.

Introduction

On entend par ressources vivantes de la mer, les espèces marines utilisables économiquement par l'homme. Bien que le tourisme et les activités de loisir aient introduit de nouvelles formes d'usage des ressources vivantes marines, on se limite ici aux ressources exploitées par la pêche ou l'aquaculture dans leurs milieux naturels¹, le poids économique et social de ces activités dépassant largement celui des autres usages.

L'état de ces ressources dépend à la fois de facteurs naturels (température, salinité, courants...) et anthropiques (prélèvements, modification des habitats...). Ainsi, les fluctuations de la NAO (North Atlantic Oscillation) et des pics de plancton associés, ou l'abaissement du pH des océans et ses répercussions

1. Hors aquaculture marine en milieu contrôlé telle que l'élevage de turbot à Anglet.

sur les organismes marins, sont encore mal connus. Les premières études expérimentales montrent que l'acidification des océans pourrait affecter la construction et la solidification des squelettes et coquilles d'animaux marins zooplanctoniques comme les ptéropodes [1] qui constituent une part conséquente du bol alimentaire des juvéniles de saumons pink (*O. gorbusha*) en Alaska dont la taille est comparable à celle des post-smolts² de saumon atlantique (15 à 20 cm).

Par ailleurs, les usages liés au milieu marin (pêche, aquaculture, activités nautiques de loisir, transport maritime...) et ceux liés au milieu terrestre (agriculture, tourisme littoral...), ont des répercussions sur le milieu marin qui se conjuguent avec ceux du changement climatique. La distinction entre les différents effets (anthropiques et climatiques) est difficile à évaluer ce qui engendre des difficultés en matière de prévisions.

Pour les secteurs de la pêche professionnelle et de l'aquaculture qui dépendent directement des ressources vivantes marines, la viabilité de ces activités résulte non seulement des conditions d'accès à la ressource et de l'état des stocks, des marchés..., mais aussi de la capacité des entreprises à s'adapter aux changements intervenant dans les écosystèmes.

Au côté des possibles adaptations génétiques des espèces (sur le long terme), les réponses biologiques aux changements physico-chimiques, des populations et des communautés sont essentiellement de quatre types [2] : il s'agit de déplacements de limites bio-géographiques, de décalages temporels de la phénologie, de modification de la physiologie liée à l'augmentation de la température et au déficit d'oxygène, et de mécanismes d'adaptation ou non face à l'acidification des eaux marines (avec une sensibilité attendue plus forte chez les invertébrés les moins évolués par rapport aux poissons, céphalopodes...).

Une approche un peu différente a été développée dans le cadre du projet européen RECLAIM (REsolving CLImAtic IMpacts on fish stocks, 2007-2009) qui a considéré l'impact du changement climatique attendu sur les habitats, la physiologie des organismes, la dynamique des populations, ainsi que la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Au cours de cette démarche, une liste d'hypothèses a été élaborée et les réponses possibles sont rassemblées dans le **tableau 1**.

Les populations situées en limite de leur aire de distribution vont présenter des réponses plus fortes que les populations situées dans une position médiane par rapport à leur aire de distribution.
L'abondance des espèces boréales en limite biogéographique sud va décroître ; celle des espèces méridionales en limite biogéographique nord va augmenter.
Les populations de poissons des systèmes océanographiques présentant une grande variété de fonctionnalités à méso-échelles seront moins dépendantes du changement climatique.
Les espèces pélagiques et démersales vont réagir différemment. Les espèces pélagiques pourront plus facilement suivre les changements intervenant dans les masses d'eau ainsi que les conditions biotiques et abiotiques associées. Les espèces démersales présenteront généralement des conditions en termes d'habitats plus restreintes d'un point de vue géographique.
Les espèces à vie courte vont présenter des réponses plus fortes et sont mieux armées pour s'adapter aux changements de l'environnement que les espèces à vie longue.
Les espèces requérant des habitats spatialement restreints pour une phase de leur cycle de vie vont être plus touchées par le changement climatique que les espèces ne nécessitant pas d'habitats spécifiques.
Les stocks halieutiques soumis à une exploitation intense répondront plus fortement au changement climatique que ceux exploités de manière limitée.
Les écosystèmes avec des réseaux trophiques simples vont présenter des réponses plus simples et plus rapides au changement climatique que ceux avec des réseaux trophiques complexes.
Les modifications induites par le changement climatique dans la structure des écosystèmes peuvent être brusques.

Tableau 1 : Hypothèses des réponses possibles au changement climatique au niveau des habitats, de la physiologie des organismes, de la dynamique des populations, ainsi que de la structure et du fonctionnement des écosystèmes (projet RECLAIM, www.climateandfish.eu).

2. Phase postérieure à celle du jeune saumon qui vient de subir la smoltification et qui migre vers la mer (smolt étant un terme anglais synonyme de saumoneau).

I- Exploitation des ressources marines et estuariennes en Aquitaine - Un état de la situation

Les activités de pêche (pêche des bivalves compris)

Avec un peu plus de 300 navires de pêche et près de 1 000 marins pêcheurs en équivalents temps plein, l'Aquitaine contribue pour respectivement 6 % à la flottille de pêche nationale métropolitaine et 9 % à l'effectif des pêcheurs. Ces dernières années, le chiffre d'affaires annuel global est estimé être compris entre 30 et 50 M€ pour la première vente. Les retombées économiques de l'activité dépassent largement ce premier maillon de la filière que sont les producteurs. Une étude locale concernant les Pyrénées-Atlantiques et les Landes [3] a ainsi estimé les emplois générés par la pêche compris entre 810 et 860 emplois directs (ETP) auxquels s'ajoutent 120 à 150 emplois indirects (30 à 40 en amont de la filière et 60 à 70 en aval).

L'outil de production moyen est un navire d'une longueur de 12 m (près des $\frac{3}{4}$ de la flottille sont de longueur inférieure à 12 m – sources DDTM – CRPMEM Aquitaine), de puissance totale de 172 kW, de jauge de 44 UMS et d'âge 21 ans. En termes d'engins de pêche, l'activité exprimée en cumul des mois de pêche est dominée par les filets, la pêche à la main (pour les palourdes), les chaluts, les tamis et les casiers (86 % de l'activité) (Figure 1).

Des métiers parfois très anciens et/ou emblématiques sont pratiqués en Aquitaine tels que (par ordre alphabétique) le balai à crevette, la bolinche à anchois, le chalut à céteau, les filets maillants dérivants pour les captures de lamproies marines et d'aloses, de maigres ou encore de saumons, le filet à seiche, la palangre à merlu, la pêche de thonidés à l'appât vivant et le tamis à civelle.

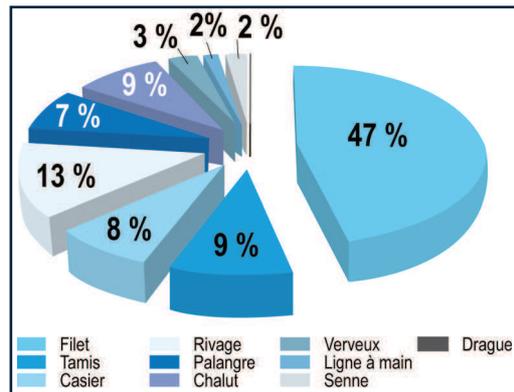


Figure 1 : Nombre de mois d'activité des navires aquitains (données 2009).

La flottille de pêche est très dépendante du milieu côtier puisque près de 80 % des unités exercent une activité dans un rayon d'action inférieur à 12 milles, 16 % des navires à l'extérieur et 5 % opèrent à la fois « en côtier » et plus au large. Au niveau des captures totales, sur les quelques 15 000 tonnes d'apports annuels, un tiers provient de la zone CIEM VIII B qui comprend notamment les estuaires de la Gironde et de l'Adour dans leur partie maritime, le bassin d'Arcachon et le plateau jusqu'à l'isobathe des 200 m au large de la côte d'Aquitaine (Figure 2).

Les principales espèces capturées dans le VIII B sont présentées dans le Tableau 2. Les captures de bivalves, palourdes et moules, sont intégralement réalisées dans le bassin d'Arcachon. Plus au large, les captures concernent surtout les thonidés (thon blanc – *Thunnus alalunga* et thon rouge – *Thunnus thynnus*), les baudroies (baudroie blanche ou commune – *Lophius piscatorius* et baudroie noire ou rousse – *Lophius budegassa*), le merlu européen ou commun (*Merluccius merluccius*) et les cardines (*Lepidorhombus spp.*).

Parmi les espèces principales, et mis à part le cas des amphihalins (anguille stade civelle et lamproie marine), les espèces présentant une forte saisonnalité des captures sont essentiellement pélagiques³ (maquereau commun, thon blanc, thon rouge) et démersales⁴ (dorade royale – *Sparus aurata*, maigre commun).

