



TRAJECTOIRES fonctionnelles d'un grand écosystème ESTuarien : la Gironde

Functional trajectories of large estuarine ecosystem : the Gironde

Programme LITEAU IV
Programme 190-0190-THUR-BSAF
Rapport Final

Jérémy LOBRY^{1,*}, Aldo SOTTOLICHIO², Clarisse CAZALS¹, Gérard CASTELNAUD¹, Christophe BOSCHET¹, Xavier CHEVILLOT¹, Gabrielle BOULEAU¹, Caitriona CARTER¹, Benoit LABBOUZ¹, Denis SALLES¹

¹Iristea, Centre de Bordeaux

²Université de Bordeaux

* Coordonnateur du projet

Jérémy Lobry

Iristea – Centre de Bordeaux

Unité de Recherches EABX - "Ecosystèmes Aquatiques et Changements Globaux"

50 avenue de Verdun, F33612 Cestas Cedex, France

+33 (0)5 57 89 08 32

www.iristea.fr

N° de contrat : 12-MUTS-LITEAU-2-CVS-014 ; 2012- N°CHORUS 2100848022

Date de notification du contrat : 24/09/2012

Date de remise du rapport final : 15/11/2015



université
de BORDEAUX



RÉGION
AQUITAINE

Sommaire

A. RÉSUMÉS

1	Résumé exécutif	2
2	Executive abstract	4

B. RAPPORT DE SYNTHÈSE

1	Introduction	1
2	Trente ans de changements dans l'estuaire de la Gironde	2
2.1	Le contexte HMS et les habitats	2
2.2	La biodiversité et le réseau trophique	5
2.3	La filière pêche-aquaculture	9
3	Et maintenant ? 4 scénarios pour l'estuaire.	13
3.1	Scénario n°1 : Tout bouge mais rien ne change – Une adaptation par ajustement	13
3.2	Scénario n°2 : Puisqu'il faut de l'eau – Une adaptation par développement de l'offre en eau	14
3.3	Scénario n°3 : Un fleuve et son estuaire apprivoisés par et pour leurs métropoles – Une adaptation par l'économie verte	14
3.4	Scénario n°4 : Une voix pour l'écosystème – Une adaptation par les pratiques alternatives	15

C. RAPPORT SCIENTIFIQUE

1	Introduction	1
1.1	Problématique scientifique et état de l'art	1
1.2	Contexte, intérêt et enjeux	2
1.3	Démarche générale et plan du rapport	4
1.4	Articulation avec des projets achevés ou en cours	5
1.5	Principaux livrables	5
2	Trente ans de changements dans l'estuaire de la Gironde. Evolution rétrospective du socio-écosystème.	7
2.1	Evolution des caractéristiques HMS et des habitats (Sottolichio A. et Lobry J.)	7
2.1.1	Introduction	7
2.1.2	Approches mises en œuvre	8
2.1.3	Résultats	11
2.1.4	Synthèse	19
2.2	Le fonctionnement trophique du système et son évolution (Lobry, J.)	21
2.2.1	Introduction	21
2.2.2	Matériel et méthodes	27
2.2.3	Principaux résultats	32
2.2.4	Synthèse : la fonction de nurserie de l'estuaire est-elle menacée ?	40
2.3	Etat des lieux socio-économique rétrospectif	42
2.3.1	Principaux déterminants du contexte socio-économique de l'estuaire	42
2.3.2	Evolution socio-économique de la filière pêche-aquaculture (C. Boschet, C. Crochot, G. Castelnaud, C. Cazals)	43

3	... Et maintenant ? Approche prospective et construction de scénarios	52
3.1	Introduction	52
3.2	Méthodologie mise en œuvre	52
3.2.1	Les méthodes de construction de scénarios (G. Bouleau)	52
3.2.2	La méthodologie mise en œuvre (B. Labbouz)	54
3.3	Résultats : 4 scénarios pour l'estuaire (B. Labbouz, D. Salles, J. Lobry)	56
3.3.1	Scénario n°1 : Tout bouge mais rien ne change – Une adaptation par ajustement	56
3.3.2	Scénario n°2 : Puisqu'il faut de l'eau – Une adaptation par développement de l'offre en eau	59
3.3.3	Scénario n°3 : Un EFE apprivoisé par et pour ses métropoles – Une adaptation par l'économie verte	61
3.3.4	Scénario n°4 : Une voix pour l'écosystème – Une adaptation par les pratiques alternatives	63
4	Synthèse : des pistes de recherche pour demain	67

D. GESTION DU PROJET

1	Rappels : Informations administratives	1
2	Valorisation et diffusion	2
2.1	Livrables et outputs	2
2.1.1	HMS et Habitats	2
2.1.2	Le fonctionnement trophique du système et son évolution	3
2.2	Synthèse des livrables et outputs	4
2.3	Valorisations « publiques », Actions de diffusion, de médiation	7
2.4	En termes de gestion et d'action publique	9
3	Dynamique du projet	9
3.1.1	Dynamique scientifique	9
3.1.2	Bilan budgétaire	11
3.1.3	Implication des acteurs dans le projet	12

E. ANNEXES

F. BIBLIOGRAPHIE

Remerciements

Nous tenons à remercier le consortium de l'ANR ADAPT'EAU (ANR-11-CEPL-008 , www.adapteau.fr) pour les interactions fortes entre nos projets.

Nous tenons aussi à remercier le Pr Benoît Sautour (UB, OASU) pour son encadrement et sa contribution à la thèse de Xavier Chevillot ainsi que le Dr Guy Bachelet (CNRS) pour sa contribution au travail de modélisation trophique.



A.

Résumés

1 Résumé exécutif

Les écosystèmes estuariens et côtiers sont particulièrement vulnérables aux changements globaux. Concentrant aujourd'hui près de 75 % de la population humaine, ils sont de plus en plus exploités et contaminés et leur biodiversité est largement impactée. Il est aujourd'hui établi que le réchauffement global a ainsi conduit à une migration latitudinale majeure d'espèces de planctons ou de poissons. L'émergence de la problématique du changement climatique a conduit à interroger les processus de reconfiguration des diverses composantes et fonctionnalités des éco-sociosystèmes sous l'influence des changements globaux.

L'estuaire de la Gironde est le plus vaste estuaire d'Europe de l'Ouest. Il est exposé depuis des décennies à une diversité d'impacts environnementaux liés aux activités humaines (pêche, dragage, industries, pollutions chroniques...) et au changement climatique (élévation de la température de l'eau, baisse des débits). D'importantes modifications de la structure des communautés ont été mises en évidence ces dernières années sous l'effet du changement global à différents niveaux trophiques : sur le compartiment zooplanctonique, sur les macrocrustacés ou sur les poissons.

L'histoire récente de l'estuaire de la Gironde est marquée, sur le plan environnemental, par des ruptures. Différentes phases peuvent en effet être décrites.

D'abord, l'évolution hydromorphosédimentaire de l'estuaire se traduit par une alternance de phases de creusement et d'envasement du système. Il apparaît que le bilan net montre un creusement alors que dans le même temps, le bouchon vaseux remonte dans les fleuves. Ce constat peut être relié à l'évolution du marnage et, en particulier de l'asymétrie de l'onde de marée : le marnage a diminué dans la partie Bordeaux-Le Verdon et les processus physiques se sont déplacés dans la partie amont de l'estuaire géomorphologique. Or, le cadre morphosédimentaire conditionne l'environnement hydrologique, ces deux facteurs étant le support de l'habitat des communautés écologiques fréquentant la Gironde. Globalement, dans ce contexte morphosédimentaire auquel se conjugue une diminution tendancielle forte des débits fluviaux, il est aujourd'hui communément admis qu'un processus de marinisation est en cours dans l'estuaire de la Gironde.

L'étude des suivis écologiques existants sur la Gironde depuis 3 décennies montre, elle aussi, une succession de périodes caractérisées par des structures de communautés différentes. La biodiversité a évolué par phases. Trois périodes peuvent être distinguées. Dans la partie médiane de l'estuaire, on est ainsi passé, dans la période 1985-1988, d'une structure du peuplement de poissons marquée par une abondance élevée de poissons migrateurs amphihalins à un peuplement très marin caractérisé par une abondance très élevée de juvéniles de poissons marins -notamment des anchois, des sprats ou des maigres- lors de la période récente (2004-2014). La relation poisson-environnement varie elle-même selon les périodes. Les drivers environnementaux sont tantôt des variables du climat général (NAO, ...) ou de l'hydrologie locale (débit...). Ceci suggère que les processus majeurs structurant les

assemblages varient. A ce stade, il semble donc que l'on puisse décrire l'évolution de l'écosystème estuarien sur les 3 dernières décennies en considérant une succession de shifts écologiques semblables à des *regime shifts*.

A ces modifications de la biodiversité s'ajoutent des modifications significatives de la phénologie des espèces et, au final, de la capacité trophique de l'estuaire. Tout ceci conduit à s'interroger sur la qualité de la fonction de nourricerie associée à ce milieu.

Or, plusieurs filières économiques dépendent de la qualité environnementale de l'estuaire. C'est particulièrement le cas de la filière pêche-aquaculture qui est tributaire de deux grandes sources d'influence : la dynamique de l'écosystème qui régule l'abondance des espèces, et l'environnement économique et institutionnel. Sur le long terme, les activités de pêche et d'aquaculture sur l'estuaire de la Gironde ont été marquées par des fluctuations et vulnérabilités biologiques, environnementales et économiques, liées entre elles. Ceci a conduit à des périodes de récession plus ou moins longue, et même d'interdictions pour l'ostréiculture. Ainsi, dans ce contexte d'incertitude, l'enjeu est d'appréhender la teneur économique et institutionnelle des dynamiques sectorielles territoriales, de la pêche professionnelle et de l'ostréiculture dont la réimplantation après une longue période d'interdiction et d'extinction fait l'objet de débats.

Sur ces bases, la combinaison des savoirs fonctionnalistes acquis sur l'écosystème estuarien et de l'analyse socio-économique en termes d'héritage et d'innovation a permis, en lien avec le projet ANR ADAPT'EAU, de construire 4 scénarios contrastés d'évolution possible de l'estuaire intégrant : (i) ce que peuvent dire les différentes disciplines scientifiques sur le socio-écosystème, (ii) les capacités des acteurs et (iii) différents choix possibles. Le premier qui s'intitule « tout bouge mais rien ne change » est un scénario tendanciel qui décrit une adaptation par ajustement du socio-écosystème aux changements globaux. Dans le deuxième scénario, « Puisqu'il faut de l'eau », l'adaptation se fait par le développement de l'offre en eau. Le troisième scénario présente une dynamique d'adaptation du système via l'économie verte dans laquelle le milieu est apprivoisé par et pour ses métropoles. Enfin, dans le scénario n°4, « une voix pour l'écosystème » s'élève et l'adaptation se fait par des pratiques alternatives.

Ainsi, après avoir décrit la trajectoire passée de l'estuaire, le projet TRAJEST a permis de mettre en perspective des indicateurs hydromorphosédimentaires, biologiques, halieutiques et socio-économiques afin de proposer des scénarios décrivant les évolutions possibles de l'écosystème estuarien de la Gironde. Ces scénarios ont vocation à éclairer les choix des gestionnaires dans une perspective de gestion de l'eau et des milieux.

2 Executive abstract

As today nearly 75% of the human population is concentrated near estuarine and coastal areas, these ecosystems are particularly vulnerable to global changes. They are increasingly exploited and contaminated and their biodiversity is largely impacted. It is now established that global warming has led to a major latitudinal migration of plankton or fish species. The emergence of the issue of climate change has led to question the reconfiguration process of the various eco-sociosystems' components and features under the influence of global change.

The Gironde estuary is the largest estuary in Western Europe. It is exposed for decades to a variety of environmental impacts associated with human activities (fishing, dredging industries, chronic pollution ...) and Change Global (increase of water temperature, decrease in flow rates). Significant changes in community structure have been highlighted in recent years at different trophic levels – zooplankton, macro-crustaceans and fish- as a result of global change.

The recent history of the Gironde estuarine environment is marked by abrupt shifts. Different phases can indeed be described.

First, the hydro-morpho-sedimentary evolution of the estuary results in alternating phases of excavation and silting up of the system. It appears that the net balance shows an excavation while at the same time, the Turbidity maximum zone (TMZ) moves upstream into the rivers.

This result appears relatively cons-intuitive. Indeed, the classical evolution trend of such systems teaches us that the estuary is supposed to silt up. However, it appears that the net balance shows a digging while at the same time, the maximum turbidity zone migrates upstream into the rivers. This finding may be related to the evolution of the tidal range and in particular to the asymmetry of the tidal wave: the tidal range decreased in the Bordeaux-Le Verdon part of the estuary and physical processes have moved in the upstream part of the geomorphologic estuary. However, the morphosedimentary framework conditions the hydrological environment, both of which are the support of the habitat of ecological communities attending the Gironde. Given the morphosedimentary context and the significant decrease in the river flow, it is now widely admitted that the Gironde estuary is experiencing a “marinisation” process.

The study of ecological monitoring existing in the Gironde for 3 decades shows, as well, a succession of periods characterized by significantly different community structures. Biodiversity has evolved in phases. Three periods can be discriminated. In the middle part of the estuary, we moved from a fish population structure characterized by a high abundance of diadromous fish, in the 1985-1988 period, to a very marine population characterized by a very high abundance of marine juvenile fish, including anchovies, sprats or meagres in the recent period (2004-2014). Fish-environment relationship itself varies according to the

period. Environmental drivers are sometimes variables of general climate (NAO ...) or of local hydrology (river flow ...). This suggests that the main processes structuring assemblies vary. At this stage, it seems that we can describe the evolution of the estuarine ecosystem over the past 3 decades by considering a succession of ecological shifts similar to regime shifts.

Significant changes in the phenology of main species have also been shown, as well as a global decrease of the estuarine trophic capacity. All these results led us to wonder if the nursery function associated with the Gironde is still efficient.

Several economic sectors depend on the environmental quality of the estuary. This is particularly the case of the fishery-aquaculture industry which is dependent on two major sources of influence: the ecosystem dynamics that regulates the abundance of species and the economic and institutional environment. In the long term, fishing and aquaculture on the Gironde estuary were marked by biological, environmental and economic fluctuations and vulnerabilities. This has led to more or less important recession periods and even to prohibitions for oyster production. Thus, in this context of uncertainty, the challenge is to understand the economic and institutional content of territorial sectoral dynamics, professional fishery and oyster farming which reimplantation after a long period of prohibition is now discussed.

On this basis, the combination of functionalist knowledge about the estuarine ecosystem and socio-economic analysis in terms of heritage and innovation allowed building, in relation to the ANR project ADAPT'EAU, 4 contrasted scenarios illustrating 4 possible kind of adaptation to Global Changes accounting for: (i) what can tell different scientific disciplines on the socio-ecosystem, (ii) the capacity of stakeholders and (iii) different choices. These scenarios are intended to clarify the managing choices in a perspective of water and environment management. The first one is entitled "everything moves but nothing changes". It is the business-as-usual scenario that describes an adaptation to Global Changes through adjustments. In the second one, "as we need water", water supply is the main driver of adaptation. The third scenario describes an adaptation driven by green economy and metropolization. And, finally, in the last one, "a vote for the ecosystem" raises up and alternative dynamics are promoted.

Thus, after we described the past trajectory of the estuary by putting biological, fisheries and socio-economic indicators into perspective, we provided a prospective and comprehensive view of possible futures for the Gironde. These scenarios are intended to clarify the choices of managers in terms of water management perspective.

B.

Rapport de synthèse

1 Introduction

Le fonctionnement des écosystèmes est désormais indissociable de la dynamique des activités humaines. Or, il est aujourd'hui établi que, depuis quelques décennies, des changements environnementaux à l'échelle locale et globale - parmi lesquels le changement climatique, un accroissement continu de la surface des terres agricoles, la surexploitation des ressources naturelles, la pollution chimique et l'émergence de nouveaux besoins de consommation - menacent la durabilité même de ces écosystèmes en modifiant l'équilibre entre les activités humaines et leur fonctionnement écologique.

Les écosystèmes estuariens et côtiers sont particulièrement vulnérables aux changements globaux. Ils concentrent aujourd'hui près de 75 % de la population humaine ; ils sont de plus en plus exploités et contaminés et leur biodiversité est largement impactée.

Les outils réglementaires envisagés pour atténuer les effets des activités humaines sur ces écosystèmes (Directive Cadre Européenne sur l'Eau ou Directive cadre Stratégie pour le Milieu Marin) prévoient d'évaluer l'état écologique des écosystèmes. Les travaux d'implémentation de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et des réflexions autour de la mise en place de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) ont souligné plusieurs limites dans notre appréhension de l'état écologique des écosystèmes et de son évolution dans le contexte du Changement Global. Les conclusions de précédents programmes de recherches mettent notamment en avant (1) la nécessité d'une appréhension plus fonctionnelle des écosystèmes, (2) l'intérêt de raisonner en termes dynamiques sur la base de scénarios plutôt que de façon statique sur la base de références et (3) le besoin de prendre en compte les évolutions dans le cadre des Changements Globaux. Enfin, ils ont notamment mis en évidence le besoin de développer des indicateurs du fonctionnement hydromorphosédimentaire (HMS) des estuaires, ce qui implique une meilleure compréhension de l'évolution physique du milieu, qui soutient le développement et le fonctionnement de l'écosystème. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de changer de méthodes, d'aller plus loin dans l'analyse et de mieux expliciter la trajectoire fonctionnelle des écosystèmes estuariens dans le contexte des Changements Globaux.

La prise en compte de l'histoire des trajectoires est une démarche classique en sciences humaines et sociales pour aborder les tensions entre phénomènes hérités (structures, institutions) et la marge de manœuvre des acteurs. L'ensemble des approches militent pour une approche plurielle des trajectoires et du fonctionnalisme en tant qu'interprétations du passé.

Le projet TRAJEST apporte des éléments de réponse sur ces différents points dans le cadre des écosystèmes estuariens. Il se veut ainsi une contribution, basée sur l'acquisition, la

synthèse et la structuration de connaissances écologiques, vers la mise en œuvre de démarches interdisciplinaires de consilience et la construction de scénarios prospectifs nécessaires à la gestion des écosystèmes complexes. Le cas d'étude proposé est l'estuaire de la Gironde. Plus vaste estuaire d'Europe de l'Ouest, il est exposé depuis des décennies à une diversité d'impacts environnementaux liés aux activités humaines (pêche, dragage, industries, pollutions chroniques...) et aux Changements Globaux (élévation de la température de l'eau, baisse des débits).

2 Trente ans de changements dans l'estuaire de la Gironde

Dans le cadre de ce projet, l'évolution passée de l'estuaire a essentiellement été décrite sous 3 angles : (1) le contexte hydromorphosédimentaire (HMS) et les habitats, (2) la biodiversité et le réseau trophique et (3) une activité socio-économique particulière, la filière pêche-aquaculture.

2.1 Le contexte HMS et les habitats

Les dynamiques HMS ont significativement évolué au cours du temps. La comparaison des cartes bathymétriques ne montre pas de modifications majeure de la morphologie globale de l'estuaire de 1953 à 1994, hormis une mobilité importante dans la zone autour des îles et des bancs au centre de l'estuaire. Cependant, la comparaison quantitative de bathymétries montre que différents épisodes peuvent être distingués. Il apparaît ainsi

- Entre 1953 et 1962 : un creusement global de l'estuaire
- Entre 1962 et 1970 : un bilan global qui montre plutôt une tendance à l'envasement
- Depuis 1970 : un creusement net

La comparaison des différentiels bathymétriques (FIG. I) montre qu'il y a globalement une remontée progressive de la zone de dépôt maximum (ZMD).

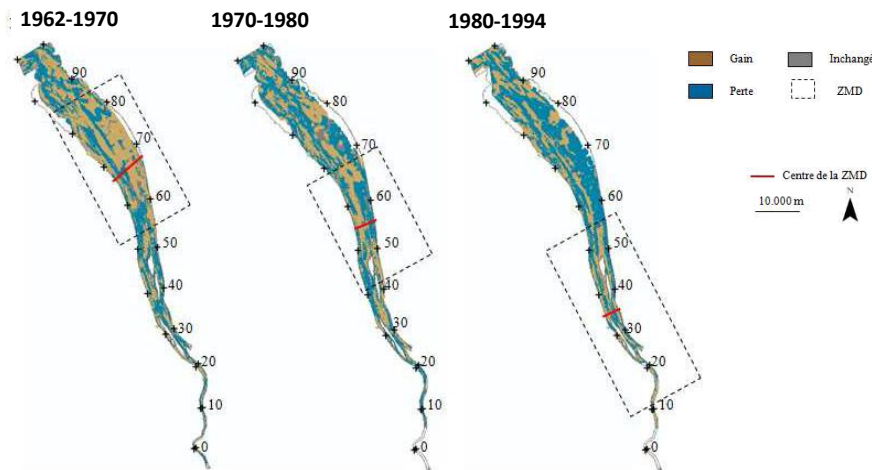


FIG. I. Bilans sédimentaires issus de l'analyse des cartes bathymétriques. Indique un déplacement progressif en accord avec la dynamique d'envasement de la partie amont

L'analyse des sections mouillées (FIG. II) montre qu'entre 1953 et 1994 l'évolution se fait selon une succession des zones en sédimentation-érosion, avec une plus forte érosion dans le secteur médian de l'estuaire, compris entre les km 40 et 70 en aval de Bordeaux. Ce résultat apparaît relativement contre-intuitif. En effet, l'évolution classique tendanciel de ce genre de système nous enseigne que l'estuaire est sensé s'envaser. Cependant, il apparaît que le bilan net montre un creusement. Nous pouvons déduire un export massif de sédiments vers l'océan, ou bien une remontée et un envasement important en amont, dans les sections fluviales de la Garonne et de la Dordogne, zones non couvertes par les bathymétries analysées. Les tendances du débit fluvial indiqueraient plutôt une remontée du bouchon vaseux et donc des zones de sédimentation.