3. Qualifie une espèce, des individus vivant en pleine eau [13].

4. Qualifie une espèce qui vit près des fonds marins tout en pouvant les quitter ponctuellement.

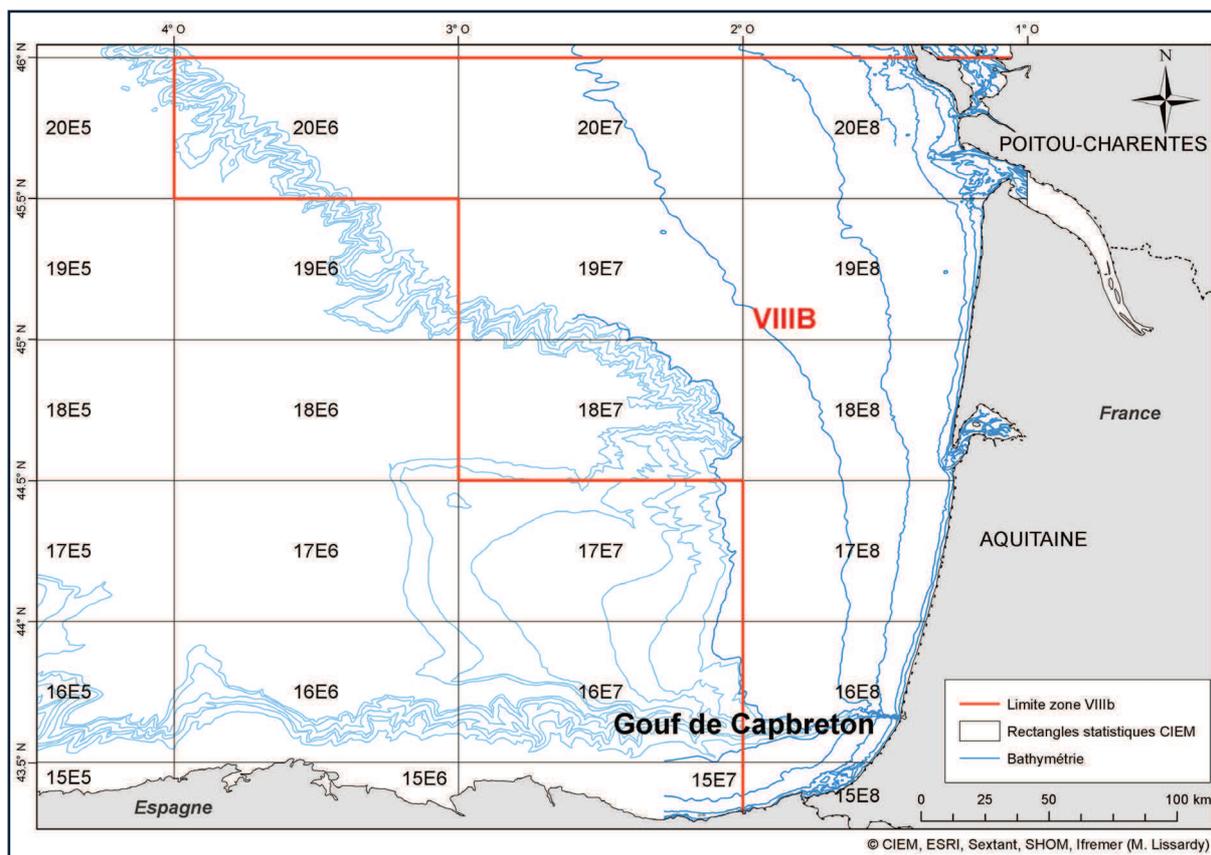


Figure 2 : Découpage de la zone CIEM VIIIb au large de l'Aquitaine.

En poids	Merlu commun (<i>Merluccius merluccius</i>), maquereau commun (<i>Scomber scombrus</i>), palourde japonaise (<i>Venerupis philippinarum</i>), sole commune (<i>Solea solea</i>), chinchards d'Europe (<i>Trachurus spp</i>), baudroies d'Europe, lamproie marine (<i>Petromyzon marinus</i>), bar commun (<i>Dicentrarchus labrax</i>), sardine commune (<i>Sardina pilchardus</i>), calmars (<i>Loliginidés</i> essentiellement) + algue rouge (<i>Gelidium comeum</i>)
En valeur	Sole commune, merlu commun, lamproie marine, palourde japonaise, bar commun, anguille européenne (<i>Anguilla anguilla</i>) au stade civelle essentiellement, baudroies d'Europe, crevettes (Palémonidés essentiellement), maigre commun (<i>Argyrosomus regius</i>), maquereau commun

Tableau 2 : Les 10 principales espèces (ou groupes d'espèces) capturées dans la zone CIEM VIIIb en poids et en valeur estimée (données 2009).

Les activités de pêche estuarienne (espèces amphihalines)

Parmi les espèces halieutiques qui peuvent être largement impactées par le changement climatique, figurent les espèces amphihalines dont une grande diversité est présente en Aquitaine. Elles ont une forte valeur patrimoniale et sont exploitées par des pêches commerciale et de loisir [4][5][6][7][8] : saumon atlantique (*Salmo salar*), truite de mer (*Salmo trutta*), grande alose (*Alosa alosa*), alose feinte (*Alosa fallax*), lamproie marine (*Petromyzon marinus*), lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*), anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Le bassin de la Gironde est le seul en France où l'on peut encore rencontrer à l'état sauvage l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*) que l'on trouvait également dans l'Adour jusqu'au milieu du XX^e siècle [9]. Trois espèces supplémentaires sont exploitées par la pêcherie et peuvent être considérées comme de « petits migrateurs amphihalins ». Il s'agit du flet (*Plathyctys flesus*), du mulot porc (*Liza ramada*) et de l'éperlan (*Osmerus eperlanus*). Cette dernière espèce a déjà subi de plein fouet les effets du réchauffement depuis les années 1950 [10] et a disparu de l'estuaire de la Gironde au cours des 15 dernières années. La plupart de ces espèces sont anadromes ; elles remontent les rivières pour se reproduire. L'anguille européenne, le flet et le mulot sont des espèces dites catadromes et migrent dans le milieu marin pour assurer leurs reproductions [11].

Ces espèces migratrices ont subi au cours de la seconde moitié du XX^e siècle une forte pression anthropique [12] avec une fragmentation importante de leurs habitats, une perte de milieux essentiels pour la reproduction (cas de la grande alose, des salmonidés migrateurs, de l'esturgeon), une diminution des surfaces d'accueil en partie basse des estuaires (cas de l'anguille, du flet et du mullet) ou en partie haute pour les salmonidés migrateurs (saumon et truite de mer).

Les effets de ces pertes de milieux ont été amplifiés par la contamination des cours d'eau (par les PCB, des contaminations polymétalliques notamment), par la dégradation de la qualité des estuaires à certaines saisons (hypoxie), par la chenalisation des cours inférieurs des bassins versants, par le ralentissement ou le blocage des migrations de montaison ou d'avalaison. Cela a provoqué une diminution très forte de l'abondance de ces espèces emblématiques et de leurs capacités de résilience [14][15][16]. Compte tenu des objectifs de Johannesburg en 2002 (convergence vers l'objectif du Rendement Maximal Durable pour 2015), la durabilité de la pêche ne peut être dissociée pour ces populations ichtyologiques de la régulation des autres usages qui impactent la productivité et la résilience des écosystèmes littoraux, estuariens et continentaux [17][18][19]. La surexploitation des populations halieutiques constitue un facteur aggravant aux possibilités d'adaptation de ces populations aux effets du changement climatique [20][21].

Du point de vue de l'activité halieutique et de l'état des stocks de poissons amphihalins, la situation actuelle est plus que préoccupante. Les salmonidés migrateurs remontent les bassins versants de la Gironde-Garonne-Dordogne et de l'Adour, mais leurs pêches professionnelles ou de loisirs ne sont permises que sur le bassin de l'Adour et des Gaves [22]. Les captures d'aloses ont fortement décliné sur le bassin de l'Adour et la pêche a été arrêtée sur celui de la Gironde en 2008 [22][23]. La pêche de l'anguille européenne est fortement contrainte par la mise en place d'une réglementation européenne et l'interdiction d'exportation des civelles sur le marché asiatique suite à une décision de la CITES⁵. Par voie de conséquence, la valeur de la pêcherie civellière s'est effondrée depuis 2005 passant, au niveau national, de 85 à 6 millions d'euros actuellement [24]. Les concentrations en PCB dans les tissus de l'anguille ont amené les autorités sanitaires à interdire la commercialisation de l'anguille dans certains secteurs de la Garonne et de l'Adour [25][26].

L'ostréiculture en Aquitaine

L'Aquitaine est également une région ostréicole avec comme principale zone de production, le bassin d'Arcachon (732 ha de concessions en 2009) [27]. La production annuelle se situe autour de 8 000 t, ce qui représente environ 7 % de la production nationale. Les caractéristiques finales du produit sont dépendantes du travail de l'ostréiculteur (précocité du détroquage, fréquence de manipulation des poches, tris) et des conditions environnementales (températures, floraisons phytoplanctoniques, matière particulaire en suspension, stocks d'huîtres...). À plus petite échelle, le lac d'Hossegor dispose aussi de quelques parcs ostréicoles.

Le bassin d'Arcachon intervient par ailleurs, avec le bassin de Marennes Oléron, de manière prépondérante au plan national dans l'approvisionnement en naissains d'huître creuse issus du captage naturel. Les facteurs environnementaux (en particulier la température) jouent un rôle prépondérant dans le bon déroulement de ce captage [28].

Depuis 2008, le bassin d'Arcachon et le lac d'Hossegor sont concernés par les épisodes de mortalités d'huîtres creuses qui touchent l'ensemble des bassins ostréicoles français et certains pays européens. Ils se manifestent par des mortalités massives (40 à 100 %) chez les jeunes individus et sont attribués à la combinaison de facteurs défavorables avec la présence d'agents infectieux. Le « microvariant » de l'herpès-virus OsHV-1 apparaît comme jouant un rôle prépondérant dans les épisodes rapportés.

5. CITES : Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction.

II- Les habitats essentiels de la zone CIEM « VIII B » pour les espèces exploitées

Les espèces exploitées ont des cycles de vie complexes (œuf, larve, juvénile, adulte) et ces différents stades ontogéniques⁶ peuvent requérir des habitats spécifiques. Alors que ces habitats et leur connectivité sont des éléments déterminants pour le bon déroulement du cycle de ces espèces ; ils peuvent être tous deux affectés par le changement climatique [29]. En faisant référence aux travaux du projet BEEST, les fonctions de ces habitats peuvent être distinguées en différentes zones : d'alimentation, de refuge, de nurricerie⁷, de transit ou de reproduction. Pour ces habitats essentiels (également appelés habitats clés), les notions d'existence, de disponibilité et d'accessibilité sont des critères d'intérêt sur le plan fonctionnel [30].

L'Aquitaine compte certains de ces habitats essentiels pour les principales espèces exploitées dans le VIII B (Figure 2) ; ces derniers sont présentés en fonction de leur localisation dans le Tableau 3.

	Estuaire Gironde	Estuaire Adour	Étangs	Bassin d'Arcachon	Côte/Plateau	Talus
Sole commune	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie	Nourricerie Reproduction	
Merlu européen					Alimentation des 3 ans et plus	Reproduction
Lamproie marine	Transit	Transit			Alimentation	
Palourde japonaise			Intégralité du cycle de vie	Intégralité du cycle de vie		
Bar commun	Nourricerie Refuge	Nourricerie Refuge	Nourricerie	Nourricerie Refuge	Reproduction	
Anguille européenne (stade civelle)	Transit Nourricerie	Transit Nourricerie	Nourricerie	Alimentation Nourricerie Transit	Transit	Transit
Baudroies d'Europe					Reproduction	Alimentation
Maigre commun	Reproduction Nourricerie				Nourricerie	
Maquereau commun					Reproduction	Reproduction
Huîtres				Intégralité du cycle de vie		

Tableau 3 : Habitats essentiels localisés en Aquitaine pour les espèces principales capturées dans le VIII B.

Les habitats côtiers et estuariens jouent, pour bon nombre d'espèces exploitées sur le plateau continental, un rôle déterminant car il s'agit de zone de reproduction et/ou de nurricerie. Dans certains cas, des espèces réalisent l'ensemble de leur cycle dans un seul et même habitat (cas des bivalves par exemple). Certaines espèces euryhalines peuvent pénétrer très loin à l'intérieur des estuaires dans des eaux de très faibles salinités [23][31]. L'importance relative de ces différents habitats pour chacune des espèces n'est pas présentée ici ; leur hiérarchisation tenant compte à la fois des surfaces maritimes concernées mais aussi de l'importance de la zone pour le bon déroulement du cycle biologique.

6. Relatif au développement de l'animal, de la fécondation de l'œuf à l'état adulte.

7. Zone dans laquelle les juvéniles d'une espèce se concentrent pour se nourrir.

III- Impact du changement climatique sur les poissons marins

Pour chaque espèce commerciale, sont pris en compte les impacts observés et attendus (nourricerie, reproduction). D'une manière générale, en ce qui concerne les espèces de poissons à pontes pélagiques (majorité des espèces exploitées) recensées dans la partie méridionale du golfe (une soixantaine de taxons), l'impact se fera vraisemblablement ressentir sur le maximum d'abondance des œufs (centré en février) et celui des larves (en juin). On assiste, depuis une dizaine d'années, à un étalement des pontes sur l'année entière avec une pérennisation du compartiment ichthyoplanctonique [32].

Sole commune

Mature entre 3 et 5 ans, la sole commune se reproduit dans le golfe de Gascogne sur des profondeurs comprises entre 60 et 80 m, de janvier à avril et à une température voisine de 8-9 °C [33]. Sur l'ensemble des zones de ponte de l'Atlantique Nord-Est, un décalage temporel est observé et ce, d'autant plus



© M.N. de Casamajor

que la latitude de la zone augmente. Un effet de la température a été observé dans le cas de la Mer du Nord avec une période de ponte avancée par rapport à la moyenne en cas d'année chaude [34]. Pour cette zone, les fluctuations de la température ne semblent pas influencer la croissance des individus les plus âgés ; les facteurs corrélés étant l'abondance de la population, l'eutrophisation et la pêche [35].

À la différence d'autres stocks européens de sole, et même d'autres espèces de poissons, le stock du golfe de Gascogne présente des variations du taux de recrutement⁸ limitées [36][37], avec dans le cas des travaux les plus récents, un coefficient de variation de 24 établi sur 13 campagnes scientifiques. L'explication avancée est la durée limitée des jeunes stades pélagiques (œufs et larves) qui sont, d'après Van der Veer *et al.* [38], considérés comme des facteurs prépondérants pour expliquer cette variabilité chez les poissons plats.

Cependant, les travaux de Le Pape *et al.* [37] ont montré que dans le golfe de Gascogne, le débit des rivières peut être un facteur positif influant fortement sur l'abondance des jeunes soles pour certaines nourriceries estuariennes (démonstré dans le cas de la Vilaine). Pour l'Aquitaine, alors que pour la période hivernale, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'évolution des débits des rivières, la diminution attendue des débits aux cours des périodes d'étiages pourrait avoir un impact négatif sur les zones de nourriceries (estuaires de la Gironde et de l'Adour). Ces effets à l'échelle régionale seront à replacer par rapport aux effets des modifications hydriques sur les autres zones de nourriceries de ce stock. Pour l'instant, et à l'échelle du golfe de Gascogne, il n'a pas été mis en évidence de relations entre les débits des rivières et le recrutement [39].

Concernant l'effet de la température sur le recrutement, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de connaissance potentiellement transférable à l'Aquitaine puisque des effets divergents ont été observés : un effet négatif dans le cas de la Mer du Nord ; un effet positif dans le cas du Canal de Bristol [40][41]. Pour des espèces de poissons plats présentant une large répartition autour du golfe de Gascogne, des travaux récents ont mis en évidence des corrélations entre les abondances de ces espèces et l'augmentation de la température [42]. Pour les espèces boréales, l'abondance décroît dans le golfe alors que pour les espèces méridionales elle augmente. Le recrutement apparaît comme le principal processus impacté. Dans le

8. Le nombre de jeunes entrant dans le stock chaque année.

golfe de Gascogne, la sole commune se situe au centre de son aire de répartition (latitude moyenne 44,5°N) ; les travaux effectués n'ont pas permis de dégager une tendance nette concernant l'évolution de cette répartition. Un effet de la température a par ailleurs été mis en évidence, pour la Mer du Nord, avec une augmentation de la longueur de la sole commune à la fin de la première année de son cycle, liée à l'augmentation de la température [34].

Bar commun

Le bar commun fréquente les zones d'estuaires, le bassin d'Arcachon et les étangs au stade juvénile essentiellement. Adulte, il peut également fréquenter ces zones, mais de manière plus sporadique. Cette espèce est caractérisée par un comportement



grégaire surtout dans sa phase juvénile, il est capable de supporter d'importantes variations de salinité et de température (2 °C à 32 °C). Sa croissance au stade juvénile (mais également au stade adulte) est cependant marquée par une forte saisonnalité liée à la température (pas d'alimentation en dessous de 7 °C et/ou migration au large et en profondeur). Sur les zones de nourricerie, les jeunes s'alimentent essentiellement de crustacés [43] avec un comportement décrit comme généraliste et opportuniste. Les travaux de Lafaille *et al.* [44] ont, par ailleurs, mis en évidence le rôle fondamental des productions primaires et secondaires des zones de marais salants sur l'alimentation des jeunes individus.

Le fonctionnement des zones de nourriceries dépend fortement de leur localisation géographique [45]. Par comparaison avec des écosystèmes plus septentrionaux, il semble que les nourriceries méridionales de juvéniles de bar commun soient fréquentées plus longtemps (au-delà de la fin d'été), permettant ainsi d'augmenter la période de croissance. Une évolution dans ce sens pourrait être observée pour l'Aquitaine.