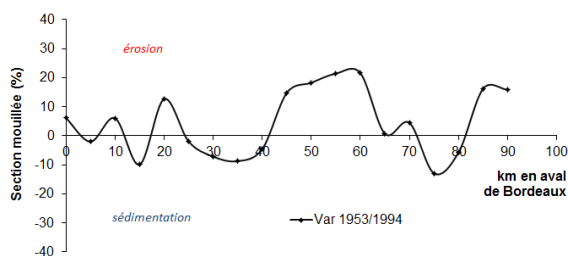


FIG. II. Evolution globale de la section mouillée de 1953 à 1994, en % par rapport à la section de 1953.

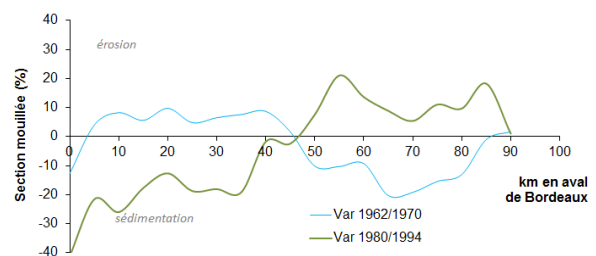


FIG. III. Evolution relative de la section mouillée de 1962 à 1970 et de 1980 à 1994

L'analyse des sections mouillées par années, a montré deux périodes particulières avec une inversion de tendance très nette (FIG. III). Entre 1962 et 1970, la sédimentation se fait essentiellement en aval de l'estuaire (km 45 à 90), tandis que le secteur amont (km 5 à 45) est en érosion. Entre 1980 et 1994 la tendance est exactement inverse, avec érosion des secteurs aval et une sédimentation en amont.

Ces modifications morphologiques peuvent être attribuées, en premier lieu, aux modifications du régime fluvial, en particulier l'intensification des étiages, et à la remontée progressive du bouchon vaseux qui en découle. En effet, ces deux tendances ont été maintes

fois observées depuis les années 1980, et ont été récemment démontrées par analyse de données de turbidité à Bordeaux. Le lien entre ces tendances et les modifications morphologiques, même s'il est vraisemblable, est toutefois purement qualitatif, et le débit fluvial ne saurait expliquer à lui seul l'ensemble des tendances HMS. Par ailleurs, et malheureusement, les données bathymétriques permettant de vérifier cette hypothèse sont inexistantes ou inaccessibles, et cela est une limite pour la robustesse des conclusions de cette étude.

L'analyse de la marée, faite sur une période plus longue que la morphologie, a montré une évolution nette du marnage à Bordeaux entre 1953 et 2014. Le calcul fait à partir des quatre situations retenues (1953, 1971, 2005 et 2014) montre un marnage moyen à l'embouchure (Le Verdon, ici nommée Pointe de Grave) de 3,21 m. Le marnage moyen à Bordeaux est de 4,65 m pendant la même période. Une évolution nette du marnage est constatée entre 1971 et 2005 à Bordeaux. En 1953-1971, le marnage moyen est de 4,20m, tandis qu'en 2005-2014 il est de 4,85m. L'augmentation est donc de l'ordre de 0,65 m, soit 13,3% en moyenne.

Ces tendances pour la marée montrent qu'une amplification de la marée s'est produite, entre 1971 et 2005, sans doute du fait des modifications de la morphologie de l'estuaire, favorisant l'effet de convergence (qui conduit à l'amplification) et réduisant l'effet de frottement sur les berges (qui conduit à l'amortissement de l'onde). La réduction du frottement pourrait être renforcée par la persistance en amont du bouchon vaseux. Par ailleurs, l'amplification de la marée aurait dû conduire à une intensification de l'asymétrie, mais cela ne s'est pas produit, ou du moins cela n'apparaît pas clairement dans les données analysées. L'une des explications possibles est le fait que l'estuaire ne s'est pas approfondi de manière significative en amont, ce qui tendrait à renforcer l'idée d'un engorgement en amont.

L'ensemble de ces résultats sur la marée dessine un scénario complexe, avec des mécanismes conduisant à des effets antagonistes et non élucidés avec les données disponibles pour cette étude. En effet, l'augmentation du marnage est probablement favorisée par la remontée du bouchon vaseux, qui réduit les effets de frottement sur le fond. Ceci est de nature à renforcer les courants, et donc probablement à accentuer la remontée du bouchon vaseux. Cependant l'asymétrie (qui devrait augmenter en conséquence et renforcer cet effet) n'est pas plus forte. Le lien entre ces mécanismes reste donc à élucider, en vue notamment de l'édification de scénarios futurs vraisemblables.

Il est finalement aujourd'hui communément admis par les scientifiques et les gestionnaires locaux que l'estuaire de la Gironde connaît depuis quelques années un processus de « marinisation ».

Le terme synthétise différentes modifications HMS mises en avant. On peut les schématiser comme suit (FIG. IV) :

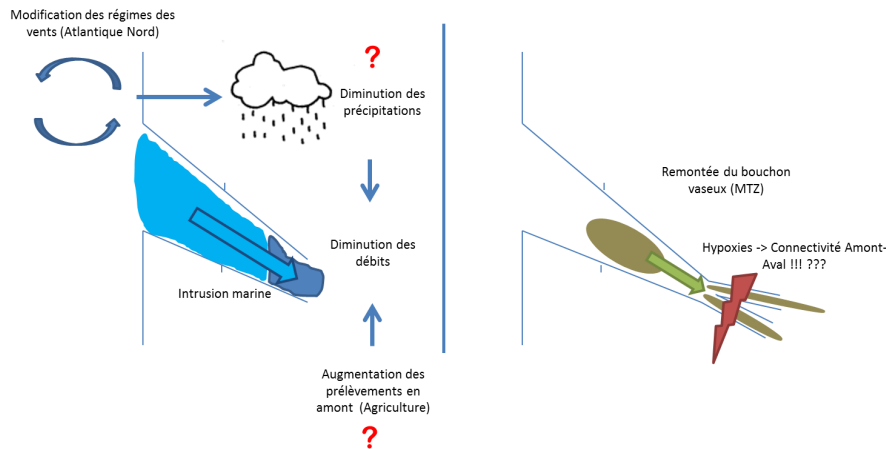


FIG. IV. Représentation schématique du phénomène de marinisation de l'estuaire de la Gironde.

Ce phénomène se traduit en premier lieu par une intrusion plus profonde de la marée, et donc de la masse d'eau marine, dans l'estuaire (et donc une augmentation de la salinité dans la partie médiane de l'estuaire, notamment de la salinité moyenne). Cela s'accompagne d'une remontée du bouchon vaseux qui se retrouve désormais plus souvent piégé dans le bas des fleuves.

Les résultats du programme ETIAGE montre que l'une des premières conséquences de cette remontée est le piégeage de Matière Organique (issue notamment de la métropole bordelaise) et de différents contaminants dans une zone plus resserrée de l'hydrosystème. Le piégeage et la dégradation de la MO peut conduire, dans certaines conditions (fortes températures, étiages importants), à des événements hypoxiques. Evènements hypoxiques dont on suspecte qu'ils peuvent impacter la vie aquatique et notamment la migration de certains poissons amphihalins (en particulier les alosons qui dévalent en été).

Pour autant, malgré des conditions hydrologiques globalement plus favorables aux poissons marins dans l'estuaire, la surface d'habitats potentiels augmente peu pour la plupart des espèces. En effet, la condition limitante reste la surface de zones intertidales. Or, d'une part, celle-ci a beaucoup diminué au cours des décennies précédentes. D'autre part, les surfaces les plus importantes se trouvent en aval tandis que l'amont de l'estuaire et le bas des fleuves restent pauvres en espaces intertidaux.

2.2 La biodiversité et le réseau trophique

D'importantes modifications de la structure des communautés écologiques de l'estuaire de la Gironde ont été mises en évidence ces dernières années sous l'effet du changement global à différents niveaux trophiques.

En particulier, la communauté zooplanctonique a été profondément modifiée au cours des 3 dernières décennies. Des travaux de l'Université de Bordeaux basés sur les suivis environnementaux trentenaires du milieu ont établi l'arrivée et l'installation dans l'estuaire d'une espèce exotique de copépode, *Acartia tonsa*, proche de l'espèce native *A. bifilosa*. Cette colonisation serait facilitée par le changement climatique qui rendrait l'estuaire favorable à la nouvelle espèce. Chez d'autres crustacés aussi, des modifications notables ont été mises en lumière. En 2006 a été mise en évidence l'arrivée d'une nouvelle espèce de crevette exotique *Palaemon macrodactylus* qui pourrait concurrencer l'espèce native, la crevette blanche *P. longirostris*. Plus récemment, les campagnes de suivi de la faune benthique réalisées de façon récurrentes dans l'estuaire dans le cadre, notamment, du suivi du CNPE du Blayais montrent un effondrement de la richesse spécifique et de l'abondance de la macrofaune benthique tant en zone subtidale qu'en zone intertidale.

Chez les poissons aussi, de nombreux changements ont été observés. L'éperlan, dont la Gironde constitue la limite méridionale de l'aire de répartition, était extrêmement abondant dans le milieu dans les années 1980 et a depuis complètement disparu de nos observations. L'impact du changement climatique est l'hypothèse la plus probable. Les eaux se réchauffant, elles deviennent moins favorables aux espèces « nordiques » telles que l'éperlan. A l'inverse, elles deviennent plus favorables aux espèces méridionales qui peuvent alors trouver plus au Nord des habitats qui deviennent plus favorables. C'est le cas par exemple du maigre qui est devenu au début des années 2000 une espèce majeure de l'estuaire de la Gironde. Plus globalement, une étude réalisée à partir des données recueillies entre 1991 et 2009 concluait à une augmentation tendancielle, plus ou moins progressive et linéaire de l'abondance des juvéniles de la plupart des espèces marines dans l'estuaire au cours de cette période liée à une augmentation de la salinité et de la température dans le milieu en relation avec la marinisation de l'estuaire. Enfin, une récente étude met en avant l'hypothèse, non plus d'une évolution progressive des peuplements mais décrit des changements abrupts (shifts) dans les communautés estuariennes autour de 1987 et 2001. Les conséquences de ces changements, de nature à modifier le fonctionnement et les processus au sein du réseau trophique dans son ensemble tel qu'il a été défini dans différents travaux n'ont encore jamais fait l'objet d'études intégrées.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail.

Des méthodes d'analyses multivariées et de classification appliquées aux données permettent en effet d'identifier trois périodes différentes entre 1985 et 2014 marquées par des structures du peuplement de poissons contrastées. On passe d'un assemblage caractérisé par une présence significative de poissons migrateurs amphihalins dans la partie médiane de l'estuaire lors de la première période (1985-1988) à un peuplement dominé par les juvéniles de poissons marins, notamment pélagiques (anchois, sprats) lors de la dernière période (2004-2010). Entre les 2, une période plus variable qui correspond peu ou prou à la marinisation de l'écosystème telle qu'elle avait été décrite précédemment. Une quatrième

rupture semble se dessiner en 2012 mais nous n'avons pas le recul nécessaire sur les données pour la caractériser formellement.

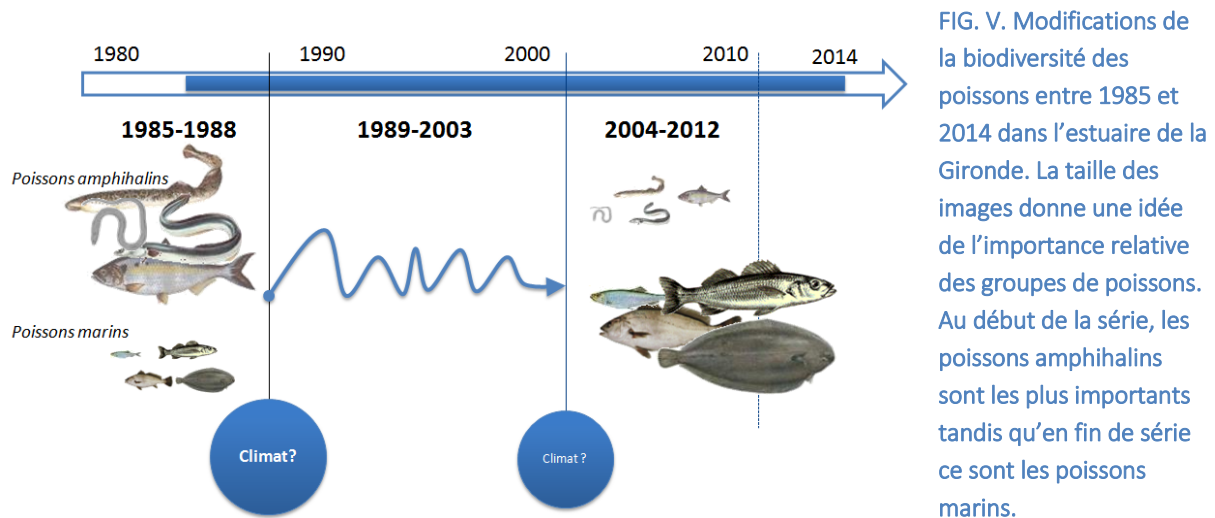


FIG. V. Modifications de la biodiversité des poissons entre 1985 et 2014 dans l'estuaire de la Gironde. La taille des images donne une idée de l'importance relative des groupes de poissons. Au début de la série, les poissons amphihalins sont les plus importants tandis qu'en fin de série ce sont les poissons marins.

A ce jour, nous faisons donc l'hypothèse que des modifications importantes et abruptes de la biodiversité ont eu lieu dans l'estuaire de la Gironde en lien avec le changement climatique. L'évolution de l'écosystème estuarien sur les 3 dernières décennies peut donc être décrit en considérant une succession de ruptures écologiques et non pas simplement comme une lente marinisation progressive du milieu. Les facteurs environnementaux qui structurent les communautés de poissons comprennent, à la fois, des facteurs climatiques à large échelle et des variables de l'hydrologie locale, en particulier le débit.

Augmentation significative des abondances de poissons marins dans l'estuaire, modifications profonde des communautés zooplanctoniques, variations inquiétantes des abondances de crevettes, compartiment clé du réseau trophique, chute drastique de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique, toute cela pose question sur l'évolution du réseau trophique estuarien. Et notamment, sur la capacité d'accueil trophique de l'estuaire pour les poissons.

Trois modèles trophiques ont donc été réalisés, représentatifs de chacune des 3 périodes précédemment décrites. Ils sont basés sur les données disponibles et reflètent donc les variations importantes de biomasses entre les 3 périodes. Ils permettent aussi, et surtout, d'estimer l'évolution de l'efficacité écotrophique (EE) de chacun des compartiments du réseau. Une augmentation des EE de certaines espèces traduit une augmentation de la pression de prédation. C'est notamment le cas pour les poissons benthiques et démersaux, notamment marins, dont la biomasse a beaucoup augmenté au cours des 2 dernières périodes (bars, maigre, poissons plats) et qui prédatent des compartiments dont la biomasse

a considérablement diminué (macrofaune benthique) ou dont la structure de population a été modifiée (crevettes).

Les changements dans la composition spécifique et l'abondance relative des espèces s'accompagnent de changements dans leurs cycles écologiques.

Les résultats basés sur les méthodes statistiques complexes mises en œuvre laissent apparaître des modifications significatives de la date d'arrivée et de la durée de séjour dans l'estuaire de nombreuses espèces de poissons. Différents types de changements sont décrits : des changements dans la date d'apparition et le mois du pic d'abondance, des changements dans la durée de présence et des changements dans la durée des interactions potentielles proie-prédateur (FIG. VI).

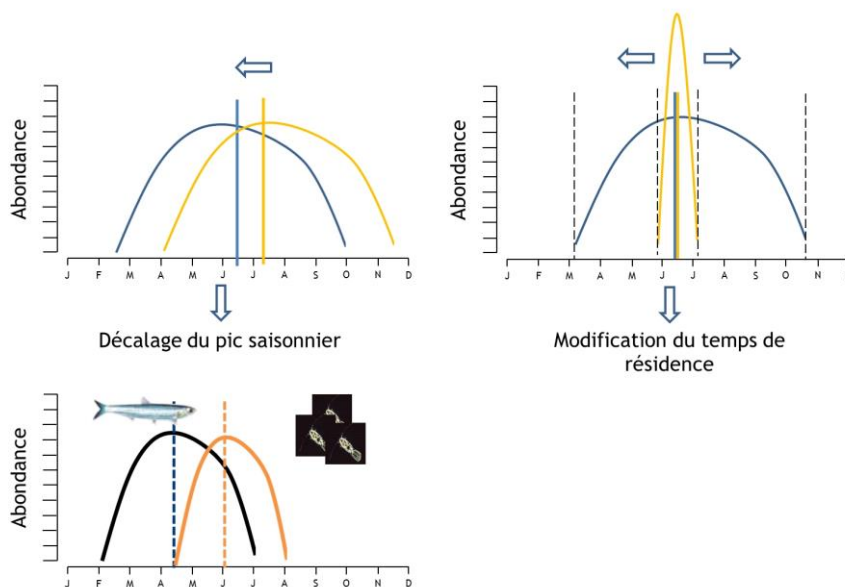


FIG. VI. Représentation synoptique simplifiée des changements observés dans la distribution annuelle de la présence des espèces dans l'estuaire.

Sur les 19 espèces considérées, 14 présentent une modification significative de leur phénologie pour au moins un des descripteurs étudiés. Ainsi, sur les 14 espèces de poisson recensées régulièrement, 8 présentent une modification significative dans leur patron saisonnier d'abondance dans le milieu pour au moins une des périodes décrites ci-dessus. Pour 7 de ces espèces, il semble qu'elles apparaissent dans l'estuaire plus tôt aujourd'hui qu'il y a 30 ans. Nos résultats montrent aussi que, pour 40% des populations de poissons étudiées, le temps de séjour dans l'estuaire a aussi significativement changé au cours des 3 décennies. Bien que les situations soient contrastées, pour la plupart d'entre elles, le temps de séjour a raccourci. Ces changements dits « phénologiques » dans les dynamiques saisonnières des poissons et du zooplancton dans l'estuaire sont des marqueurs profonds des changements globaux qui impactent la biodiversité aquatique. Et ces changements posent de nombreuses questions. Parmi elles, la question de l'heure du dîner... En effet, on constate que les changements phénologiques sont intervenus sur les poissons et leurs proies. Les résultats

montrent une potentielle désynchronisation entre les pics d'abondance des poissons et de leurs proies dans l'estuaire. Ainsi, du fait des changements observés dans la phénologie des espèces, la synchronie entre les juvéniles de poissons et leurs proies zooplanctoniques a été modifiée pour plusieurs des couples proie-prédateur et concerne 9 des 14 espèces de poissons prises en compte dans cette analyse. Cela suggère que de potentiels 'mismatch' peuvent se produire et les chaînes et réseaux alimentaires pourraient être déstructurés et la viabilité du système mise en questions.

Les modifications de la biodiversité observées traduisent à la fois l'impact de changements profonds de l'environnement aux échelles globales (changement climatique) et locales (modifications hydrologiques) sur la dynamique de la biodiversité estuarienne mais aussi une capacité certaines des communautés écologiques à s'adapter. Pour autant ces modifications sont abruptes et profondes. Si les causes de l'effondrement des populations de poissons migrateurs amphihalins de l'estuaire sont multiples (surpêche, destruction des frayères, qualité de l'eau), l'augmentation de l'abondance des juvéniles de poissons marins dans l'estuaire est clairement liée au phénomène de marinisation de la Gironde. Les juvéniles de poissons sont donc plus nombreux, arrivent plus tôt et remontent plus haut dans l'estuaire. Cependant, la surface d'habitats potentiels n'augmente que très peu en proportion, les proies sont plutôt moins nombreuses et ne sont pas toujours au rendez-vous du dîner. La capacité d'accueil trophique apparaît de plus en plus limitée. Deviendra-t-elle limitante ? Elle conditionne l'effectivité de la fonction de nourricerie associée à la Gironde.

Cette fonction de nourricerie apparaît potentiellement dégradée, non seulement du fait d'un déficit potentiel de la capacité d'accueil du milieu mais aussi du fait d'une qualité de l'eau assez mauvaise. Déficit de la capacité d'accueil et contamination ne semblent pas se traduire ici par des mortalités élevées chez les juvéniles de poissons marins. Ils peuvent se traduire en revanche par des croissances plus faibles, des réserves lipidiques moins importantes et par la bioaccumulation de certains contaminants. Tous ces éléments peuvent affecter la contribution des juvéniles qui sortent de l'estuaire aux stocks marins et, à terme, la viabilité des populations.

2.3 La filière pêche-aquaculture

Le patrimoine biologique de l'estuaire de la Gironde a permis le développement de la pêche et de l'aquaculture depuis la fin du 19ème siècle. Ces activités se sont considérablement développées après 1945 grâce à une amélioration des techniques faisant de la pêche une activité rémunératrice grâce à la production de caviar sauvage dans un premier temps, puis des alevins d'anguille par la suite. Des prix de vente très élevés ont provoqué un engouement sans précédent pour la pêche dans l'estuaire de la Gironde de ces

alevins entre 1950 et 1970. En parallèle, l'activité ostréicole s'est développée depuis 1900 et s'est orientée vers la production de naissains et de demi-élevage à destination d'Arcachon et de Marennes-Oléron. En 1969, la côte médocaine constituait la première réserve d'huîtres portugaises française et produisait un tiers du naissain français. En 1970, l'activité pêche-aquaculture était donc en plein essor et faisait vivre plus de 1500 familles.