Maigre commun

Le maigre est un poisson semi-pélagique côtier dont les adultes, après s'être regroupés dans les eaux côtières basques ou landaises en avril [46], remontent vers le nord pour se reproduire dans l'estuaire de la Gironde de mi-mai à juillet⁹. Il est aussi présent dans l'estuaire pour se nourrir au stade juvénile d'avril-mai à novembre-décembre. Lorsque les eaux se refroidissent, les juvéniles quittent l'estuaire. Ils se répartissent, principalement sur des profondeurs comprises entre 20 et 40 m des pertuis Charentais au bassin d'Arcachon, ne revenant pour certains dans l'estuaire que lorsque la température augmente. En dehors des périodes de ponte, la distribution des adultes s'étend principalement de la Vendée au Pays Basque [46][47]. En Aquitaine, une zone d'hivernage des adultes est signalée au sud, dans la zone d'influence du panache de l'Adour [47].

La température de l'eau serait ainsi le facteur déterminant des migrations trophiques et de la reproduction [46]. Concernant le succès de la reproduction, des travaux récents n'ont pas confirmé l'hypothèse de valeurs seuil [48] chez cette espèce eurytherme¹⁰ qui supporte par ailleurs des variations importantes de salinité (euryhaline). La température est également importante pour la croissance avec une température optimale se situant entre 17 et 21 °C ([49] cité par [50]). En dessous de 13-15 °C, l'alimentation est considérablement ralentie. Pour les larves, une température supérieure à 20-21 °C est requise pour leur alimentation [48].

9. Pour la Gironde, la zone de frayère se situerait à partir des observations des pêcheurs entre Meschers et Mortagne-sur-Gironde dans la moitié droite de l'estuaire à proximité du banc des Marguerites [48].

10. Organismes capables de supporter sans dommage notable d'importantes et rapides modifications de la température du milieu extérieur.

Peu d'informations sont disponibles dans la littérature à propos d'un impact possible du changement climatique sur cette espèce. Le maigre fait partie des espèces méridionales pour lesquelles une augmentation de l'abondance a été décrite pour l'estuaire du Tage [51].

Maquereau commun et autres petits pélagiques

Le maquereau commun présent au large des côtes d'Aquitaine appartient au stock de maquereau de l'Atlantique Nord-Est. Le frai se déroule entre fin février et juin, sur le plateau continental (jusqu'à environ 120 m de profondeur) et à une température de 12-13 °C. Les pontes sont fractionnées, tout au long de la période de reproduction, ce qui est interprété comme une adaptation aux facteurs environnementaux changeant. De manière générale, chez les espèces pélagiques, la disponibilité en nourriture et les contraintes physiques comme la turbulence sont considérées comme prépondérantes pour la survie des larves et le recrutement [52][53].

Pour la population de la Mer du Nord, deux phénomènes ont été observés : un déplacement vers le nord des zones de pontes et d'alimentation, une précocité de la ponte et une augmentation de la variabilité du recrutement par rapport aux années antérieures [54]. Un effet de la température sur la distribution de cette population a été avancé. Jansen and Gislason [55] ont confirmé cette hypothèse. Ces résultats suggèrent qu'une augmentation de la température devrait affecter la période et l'importance de la croissance, du recrutement et de la migration pour cette population de la Mer du Nord. Pour la partie de la population de la Mer Celtique qui fréquente le nord des côtes espagnoles, pendant le frai, des effets négatifs de périodes de vents forts et des phénomènes d'advection sur la survie des larves ont été observés [56].

Pour le sud du golfe de Gascogne, Hémerly *et al.* [57] ont mis en évidence une corrélation entre un descripteur d'abondance de maquereaux (*Scomber scombrus* et *Scomber japonicus*) issu de données de capture par la pêche (antérieures à 2000) et la variabilité climatique observée dans le sud-est du golfe synthétisé par l'index climatique multivarié SBC (Southern Biscay Climate index). Cette corrélation s'accompagne d'une tendance à la hausse du descripteur d'abondance.

Au côté du maquereau, l'anchois commun (*Engraulis encrasicolus*) est une autre espèce de petit pélagique qui est présent sur le plateau continental aquitain (jusqu'à - 150 m) et dans la zone côtière (au printemps). La pêche a été interrompue entre juillet 2005 et mars 2010 en raison de l'état préoccupant du stock ; ceci alors qu'elle représentait une part très importante du chiffre d'affaires des chalutiers pélagiques et des bolincheurs aquitains. De nombreux travaux ont montré la sensibilité de cette population aux variations climatiques, subissant les effets du pattern de l'Atlantique Est [58], de l'upwelling (*ibid.*), de la turbulence [59][60], du débit des fleuves [61] et du transport d'Ekman [62]. Pour cette espèce, les travaux d'Hémerly *et al.* [57], Castège *et al.* [63] et Castège et Hémerly [64] n'ont pas mis en évidence de corrélation du descripteur d'abondance avec l'index climatique SBC.

Baudroies d'Europe

Deux espèces sont exploitées par les pêcheurs professionnels aquitains : la baudroie blanche ou commune (*Lophius piscatorius*) et la baudroie noire ou rousse (*Lophius budegassa*). Chez la baudroie commune, les jeunes effectueraient des migrations depuis les accores vers le littoral entre le printemps et l'hiver (- 200 m à - 70 m) alors que chez la baudroie rousse, les déplacements seraient plus limités (- 200 m à - 110 m). La plupart des grands individus vivent entre - 600 et - 900 m. Plusieurs périodes de pontes ont été décrites pour la baudroie commune dans le golfe de Gascogne : mai-juin et novembre-décembre sur des fonds de - 160 m à - 200 m. Espèces à comportement bathydémersal (après une phase larvaire pélagique d'une centaine de jours), le régime alimentaire des adultes est essentiellement composé de poissons (tacauds, chinchards, fausses limandes, soles-perdrix...) voire de céphalopodes et de crustacés.

En raison des connaissances limitées sur la biologie de ces espèces, il n'est actuellement pas possible de présenter des effets constatés ou attendus du changement climatique sur ces dernières. Peu de travaux existent à l'image de ceux menés sur la baudroie commune en Mer du Nord qui décrivent un déplacement de la distribution vers le Nord concomitante (mais non significative) d'une augmentation de la température hivernale [65]. Pour cette même espèce, et pour le plateau Celtique, une septentrionalisation de l'aire de répartition avait auparavant été posée en hypothèse par Gaertner [66].

Merlu commun

Le merlu commun, poisson démersal, effectue des migrations entre la côte et le large qui sont fonction de l'âge et de la saison. Les deux premières années, les juvéniles sont rassemblés sur les vasières. Pour le stock Nord (qui concerne le merlu présent au large de nos côtes), les plus importantes zones de nourriceries sont situées dans le golfe de Gascogne : Grande Vasière depuis Penmarc'h jusqu'au plateau de Rochebonne (- 80 à -120 m), vasière de la Gironde et, plus secondairement, vasière au large des Landes [8]. Au printemps de la troisième année, ils migrent vers la côte pour ensuite se disperser sur tout le plateau continental à l'automne [67]. Les individus les plus âgés recherchent des profondeurs plus importantes et se déplacent vers le nord après le printemps. Les zones de canyons et de fonds rocheux au niveau du talus continental constituent des zones de concentration d'adultes [68]. Pour l'Aquitaine, des captures importantes sont réalisées à la palangre sur la zone du gouf de Capbreton [69].

Pour l'Atlantique Nord-Est, la température apparaît comme un facteur prépondérant dans la détermination de la saison de ponte ; Alvarez *et al.* [70] rappelant que pour le golfe de Gascogne l'occurrence d'œufs est associée à des eaux de surface de température comprise entre 10 et 12,5 °C. Les travaux de Fernandes *et al.* [71] ont mis en évidence l'influence de la turbulence et de la température sur la phase de recrutement de cette espèce. La distribution et la taille des zones de concentration des recrues semblent influencées par la production primaire [68].

À l'échelle du golfe de Gascogne et à partir de campagnes de chalutages de fond, les travaux de Persohn *et al.* [72] ne mettent pas en évidence de relation entre les variations de la distribution de juvéniles de merlu et les températures de fond enregistrées pendant les campagnes. À partir d'autres données (captures des professionnels) et pour la zone sud du golfe, les travaux d'Hémery *et al.* [57] et Castège et Hémery [64] indiquent une corrélation du descripteur d'abondance de merlu avec l'index climatique SBC. Pour la période considérée, cette relation s'accompagne d'une diminution des débarquements chez le merlu.

Thon rouge et thon blanc

Le thon rouge, grand poisson pélagique, effectue une migration annuelle durant les mois d'été dans le golfe de Gascogne. Il y est présent, et traditionnellement exploité par la pêche à l'appât vivant, à proximité du talus continental. Il est par ailleurs exploité par les chalutiers pélagiques français. L'anchois juvénile constitue une proie essentielle pour les jeunes thons rouges dans le golfe de Gascogne, cette proie représentant plus de 95 % de leur alimentation d'août à l'automne [73]. Après une phase larvaire au niveau du plateau continental, les anchois juvéniles sont habituellement présents à partir d'août au-delà du plateau, où ils font l'objet de la prédation par les thons rouges. Les fluctuations d'abondance de l'anchois peuvent donc impacter la constitution de réserves d'énergie et la croissance des jeunes thons, comme cela a pu être observé pour les individus de 1 an – au fort taux de croissance – lors d'années de faible recrutement de l'anchois [74]. La variabilité climatique, si elle n'a pas d'effet direct mesuré, à l'heure actuelle, sur le thon rouge présent dans le golfe de Gascogne, peut donc avoir un effet indirect, par le biais des variations de l'abondance et de la distribution spatiale de l'anchois.