Depuis la moitié du 20ème siècle et notamment depuis 1970, l'estuaire de la Gironde est soumis à de nombreuses pressions anthropiques et environnementales liées aux activités humaines. Or, la filière pêche-ostréiculture est totalement tributaire de la dynamique de l'écosystème et de l'approvisionnement en matières premières qu'elle permet. Depuis la fin des années 70, les stocks des espèces halieutiques dans l'estuaire de la Gironde ont ainsi fortement fluctué. Certaines espèces, abondantes autrefois, sont aujourd'hui sérieusement menacées alors que d'autres sont réapparues. Il est actuellement difficile d'identifier tous les facteurs expliquant ce phénomène complexe. Néanmoins, les acteurs économiques et politiques ont pris des décisions pour s'adapter à ces évolutions qui ont eu des conséquences sur l'activité économique. La filière ostréicole a été la plus sévèrement touchée par les aléas de l'environnement à travers les épizooties et les diverses pollutions. Par exemple, en 1968 la virose de l'huître a décimé la quasi-totalité des stocks français. Cette évolution dans le stock des espèces, couplée à la prise de conscience croissante de la pollution du milieu estuarien, a conduit au développement d'une réglementation des activités de pêche-ostréiculture à l'échelle locale, nationale et européenne. L'Europe et les pouvoirs publics français ont mis en place des restrictions de pêche dans le but de protéger la ressource halieutique et la santé des populations en lien avec la contamination des produits. De même, en lien avec les directives européennes, l'exploitation des huîtres a été interdite pendant près de dix-huit ans, entre 1996 et 2014, à cause de leur contamination au cadmium. En outre, l'activité aquacole a également été limitée dans son accès au foncier étant donné que les marais médocains présentent la singularité d'être la propriété du port autonome de Bordeaux (PAB – aujourd'hui GPMB Grand Port Maritime de Bordeaux) depuis 1980 et qu'ils dépendent, de ce fait, de la politique d'aménagement nationale du territoire des zones industrialo portuaires. Que ces restrictions réglementaires d'accès à la ressources soient prolongées ou ponctuelles, elles interviennent sur des espèces dont les stocks étaient effectivement bas et dont les perspectives économiques d'exploitation étaient très incertaines.

La conjugaison des évolutions écosystémiques et institutionnelles (que ce soit en termes de capture ou d'accès à la profession tel que qualification obligatoire, quota de licence ...) ont eu des impacts sur la quantité produite et ses composantes. La production de la filière ostréicole a été divisée par soixante et le nombre d'ostréiculteurs par vingt depuis 1968. La production de la filière pêche a quant à elle été divisée pratiquement par cinq et le nombre de pêcheurs par trois depuis 1978. L'évolution de l'accès de la filière à la ressource halieutique a surtout conduit à un appauvrissement de la diversité de sa production la rendant dépendante d'un nombre réduit d'espèces accentuant la nécessité de faire des choix productifs adaptés à sa vulnérabilité commerciale.

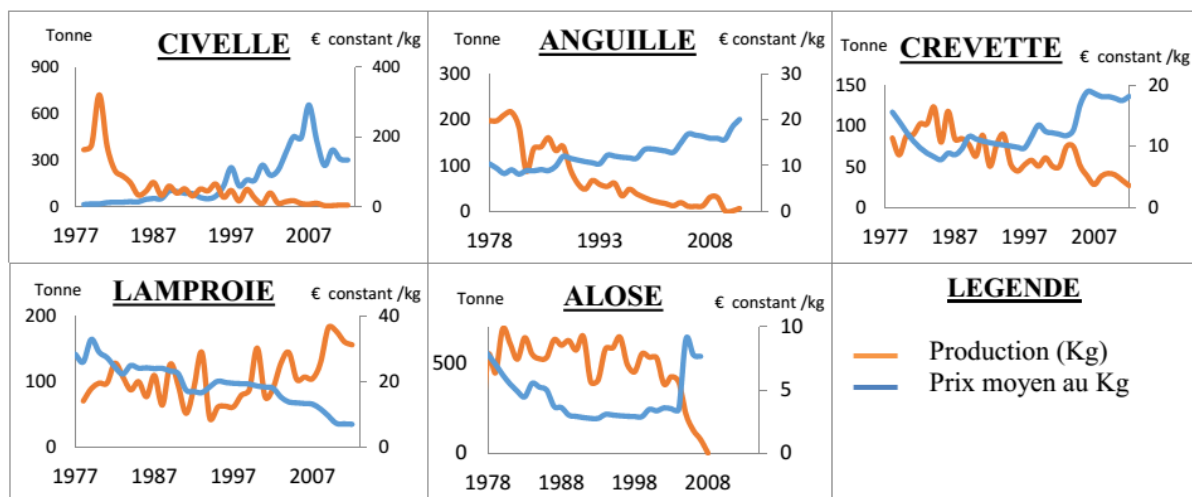


FIG. VII. Volatilité des prix en lien avec la production. Source : Jeu de données Irstea (2015), calculs par auteur- Données non disponibles pour la filière ostréicole

De nombreux départs en retraite et des cessations d’activité même des plus jeunes ont été accélérés par des plans de sortie de flotte. La baisse des revenus liée à l’augmentation des charges et à la fragilité du chiffre d’affaires, en lien avec l’accès restreint à la ressource, a accentué ce phénomène. De plus, avec la création des permis de mise en exploitation des navires (PME), des quotas de licences, de la diminution des aides à l’installation et des possibilités de pêche qui se réduisent, très peu de jeunes se sont installés ces dernières années. Pour autant l’adaptation des pratiques des professionnels et la très forte diminution du nombre de pêcheurs sur l’estuaire a permis de maintenir la productivité par actif. Entre 1977 et 2004, alors que la production totale diminuait de 25 %, la production par pêcheur augmentait de 56 %. Cette intensification a été possible grâce à des innovations techniques (les filets monofilament, les vire-filets et les moteurs « in-bord »). Néanmoins, les stratégies des pêcheurs fluviaux ont été limitées par rapport à celles des pêcheurs marins : modernisation moindre de la flotte et faible possibilité de diversification en termes d’espèces. La situation de la filière ostréicole a été différente. Les professionnels n’ont pu s’appuyer que sur une seule espèce fortement soumise aux aléas du milieu. La poursuite de leur activité a été possible grâce à la délocalisation d’une partie de l’activité sur Arcachon et la création de circuits fermés pour ne plus dépendre du milieu.

Sur la période étudiée, l’accès à certains débouchés nationaux et internationaux a diminué sous l’influence de décisions institutionnelles (ouverture puis fermeture des débouchés). Ainsi, en 2007, face au déclin de la population d’anguilles, l’Europe a interdit l’export de civelles vers l’Asie qui représentait la quasi-totalité des débouchés de la filière de l’estuaire de la Gironde. Dans le cadre du plan européen de l’anguille, il existe un quota "consommation" destiné au marché alimentaire et un quota "repeuplement" destiné au programme de transferts européens d’anguilles. Or, depuis quelques années la consommation d’anguille diminue et les débouchés ouverts par les programmes de

repeuplement stagne sous l'effet des difficultés budgétaires. Cette saturation des débouchés a provoqué une diminution de 60% des prix de la civelle en 2007. Dans ce contexte où les producteurs subissent les lois du marché, les réglementations sanitaires et commerciales imposées à l'échelle nationale et européenne ne leur laisse que peu d'opportunités économiques, d'autant que la filière a toujours été concurrencée par la vente des produits issus de filières illégales. Pour faire face à ces conditions de marché peu porteuses, les professionnels ont modifié leurs pratiques de commercialisation en développant la vente directe pour les produits dont la consommation locale pouvait absorber la production.

Contrairement aux espèces précédentes, l'huître de l'estuaire n'a jamais été exportée à l'étranger. Néanmoins ce produit était largement échangé à l'intérieur du territoire français. Avant les années 1980, l'ostréiculture produisait un tiers du naissain français. A partir des années 1980, la plupart des centres ostréicoles se sont mis à produire leur propre naissain et ont commencé à se détourner de celui du médoc. Pour maintenir leur chiffre d'affaires, les ostréiculteurs ont fait évoluer leur mode de valorisation de leurs produits ; dans un premier temps en 1978, en passant de la production de naissain à la production d'huîtres finies, puis dans un second temps en 2014, via la production d'huîtres affinées.

L'analyse de la trajectoire de la filière pêche-ostréiculture a permis de montrer sa forte dépendance à son environnement institutionnel, économique et écologique qui l'a rendu plus vulnérable. Cette vulnérabilité se constate à travers la baisse de la production et des effectifs de professionnels, l'instabilité du chiffre d'affaire, la grande dépendance vis-à-vis d'un nombre limité d'espèces et les difficultés à se coordonner pour défendre des positions communes dans les instances de gouvernance locales. Si les acteurs ont mis en place des stratégies techniques, économiques et politiques pour inverser la tendance générale marquée par le déclin de la filière, les différentes capacités d'adaptation des acteurs ont conduit à une différenciation potentielle des trajectoires entre la pêche maritime, la pêche fluviale et l'ostréiculture. La filière ostréicole quoiqu'encore très anecdotique est fortement soutenue politiquement et peut se destiner à un marché de niche avec la perspective de la création d'une IGP. En revanche la filière pêche reste confrontée à un marché saturé et une production de plus en plus réglementée. Néanmoins la filière pêche ostréiculture est marquée par un fort ancrage territorial et porteuse d'identité pour l'estuaire de la Gironde, sur cette base une implication coordonnée des acteurs dans la gouvernance du parc naturel régional et du parc marin pourrait lui offrir de nouvelles perspectives économiques.

3 Et maintenant ? 4 scénarios pour l'estuaire.

La combinaison de savoirs fonctionnalistes sur les écosystèmes estuariens et d'analyse socio-économique en termes d'héritage et d'innovation soumis à des interprétations diverses a permis de construire 4 scénarios cohérents présentant l'adaptation de l'estuaire aux changements globaux. Cette réflexion a été conduite dans les projets ANR ADAPTEAU (ANR-11-CEPL-008, www.adapteau.fr) et TRAJEST.

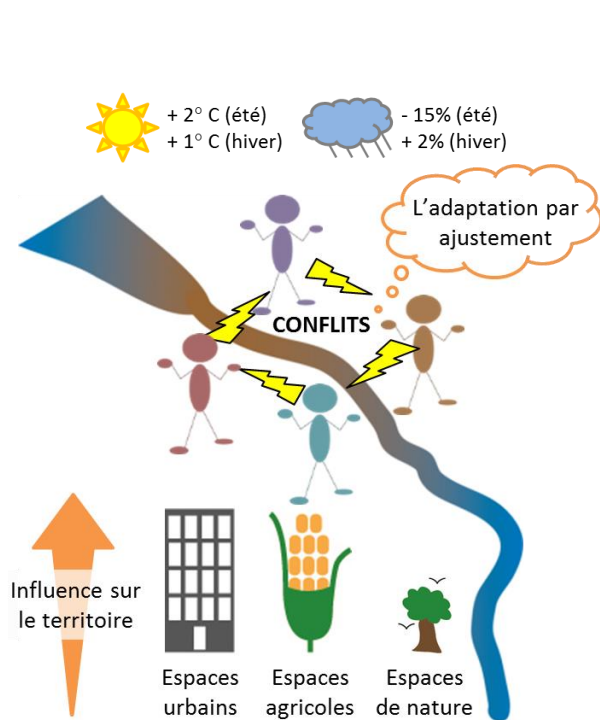


FIG. VIII. Schéma représentatif du scénario n°1.

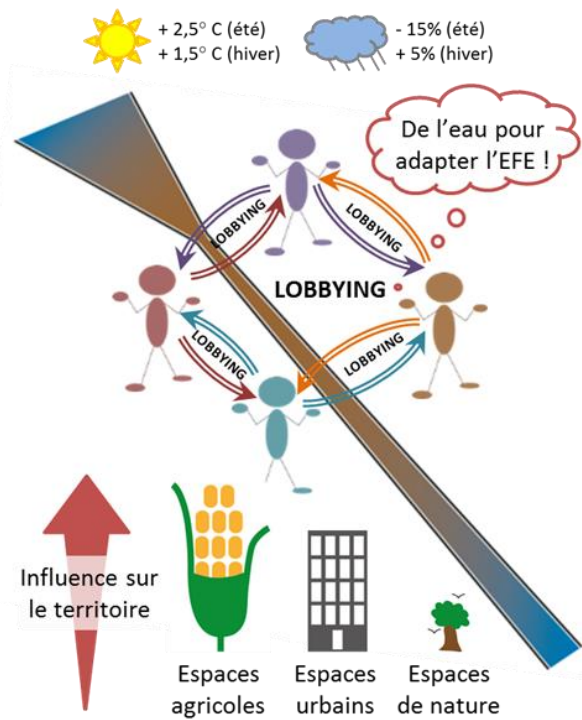


FIG. IX. Schéma représentatif du scénario n°2.

3.1 Scénario n°1 : Tout bouge mais rien ne change – Une adaptation par ajustement

Dans ce scénario (voir FIG. VIII), l'hydrosystème connaît en 2050 une dynamique d'urbanisation identique à celle des années 2010. Le territoire se structure autour de deux types d'espaces qui se développent et se confrontent : des villes qui s'étalent et se densifient autour des deux métropoles (Bordeaux et Toulouse) et une agriculture intensive dont les prélèvements en eau sont conséquents. Malgré ses impacts avérés, le changement climatique n'est toujours pas considéré comme un enjeu central. Les organismes gestionnaires interviennent ponctuellement pour répondre à des situations de crise. L'écosystème est doublement impacté par le mode de développement territorial et par l'absence de décisions politiques proactives en faveur de l'environnement. Ainsi, les débits moyens de la Garonne

diminuent et la qualité écologique de l'ensemble de l'hydrosystème se dégrade continuellement à partir des années 2010 pour atteindre un état critique en 2050.

3.2 Scénario n°2 : Puisqu'il faut de l'eau – Une adaptation par développement de l'offre en eau

En 2050 (voir FIG. IX), l'agriculture irriguée est considérée comme le facteur principal de la gestion de l'eau sur le continuum Garonne-Gironde. Une priorité politique est accordée aux surfaces agricoles irriguées ainsi qu'aux aménagements de stockage et de prélèvement d'eau. Les dispositifs de gestion et de gouvernance de l'eau (comité de bassin, SAGE, EPTB...) sont dominés par les acteurs de la filière agro-industrielle. Les enjeux quantitatifs de la ressource monopolisent la question de l'adaptation au changement climatique. Les outils de gestion de l'eau sont mobilisés pour favoriser la mise à disposition et l'écoulement de l'eau pour satisfaire les usages. L'anthropisation du fleuve et de l'estuaire est renforcée par des aménagements dédiés aux besoins quantitatifs de la ressource, au contrôle et à l'atténuation des événements extrêmes (crues, sécheresses...). Les débits moyens connaissent donc une diminution progressive. En 2050, l'hydrosystème est devenu un milieu homogène dont la qualité écologique n'intéresse plus les acteurs : les espèces tolérantes de l'aval colonisent les eaux douces et l'estuaire connaît une marinisation importante.

3.3 Scénario n°3 : Un fleuve et son estuaire apprivoisés par et pour leurs métropoles – Une adaptation par l'économie verte

En 2050 (voir FIG. X), la lutte contre le changement climatique est au cœur des dispositifs de gestion de l'eau. Très interventionnistes, les décideurs publics mettent en œuvre des aménagements afin de contrôler les variations des régimes hydrologiques, quitte à contraindre la dynamique naturelle de l'hydrosystème. Les acteurs, organisés autour de puissantes filières socio-économiques (tourisme, industrie, énergie), mettent en œuvre des options d'adaptation, dans la mesure où elles sont recevables socialement et économiquement. L'urbanisation se densifie sur une partie du territoire, alors que certains tronçons du continuum Garonne-Gironde sont aménagés pour offrir des services aux urbains et favoriser des options d'adaptation. Ce développement permet d'améliorer l'attractivité touristique tout en diminuant les prélèvements en eau par une sobriété collective. L'érosion de la qualité écologique de l'écosystème estuarien ralentit, la diminution des débits moyens est enrayée, et la biodiversité s'améliore.

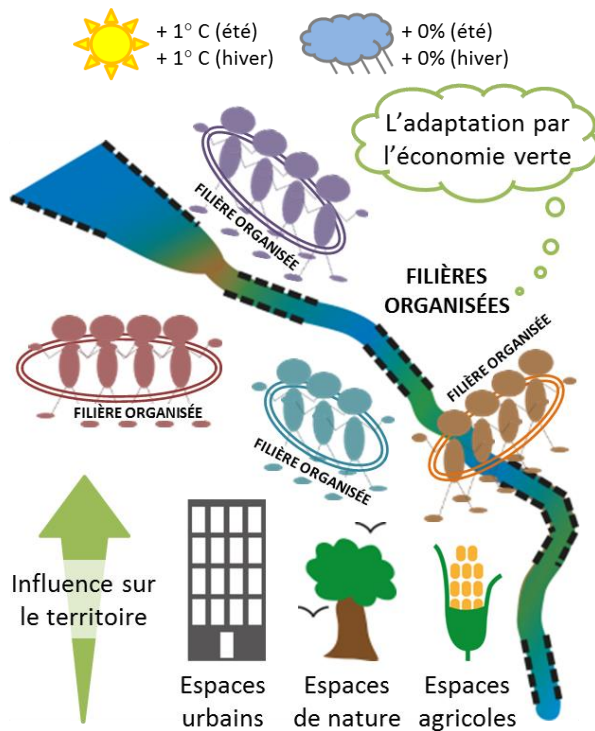


FIG. X. Schéma représentatif du scénario n°3.

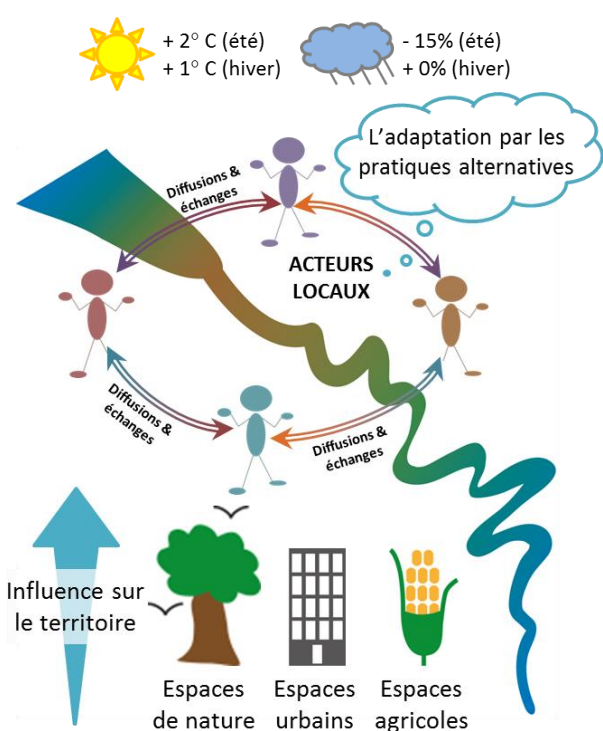


FIG. XI. Schéma représentatif du scénario du scénario 4

3.4 Scénario n°4 : Une voix pour l'écosystème – Une adaptation par les pratiques alternatives

En 2050 (voir la FIG. XI), la dynamique du fleuve et ses aléas sont acceptés. Une nouvelle logique de gestion et de gouvernance est partagée sur l'ensemble du territoire : l'adaptation à la nouvelle dynamique de l'ensemble fluvio-estuarien s'impose et se substitue à la volonté de la contraindre. Étiages sévères et crues se succèdent pour façonner un hydrosystème qui se régénère périodiquement et dont les débits moyens diminuent « en dents de scie ». La diminution de la qualité écologique ralentit mais reste préoccupante. La variation des régimes hydrologiques est devenue une préoccupation centrale pour la population. Les modes de vie et de consommation changent et les rares aménagements s'effectuent dans le respect de l'environnement. L'adaptation est impulsée par des pionniers dont les pratiques alternatives se diffusent puis servent de modèle sur l'ensemble du territoire. Une nouvelle approche intégrative de l'environnement est prônée par les gestionnaires qui favorisent et soutiennent la mise en œuvre d'options d'adaptation.

Les scénarios ont vocation à éclairer les politiques publiques et les décisions locales à moyen terme. Ils ont été mis en discussion avec les acteurs du territoire à l'occasion de deux journées organisées en avril et en mai 2015, respectivement sur l'estuaire de la Gironde et sur la Garonne moyenne ; puis lors du colloque de restitution finale du projet en octobre 2015. Ces trois journées ont permis porter au débat les enjeux soulevés par ces scénarios et

d'animer des discussions publiques et pluralistes sur les politiques à privilégier pour s'adapter aux variations des régimes hydrologiques sur le territoire de l'environnement fluvio-estuarien Garonne-Gironde.

C.

Rapport scientifique

1 Introduction

1.1 Problématique scientifique et état de l'art

Le fonctionnement des écosystèmes est désormais indissociable de la dynamique des activités humaines (Vitousek, 1997). Or, il est aujourd'hui établi que, depuis quelques décennies, des changements environnementaux à l'échelle locale et globale - parmi lesquels le changement climatique, un accroissement continu de la surface des terres agricoles, la surexploitation des ressources naturelles, la pollution chimique et l'émergence de nouveaux besoins de consommation - menacent la durabilité même de ces écosystèmes en modifiant l'équilibre entre les activités humaines et leur fonctionnement écologique (Folke et al., 2005). La structure et les propriétés des écosystèmes sont menacées à large échelle (Loreau et al., 2004 ; Fox, 2007). Or, la complexité des interactions écologiques et de la relation entre biodiversité et fonctionnement dans les écosystèmes marins, côtiers (Sala & Knowlton, 2006 ; Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010) et estuariens (Elliott & Quintino, 2007) rend nécessaire la mise en perspective fonctionnelle des observations sur l'évolution de la structure des assemblages biologiques.

La pertinence et l'efficacité des plans de mesures qui devront être mis en place pour atténuer les effets des Changements Globaux et gérer ou restaurer la qualité écologique des écosystèmes aquatiques dépendra de notre capacité à (1) interpréter nos observations sur la structure des communautés en termes de propriétés fonctionnelles, (2) caractériser les trajectoires passées des écosystèmes pour construire des programmes de gestion basés sur des scénarios prospectifs et enfin (3) intégrer les effets des Changements.