Si le golfe de Gascogne constitue une aire d'alimentation estivale bien connue pour cette espèce, il est également une zone d'hivernage, partiel ou total, pour une partie des immatures, comme l'ont montré des travaux récents menés par marquage électronique [75].

Parmi les poissons migrateurs présents dans le golfe de Gascogne en période estivale, le germon (thon blanc) subit quant à lui l'influence de la NAO sur son recrutement [76]. Cette influence serait d'ailleurs une des causes du déclin des captures de germans depuis les années 1960 [77][78], l'ordre de grandeur des niveaux observés depuis la fin des années 1980 étant inférieur de moitié à celui des années 1960. Outre une influence sur le recrutement, la NAO pourrait induire dans le golfe de Gascogne des anomalies thermiques pouvant affecter la capturabilité des germans [77]. En termes d'habitat vertical, l'effet de l'ensoleillement et de l'agitation de la mer dans le golfe de Gascogne a été mis en évidence pour certaines classes d'âge [79]. La variabilité du climat influence également la précocité des migrations saisonnières du germon et du thon rouge vers le golfe de Gascogne [80], de même que la latitude moyenne de la distribution estivale du germon (*ibid.*). Les causes de la récente raréfaction du germon dans ses zones de pêche traditionnelles du golfe de Gascogne ne sont pas encore démontrées, mais la question de l'effet de facteurs océano-climatiques sur la longitude de sa distribution peut être posée.

IV- Impact du changement climatique sur les migrateurs amphihalins

De manière globale, il est prévu, sous l'effet du changement climatique, la contraction de l'aire de répartition de 14 espèces de migrateurs amphihalins européens sur les 22 répertoriées à l'horizon 2100 [81]. Les évolutions projetées sont différentes selon les espèces : 1) *Alosa fallax* devrait s'étendre au Nord et à l'Est de son aire de répartition telle qu'observée en 1900 ; 2) *Anguilla anguilla* devrait voir son abondance augmentée en Méditerranée autour de la mer Noire et en mer Égée ainsi qu'en Scandinavie ; 3) *Petromyzon marinus* devrait être assez sensible au changement climatique avec une diminution modérée à forte de son abondance dans le golfe de Gascogne ; 4) *Salmo salar* ne devrait plus coloniser certains bassins du sud de la France ; 5) *Alosa alosa* devrait subir une forte diminution de son abondance dans le sud de son aire de répartition incluant le Maroc, le Portugal, l'Espagne et la France. L'étude mentionnée [81] met en avant l'importance d'une échelle d'analyse plus locale afin d'intégrer les effets des pressions anthropiques sur l'évolution de ces populations sous pression climatique.

Si l'on excepte l'éperlan [10], peu de travaux ont été faits sur les autres espèces amphihalines pour ce qui concerne l'impact du changement climatique sur leur survie et leur comportement dans les eaux marines. Cependant on peut supposer que des clupéidés comme la grande alose ou l'alose feinte seront, aux stades jeunes, fortement impactés par les changements phénologiques de différents groupes fonctionnels planctoniques, avec des risques de désynchronisation des interactions biologiques [2]. De même, l'anguille véhiculée au stade leptocéphale par le Gulf Stream et la dérive Nord-Atlantique risque d'être affectée par une modification de la circulation thermo-haline [14].

Comme précédemment, pour chaque espèce commerciale, sont présentés un descriptif succinct ainsi que les impacts observés et attendus.

Saumon atlantique

Cette espèce anadrome (*Salmo salar*), se reproduit au cours de l'hiver (décembre-janvier), avec une phase de croissance en eau douce de 1 à 2 années, une phase de croissance marine de 1 ou 3 années (rarement 4). C'est une espèce territoriale dont la survie des œufs et des larves est liée à la perméabilité des zones de gravière. L'accessibilité aux zones les plus hautes (et de meilleures qualités) est fonction de la libre circulation des géniteurs (obstacles équipés de passes alimentées en eau). En estuaire, des bouchons thermiques peuvent différer les remontées de certaines catégories de saumons remontant pendant la période estivale surtout si ceux-ci sont associés à des eaux chargées en matières organiques.

Les effets des variations des températures marine et continentale ou des débits sur la croissance, l'âge de première maturité des populations de saumon atlantique dans l'Atlantique Nord-Est et en mers du

Nord et de Norvège sont bien documentés [82][83][84][85][86]. Par extension, l'influence du changement climatique sur ces deux variables est analysée sur des séries longues depuis au moins 3 ou 4 décennies.

Une augmentation de la température marine coïncide avec une meilleure croissance des post-smolts aboutissant à une augmentation de la proportion de saumons revenant après seulement 1 hiver de séjour en mer [85]. Cette augmentation de la température est reliée à la NAO (North Atlantic Oscillation). Ces variations climatiques coïncident également avec des variations de l'abondance du plancton : une augmentation de la NAO en hiver est liée à une élévation de la température en surface, un accroissement de la fréquence des fortes tempêtes et une déstructuration de la colonne d'eau qui impliquent une diminution de l'abondance des proies planctoniques et de leurs disponibilités pour les prédateurs comme les post-smolts de saumons [83]. Ces interactions entre effets climatiques et caractéristiques des stocks de saumons ne sont pas si simples ni linéaires [87] et mettent en jeu d'autres variables telles que les caractéristiques de la rivière de production des juvéniles (longueur et débit) et du positionnement en latitude du bassin-versant [88].

En France, les principaux stocks de saumon atlantique ont été décrits avec précision et la variabilité des structures en âge, taille et sex-ratio des populations ont été précisées [89][90][91][92][93][94]. Une relation entre la structure en âge et la taille des géniteurs a été observée, confortant en cela l'hypothèse d'Elson et Schaffer [95] reliant l'abondance des saumons de plusieurs hivers de mer à l'éloignement des zones de frayères et donc à la taille de la rivière [94]. L'évolution des populations du bassin des Gaves au cours du XX^e siècle, parallèlement à l'édification de barrages interdisant la reproduction sur les cours supérieurs de ce bassin, s'est caractérisée par une diminution des saumons ayant séjourné plusieurs hivers en mer [96]. L'influence de la température sur la croissance des juvéniles et leur âge de moltification a été également mise en évidence [89]. Des travaux récents effectués en Bretagne montrent des effets conjugués de la température de l'eau et des densités de salmonidés migrateurs sur les croissances des juvéniles de saumons et signalent l'effet prépondérant sur la croissance des variations de densités plutôt que celles de la température liées à un changement climatique [97]. Ils notent également l'accroissement des *grilses* (saumons d'un hiver de mer) lié à l'augmentation du réchauffement climatique (augmentation de la vitesse de croissance en eau douce entraînant une maturation précoce des saumons en mer). Des études sur les populations de saumon atlantique en limite sud de leurs aires de répartition (Cantabrique et Pays Basque) montrent des effets du changement climatique sur l'accroissement du taux de divagation des saumons avec un mélange de populations entre rivières proches et un taux de maturation précoce chez les *parr* mâles [98].

Le calendrier des périodes à forte probabilité d'hypoxies et d'anoxies en Gironde tel qu'actuellement observé [99] peut perturber physiologiquement la montée des grands migrateurs non seulement le saumon, mais également la truite de mer. L'augmentation de la température, l'intrusion saline liée à la montée du niveau de la mer, la diminution des débits printaniers et estivaux devraient accroître à la fois la longueur de cette période critique et les fréquences d'apparition d'épisodes hypoxiques et anoxiques qui influent sur la physiologie de ces espèces et leurs comportements de migration.

Sur l'Adour inférieur, estuaire sans bouchon vaseux, le niveau des températures déjà observé en été (juillet à septembre) est situé entre 20 et 25 °C en moyenne. Des migrations de saumons ont été observées dans l'estuaire de l'Adour à des températures supérieures à 20 °C, mais les remontées de saumons cessent généralement en août, mois où les températures journalières approchent les 25 °C [100]. L'accroissement de la température dans l'estuaire au moment de la remontée des saumons d'un hiver de mer en début d'été pourrait ralentir leur pénétration et prolonger leur temps de résidence en zone littorale et côtière basco-landaise où ils peuvent être capturés par les filets côtiers [101].

Sur la Garonne, l'augmentation des températures, la diminution des débits pourraient affecter la vitesse de remontée des saumons. Signalons que, de plus en plus ces dernières années, des autorisations

exceptionnelles de rejets d'eau de refroidissement des centrales nucléaires sont données pour permettre le relâcher d'eau à des températures supérieures à 28 °C : 14 jours à Golfech en 2003 et 19 jours en 2006 [102]. Les frayères naturelles sont situées au-delà de Toulouse dans les parties supérieures de la Garonne, mais la ponte pourrait être affectée par le réchauffement climatique. Cela pourrait modifier la durée de la fenêtre de ponte qui se situe dans une période où les températures de l'eau sont comprises entre 3 et 12 °C sous nos latitudes. Notons qu'au cours de ces 20 dernières années, la probabilité d'avoir des températures supérieures à 11,5 °C durant la période de reproduction de l'espèce est passée de 4 à 11 %. En outre, les maxima journaliers égaux ou supérieurs à cette limite haute créant un stress physiologique inhibiteur affectent 60 % des jours de la période de reproduction [103].