Les écosystèmes estuariens et côtiers sont particulièrement vulnérables aux changements globaux (Hénocque & Denis, 2001 ; Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010). Concentrant aujourd'hui près de 75 % de la population humaine, ils sont de plus en plus exploités et contaminés (Budzinski et al., 1997 ; Matthiessen & Law, 2002) et leur biodiversité est largement impactée. Il est aujourd'hui établi que le réchauffement global a ainsi conduit à une migration latitudinale majeure d'espèces de planctons (Beaugrand, 2009) ou de poissons (Perry et al., 2005 ; Hermant et al., 2010 ; Nicolas et al., 2011). L'émergence de la problématique du changement climatique a conduit à interroger les processus de reconfiguration des diverses composantes et fonctionnalités des éco-sociosystèmes (Décamps, 2010) sous l'influence des changements globaux (Turner et al., 2003).

Les outils règlementaires envisagés pour atténuer les effets des activités humaines sur les écosystèmes, et notamment sur les écosystèmes côtiers et estuariens (DCE Eu, 2000 ; DCSMM Eu, 2005) prévoient d'évaluer l'état écologique des écosystèmes. Or, bien que l'état écologique d'un écosystème devrait nécessairement être considéré comme l'expression de la qualité de sa structure et de son fonctionnement (De Jonge et al., 2006), les exigences

normatives des différentes directives règlementaires ont conduit à l'élaboration d'indicateurs de qualité essentiellement basés sur des éléments structuraux ou taxonomiques plutôt que sur des éléments relatifs au fonctionnement ou au rôle fonctionnel des écosystèmes (De Jonge et al., 2006 ; Hering et al., 2010). Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de changer de paradigme, d'aller plus loin dans l'analyse (Hering et al., 2010) et de mieux expliciter le lien entre biodiversité/structure et processus/fonctionnement à l'échelle des écosystèmes (Hillebrand & Matthiessen, 2009) pour ainsi mieux appréhender la trajectoire fonctionnelle des écosystèmes estuariens dans le contexte du changement global (Sala & Knowlton, 2006).

La prise en compte de l'histoire des trajectoires est une démarche classique en sciences humaines et sociales pour aborder les tensions entre phénomènes hérités (structures, institutions) et la marge de manœuvre des acteurs. Cette tension est notamment abordée par la notion de « dépendance au sentier » en économie institutionnelle (David, 1985) et en analyse des politiques publiques (North, 1990 ; Pierson, 2000). La sociologie pragmatique permet également de l'aborder en étudiant comment les acteurs et les structures se reconfigurent en situation (Corcuff, 1995). Ces approches militent pour une approche plurielle des trajectoires et du fonctionnalisme en tant qu'interprétations du passé. Aujourd'hui les méthodes de construction de scénarios sur des socio-écosystèmes ne tiennent pas compte de ces différences d'interprétation et confinent le social à la périphérie des modèles bio-physiques (pour une synthèse voir notamment Fernandez et al., 2011).

1.2 Contexte, intérêt et enjeux

Les travaux d'implémentation de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et des réflexions autour de la mise en place de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) ont souligné plusieurs limites dans notre appréhension de l'état écologique des écosystèmes et de son évolution dans le contexte du Changement Global. Ces limites ont été soulignées par différents auteurs (ex. De Jonge et al., 2006) et par plusieurs acteurs et gestionnaires (cf. synthèse du projet BEEST : Lévêque et al., 2011). Les conclusions du projet BEEST¹, financé dans le cadre du programme LITEAU III, concernent en particulier (1) la nécessité d'une appréhension plus fonctionnelle des écosystèmes, (2) l'intérêt de raisonner en termes dynamiques sur la base de scénarios plutôt que de façon statique sur la base de références et (3) le besoin de prendre en compte les évolutions dans le cadre des Changements Globaux. Enfin, on peut souligner que le projet BEEST a notamment mis en évidence le besoin de développer des indicateurs du fonctionnement hydromorphosédimentaire (HMS) des estuaires, ce qui implique une meilleure compréhension de l'évolution physique du milieu, qui soutient le développement et le fonctionnement de l'écosystème (Le Hir et al., 2011).

¹ Vers une approche multicritère du Bon État écologique des grands ESTuaires : Seine, Loire et Gironde

TRAJEST apporte des éléments de réponse sur ces différents points dans le cadre des écosystèmes estuariens. Il se veut ainsi une contribution, basée sur l'acquisition, la synthèse et la structuration de connaissances écologiques, vers la mise en œuvre de démarches interdisciplinaires de consilience et la constructions de scénarios prospectifs nécessaires à la gestion des écosystèmes complexes (Coreau et al., 2009).

Le projet BEEST (Lévêque et al., 2011) a, par ailleurs, mis en avant des différences dans l'évolution passée des grands estuaires français, Seine, Loire et Gironde qui laissent supposer des réponses fonctionnelles différentes et des histoires futures contrastées du fait notamment d'enjeux environnementaux différents (ex. régulation des débits, marinisation et exploitation des ressources halieutiques sur la Gironde ; aménagement/restauration d'habitats et qualité de l'eau sur la Seine).

Le cas d'étude proposé est l'estuaire de la Gironde. Plus vaste estuaire d'Europe de l'Ouest (Lobry et al., 2003), il est exposé depuis des décennies à une diversité d'impacts environnementaux liés aux activités humaines (pêche, dragage, industries, pollutions chroniques...) et aux Changements Globaux (élévation de la température de l'eau, baisse des débits). D'importantes modifications de la structure des communautés ont été mises en évidence ces dernières années sous l'effet du changement global à différents niveaux trophiques : sur le compartiment zooplanctonique (David et al., 2005 ; David et al., 2007c), sur les crustacés (Béguer, 2009b) ou sur les poissons (Delpech et al., 2010 ; Pasquaud et al., 2012b). Les conséquences de ces changements, de nature à modifier le fonctionnement et les processus au sein du réseau trophique dans son ensemble tel qu'il a été défini dans différents travaux (David et al., 2006a ; David et al., 2006b ; Lobry et al., 2008 ; Pasquaud et al., 2010a ; Pasquaud et al., 2010b), n'ont encore jamais fait l'objet d'études intégrées. L'estuaire de la Gironde fait notamment l'objet d'un suivi écologique régulier depuis plusieurs décennies autorisant la mise en œuvre d'études intégrées sur son évolution et de plusieurs programmes interdisciplinaires de recherche traitent actuellement des différents enjeux environnementaux le concernant. Dans le même temps, un suivi de la pêche professionnelle dans le système fluvio-estuarien Gironde-Garonne-Dordogne est effectué depuis plus de trois décennies, à partir d'enquêtes annuelles qui permettent de produire des indicateurs de socio-économie et de biologie des pêches. Les évolutions temporelles des pêcheries et des principales espèces d'intérêt halieutique ont été analysées (Beaulaton, 2008 ; Rapports annuels à EDF, dernier sorti : Girardin & Castelnaud, 2010). Des enquêtes halieutiques et socio-économiques de plus vaste ampleur ont été menées sur les années de référence 1982, 1989 et 2000, la première étant doublée d'une étude historique et règlementaire (Guchan, 1988 ; Castelnaud & Babin, 1992 ; Babin, 1993 ; Castelnaud & Cauvin, 2002). Cependant, jusqu'à présent, aucune mise en perspective des indicateurs biologiques, halieutiques et socio-économiques n'a été effectuée, de même qu'aucune étude globale de l'évolution de la pêche professionnelle en Gironde n'a été réalisée, depuis le début de ces suivis et enquêtes.

1.3 Démarche générale et plan du rapport

La démarche générale du projet se situe dans le cadre d'une analyse de la trajectoire de l'écosystème estuarien telle qu'elle peut être définie par Blandin (1986) ou telle qu'elle s'entend en écologie de la restauration (http://www.ser.org/pdf/SER_Primer_in_French.pdf) ou en écologie du paysage (Bürgi & Gimmi, 2007). Dans ce cadre, une trajectoire écologique est celle qui décrit le chemin évolutif d'un écosystème au cours du temps. La trajectoire englobe tous les attributs écologiques – biotiques et abiotiques – d'un écosystème. Dans TRAJEST, la trajectoire de l'estuaire sera analysée en considérant différents niveaux : habitat, dynamique hydro-morpho-sédimentaire, réseau trophique et contexte socio-économique.

Dans ce contexte, ce travail s'est articulé en deux temps. Il a consisté à (1) analyser l'histoire récente (depuis le début des années 1980) de l'écosystème afin (2) de fournir des éléments de perspectives s'appuyant sur la compréhension de son évolution passée. Plus particulièrement, ce projet a permis d'explorer des hypothèses théoriques d'évolution du contexte social et environnemental. Ces éléments ont nourri des réflexions spécifiques portées par le projet ANR ADAPT'EAU -coordonné par Denis Salles (Irstea)- en relation avec les acteurs locaux. En particulier, c'est dans le cadre d'ADAPT'EAU qu'ont été construits des scénarios prospectifs qui décrivent l'état, le fonctionnement et la dynamique de l'environnement fluvio-estuarien (EFE) Garonne-Gironde. La partie des scénarios relative à l'estuaire s'appuie essentiellement sur les connaissances spécifiques acquises dans TRAJEST. Cette approche prospective conduite conjointement dans TRAJEST et ADAPT'EAU constitue la seconde partie de ce rapport scientifique.

Aussi se rapport s'articule-t-il assez classiquement en deux parties.

La première partie est une partie rétrospective. Elle présente l'évolution du socio-écosystème selon plusieurs angles saillants : (1) l'évolution HMS et les habitats, (2) les communautés écologiques (avec un focus sur l'ichthyofaune) et le réseau trophique et (3) les dynamiques socio-économiques et, en particulier, la filière pêche-aquaculture.

La seconde partie présente la démarche prospective et les 4 scénarios établis dans le cadre d'ADAPT'EAU sur l'EFE Garonne-Gironde en détaillant et complétant la partie relative à l'estuaire de la Gironde.

Enfin, un chapitre de synthèse présente les éléments saillants de la prospective qui sont des pistes de recherche pour demain.

1.4 Articulation avec des projets achevés ou en cours

Ce projet s'inscrit naturellement dans le prolongement du projet BEEST financé dans le cadre de LITEAU III. Porté par certaines des équipes structurantes de BEEST, il se fonde sur les principales recommandations et focalise sur certaines des thématiques-clé issues du projet.

TRAJEST combine à la fois des propositions de recherches propres et innovantes et des éléments issus d'autres projets de recherches voisins afin de proposer un corpus de recherche cohérent autour de la problématique des trajectoires d'écosystèmes estuariens.

En particulier, des collaborations étroites seront entretenues avec les équipes impliquées dans différents projets partenaires :

- le projet ANR ADAPT'EAU coordonné par Denis Salles (Irstea) avec lequel des interactions fortes sont envisagées au travers de transferts de résultats et de compétences ;
- le projet MESSCENE financé par la Fondation de France et coordonné par le GIP Seine Aval dont certains outputs sont ont été intégrés dans ce travail ;
- les projets Trajectoires, Usages et Dynamiques de l'Estuaire et des Zones Humides(DYEZH) (présenté au Conseil Régional d'Aquitaine dans le cadre du Réseau de Recherche Littorale Aquitaine (RRLA) coordonné par Aldo Sottolichio, EPOC) et CPER GP 234 5 « Recherches sur l'évolution de l'écosystème estuarien » (coordonné par Philippe Boët, Irstea) dont les demandes de financement sont actuellement en cours d'évaluation au Conseil Régional d'Aquitaine ;

D'un point de vue de l'insertion dans la dynamique de recherche régionale, ce projet permet un renforcement des collaborations avec l'Université de Bordeaux. La thématique développée dans le projet s'insère tout à fait dans les problématiques scientifiques mises en avant dans le cadre du LABEX COTE (COntinental To coastal Ecosystems: evolution, adaptability and governance).

1.5 Principaux livrables

Au-delà des outputs et des livrables scientifiques propres à chaque action, 3 livrables principaux peuvent être associés à ce projet.

En premier lieu, le travail de thèse de Xavier Chevillot s'inscrit complètement dans TRAJEST. Son manuscrit devrait être déposé en décembre 2015 et sa soutenance est programmée en février/mars 2016. Le manuscrit et les publications associées sont des outputs scientifiques structurants du projet.

En deuxième lieu, les scénarios issus de la démarche prospective conjointe ADAPT'EAU/TRAJEST sont des éléments de débat publique et donc de transfert opérationnel

indéniable. Ils ont fait l'objet de plusieurs séminaires d'échanges publics avec les acteurs du territoire dont certains ont vocation à s'en emparer.

Enfin, plusieurs actions de communication à différentes échelles (gestionnaires, élus, grand public) ont été menées dans le cadre de ce projet et à partir des connaissances acquises au cours de ce projet.

Ces sorties sont listées dans la partie D du rapport Final.

2 Trente ans de changements dans l'estuaire de la Gironde. Evolution rétrospective du socio-écosystème.

Trois angles sont ici mis en avant pour décrire l'évolution du socio-écosystème estuarien : (1) l'évolution HMS et les habitats, (2) les communautés écologiques (avec un focus sur l'ichtyofaune) et le réseau trophique et (3) les dynamiques socio-économiques et, en particulier, la filière pêche-aquaculture.

2.1 Evolution des caractéristiques HMS et des habitats (Sottolichio A. et Lobry J.)

2.1.1 Introduction

Plusieurs pistes ont été évoquées pour mettre en avant une approche plus fonctionnelle et opérationnelle de l'évaluation de la qualité écologique des estuaires. Parmi ces pistes, les scientifiques soulignent la nécessité de mieux considérer la morphologie des estuaires et les facteurs-clé de la dynamique hydrologique et sédimentaire qui en découlent (bathymétrie, faciès sédimentaire, salinité, courantologie...).

L'analyse des caractéristiques HMS et de leur évolution est un enjeu majeur pour comprendre l'évolution des habitats estuariens. Dans les estuaires très turbides comme la Gironde, l'envasement induit est à l'origine des principales modifications morphologiques de l'estuaire à moyen et long-terme. De plus, cela correspond, du point de vue écologique, à une modification des caractéristiques de l'habitat. Dans le cadre de ce projet, il s'agira de caractériser les grandes évolutions hydro-morphologiques de l'estuaire au cours des dernières décennies. Des cartes anciennes du milieu (datant des années 1960, 1970, 1984 et 1994) ont été mises à la disposition d'EPOC par le Port de Bordeaux (GPMB), et numérisées. Elles seront analysées afin de caractériser l'évolution de la morphologie au cours des dernières décennies, basée sur des indicateurs tels que les sections mouillées, les surfaces intertidales et les bilans érosion-dépôt.

Ces facteurs ont un rôle déterminant sur le type de faune que l'on peut rencontrer à un endroit donné de l'estuaire et sur l'utilisation du milieu par cette faune. Ainsi, par exemple, les vasières (milieux vaseux et/ou sablo-vaseux) intertidales (de faible profondeur, soumis au balancement des marées) saumâtres (de salinité moyenne) des estuaires sont des milieux privilégiés par les juvéniles de nombreuses espèces de poissons marins pour assurer une partie de leur croissance. On parle du rôle de nourricerie de ces habitats estuariens particuliers. Le rôle fonctionnel des habitats (ex. habitats de nourricerie pour les poissons marins) est important à considérer dans l'évaluation de la qualité écologique des milieux estuariens.

A l'habitat « physique » est associé un habitat « fonctionnel ». Pour passer de l'un à l'autre, il est nécessaire de caractériser les fonctions écologiques associées aux différents habitats estuariens. Un outil de modélisation écologique spatialisé baptisé SIG « Habitats Fonctionnels » (SIG-HF) a été développé sur la Gironde par Irstea, notamment dans le cadre du projet BEEST. Ce Système d'Information Géographique (SIG) est destiné à cartographier les fonctionnalités écologiques majeures associées à la mosaïque d'habitats estuariens. Dans un premier temps, dans le cadre de ce projet, le développement de cet outil a été consolidé. En particulier, la cohérence des cartographies obtenues avec les données d'observation disponibles sur l'estuaire a été analysée afin de valider l'outil. La sensibilité des cartes obtenues à certains paramètres d'habitats utilisés pour la cartographie a été testée afin d'évaluer l'incertitude associée aux cartes produites. Dans le cadre de TRAJEST, on se focalisera en premier lieu sur la fonction de nourricerie pour l'ichtyofaune.

En combinant les deux types de résultats, des hypothèses sur l'évolution des habitats écologiques et « fonctionnels » ont pu être posées.

2.1.2 Approches mises en œuvre

2.1.2.1 Evolution des caractéristiques HMS

Sur le plan méthodologique, cette étude s'appuie sur la comparaison de cartes bathymétriques anciennes du milieu mises à disposition par le Port de Bordeaux, qui ont été numérisées et sont analysées par SIG (initialement 4 cartes – 1962, 1970, 1980, 1994 puis une cinquième – 1953). L'analyse de ces cartes permet de retracer l'évolution morphologique depuis les années 1950 (variations bathymétriques et bilans sédimentaires). Les données des marégraphes disposés dans l'estuaire ont aussi été analysées. Le Port de Bordeaux a mis à disposition ses données d'archives. Avant les années 1990, les enregistrements de la marée sont imprimés sur bande, il a été donc nécessaire de les scanner puis de les numériser. Afin de faire une analyse quantitativement pertinente, il faut disposer de l'enregistrement annuel complet, ce qui représente un travail de préparation conséquent. Pour cette raison, ont été analysées seulement les années 1953 et 1971, ainsi que les marégraphes du Verdon (embouchure) et le marégraphe de Bordeaux, qui celui situé le plus amont dans l'axe estuarien (à 100 km de l'embouchure). A ces deux situations anciennes, nous avons ajouté l'analyse de deux années plus récentes, 2005 et 2014. Pour ces deux situations les enregistrements sont déjà sous forme numérique et n'ont nécessité aucune préparation préalable.

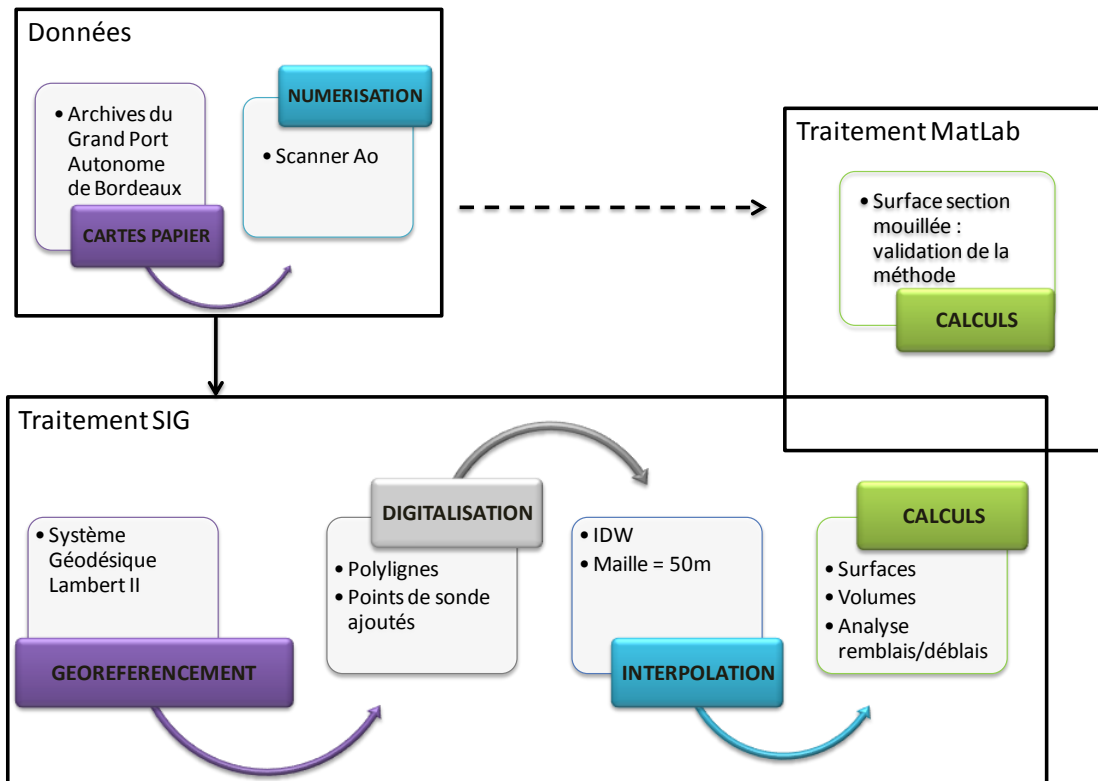


Figure 1. Schéma conceptuel de la démarche méthodologique d'analyse des cartes bathymétriques

Tableau 1. Années utilisées pour l'analyse d'évolution HMS

	1953	1962	1971	1980	1994	2005	2014
bathymétrie	x	x	x	x	x		
marée	x		x			x	x

A la vue du Tableau 1, on s'aperçoit que les données de bathymétrie et de marée ne sont pas parfaitement synchrones, ce qui est une des limites de cette étude, qu'il faut considérer comme une première étape avant une analyse rétrospective plus fine de l'estuaire.

Le travail d'analyse bathymétrique avait bénéficié d'un premier stage M2 réalisé en dehors du projet TRAJEST en 2012. Il a été poursuivi lors d'un deuxième stage de M2 en 2013, puis d'un stage de M1 de 2015. Le second stage M2 a permis de compléter l'analyse morphologique avec la carte bathymétrique de 1953, d'affiner les résultats et de les vérifier en croisant les données des marégraphes et de la littérature. Le stage M1 a quant à lui permis de terminer la digitalisation des marégraphes anciens, afin de parvenir à une analyse quantitative plus fiable.

2.1.2.2 Caractérisation des fonctions écologiques associées aux différents habitats estuariens

Le principe général repose sur l’articulation d’une double démarche cartographique et écologique. Il s’agit, d’une part, de mettre en place des outils de cartographie basés sur des données pertinentes du milieu et, en particulier, la bathymétrie, le faciès sédimentaire, la salinité, la turbidité, les courants. D’autre part, il s’agit de développer une méthode simple, robuste et reproductible de modélisation écologique des habitats utilisés par les espèces considérées dans l’outil pour réaliser une fonction particulière (ex. habitat de nourricerie pour les poissons plats tels que la sole).

L’objectif est de poursuivre le développement et de mettre en œuvre un outil de modélisation écologique spatialisé baptisé SIG « Habitats Fonctionnels » (SIG-HF) destiné à cartographier les fonctionnalités écologiques majeures associées à la mosaïque d’habitats estuariens.

La démarche SIG HF est structurée en 4 grandes étapes (Figure 2).

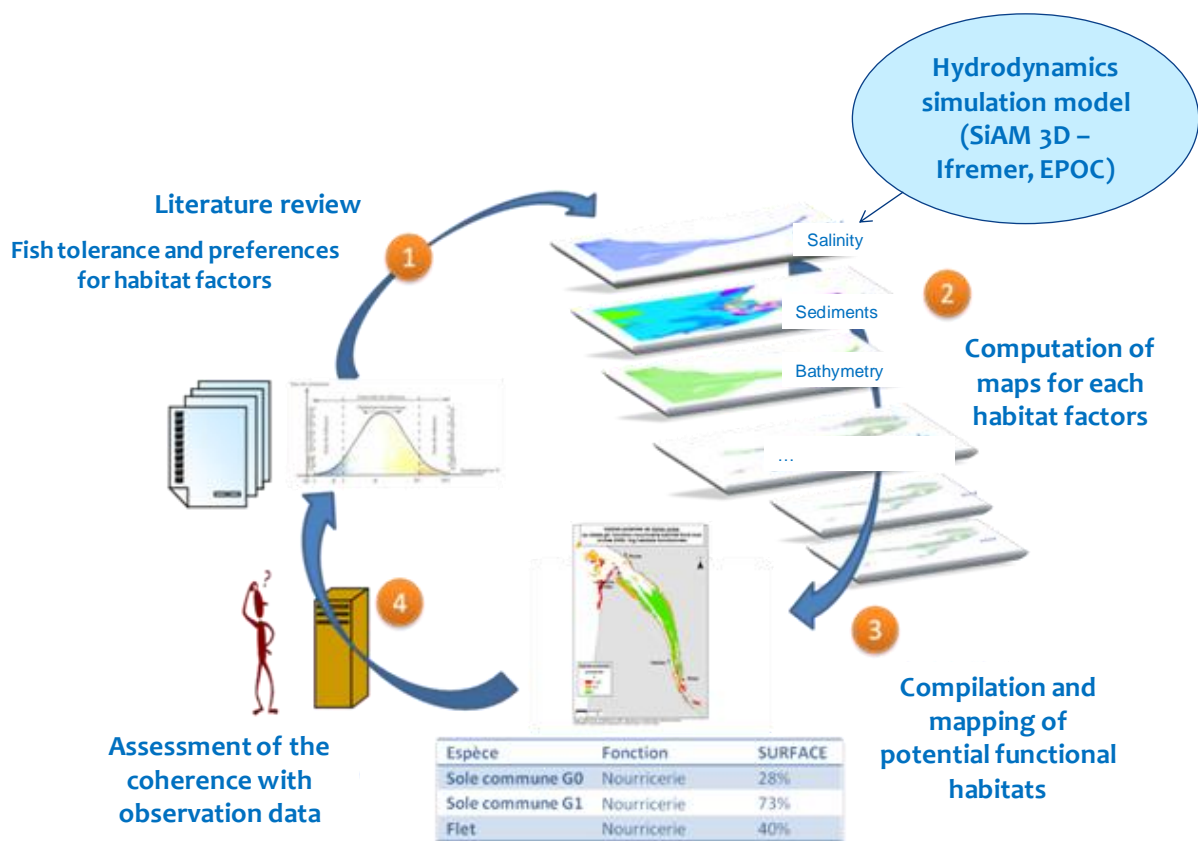


Figure 2. Schéma conceptuel de la démarche méthodologique mise en œuvre dans le SIG-HF

Dans un premier temps, le développement de cet outil a été consolidé, notamment en ce qui concerne les données de salinité. La cartographie de l’habitat nécessite de pouvoir confronter les préférences écologiques des espèces pour les principaux facteurs d’habitat

avec la valeur de ces facteurs dans l'estuaire en tenant compte des dynamiques spatio-temporelles. Or, pour les facteurs hydrologiques, et en particulier la salinité, il est nécessaire de recourir à des sorties de modélisation hydrodynamique. Le modèle SiAM-3D a donc été utilisé comme source de données. Le langage du modèle, la structure et le format des données en sortie n'étant pas directement compatible avec le SIG mis en place, il a été nécessaire de construire des routines permettant de compiler les sorties de SiAM dans un format compatible avec le SIG.

La cohérence des cartographies obtenues avec les données d'observation disponibles a été analysée et permet, en partie, de valider l'outil. La sensibilité des cartes obtenues à certains paramètres d'habitats utilisés pour la cartographie a été testée.

Ce travail a fait l'objet du stage de M2 puis du CDD de Flavin Fauvel financé dans le cadre de ce projet. Les développements numériques et en particulier l'articulation entre le SIG-HF et SiAM ont fait l'objet d'un co-financement de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Le rapport complet sur ce travail est fourni en Annexe 1.

2.1.3 Résultats

2.1.3.1 Bilans sédimentaires

Les dynamiques HMS ont significativement évolué au cours du temps. La comparaison des cartes bathymétriques ne montre pas de modifications majeure de la morphologie globale de l'estuaire de 1953 à 1994, hormis une mobilité importante dans la zone autour des îles et des bancs au centre de l'estuaire. Cependant, la comparaison quantitative de bathymétries montre que différents épisodes peuvent être distingués. Il apparaît ainsi

- Entre 1953 et 1962 : un creusement global de l'estuaire
- Entre 1962 et 1970 : un bilan global qui montre plutôt une tendance à l'envasement
- Depuis 1970 : un creusement net

La comparaison des différentiels bathymétriques (Figure 3) montre qu'il y a globalement une remontée progressive de la zone de dépôt maximum (ZMD).

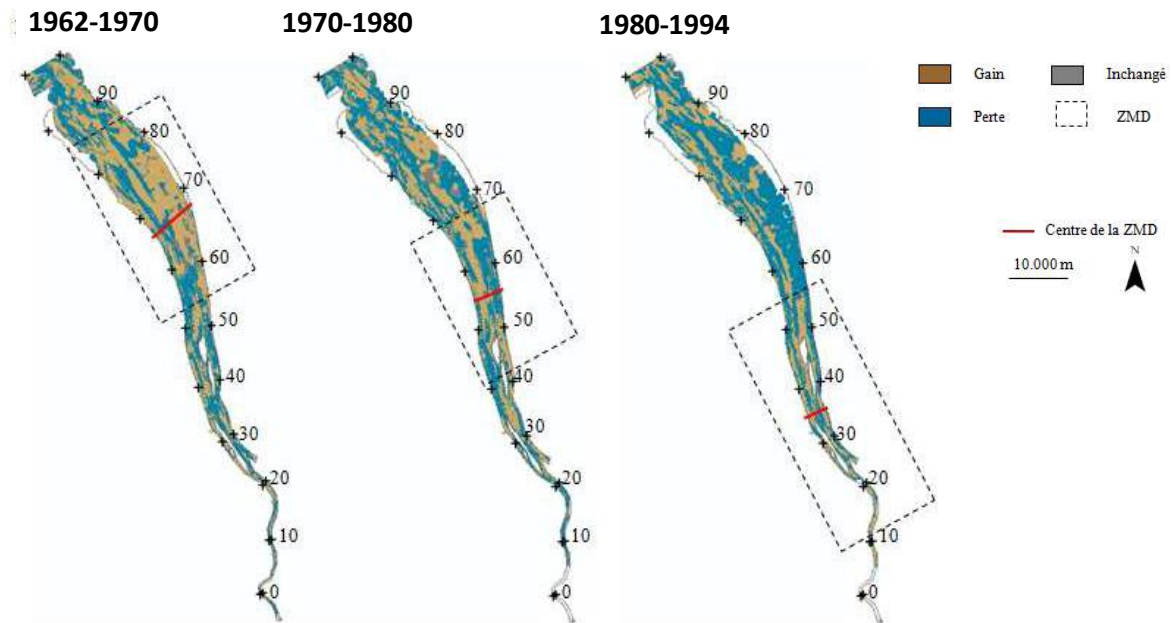


Figure 3. Bilans sédimentaires issus de l'analyse des cartes bathymétriques. Indique un déplacement progressif en accord avec la dynamique d'envasement de la partie amont

L'analyse des sections mouillées (Figure 4) montre qu'entre 1953 et 1994 l'évolution se fait selon une succession des zones en sédimentation-érosion, avec une plus forte érosion dans le secteur médian de l'estuaire, compris entre les km 40 et 70 en aval de Bordeaux. Ce résultat apparaît relativement contre-intuitif. En effet, l'évolution classique tendanciel de ce genre de système nous enseigne que l'estuaire est sensé s'envaser. Cependant, il apparaît que le bilan net montre un creusement. Nous pouvons déduire un export massif de sédiments vers l'océan, ou bien une remontée et un envasement important en amont, dans les sections fluviales de la Garonne et de la Dordogne, zones non couvertes par les bathymétries analysées. Les tendances du débit fluvial indiqueraient plutôt une remontée du bouchon vaseux et donc des zones de sédimentation.

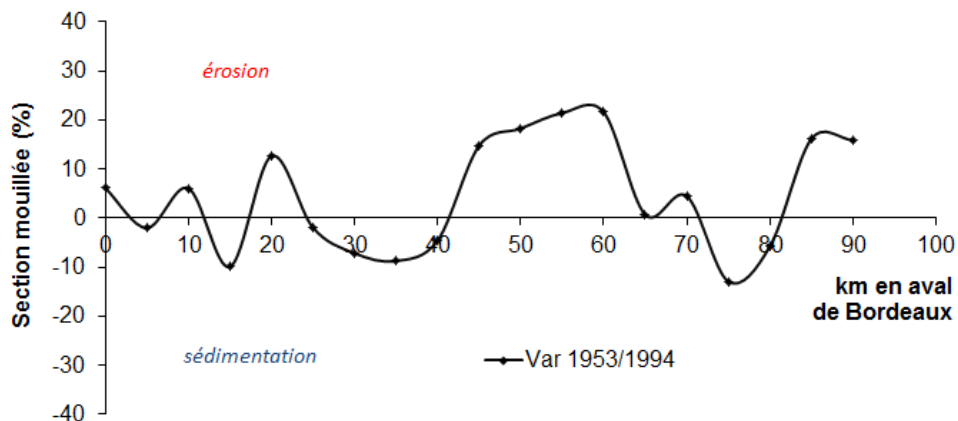


Figure 4. Evolution globale de la section mouillée de 1953 à 1994, en % par rapport à la section de 1953.

L'analyse des sections mouillées par années, a montré deux périodes particulières avec une inversion de tendance très nette (Figure 5). Entre 1962 et 1970, la sédimentation se fait essentiellement en aval de l'estuaire (km 45 à 90), tandis que le secteur amont (km 5 à 45) est en érosion. Entre 1980 et 1994 la tendance est exactement inverse, avec érosion des secteurs aval et une sédimentation en amont.

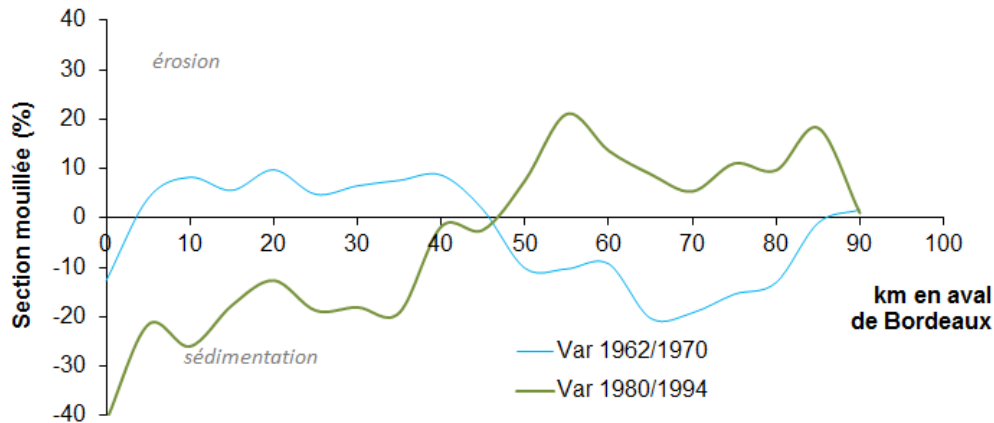


Figure 5. Evolution relative de la section mouillée de 1962 à 1970 et de 1980 à 1994

Ces modifications morphologiques peuvent être attribuées, en premier lieu, aux modifications du régime fluvial, en particulier l'intensification des étiages, et à la remontée progressive du bouchon vaseux qui en découle. En effet, ces deux tendances ont été maintes fois observées depuis les années 1980, et ont été récemment démontrées par analyse de données de turbidité à Bordeaux (Jalón-Rojas et al., 2015). Le lien entre ces tendances et les modifications morphologiques, même s'il est vraisemblable, est toutefois purement qualitatif, et le débit fluvial ne saurait expliquer à lui seul l'ensemble des tendances HMS. Par ailleurs, et malheureusement, les données bathymétriques permettant de vérifier cette hypothèse sont inexistantes ou inaccessibles, et cela est une limite pour la robustesse des conclusions de cette étude.

L'analyse de la marée, faite sur une période plus longue que la morphologie, a montré une évolution nette du marnage à Bordeaux entre 1953-2014 (Figure 6). Le calcul fait à partir des quatre situations retenues (1953, 1971, 2005 et 2014) montre un marnage moyen à l'embouchure (Le Verdon, ici nommée Pointe de Grave) de 3,21 m. Le marnage moyen à Bordeaux est de 4,65 m pendant la même période. Une évolution nette du marnage est constatée entre 1971 et 2005 à Bordeaux (Figure 6). En 1953-1971, le marnage moyen est de 4,20m, tandis qu'en 2005-2014 il est de 4,85m. L'augmentation est donc de l'ordre de 0,65 m, soit 13,3% en moyenne.

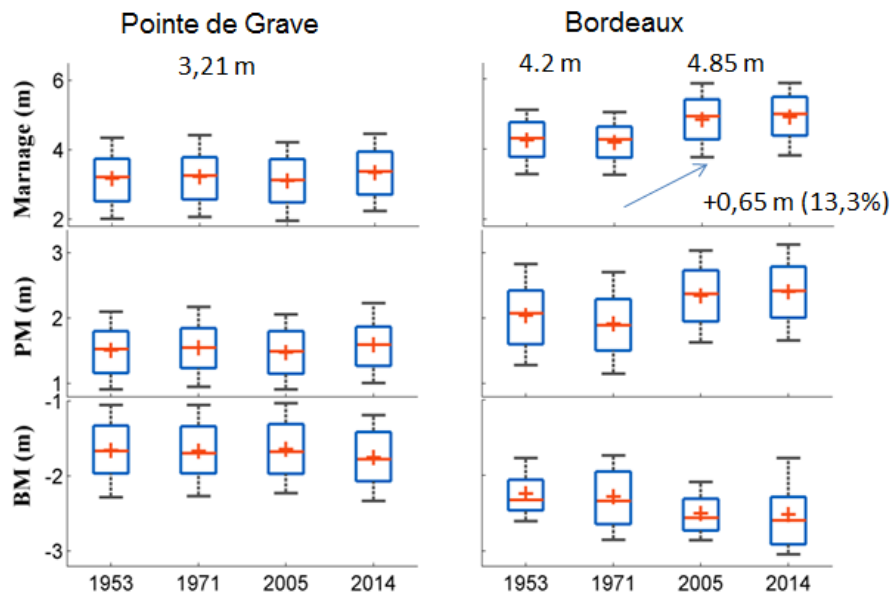


Figure 6. Evolution moyenne des marnages et des hauteurs de pleine mer (PM) et basse mer (BM) à la Pointe de Grave et à Bordeaux en 1953, 1971, 2005 et 2014.

L'asymétrie (différences de durée flot-jusant) ne montre pas de tendance analogue pendant cette période. En moyenne à Bordeaux, le flot dure 4,47h et le jusant dure 7,95h, avec une asymétrie quasiment constante pour les quatre périodes analysées (Figure 7).

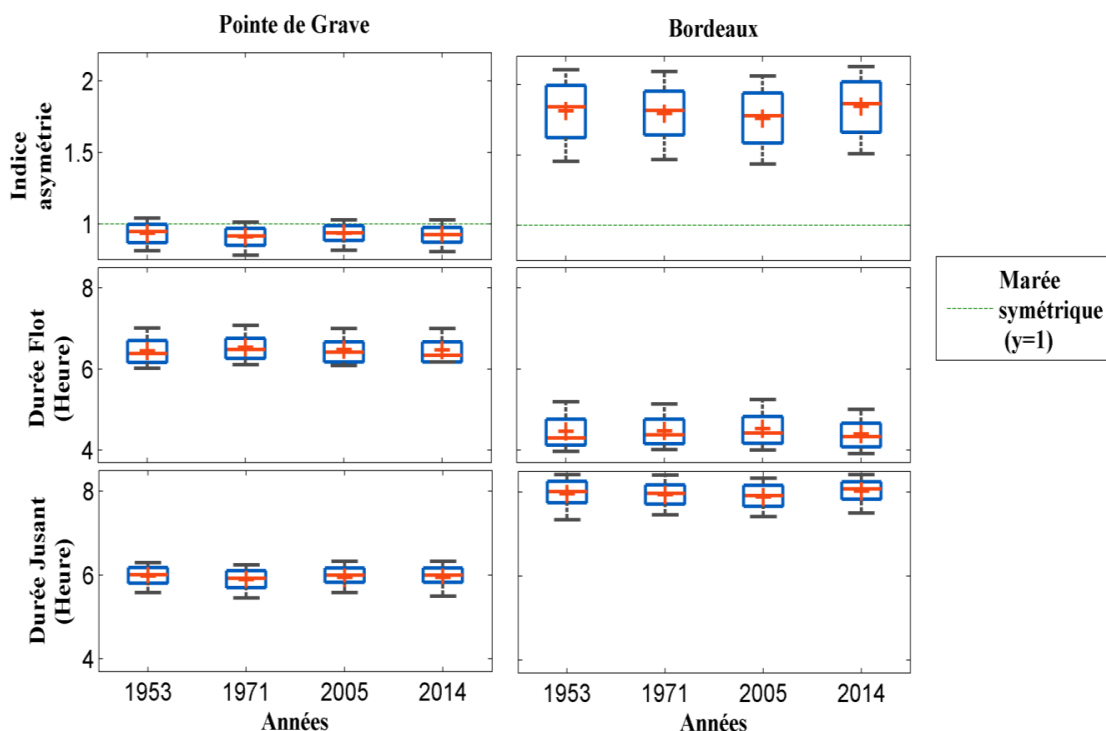


Figure 7. Evolution moyenne de l'asymétrie de la marée et des durées du flot et du jusant à la Pointe de Grave et à Bordeaux en 1953, 1971, 2005 et 2014.

Ces tendances pour la marée sont, évidemment, un résultat préliminaire. Elles montrent toutefois qu'une amplification de la marée s'est produite, entre 1971 et 2005, sans doute du fait des modifications de la morphologie de l'estuaire, favorisant l'effet de convergence (qui conduit à l'amplification) et réduisant l'effet de frottement sur les berges (qui conduit à l'amortissement de l'onde). La réduction du frottement pourrait être renforcée par la persistance en amont du bouchon vaseux. Par ailleurs, l'amplification de la marée aurait dû conduire à une intensification de l'asymétrie, mais cela ne s'est pas produit, ou du moins cela n'apparaît pas clairement dans les données analysées. L'une des explications possibles est le fait que l'estuaire ne s'est pas approfondi de manière significative en amont, ce qui tendrait à renforcer l'idée d'un envasement en amont.

L'ensemble de ces résultats sur la marée dessine un scénario complexe, avec des mécanismes conduisant à des effets antagonistes et non élucidés avec les données disponibles pour cette étude. En effet, l'augmentation du marnage est probablement favorisée par la remontée du bouchon vaseux, qui réduit les effets de frottement sur le fond. Ceci est de nature à renforcer les courants, et donc probablement à accentuer la remontée du bouchon vaseux. Cependant l'asymétrie (qui devrait augmenter en conséquence et renforcer cet effet) n'est pas plus forte. Le lien entre ces mécanismes reste donc à élucider, en vue notamment de l'édification de scénarios futurs vraisemblables.

2.1.3.2 Habitats fonctionnels et fonction de nourricerie

Les avancées ont essentiellement été d'ordre méthodologique. Elles ont concerné 4 points :

- La consolidation de la base de données du SIG-HF.

De nouvelles fiches-espèces ont été intégrées concernant des espèces spécifiques de l'estuaire de la Gironde (notamment le maigre *Argyrosomus regius*). Ces fiches-espèces précisent les seuils de tolérance et les préférences écologiques des espèces pour différents facteurs environnementaux utilisés pour la cartographie des habitats potentiels (en particulier : salinité, sédiment, bathymétrie...). Ces données sont intégrées dans la base de données du SIG-HF (cf. Figure 2).

- L'articulation avec les sorties SIAM-3D

Les données utilisées pour la salinité de l'estuaire proviennent de l'UMR EPOC et du modèle SIAM 3D.