Sur le bassin des Gaves, les risques pour la reproduction de l'espèce sont moindres compte tenu des cours d'eau aux débits spécifiques plus soutenus [104] et à des régimes alimentés en partie par des eaux de fonte de neige (régime nival). Cela nécessite, cependant, le maintien de la libre circulation des migrateurs vers les cours supérieurs des Gaves et le respect des DOE (Débits Objectifs d'Étiages permettant d'assurer le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques) pour l'alimentation suffisante des passes à grands migrateurs sur les cours inférieurs et moyens des Gaves afin que le maximum de reproduction puisse se faire sur les frayères des cours supérieurs pour limiter l'effet du réchauffement climatique [105].

Pour les espèces anadromes comme les salmonidés migrateurs et les aloses (cf. ci-après), une des phases critiques de leurs cycles de vie est constituée par le changement de milieu et les premiers mois de vie marine [82].

Des modifications concomitantes entre les anomalies de températures de l'hémisphère Nord et les changements de dominance du phytoplancton, zooplancton et de certaines espèces de poissons (dont le saumon) à l'échelle de l'Océan Atlantique Nord-Est, ont été montrées. Une diminution des prises de saumons autour des îles britanniques est ainsi notée parallèlement à l'accroissement des températures et de la diminution du copépode subarctique : *Calanus finmarchicus* [106]. La raréfaction de ce copépode correspond à une migration rapide vers le Nord du zooplancton entre les latitudes correspondant au sud du golfe de Gascogne et à l'Islande [107].

Cette diminution du plancton reliée à l'accroissement de la NAO est également associée à une survie moindre des jeunes saumons atlantiques issus des rivières irlandaises [83]. La relation entre l'importance de l'espèce *Calanus finmarchicus* et la survie des saumons serait indirecte car ces copépodes sont retrouvés en faible proportion dans le bol alimentaire des saumons au stade post-smolts [108].

Ceci met en lumière, la complexité des mécanismes que le changement climatique induit au niveau océanique avec des effets de contrôle du type bottom-up¹¹ [109] et sans relation simple entre la fluctuation de la NAO et l'abondance des stocks de saumon atlantique [87].

Aloses (grande alose, alose feinte)

Deux espèces sont exploitées (grande alose, *Alosa alosa*, et alose feinte, *Alosa fallax*), avec une migration génésique¹² qui se fait entre les mois de mars et de juin, périodes où elles sont capturées en estuaire. La reproduction de l'alose feinte a lieu dans des zones situées plus en aval que celles choisies par la grande alose. Elle est plus précoce : début mai pour l'alose feinte jusqu'à juillet et début juin pour la grande alose. L'âge des reproducteurs varie principalement entre 4 et 7 ans pour la grande alose et 3 et 8 ans pour l'alose feinte. Les juvéniles naissent en plein été et restent en estuaire 5 à 7 mois environ, ou y transitent (grande alose) avec une migration principale à l'automne pour les deux espèces. La phase de croissance est plutôt côtière, mais l'alose feinte semble faire des allers et retours entre les zones estuariennes et littorales.

11. Selon un principe ascendant.

12. Migration de retour vers les zones de reproduction.

Comme pour tous les clupéidés, la survie des jeunes est dépendante de facteurs environnementaux qui jouent sur la phénologie des communautés planctoniques. La production de grande alose est liée à la disponibilité de frayères fonctionnelles qui ont été sur la Garonne comme sur l'Adour fortement perturbées ou détruites par l'extraction de granulats dans les lits des rivières.

Pour la grande alose et l'alose feinte, on note pour la Gironde, les mêmes perspectives de blocage des migrations des géniteurs en zone estuarienne [110] au moins pendant la période estivale compte tenu des conditions d'hypoxies et d'anoxies actuellement constatées ou prévisibles. La dévalaison des juvéniles des deux espèces pourrait être perturbée voire différée compte tenu de conditions encore très critiques en oxygénation que l'on peut rencontrer au mois d'août et en début d'automne. Cette période correspond au séjour estuarien des juvéniles d'alose feinte avant leur migration marine et au transit estuarien des juvéniles de grande alose vers la mer [111].

Pour le bassin de l'Adour, les phases de migration génésique et de dévalaison des juvéniles ne devraient pas être trop affectées (pas de bouchon vaseux ni de déficit d'oxygénation répertoriés actuellement). Leur présence est détectée dans le bas estuaire, près de l'embouchure, dès le mois de juillet pour l'alose feinte et de novembre à décembre pour la grande alose dans l'estuaire maritime [112], zones où les températures devraient rester compatibles à la survie de ces populations, même après élévation thermique.

La reproduction de ces espèces se fait dans les cours moyens des bassins versants de la Dordogne [113], de la Garonne [114] ou de l'Adour et des Gaves [115], l'alose feinte frayant sur des zones plus en aval comme c'est le cas sur la Dordogne ou la Garonne [116].

Le croisement des informations concernant l'évolution des débits, des températures et des prélèvements en eau particulièrement sur les corridors de la Garonne et de l'Adour, déjà caractérisés par des situations très critiques en matière de respect des DOE [117], laisse augurer non pour la reproduction (des *bulls* de grande alose ont été observés à des températures de 25 °C [115]), mais pour la survie des alevins des deux espèces, des conditions probablement préjudiciables à leur maintien. La situation ne devrait pas être aussi délicate sur le bassin des Gaves pour la grande alose avec des températures qui n'excèdent pas en août les 25 °C [115] et des débits plus soutenus.

Les juvéniles d'aloses, au moment de leur migration marine, sont très probablement dépendants de la structure de la chaîne trophique et de l'abondance et de la taille des proies. Les modifications induites par le changement climatique au niveau des productions primaire et secondaire provoquent des phénomènes de décalage (« mismatch ») [118] entre les pics de production des différents niveaux du réseau trophique. C'est une des causes de la variabilité du recrutement d'espèces comme la morue [119], mais aussi de clupéidés du golfe de Gascogne comme l'anchois [120]. Il est probable que les juvéniles d'aloses soient, comme tous clupéidés au stade jeune, fortement dépendants de la quantité et de la qualité des premiers maillons de la chaîne et très sensibles aux changements phénologiques [121].

Anguille européenne

La reproduction de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), se fait en mer des Sargasses en hiver. Les larves dites leptocéphales sont véhiculées par la circulation océanique *au prorata* des volumes circulants, son activité natatoire étant limitée. La vitesse de migration est de ce fait liée à la vitesse de la circulation thermo-haline dans l'Atlantique Nord. La dispersion des larves au moment de leur métamorphose en civelle à proximité du plateau continental est mal connue, mais il est probable que compte tenu des périodes principales de migration dans les estuaires, l'arrivée des leptocéphales au nord et au sud du golfe de Gascogne se fasse selon deux branches différentes de la dérive Nord-Atlantique. La durée de migration des leptocéphales est comprise entre 1 et 3 ans selon les auteurs et les sites

d'arrivée. La pénétration des civelles dans les estuaires se fait principalement entre le mois de novembre et le mois d'avril. Ce stade de pénétration lié aux conditions hydroclimatiques est suivi d'une phase de sédentarisation en partie basse des estuaires, puis de colonisation des bassins versants pendant laquelle l'anguille dite « jaune » va grossir durant 5 à 10 années environ sous nos latitudes. L'anguille jaune se transforme en anguille argentée et migre en automne, vers la mer, pour se reproduire.

Les eaux estuariennes et continentales constituent des zones de grossissement. La diminution des débits durant les périodes printanières et automnales dans les zones hydrologiques soumises à de forts prélèvements en eau et caractérisées par de nombreux obstacles plus ou moins franchissables, devrait aboutir à un ralentissement de la vitesse de diffusion des juvéniles vers les zones encore accessibles à cette espèce. Soulignons que les zones situées en amont des grands bassins versants produisent surtout des anguilles de grande taille qui sont en majorité des femelles [14].

De manière plus globale, c'est une espèce qui devrait être moins affectée par l'élévation de température [81], sous réserve de ne pas se trouver dans des tronçons hydrologiques déjà caractérisés par des épisodes longs d'hypoxies et d'anoxies : cas de l'estuaire de la Gironde par exemple [99].

Concernant la phase océanique, le changement climatique en affectant la circulation thermo-haline dans l'Atlantique Nord pourrait ainsi réduire de 30 % l'intensité du flux transocéanique [121] et allonger la durée de migration des larves leptocéphales, provoquant un accroissement de leur mortalité lorsqu'elles rejoignent leurs bassins de colonisation allant de la Mauritanie à la Baltique. La diminution de la disponibilité trophique pourrait être également une cause de mortalité pendant la migration transocéanique.