Ce modèle, développé par Ifremer et adapté à la Gironde par Aldo Sottolichio, permet de simuler les conditions hydrosédimentaires (salinité, turbidité, courants) au sein de l'estuaire en fonction de différentes conditions de débit et de marée. Afin d'être en cohérence avec les données de l'habitat physique utilisées (cf. ci-dessus), des simulations ont été effectuées avec

les conditions de débit et de marées de l’année 1999. Le modèle a tourné avec des pas de temps pour l’enregistrement de 20 minutes. Le fichier de sortie est un fichier binaire. Afin de pouvoir le lire, il est transformé à l’aide d’un programme en FORTRAN en un fichier NetCDF (type de fichier développé et utilisé par les scientifiques) permettant l’accès aux métadonnées. A l’aide de ces métadonnées nous effectuons des requêtes statistiques via MATLAB afin d’obtenir les valeurs minimales, maximales ou bien moyenne de la salinité de surface ou de fond de l’estuaire en format .txt qui sont ensuite intégrées au SIG HF via QGIS

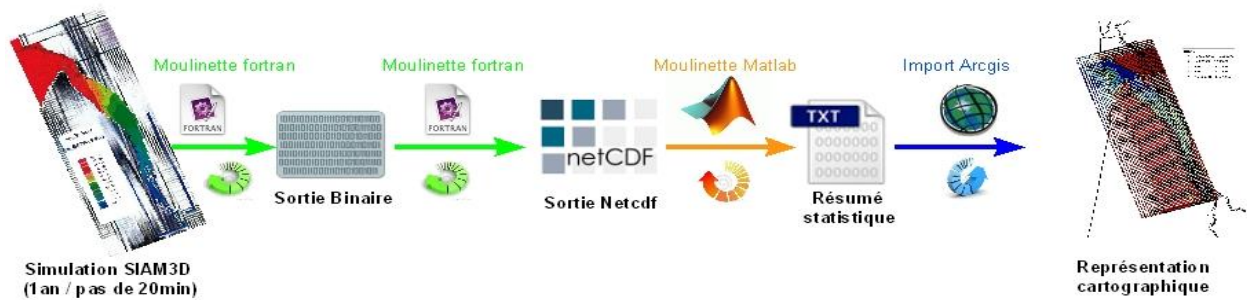


Figure 8 : Schéma conceptuel de l’intégration au SIG HF des données SIAM 3D.

- Cartographie des habitats de nourricerie pour les poissons plats (flet et sole)

Les habitats fonctionnels potentiels sont cartographiés. Une échelle de couleur, en fonction de la favorabilité, permet de visualiser rapidement les zones de l’estuaire où il y a le plus de chance de retrouver l’espèce désirée à un stade et pour une fonction donnée.

Dans les conditions de 1999, par exemple (Figure 9) on peut s’apercevoir que le flet juvénile pour la fonction de nourricerie sera plus probablement présent dans la zone amont de l’estuaire et quasi absent de la zone aval.

A l’inverse du flet, la sole va se répartir plutôt dans la partie centrale et aval de l’estuaire de la Gironde (Figure 9) lors de conditions de salinité moyenne de 1999.

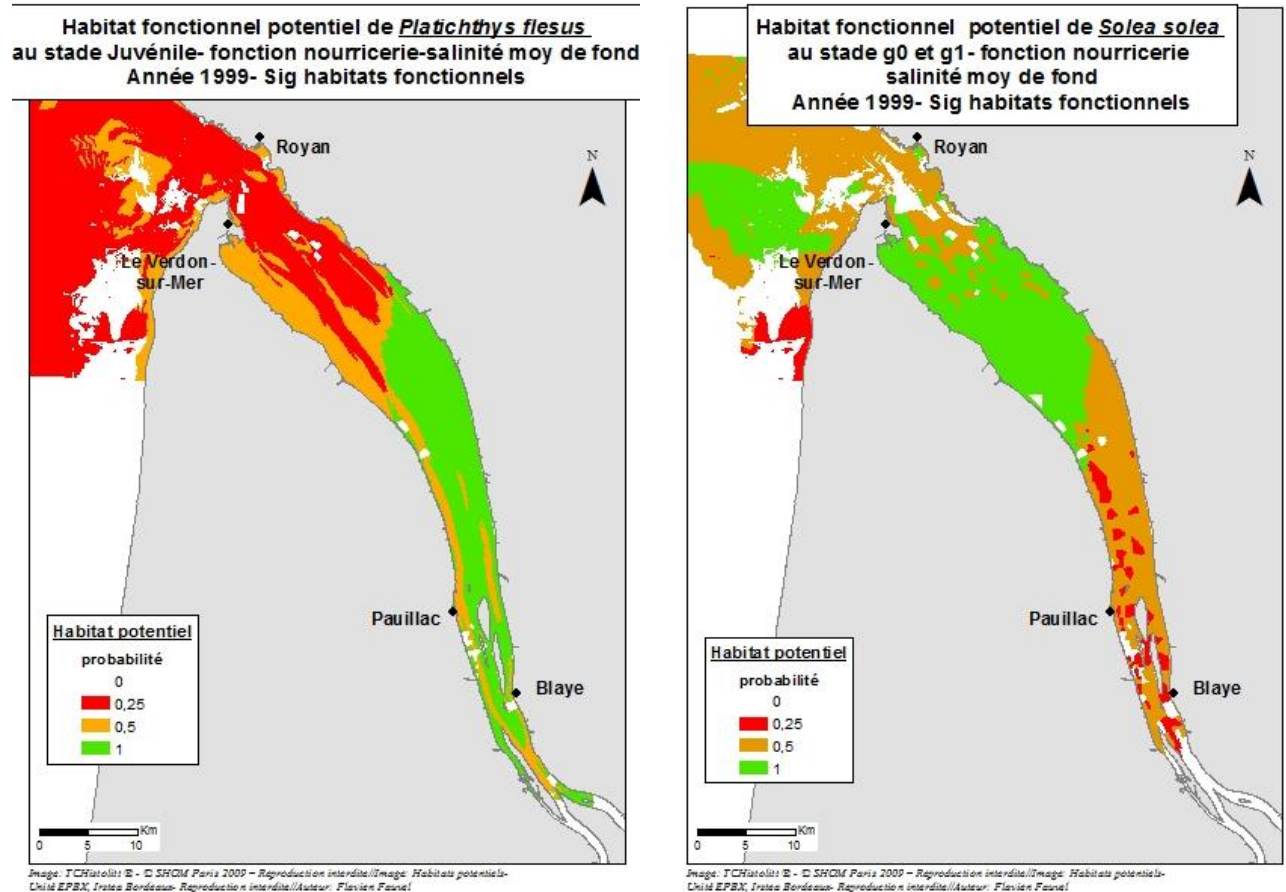


Figure 9 : représentation cartographique de l’habitat fonctionnel potentiel (à gauche) du flet, *Platicthys flesus*, (à droite) de la sole, *Solea solea*, au stade juvénile pour la fonction de nourricerie dans les conditions de salinité moyenne de fond de l’année 1999.

- Des analyses de sensibilité au choix d’agrégation des données environnementales (salinité) via des comparaisons avec les données d’observation (adéquation) et une analyse qualitative de la variabilité

Dynamiques par nature, les facteurs hydrologiques peuvent être appréhendés et cartographiés à différentes échelles temporelles et à différents niveaux d’agrégation. Plusieurs « format » ont été testés (cf. Figure 10) et leur cohérence a été analysée en lien avec les observations en milieu naturel réalisées lors des campagnes de suivis mises en œuvre dans l’estuaire par Irstea (Tableau 2). La fonction de nourricerie pour les poissons plats (sole et flet) a été choisie comme cas d’étude.

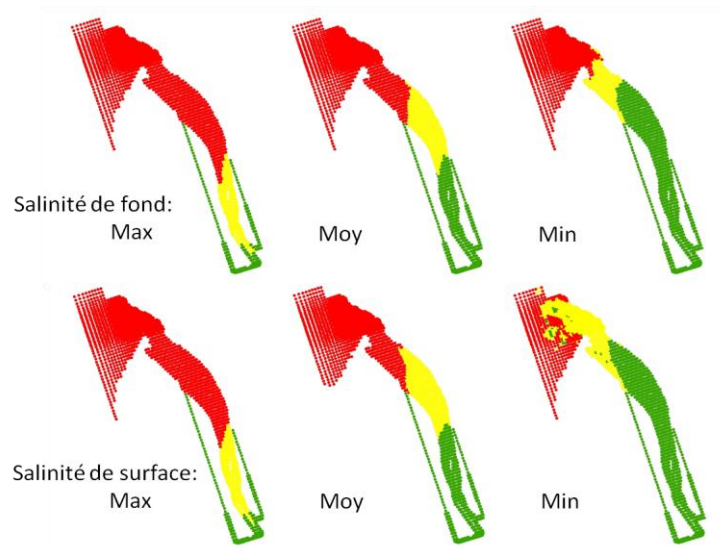


Figure 10 : Valeurs maximales, minimales et moyennes pour la salinité de fond et de surface de l’année 1999. Sorties modèle SIAM 3D. En vert zone oligohaline (salinité entre 0.5 et 5), en jaune zone mésohaline (salinité entre 5 et 15) et en rouge zone polyhaline (salinité supérieure à 15).

Tableau 2 : pourcentage de traits de chalut, contenant du flet ou de la sole, passant dans des zones de probabilités non nulles en fonction des salinités minimales, maximales ou moyennes de fond et de surface.

	min fond	moy fond	max fond	min surf	moy surf	max surf
sole	45%	100%	100%	36%	100%	100%
flet	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Les résultats obtenus mettent en avant la cohérence des observations avec les sorties du SIG-HF, tant pour le flet que pour la sole. Il est à noter que ce sont des habitats potentiels qui sont cartographiés et non des habitats observés ou réalisés, il est donc possible de ne pas repérer l’espèce dans une zone de forte probabilité. A l’inverse, il est moins envisageable de repérer l’espèce dans une zone où l’environnement est décrit comme défavorable pour l’établissement de l’espèce à un stade et une fonction donnés. Il reste cependant de nombreuses voies de développement méthodologique et technique avant que l’outil ne puisse être utilisé à des fins autres qu’exploratoires.

2.1.4 Synthèse

2.1.4.1 Perspectives de développement de l'outil SIGHF

Le SIG-HF est essentiellement un outil de synthèse des connaissances et de réflexion. Il permet d'établir un bilan des connaissances (et des manques de connaissances) sur l'écologie des principales espèces de l'estuaire mais aussi sur nos capacités à décrire le milieu sur le plan environnemental. Placé dans une démarche itérative d'évolution permanente, différentes améliorations sont envisagées telles que se baser sur des données d'observation plus précises ou encore des données environnementales (bathymétrie, sédimentologie) plus complètes (bathymétrie des zones intertidales connues).

A moyen terme, à partir des cartes anciennes utilisées dans le volet précédent, le SIG-HF devra être mobilisé pour établir une situation « historique » de la distribution et de la surface des habitats fonctionnels et la comparer à la situation actuelle afin de fournir une première approche de l'évolution de la fonctionnalité écologique du milieu au cours des dernières décennies. On se focalisera en premier lieu sur la fonction de nourricerie pour l'ichtyofaune. Malheureusement, au cours du projet TRAJEST, les développements et donc les analyses sur l'évolution des habitats fonctionnels n'ont pu être poursuivis. Et ce, pour des raisons de divers ordres.

En premier lieu, pour des raisons humaines. Depuis plusieurs années, il n'y a plus de géomaticien dans l'UR EABX d'Irstea dans laquelle était réalisée cette étude. Les aspects techniques se sont révélés plus complexes que prévu et tout n'a pu être résolu durant le CDD de Flavien Fauvel mobilisé sur cette tâche. D'autant que, en second lieu, la mobilisation de SiAM pour des analyses rétrospectives n'a finalement pas pu être mise en œuvre au même moment. En effet, le calibrage du modèle sur des bathymétries anciennes nécessitait des développements supplémentaires qui n'ont pu être implémentés à temps. Tout cela a conduit à abandonner cette partie de la tâche.

2.1.4.2 La marinisation de l'estuaire de la Gironde et l'évolution des habitats écologiques

Il est aujourd'hui communément admis par les scientifiques et les gestionnaires locaux que l'estuaire de la Gironde connaît depuis quelques années un processus de « marinisation ». Le processus a été nommé ainsi pour la première fois par David et al. (2007c ; David et al., 2007a). Le terme a ensuite été réutilisé dans plusieurs publications (Pasquaud et al., 2012a ; Chaalali et al., 2013a ; Chaalali et al., 2013b ; Chaalali et al., 2013c) et la communauté scientifique locale ainsi que les gestionnaires se le sont depuis appropriés (Le Treut, 2013).

Le terme synthétise différentes modifications HMS mises en avant. On peut les schématiser comme suit (Figure 11) :

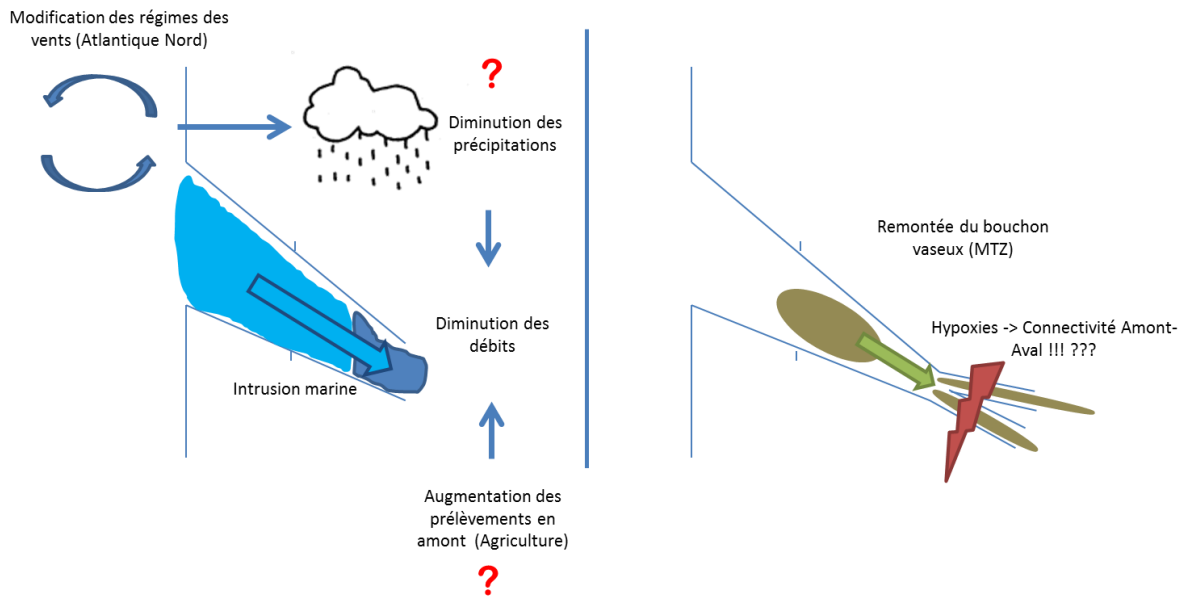


Figure 11. Représentation schématique du phénomène de marinsation de l'estuaire de la Gironde.

Ce phénomène se traduit en premier lieu par une intrusion plus profonde de la marée, et donc de la masse d'eau marine, dans l'estuaire (et donc une augmentation de la salinité dans la partie médiane de l'estuaire, notamment de la salinité moyenne). Cela s'accompagne d'une remontée du bouchon vaseux qui se retrouve désormais plus souvent piégé dans le bas des fleuves.

Les résultats du programme ETIAGE² montre que l'une des premières conséquences de cette remontée est le piégeage de Matière Organique (issue notamment de la métropole bordelaise) et de différents contaminants dans une zone plus resserrée de l'hydrosystème. Le piégeage et la dégradation de la MO peut conduire, dans certaines conditions (fortes températures, étiages importants), à des évènements hypoxiques. Evènements hypoxiques dont on suspecte qu'ils peuvent impacter la vie aquatique et notamment la migration de certains poissons amphihalins (en particulier les alosons qui dévalent en été).

Enfin, malgré des conditions hydrologiques plus favorables aux poissons marins dans l'estuaire, la surface d'habitats potentiels augmente peu pour la plupart des espèces. En effet, la condition limitante reste la surface de zones intertidales. Or, d'une part, celle-ci a beaucoup diminué au cours des décennies précédentes. D'autre part, les surfaces les plus

² Le programme de recherche multidisciplinaire ETIAGE est une étude Intégrée de l'effet des apports amont et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne. ETIAGE est un programme pluriannuel (2010-2014) mené par des chercheurs de l'Université de Bordeaux et de l'IRSTEA de Bordeaux. <http://etiage.epoc.u-bordeaux1.fr/>

importantes se trouvent en aval tandis que l'amont de l'estuaire et le bas des fleuves restent pauvres en espaces intertidaux.

2.2 Le fonctionnement trophique du système et son évolution (Lobry, J.)

Les principales connaissances qui correspondent à cette partie sont issues de la thèse de Xavier Chevillot (2012-2015) cofinancée dans le cadre de ce projet. Ce travail, à la date de remise du rapport, donnée lieu à 3 publications dont une est acceptée, une est soumise et une devrait l'être en décembre 2015 :

- Chevillot, X., Pierre, M., Drouineau H., Chaalali A., Sautour B., Lobry J. Accepté. Abrupt shifts in the Gironde fish community: an indicator of ecological changes in an estuarine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*. (Annexe 3)
- Chevillot X., Drouineau, H., Lambert, P., Sautour, B. & Lobry, J. Soumis. Toward a phenological mismatch in estuarine pelagic food web. *PLoS ONE*. (Annexe 4)
- Chevillot X., Tecchio S., Chaalali A., Lassalle G., Selleslagh J., Castelnaud G., David V., Bachelet G., Niquil N., Sautour B., Lobry J. Global changes jeopardize the trophic capacity of estuarine ecosystems: the Gironde food web as case study. *Progress in Oceanography* (en preparation texte non diffusible -)

2.2.1 Introduction

2.2.1.1 Problématique générale

De manière générale, la difficulté d'établir un lien formel entre structure des communautés et fonctionnement des écosystèmes est un thème relativement ancien (voir par exemple Winemiller, 1995) qui a donné naissance à une controverse particulièrement vive depuis une quinzaine d'années (voir par exemple Loreau et al., 2001 ; Loreau et al., 2002 ; Hillebrand & Matthiessen, 2009). La question de l'évaluation de l'état écologique des systèmes telle que posée par les Directives, trouve une partie de ses bases conceptuelles au centre de ce débat scientifique actuel sur la question de l'évaluation des conséquences à l'échelle de l'écosystème, des processus et des fonctions associées d'une érosion de la biodiversité (BDEF pour 'Biodiversity Effects on Ecosystem functions'). Quel que soit l'angle sous lequel cette question ait été abordée –voir par exemple le vieux débat sur le lien entre diversité et stabilité (McCann, 2000)- il apparaît que mettre en évidence cette relation au travers d'études empiriques est loin d'être une question triviale. Elle est particulièrement complexe dans le cas des écosystèmes estuariens par ce que de nombreux auteurs nomment l' 'Estuarine Quality Paradox'. (Dauvin, 2007 ; Elliott & Quintino, 2007). Ces auteurs notent que dans ces systèmes, naturellement stressés par des contraintes HMS fortes, les communautés écologiques sont naturellement caractérisées par un faible nombre d'espèces

et une abondance élevée de quelques espèces adaptées à ces contraintes. Ces caractéristiques sont généralement associées à une biodiversité faible. Pourtant, les écosystèmes estuariens sont dans le même temps associés à de nombreuses fonctions écologiques -dont une production biologique particulièrement importante (voir par exemple la référence la plus emblématique : Costanza et al., 1997). Cela conduit, dans le cas des estuaires, à (1) une remise en question du lien entre biodiversité et processus écosystémiques et (2) une difficulté corollaire à distinguer les effets d'un stress d'origine anthropique de ceux d'un stress d'origine naturelle (Elliott & Quintino, 2007).

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de changer de paradigme, d'aller plus loin dans l'analyse (Hering et al., 2010) et de mieux expliciter le lien entre biodiversité/structure et processus/fonctionnement à l'échelle des écosystèmes (Hillebrand & Matthiessen, 2009) pour ainsi mieux appréhender la trajectoire fonctionnelle des écosystèmes estuariens dans le contexte du changement global (Sala & Knowlton, 2006), notamment aux travers de l'analyse des réseaux trophiques (Livingston, 2002).

Or, très peu d'études proposent une approche fonctionnelle de la biodiversité en estuaire (par exemple Baird, 2009 ; Villeger et al., 2010) et aucune ne considère son évolution d'un point de vue holistique à l'échelle de l'ensemble des communautés, du fonctionnement globale et des propriétés fondamentales des écosystèmes.

Jusqu'à présent, la plupart des expériences de modélisation holistiques de réseaux trophiques estuariens, basées notamment sur des approches fondées sur des équilibres de masse (par exemple : Baird & Ulanowicz, 1993 ; Monaco & Ulanowicz, 1997 ; Lobry et al., 2008 ; Selleslagh et al., 2012), décrivent des systèmes globalement productifs, peu matures, apparemment peu structurés mais disposant d'un certains nombres de qualités de résilience et de stabilité dynamique (Lobry et al., 2008). Cependant, ces approches ne tiennent pas compte des modifications et des déséquilibres induits par les évolutions actuelles des conditions environnementales et anthropiques et de leurs conséquences sur la structure (biodiversité spécifique, structure du réseau trophique) et les processus au sein des écosystèmes (flux trophiques, interactions biologiques, productivité primaire, secondaire, halieutique...).

2.2.1.2 Le contexte girondin

Plus vaste estuaire d'Europe de l'Ouest (Lobry et al., 2003), il est exposé depuis des décennies à une diversité d'impacts environnementaux liés aux activités humaines (pêche, dragage, industries, pollutions chroniques...). D'importantes modifications de la structure des communautés ont été mises en évidence ces dernières années sous l'effet du changement global à différents niveaux trophiques.

En particulier, la communauté zooplanctonique a été profondément modifiée au cours des 3 dernières décennies. Des travaux de l'Université de Bordeaux basés eux aussi sur les suivis environnementaux trentenaires du milieu, ont établi l'arrivée et l'installation dans l'estuaire d'une espèce exotique de copépode, *Acartia tonsa*, proche de l'espèce native *A. bifilosa* sans que des phénomènes de compétition très affirmés aient pu à ce jour être mis en avant (David et al., 2005 ; David et al., 2007c). Cette colonisation serait facilitée par le changement climatique qui rendrait l'estuaire favorable à la nouvelle espèce (Chaalali et al., 2013b). Des travaux plus récents montrent, par ailleurs, que les populations de copépodes ont tendance à se déplacer vers l'amont dans la Gironde en réponse aux changements environnementaux (Chaalali et al., 2013d).

Chez d'autres crustacés aussi, des modifications notables ont été mises en lumière. En 2006 a été mise en évidence l'arrivée d'une nouvelle espèce de crevette exotique *Palaemon macrodactylus* qui pourrait concurrencer l'espèce native, la crevette blanche *Palaemon longirostris* (Figure 12).

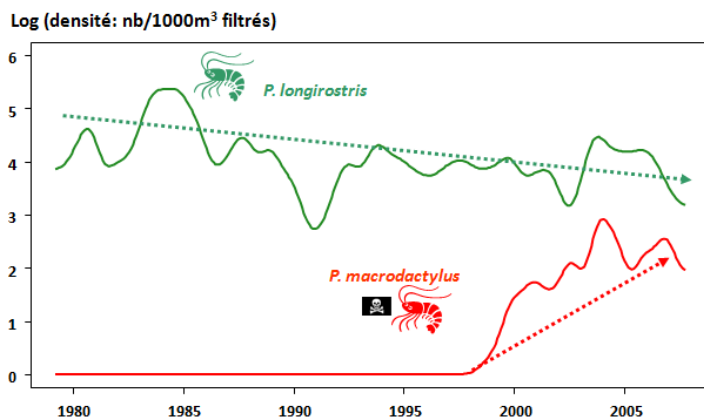


Figure 12. Evolutions comparées des abondances de *Palaemon longirostris* et de *Palaemon macrodactylus* dans l'estuaire de la Gironde entre les années 1980 et le début des années 2000 (Béguer, 2009a).

Par ailleurs, depuis quelques années, des déformations de la carapace des crevettes blanches ont été mises en évidence (Béguer, 2005 ; Feuillassier et al., 2012) et font l'objet d'une attention toute particulière (Figure 13 - thèse de Bérenger Levesque en cours à Irstea). Le taux de déformations constatées est très important. Il est de 20 à 30 % en moyenne et peut atteindre 80% des prélèvements observés. Nous avons encore peu de certitudes sur l'origine et l'impact de ces déformations mais la contamination des eaux de l'estuaire pourrait être un facteur explicatif.

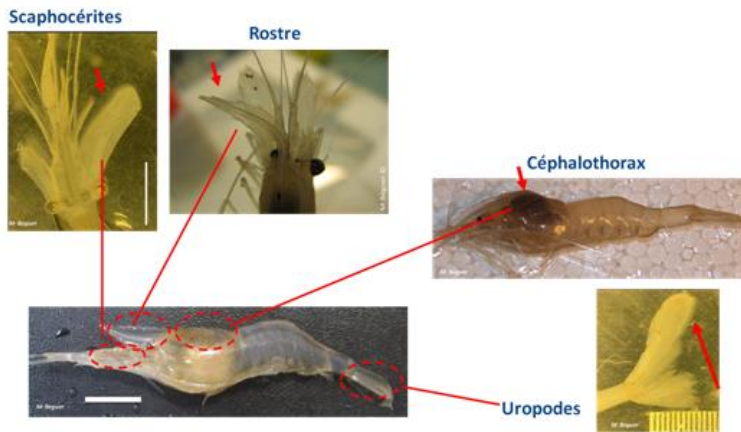


Figure 13. Exemples de déformations exosquelettiques constatées sur les crevettes blanches de l'estuaire de la Gironde.

Plus récemment, les campagnes de suivi de la faune benthique réalisées de façon récurrentes dans l'estuaire dans le cadre, notamment, du suivi du CNPE du Blayais montrent un effondrement de la richesse spécifique et de l'abondance de la macrofaune benthique tant en zone subtidale qu'en zone intertidale.

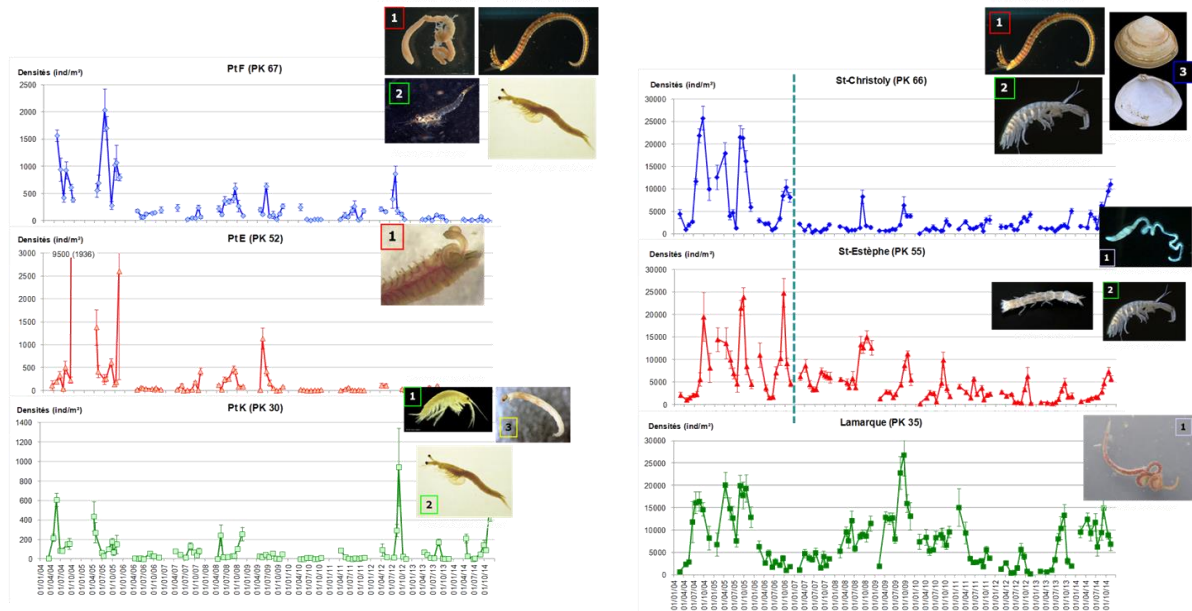


Figure 14. Evolution des densités mensuelle de la macrofaune benthique en zones subtidales (à gauche) et en zone intertidales (à droite) en différents points de l'estuaire (données Guy Bachelet, CNRS).

Chez les poissons aussi, de nombreux changements ont été observés. Dès la fin des années 1990, des travaux du Cemagref, ex-Irstea, mettaient en évidence le lent déclin de la population d'éperlans de l'estuaire (Pronier & Rochard, 1998). Ce poisson, dont la Gironde constitue la limite méridionale de l'aire de répartition, était extrêmement abondant dans le milieu dans les années 1980 et a depuis complètement disparu de nos observations (Figure 15). Les scientifiques invoquent une modification de l'aire de répartition de l'espèce qui serait remontée vers le Nord. De fait, ce poisson est resté assez abondant en Loire et est devenu important en Seine. Comme dans plusieurs autres cas de modification des aires de répartition

de poissons estuariens recensés dans la littérature (Nicolas et al., 2010), l'impact du changement climatique est l'hypothèse la plus probable. Les eaux se réchauffant, elles deviennent moins favorables aux espèces « nordiques » telles que l'éperlan. A l'inverse, elles deviennent plus favorables aux espèces méridionales qui peuvent alors trouver plus au Nord des habitats qui deviennent plus favorables. C'est le cas par exemple du maigre qui est devenu au début des années 2000 une espèce majeure de l'estuaire de la Gironde (Figure 15). A vrai dire, le maigre a toujours plus ou moins été présent dans l'embouchure de l'estuaire, le panache de la Gironde constituant une zone de reproduction importante pour cette espèce typique des eaux côtières depuis la Mauritanie jusqu'au Portugal. Mais, depuis quelques années, il est devenu emblématique de la zone estuarienne elle-même bien que l'abondance du stock fluctue sous l'influence de différents facteurs plus ou moins bien connus (pêche ? hydrologie ?).

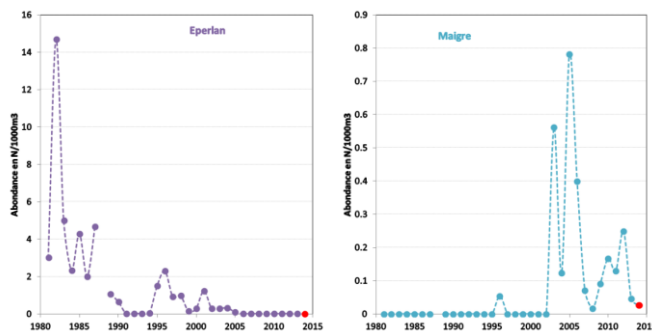


Figure 15. Evolution des abondances d'éperlans (a) et de maigres (b) dans l'estuaire de la Gironde vues par les campagnes TRANSECT.

Une première étude réalisée à partir des données recueillies entre 1991 et 2009 et publiée en 2012 (Pasquaud et al., 2012a) concluait à une augmentation tendancielle, plus ou moins progressive et linéaire de l'abondance des juvéniles de la plupart des espèces marines dans l'estuaire au cours de cette période (Figure 16). Une analyse statistique des données montrait que cette tendance était liée à une augmentation de la salinité et de la température dans le milieu en relation avec la *marinisation* de l'estuaire décrite par plusieurs auteurs (David et al., 2007b ; Goberville et al., 2010 ; Chaalali et al., 2013d). Ce processus de *marinisation* traduit le fait que, sous l'influence d'une diminution tendancielle des débits fluviaux, les eaux marines côtières pénètrent plus profondément et plus longtemps dans le milieu, et, avec elles, le cortège de poissons marins qu'elles abritent.

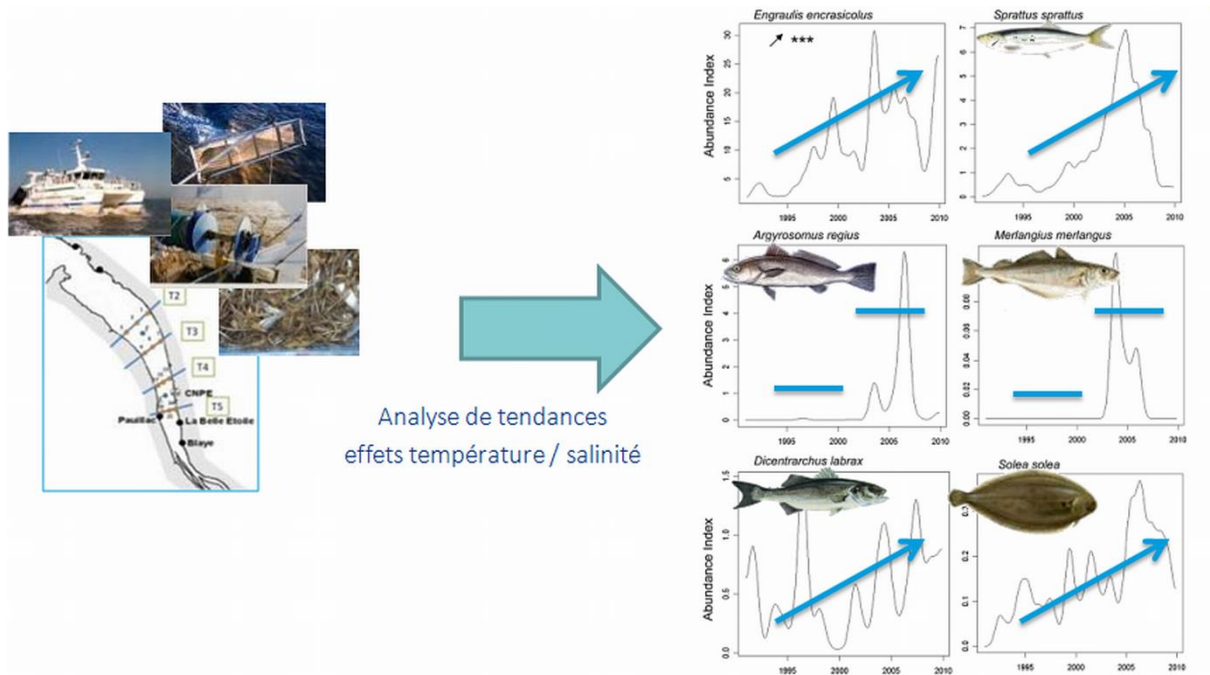


Figure 16. Augmentation de l’abondance des juvéniles de la plupart des espèces marines dans l’estuaire entre 1991 et 2009 (Pasquaud et al., 2012a).

Enfin, une dernière étude Chaalali et al. (2013a) met en avant l’hypothèse, non plus d’une évolution progressive des peuplements mais décrit des changements abrupts (shifts) dans les communautés estuariennes autour de 1987 et 2001. Les conséquences de ces changements, de nature à modifier le fonctionnement et les processus au sein du réseau trophique dans son ensemble tel qu’il a été défini dans différents travaux (David et al., 2006a ; David et al., 2006b ; Lobry et al., 2008 ; Pasquaud et al., 2010a ; Pasquaud et al., 2010b), n’ont encore jamais fait l’objet d’études intégrées.

C’est dans ce contexte que s’inscrit le présent travail. Dans un premier temps, il reprend et élargit l’analyse des séries chronologiques déjà traitées dans les travaux précédemment cités afin de (1) caractériser ces shifts en terme de biodiversité et de changements de régime, et (2) décrire les changements phénologiques associés à ces shifts écologiques et leurs éventuelles conséquences trophiques. Enfin, ces shifts seront mis en perspectives en lien avec le fonctionnement du réseau trophique.

2.2.2 Matériel et méthodes

2.2.2.1 Données utilisées

Depuis plus de 30 ans, des suivis réguliers de la faune de l'estuaire de la Gironde sont réalisés par les équipes de recherches. Ces campagnes sont réalisées, depuis 1979, aux abords de la Centrale Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) du Blayais. Elles couvrent un ensemble de stations et elles ont lieu de façon régulière, à raison d'au moins une fois par mois.

Données poissons

Le suivi de l'ichtyofaune et des crevettes est réalisé par Irstea (protocole TRANSECT). Depuis de nombreuses années maintenant, il est réalisé par le navire L'Esturial (Figure 17). Depuis 1991, les stations sont localisées sur 4 transects (numérotés de T2 à T5) répartis entre les PK 50 et 70. Ces transects relient, sur une partie de l'estuaire, la rive Saintonge et la rive Médoc. Chaque transect comprend 3 stations distribuées de la même façon, une des stations se situant près de chaque rive et la 3ème étant sur l'axe médian de l'estuaire. Pour chaque station, un prélèvement de surface et un prélèvement de fond sont réalisés. Chaque prélèvement dure 5 à 7 minutes, et est effectué de jour, entre la moitié du flot et l'étape de pleine mer. Les engins (Figure 17) sont poussés à contre-courant.

Le protocole, et notamment le maillage spatial et temporel, a plusieurs fois évolué depuis sa mise en place en 1979. Toutefois, on considère que depuis 1985 les types de prélèvements sont restés les mêmes ce qui permet de comparer les observations sur la série temporelle à partir de cette année-là.

Données zooplanctoniques

Les données zooplanctoniques sont, elles-aussi, issues du suivi environnemental du CNPE du Blayais mais aussi du programme SOMLIT³ par l'Université de Bordeaux (David et al., 2005 ; David et al., 2007c ; Chaalali et al., 2013d). Les échantillons sont collectés mensuellement entre mars et novembre depuis 1979 (en point fixe, à 1 m sous la surface et 1m au-dessus du fond, à 3h d'intervalle durant un cycle de marée). Deux stations sont localisées dans la zone d'échantillonnage poissons (Figure 17).

Données hydroclimatiques

Quatre indices climatiques ont été utilisés pour caractériser les conditions à l'échelle régionale : l'indice NAO (North Atlantic Oscillation) (Hurrell et al., 2001 ; Marshall et al., 2001), l'indice AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) (Knight et al., 2005), l'indice EAP (East Atlantic Pattern) (Barnston & Livezey, 1987 ; Decastro et al., 2006) et l'indice NHT (Northern

³ Service d'Observation en Milieu Littoral, INSU-CNRS, <http://somalit.epoc.u-bordeaux1.fr>

Hemisphere Temperature index). Les données mensuelles de ces indices proviennent de la NOAA (United States National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) Climate Prediction Center (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Les débits journaliers de l'estuaire sont fournis par Bordeaux Port Atlantique. Les données journalières de température de l'air proviennent de la station de Pauillac de Météo France. Les données physico-chimiques sont issues du programme SOMLIT.

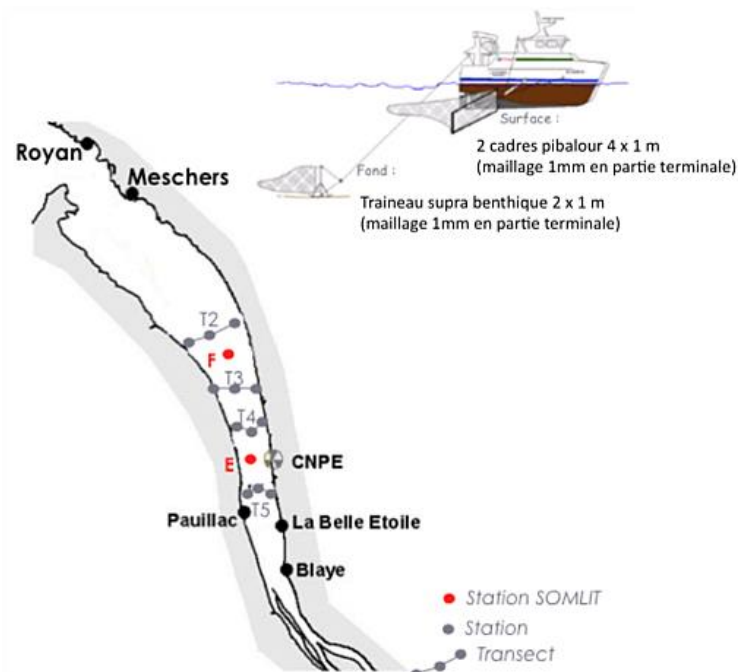


Figure 17. Zone et engins d'échantillonnage utilisés lors des campagnes TRANSECT. Pour info, les points E et F représentent les points d'échantillonnage réalisés lors des suivis SOMLIT réalisé par l'université de Bordeaux et l'Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers pour le suivi des paramètres environnementaux et de la faune zooplanctonique.

D'autres données ont été mobilisées pour construire les modèles de réseau trophique (Figure 18).

Données de chalutage

Des campagnes de suivi de la population d'esturgeon européen *Ascipenser sturio* ont été implémentées dans l'estuaire de la Gironde par Irstea entre 1986 et 2002 et depuis 2008. Elles sont réalisées mensuellement ou une fois tous les 2 mois. A chaque fois, une vingtaine de traits de chalut à panneaux (3m d'ouverture verticale, 13m d'ouverture horizontale, 70mm de maillage terminal) de 30 minutes est réalisée de jour. L'ensemble poissons capturés est déterminé, compté et mesuré.

Macrofaune benthique

Différentes séries de campagnes d'échantillonnages de la macrofaune benthique ont été réalisées dans l'estuaire en 1991-1992, 2000-2001 et depuis 2004 à différentes saisons

(octobre et avril) et mensuellement (de février à novembre) depuis 2004. Les prélèvements sont réalisés en zone subtidale au moyen d'une benne Smith-McIntyre et en zone intertidale au moyen d'un carottier.

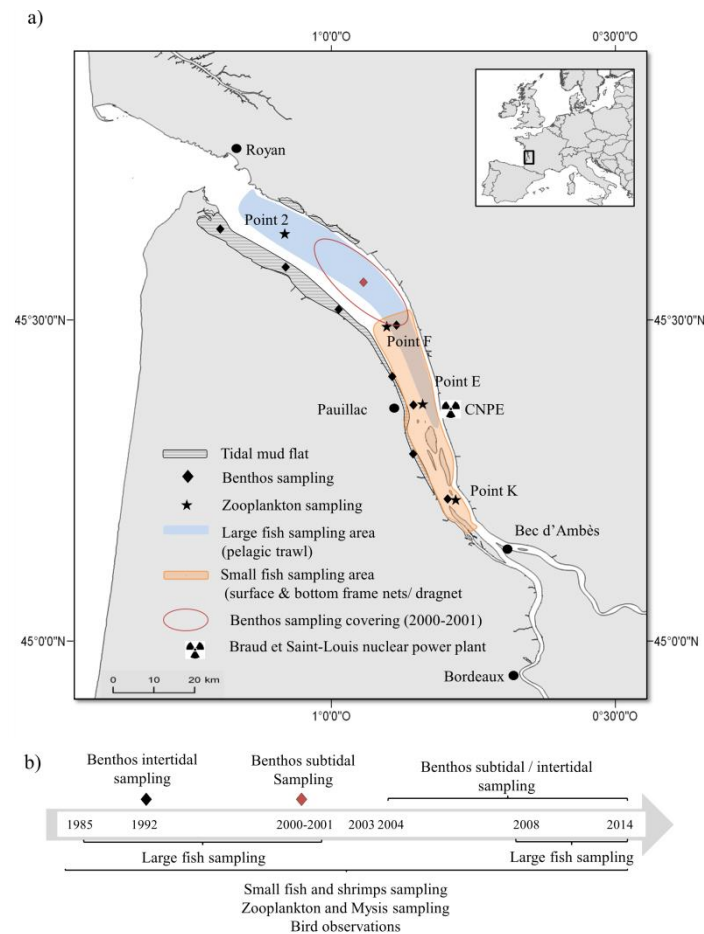


Figure 18. Localisation de l'ensemble des sites d'échantillonnages sur l'estuaire de la Gironde et vue chronologique des différentes campagnes (extrait de Chevillot et al. in prep).

2.2.2.2 Analyse des données chronologiques

En premier lieu, une Analyse en Composante Principale sur les données poissons a été réalisée afin de réduire le nombre de variables. Les axes de cette ACP ont ensuite été utilisés comme entrée dans l'analyse. Les variables ainsi combinées peuvent être comprises comme une métrique de biodiversité ichthyofaunistique.