La montée du niveau de la mer telle qu'annoncée par l'IPCC se situerait en 2100 « entre 15 cm et 80 cm au-dessus de l'actuel » selon les scénarios du SRES (Special Reports on Emissions Scenarios), la valeur la plus probable étant de 44 cm [122]. L'augmentation du niveau de la mer devrait permettre d'accroître les surfaces des zones humides estuariennes dans la Gironde, mais l'intrusion marine risque fortement de déplacer le bouchon vaseux vers l'amont avec une augmentation de la consommation en oxygène, une solubilité moindre de l'oxygène liée à l'accroissement de température et une dilution plus faible des pollutions provenant des agglomérations par réduction des débits des bassins versants [123]. Cette conjonction de facteurs devrait rendre la productivité de cet écosystème estuarien moins favorable à la production d'anguille, même si celle-ci est assez résistante aux fortes températures et désoxygénations temporaires.

Lamproie marine

Sa reproduction a lieu dans les eaux douces en fin de printemps et en début d'été sur des gravières qui sont comparables à celles utilisées par les salmonidés migrateurs, mais situées plus à l'aval des bassins versants. Le cycle comprend une phase larvaire longue : larve ammocète qui est microphage et fichée dans la vase durant une période estimée, selon les zones de colonisation, entre 4 et 8 ans. Cette larve se transforme en lamproie qui gagne la mer, vers la fin de l'été, à une taille de 20 cm environ. La lamproie marine est un ectoparasite qui se fixe sur la paroi de grands vertébrés et reste en mer environ 2 années, puis revient pondre en eau douce. Aucun phénomène de homing (retour) n'est observé comme pour les salmonidés migrateurs ou les aloses.

V- Impact du changement climatique sur les bivalves et algues exploités

Palourde japonaise

Espèce introduite dans le bassin d'Arcachon à des fins de vénériculture dans les années 1980, la palourde japonaise s'est répandue dans le bassin où elle réalise désormais de manière naturelle l'ensemble de son cycle biologique et fait l'objet d'une exploitation par la pêche professionnelle et la pêche de loisir. Chez cette espèce, les facteurs environnementaux sont connus pour influencer fortement le déroulement des différentes phases ontogéniques. La température joue, en particulier, un rôle important notamment sur la ponte (température minimale 14 °C-[124]), le développement larvaire et le recrutement, la croissance (pas de croissance en dessous de 6 °C, croissance optimale estimée entre 12 et 20 °C sous nos latitudes-[125]). L'influence d'autres facteurs a également été mise en évidence par différents auteurs dans le monde, comme les ressources trophiques, la nature du sédiment, l'oxygène, la salinité, les courants...



Concernant l'acidification des eaux, ce phénomène pourrait avoir des effets néfastes sur des organismes aquatiques, dont les organismes marins calcifiés [126] avec des conséquences sévères pour certaines espèces benthiques (coraux) ou planctoniques [127][128]. Cependant, des travaux menés récemment sur la palourde européenne (*Venerupis decussata*) n'ont pas mis en évidence de différence de croissance larvaire en réponse à des environnements aux pH réduits [129].

Pour le bassin d'Arcachon, des travaux récents [130] montrent que les deux principaux facteurs environnementaux corrélés aux variations d'état du stock sont la température, notamment au moment de la reproduction et les ressources trophiques (avec des relations différant entre les jeunes stades et les individus plus âgés).

Un partenariat entre les régions frontalières d'Aquitaine et d'Euskadi a permis d'adapter localement un modèle de simulation sur la dynamique de ce stock à des fins de gestion [131][132]. Les processus modélisés ont été calibrés à partir d'expérimentations réalisées sur le bassin et le facteur température a été spécifiquement pris en compte pour son effet sur le déclenchement de la période de ponte. Des simulations d'augmentations de température concomitantes ou non à des modifications de pratiques de pêche ont été considérées dans le cadre d'un travail préliminaire [31]. La tendance prédite est marquée par une dégradation de l'état du stock ; elle s'explique par une période de ponte raccourcie sous l'effet de l'augmentation de température. Les ressources trophiques constituent un second facteur d'importance pour la dynamique de ce stock ; il a été récemment intégré au modèle pour son effet sur la phase de reproduction et de ponte. Ces travaux sont en cours actuellement et les résultats à venir devraient préciser ces observations.

Huître creuse japonaise

L'espèce *Crassostrea gigas* a été introduite dans le bassin d'Arcachon au début des années 1970 en remplacement de l'huître creuse portugaise *Crassostrea angulata*, décimée par une épizootie (elle-même introduite pour pallier une épizootie de l'espèce locale, l'huître plate). Ses caractéristiques physiologiques, légèrement différentes de celles de l'huître portugaise, se sont avérées mieux adaptées au site, avec un cycle de développement plus rapide conduisant à une forte augmentation de la production par entreprise. Par ailleurs, cette espèce semblait avoir trouvé dans le bassin d'Arcachon les conditions optimales à sa reproduction. Si l'on fait abstraction des années 1977 à 1982 (perturbations liées au TBT), le captage était d'un niveau élevé et s'effectuait précocement dans l'été.

Comme pour la palourde, les facteurs environnementaux sont connus pour influencer fortement le déroulement des différentes phases ontogéniques. La température joue un rôle déterminant sur la ponte (température minimale 19 °C) et la survie larvaire (d'autant plus importante que la température de l'eau est élevée) [28]. Un suivi de la reproduction de l'huître japonaise dans le bassin d'Arcachon est mené (par l'ISTPM puis l'Ifremer) depuis son introduction. Les résultats obtenus montrent, depuis une dizaine d'années, une augmentation de la variabilité du succès de la reproduction, des années de déficit important du captage alternant avec des années de recrutement pléthorique [133]. Cette variabilité est notamment expliquée par des causes thermiques (étés très froids ou très chauds), conditionnant la survie larvaire [28]. Par ailleurs, la diminution de l'intensité des pontes observée depuis 2008 pourrait être expliquée, entre autres, par une modification des populations phytoplanctoniques [134], celles-ci étant sous la dépendance des conditions hydroclimatiques.

Comme sur tous les organismes marins calcifiés, l'acidification des océans pourrait avoir un impact sur la formation de la coquille de l'huître, et ce, dès les plus jeunes stades larvaires qui présentent déjà la coquille typique des bivalves.

Gelidium corneum

L'algue *Gelidium corneum* qui structure les populations rocheuses submaréales importantes, entre 0 et 15 m, est utilisée pour la production d'agar agar sur toute la côte basque. Les facteurs environnementaux qui sous-tendent la production de biomasse sont la lumière, la température et l'énergie de la houle [135]. D'après les changements prédits pour ces facteurs, la biomasse de *Gelidium* diminuera probablement au cours de ce siècle [136].

VI- Comment le climat peut-il affecter le devenir des ressources marines ?

L'évolution rapide du climat est un des éléments des facteurs de changement et ne constitue pas actuellement la principale cause de dégradation de la biodiversité, mais ses impacts seront à considérer dans un contexte de changement plus global qui s'exerce en particulier dans les écosystèmes de transition entre milieux océanique et terrestre et dans les milieux dulçaquicoles [137].

Sans être exhaustif, le **tableau 4** récapitule les effets (décrits dans ce document) observés du changement climatique sur les populations, ainsi que les tendances générales d'évolution de la biomasse de reproducteurs et de la mortalité par pêche d'après les dernières évaluations scientifiques (hors amphihalins).

La région Aquitaine présente, par sa configuration, des habitats essentiels pour la plupart des espèces exploitées à l'image des zones d'estuaires, du bassin d'Arcachon et de la zone littorale. Or, ces zones sont également utilisées et impactées par d'autres usages et une attention devra être portée sur la cohérence de leur gestion. L'Aquitaine présente également la particularité d'avoir des écosystèmes profonds, le Canyon du Cap-Ferret et celui de Capbreton (avec pour ce dernier une proximité immédiate de la côte) où de fortes productions primaire et secondaire sont répertoriées [140][141]. Ces premiers maillons du réseau trophique sont impactés par le changement climatique mais l'appréciation des conséquences sur l'ensemble du réseau trophique (par exemple sur les petits pélagiques, les thonidés, les espèces démersales comme le merlu...) n'existe pas actuellement. À l'échelle du golfe de Gascogne, Blanchard et Vandermeirsch [142] ont corrélé le déplacement d'une espèce vivant sur des fonds de 100 à 300 m et non exploitée (poisson sanglier *Caspro aper*) avec une augmentation de la température de fond. Dans le cas des espèces profondes exploitées dans la zone du gouf de Capbreton, les conséquences du changement climatique ne sont pour l'instant pas connues, elles seront plus difficiles à appréhender que pour le domaine côtier.

	Effets observés du changement climatique sur la population	Tendance biomasse de reproducteurs	Tendance mortalité par pêche
Sole commune	?	→ +	→ -
Bar commun	?	?	↗
Maigre commun	Oui ?	?	?
Maquereau commun	Oui	↗ -	→
Anchois commun	Oui	↗	↗ ?
Baudroies d'Europe	?	↘	?
Merlu commun	Oui ?	↗	↘
Thon rouge	Oui	→	↘ pour les adultes, incertaine pour les juvéniles
Thon blanc	Oui	→ -	→ -
Palourde japonaise	Oui ?	↘ + ?	?

Tableau 4 : Effets observés du changement climatique et tendances générales d'évolution les plus récentes de la biomasse de reproducteurs et de la mortalité par pêche (d'après [138] et [139]) pour les principales espèces. Les signes + ou - venant compléter les tendances indiquent respectivement une évolution de l'indicateur à la hausse ou à la baisse et constatée sur les 2 dernières années.

Peu de travaux ont été consacrés à la modélisation et la prédiction à une échelle régionale de la production des espèces halieutiques en réponse aux modifications du climat ([72][143]...). Pour le sud du golfe de Gascogne, les seuls travaux s'étant intéressés à l'évolution de populations d'espèces exploitées en lien avec la variabilité climatique sont ceux d'Hémery *et al.* [57], Castège et Hémery [64] et de Castège *et al.* [144]. Ils reposent sur des données de captures déclaratives et mettent en évidence sur un nombre défini d'espèces que celles préférant les eaux tempérées froides présentent une diminution significative d'abondance, alors que celles d'eaux tempérées chaudes sont stationnaires ou augmentent. Bien que le facteur climatique ne soit pas le seul facteur à influencer l'évolution de l'indicateur suivi, notamment par l'effet pêche, les corrélations obtenues sur la période considérée avec l'index climatique régional sont importantes pour plusieurs espèces (40 % à 60 % des changements d'abondance, **Tableau 5**) et soulignent le rôle additionnel essentiel joué par les variations océano-climatiques dans l'évolution des populations. Ce constat, visible également dans d'autres secteurs du globe, rappelle les répercussions majeures des changements climatiques et la nécessité de les prendre en compte dans un objectif de développement durable. Le **tableau 5** donne des exemples d'évolution de populations de poissons et crevettes grises en Aquitaine en relation avec les conditions climatiques.

Au-delà des espèces principales présentées précédemment, de nombreuses espèces nouvelles pour la faune ichtyologique française ont été capturées sur les côtes d'Aquitaine au cours des dernières décennies [145][146]. La présence de ces nouvelles espèces ne peut pas être seulement attribuée au réchauffement des eaux du golfe de Gascogne car il est important de noter, également, qu'au cours de cette même période, l'effort d'échantillonnage a augmenté, que ce soit en criée ou à bord des bateaux, dans un contexte de volonté d'amélioration des suivis de l'activité de pêche et des stocks de poissons. La progression des espèces de poissons à affinité méridionale vers le nord (qu'ils soient commerciaux ou non) est particulièrement marquée dans le sud du golfe de Gascogne puisque 62,5 % des observations y sont effectuées (Quéro comm pers.).

En parallèle, les techniques de pêche ont évolué permettant aux bateaux de travailler de nouveaux secteurs ce qui est considéré comme favorable à la diversité biologique des captures. En Aquitaine, la présence des deux implantations de l'Ifremer à proximité des principaux ports de débarquement aquitain permet d'avoir des informations régulières sur ces captures inhabituelles. Les synthèses sont réalisées par l'Ifremer de La Rochelle et plus récemment par l'Université de La Rochelle.

ESPÈCES		EVOLUTION DES POPULATIONS		CORRÉLATION AVEC INDEX CLIMATIQUE
		Tendance	Variation Annuelle	
Eaux Froides	Merlu d'Europe <i>Merluccius merluccius</i>	↘	-3.3%	-0.5
	Tacauds <i>Trisopterus</i> sp.	↘	-3.4%	ns
	Lieu jaune <i>Pollachius pollachius</i>	↘	-4.1%	-0.6
	Crevette grise <i>Crangon crangon</i>	↘	-2.5%	-0.5
Sans préférence	Mulets <i>Mugil</i> sp.	↘	-9.7%	-0.4
	Sardine <i>Sardina pilchardus</i>	↘	-10.2%	ns
	Anchois <i>Engraulis encrasicolus</i>	→	-	-
Eaux Chaudes	Thon rouge <i>Thunnus thynnus</i>	→	-	-
	Crinchards <i>Trachurus</i> sp.	→	-	-
	Maquereaux <i>Scomber</i> * <small>* Maquereau espagnol principalement</small>	↗	+11.8%	+0.4

Tableau 5 : Exemples d'évolutions (basées sur les données de captures) de populations de poissons et crevettes grises en Aquitaine en relation avec les conditions climatiques (index SBC), ↗ croissance, → stabilité, ↘ décroissance durant la période d'étude (1974-2000) ; les flèches en gras indiquent les tendances hautement significatives $p < 0.01$, sinon seulement significatives $p < 0.05$; ns : non significatif $p > 0.05$, [57][63].

Les effets des changements climatiques sur la faune ichthyologique pour la partie sud du golfe de Gascogne restent difficiles à dissocier des effets liés à l'activité halieutique ou encore aux fluctuations naturelles des populations. Cependant, les espèces à affinité tropicale présentent l'intérêt de ne pas être encore ciblées et les tendances observées sont supposées être liées à des modifications d'ordre climatique ou tout au moins d'ordre naturel. Les principaux groupes concernés par ces changements du milieu dans le sud du golfe de Gascogne sont les Tétrodontiformes (6 espèces), les Carangidés (10 espèces) ainsi que les grands pélagiques à affinité tropicale et de façon plus générale les espèces en limite nord de répartition pour l'Aquitaine.

Ils témoignent de changements climatiques à travers différents paramètres :

- Une extension de leur aire de répartition vers le Nord, l'apparition de nouvelles espèces ;
- Une augmentation du nombre d'individus capturé par espèce, certaines espèces considérées comme rares sont aujourd'hui abondantes ;
- Une augmentation de la diversité biologique au sein de chacun de ces groupes ;
- Une modification de leur répartition bathymétrique.



Exemples de deux espèces à affinité tropicale capturées en Aquitaine (la daurade coryphène – *Coryphaena hippurus* et la Carangue coubali – *Caranx crysos*).

La fréquentation accrue de grands pélagiques s'accompagne également par l'apparition d'autres espèces méridionales comme le rémora *Echeneis naucrates* ou le poisson pilote *Naucrates ductor* qui est de plus en plus fréquent.

Ces dernières décennies se caractérisent par une augmentation de leur diversité biologique ainsi que de leur fréquence d'observation, particulièrement au sud de la Gironde. Même si ces observations sont à relativiser par rapport à l'attention accrue qui leur est portée dans le contexte actuel, certaines de ces espèces, telles que les grands pélagiques et les carangidés, pourraient constituer de nouvelles ressources halieutiques d'intérêt pour les professionnels dans un contexte de réchauffement climatique.

Conclusion

Les informations présentées pour les espèces principales exploitées par les pêcheurs aquitains au large de l'Aquitaine mettent en évidence une sensibilité différente selon les espèces et selon les stades ontogéniques au changement climatique. Ces éléments restent valables pour d'autres zones que celle considérée dans cet ouvrage. Ils mettent également en exergue des lacunes dans les connaissances actuelles entre les conditions environnementales et la réponse biologique. Une des raisons réside dans l'existence simultanée de plusieurs facteurs (environnementaux mais aussi anthropiques) qui restent très difficiles à dissocier. La prédiction de l'effet du changement climatique sur le développement des écosystèmes marins et par conséquent la productivité de certains stocks à la lumière d'une autre pression, l'exploitation, constitue un challenge scientifique [147]. Dans le cas d'un effet négatif attendu du changement climatique, une attention particulière devra être portée aux stocks considérés comme surexploités.

En ce qui concerne les amphihalins, le défi est d'apprécier comment ces facteurs de changement peuvent jouer sur les capacités d'adaptation, la vulnérabilité et la résilience de ces populations dans les eaux marine et continentale, notamment par le croisement des connaissances sur la biologie et les caractéristiques (usages) de la zone considérée (milieu aquatique et bassin-versant de référence). La question se pose de savoir quelles sont les zones de fortes vulnérabilités au changement climatique et par voie de conséquence quelles sont les populations (ou phase du cycle biologique) qui risquent d'être fortement impactées.

Un certain nombre d'incertitudes demeurent. Elles sont liées au scénario retenu et à ses conséquences sur la gestion de la ressource en eau et des zones humides mais également à la difficulté de dissocier les effets du changement climatique au sein du changement global.

En matière de connaissance, les principaux défis à relever sont 1) la compréhension de la connectivité entre les milieux de vie (côte, estuaire, milieu profond, large) et les facteurs qui la contrôlent ; 2) l'intégration du changement climatique sur l'ensemble du cycle de vie et à l'échelle de la population ; 3) l'appréhension des effets du changement climatique sur le réseau trophique ; 4) et en complément l'observation suivie (temporelle et spatiale) d'espèces nouvelles dont celles à affinité tropicale.



Les réservoirs à poissons des domaines de Certes et de Graveyron (© J. Haas, Fédération Départementale des Chasseurs de la Gironde).