Les séries chronologiques ainsi construites sont ensuite analysées pour décrire les changements dans la structure des communautés de poissons au cours des 30 dernières années. Les méthodes CHRONOCLUST (décrites dans Legendre & Legendre (1985) et Legendre et al (1998) et mises en œuvre dans Weijerman (2005)) et STARS (Rodionov, 2004) ont été appliquées sur ces séries pour détecter les éventuels ruptures (shifts) dans la structure des communautés de poissons.

Enfin, plusieurs séries de modèles linéaires généralisés à effets mixtes ont été implémentés afin de décrire la relation poisson-environnement. D'abord sur l'ensemble de la série en introduisant un effet croisé période avec les facteurs de l'environnement. Ensuite par période. Ces deux types de modèles ont permis de discuter deux questions distinctes : (1) le lien poissons-environnement a-t-il été modifié au cours des 30 dernières années dans l'estuaire ? et, (2) les facteurs structurants les communautés de poissons sont-ils restés les mêmes au cours des 30 dernières années ?

2.2.2.3 Modélisation trophique

Des modèles de réseau trophique représentatifs de chacune des périodes décrites entre les shifts ont été construits. Ces modèles visent à réaliser un bilan des flux trophiques à l'échelle annuelle à partir de l'ensemble des données disponibles (voir ci-dessus). Ce sont des modèles Ecopath (Polovina, 1984 ; Christensen & Pauly, 1992) qui modifient, complètent et actualisent le précédent modèle réalisé sur l'estuaire (Lobry et al., 2008).

Ecopath vise à quantifier les flux de matière au sein d'un réseau trophique à partir de la connaissance des composantes du réseau et non de la composante explicite des flux eux-mêmes. En ceci, il repose largement sur une logique d'analyse inverse. Le principe général réside dans la notion d'équilibre –ou de conservation- de masse.

Dans le cadre du modèle Ecopath, on considère ainsi :

- (1) que tout ce qui est consommé par un compartiment biologique i (Q_i) ressort sous 3 formes : une part de nourriture n'est pas assimilée et alimente le pool de matière organique disponible dans l'écosystème (U_i), une part est utilisée par le métabolisme (respiration – R_i) et le reste correspond à la production biologique (croissance des organismes et des populations, P_i). On écrit :

Consommation = Production + Respiration + Nourriture non assimilée soit

$$Q_i = P_i + R_i + U_i$$

- (2) que cette production P_i est utilisée à l'intérieur de l'écosystème sous diverses formes : une partie est consommée par les prédateurs de i (mortalité par prédation - M_i), une partie est éventuellement pêchée (Y_i), une autre partie peut être exportée hors de l'écosystème (Ex_i), une autre partie retourne à l'écosystème après la mort des poissons (mortalité naturelle - M'_i) dont la MO est recyclé au sein du système et enfin, une dernière partie peut s'accumuler dans le compartiment i lui-même sous forme d'augmentation de biomasse ($Bacc_i$). On écrit :

Production = prédation + pêche + autre mortalité + accumulation de biomasse + migration nette soit

$$P_i = M_i + Y_i + M'_i + Bacc_i + Ex_i$$

Ces 2 équations constituent les équations de base du modèle Ecopath pour chaque compartiment biologique du réseau trophique (Figure 19). Les compartiments biologiques sont liés les uns aux autres par des relations de prédation. On obtient alors un système d'équations qui, une fois résolu permet d'évaluer quantitativement les paramètres manquant tels que la biomasse, la production ou la consommation. En ceci, il permet de calculer l'ensemble des flux trophiques (consommations des compartiments les uns sur les autres) entre les compartiments du réseau trophique sans modéliser explicitement les processus sous-jacents.

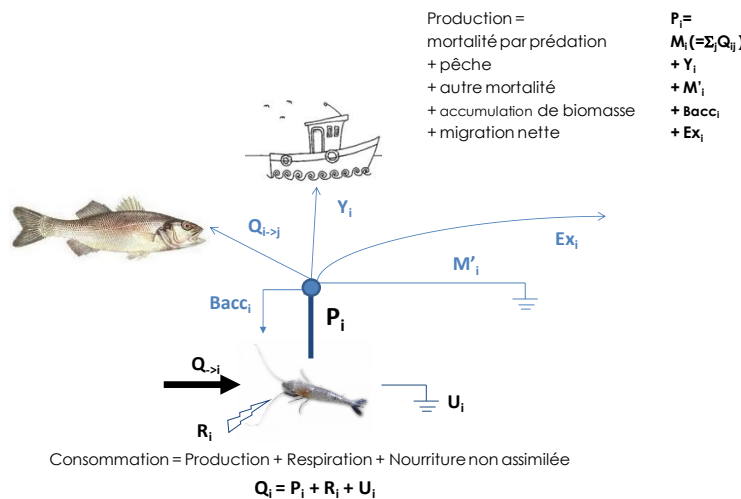


Figure 19. Schéma conceptuel présentant les équations de conservations de la masse considérées dans Ecopath

Divers indices caractéristiques pour chaque compartiment et pour le système dans son ensemble peuvent aussi être calculés à partir de là. Il s'agit notamment des indices issus de l'Ecological Network Analysis (ENA). Ils permettent de caractériser le fonctionnement global du système et de suivre son évolution dans le temps. Pour plus de détails sur les indices, le lecteur intéressé pourra se reporter aux publications de Ulanowicz (2004 ; 2011), Kones et al. (2009), Christian et al. (2005) ou plus récemment Niquil et al. (2012).

2.2.2.4 Analyse des données annuelles de présence dans l'estuaire

Nous avons mis en œuvre des méthodes statistiques relativement innovantes pour décrire la phénologie des espèces étudiées de l'ichtyofaune et du zooplancton dans l'estuaire. 19 espèces ont été considérées.

Les évolutions phénologiques des espèces considérées ont été analysées en décrivant les changements dans les patrons annuels de présence dans l'estuaire (c'est-à-dire un indice d'occurrence mensuelle sur une année). Un modèle hiérarchique bayésien à chaîne de Markov cachées a d'abord été développé sur les données TRANSECT et SOMLIT. Il décrit les vecteurs des proportions de l'abondance totale de chacune des espèces observées chaque mois de chaque année. Ces proportions sont supposées suivre une distribution de Dirichlet

autour d'une année moyenne représentative de chaque période (voir les détails dans Chevillot et al. Annexe 4).

Ce modèle a permis d'estimer et de comparer ces patrons de présence. Un certain nombre d'indicateurs phénologiques classiques ont été utilisés dans ce contexte bayésien pour caractériser ces changements.

Enfin, nous nous sommes focalisés sur les changements dans la cooccurrence spatio-temporelle des couples prédateurs-proies dans l'estuaire.

2.2.3 Principaux résultats

2.2.3.1 Des modifications abruptes de la biodiversité

Des méthodes d'analyses multivariées et de classification appliquées aux données permettent d'identifier trois périodes différentes entre 1985 et 2014 marquées par des structures du peuplement de poissons contrastées. On passe d'un assemblage caractérisé par une présence significative de poissons migrateurs amphihalins dans la partie médiane de l'estuaire lors de la première période (1985-1988) à un peuplement dominé par les juvéniles de poissons marins, notamment pélagiques (anchois, sprats) lors de la dernière période (2004-2010). Entre les 2, une période plus variable qui correspond peu ou prou à la marinisation de l'écosystème telle qu'elle avait été décrite précédemment. Une quatrième rupture semble se dessiner en 2012 mais nous n'avons pas le recul nécessaire sur les données pour la caractériser formellement.

Les résultats obtenus confirment et précisent pour l'ichtyofaune les hypothèses mises en avant par Chaalali et al. (2013a) qui avaient décrit des changements abrupts (shifts) dans les communautés estuariennes autour de 1987 et 2001. Les mêmes résultats sont aussi cohérents avec l'hypothèse d'une marinisation progressive de l'estuaire proposée par Pasquaud et al. (2012a) à partir d'une analyse sur la période 1989-2009.

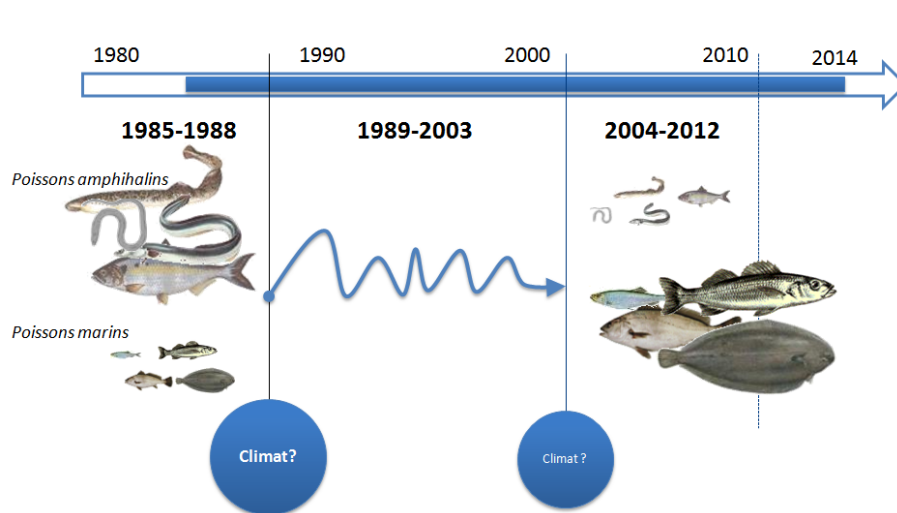


Figure 20. Modifications de la biodiversité des poissons entre 1985 et 2014 dans l'estuaire de la Gironde. La taille des images donne une idée de l'importance relative des groupes de poissons. Au début de la série, les poissons amphihalins sont les plus importants tandis qu'en fin de série ce sont les poissons marins.

D'autres changements abrupts ont été mis en évidence autour de l'année 1988 dans d'autres écosystèmes (la Mer du Nord, la Mer Baltique, la Mer Méditerranée et la Mer Noire). La plupart des scientifiques relie ces « shifts » écologiques à une modification des conditions climatiques dans l'Hémisphère Nord. Le changement observé autour de 2002-2003 est, lui, concomitant avec un autre bouleversement détecté en Mer du Nord. Il est lui aussi lié à une altération de la circulation atmosphérique et donc au climat global de l'Hémisphère Nord.

A ce jour, nous faisons donc l'hypothèse que des modifications importantes et abruptes de la biodiversité ont eu lieu dans l'estuaire de la Gironde en lien avec le changement climatique. L'évolution de l'écosystème estuarien sur les 3 dernières décennies peut donc être décrit en considérant une succession de ruptures écologiques et non pas simplement comme une lente marinisation progressive du milieu.

Les modèles statistiques décrivant la relation poissons-environnement et son évolution au cours du temps montrent que cette relation a changé dans sa structure et son intensité au cours des 3 dernières décennies. Ce ne sont plus les mêmes facteurs de l'environnement qui structurent la communauté de poissons et l'intensité (voire la direction) de cette relation a été modifiée. Le cadre théorique sous-jacent est celui des filtres environnementaux (tels que définis par Tonn et al., 1990 ; ou Keddy, 1992). Les filtres environnementaux ont donc changé au cours du temps et sélectionnés différents pools locaux d'espèces qui répondent de façon différente aux drivers environnementaux définissant ainsi différents « régimes » ou « états dynamiques » tels qu'ils sont définis dans la théorie des régimes shifts (Scheffer et al., 2001 ; Beaugrand et al., 2014).

Enfin, on montre que les facteurs environnementaux qui structurent les communautés de poissons comprennent, à la fois, des facteurs climatiques à large échelle et des variables de l'hydrologie locale, en particulier le débit.

2.2.3.2 Quelle capacité d'accueil trophique pour l'estuaire aujourd'hui ?

Les travaux précédents concluent sur l'existence de changements abrupts de la biodiversité à différents niveaux du réseau trophique (cf. 2.2.1.2 ci-dessus). Augmentation significative des abondances de poissons marins dans l'estuaire, modifications profonde des communautés zooplanctoniques, variations inquiétantes des abondances de crevettes, compartiment clé du réseau trophique, chute drastique de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique, toute cela pose question sur l'évolution du réseau trophique estuarien. Et notamment, sur la capacité d'accueil trophique de l'estuaire pour les poissons.

Trois modèles ont donc été réalisés, représentatifs de chacune des 3 périodes précédemment décrites. Ils sont basés sur les données disponibles et reflètent donc les variations importantes de biomasses entre les 3 périodes (Figure 21).

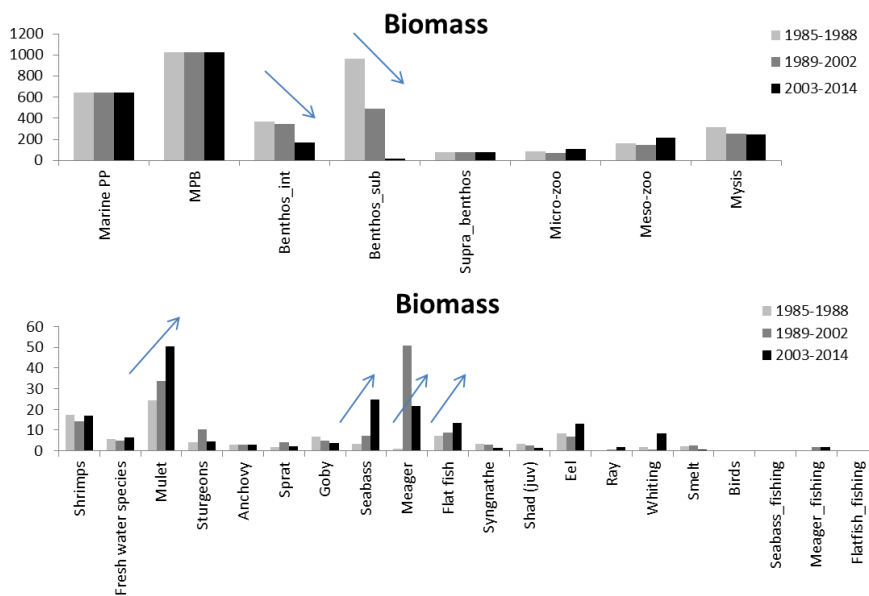


Figure 21. Estimations des biomasses retenues pour chacun des trois modèles représentatifs des 3 périodes. D'après Chevillot et al. in prep

Ils permettent aussi, et surtout, d'estimer l'évolution de l'efficacité écotrophique (EE) de chacun des compartiments du réseau. EE correspond à la part de la production de chacun des compartiments qui est « utilisées » par le réseau trophique (c.à.d. qui alimente les captures pas la pêche et la consommation par les prédateurs). Or, cette part a significativement augmenté pour plusieurs compartiments (Figure 22).

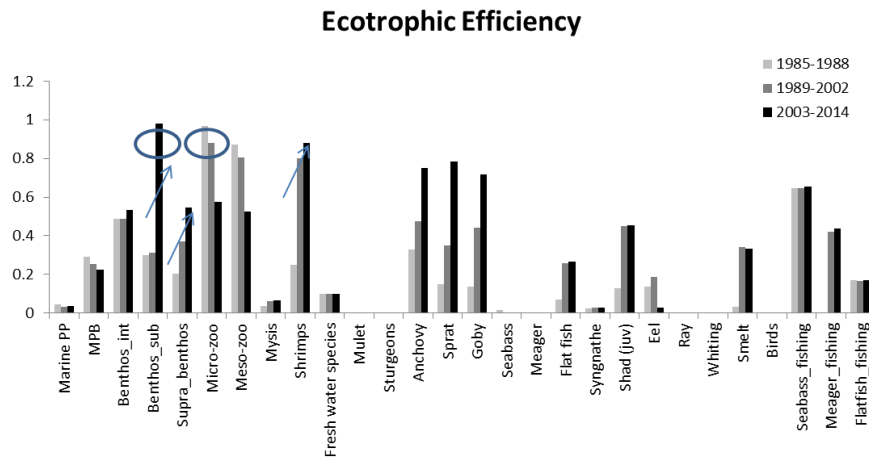


Figure 22. Evolution de l'Effacité Ecotrophique des compartiments des modèles trophiques réalisés pour chacune des périodes. D'après Chevillot et al. in prep.

Cette augmentation des EE traduit une augmentation de la pression de prédation sur des compartiments dont la biomasse a considérablement diminué (macrofaune benthique) ou dont la structure de population a été modifiée (crevettes). L'augmentation de la valeur de EE pour la crevette traduit surtout une augmentation significative de la prédation pour les poissons benthiques et démersaux, notamment marins, dont la biomasse a beaucoup augmenté au cours des 2 dernières périodes (bars, maigre, poissons plats).

Ces résultats posent la question de la capacité d'accueil trophique de l'estuaire vis-à-vis des poissons, et notamment vis-à-vis des poissons marins : les ressources trophiques disponibles dans l'estuaire pour accueillir les poissons marins ne sont-elles pas en train de devenir insuffisantes ?

Par ailleurs, sans entrer dans les détails ici, l'analyse des indices ENA décrit un réseau trophique dont le fonctionnement est très perturbé dans sa dernière période.

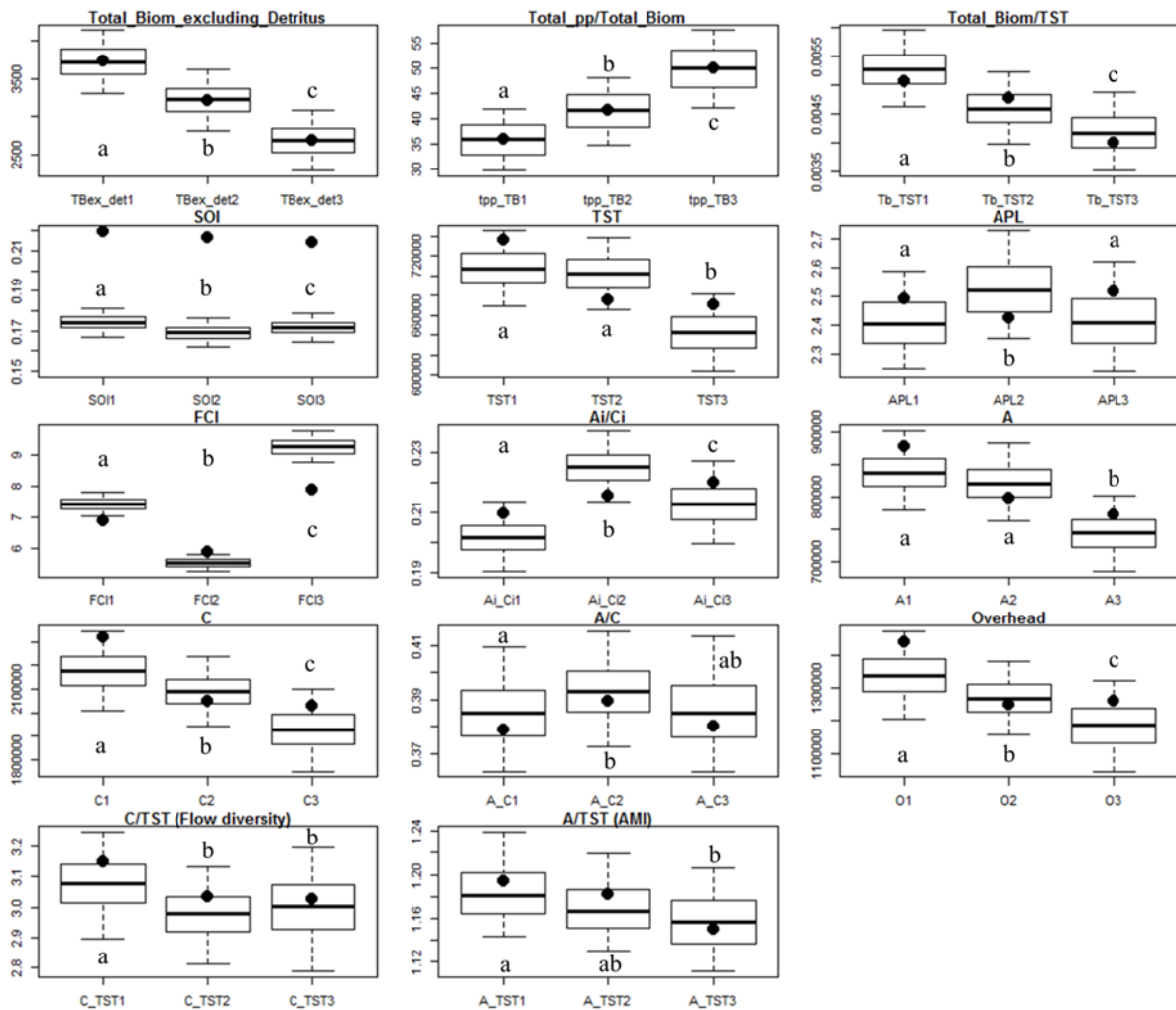


Figure 23. Estimation de la valeur des indices ENA pour les 3 périodes : Total System Throughput (TST, $gC\ m^{-2}\ y^{-1}$), connectance index (CI), Finn’s Cycling Index (FCI, Finn, 1980), Average Path Length (APL), System Omnivory Index (SOI, Libralato, 2008), Ascendency (A), ascendency (A/C), internal relative ascendency (Ai/Ci), development capacity (C), normalized ascendency (A/C). Pour une description détaillée des indices, voir Kones et al. (2009) ou Chevillot et al (in prep). Pour une description de la méthode d’estimation des incertitudes, voir Guesnet et al. (2015). Les points représentent les valeurs initiales des indices et les box-plots la distribution des valeurs estimées en tenant compte de l’incertitude sur les paramètres. Les lettres a, b et c indiquent les différences significatives entre les périodes selon le delta de Cliff (Tecchio et al., In press). D’après Chevillot et al. (in prep).

2.2.3.3 Des cycles en questions

Les changements dans la composition spécifique et l’abondance relative des espèces s’accompagnent de changements dans leurs cycles écologiques.

Les résultats basés sur les méthodes statistiques mises en œuvre laissent apparaître des modifications significatives de la date d’arrivée et de la durée de séjour dans l’estuaire de nombreuses espèces de poissons. Différents types de changements sont décrits : des changements dans la date d’apparition et le mois du pic d’abondance, des changements dans

la durée de présence et des changements dans la durée des interactions potentielles proie-prédateur (Figure 24).

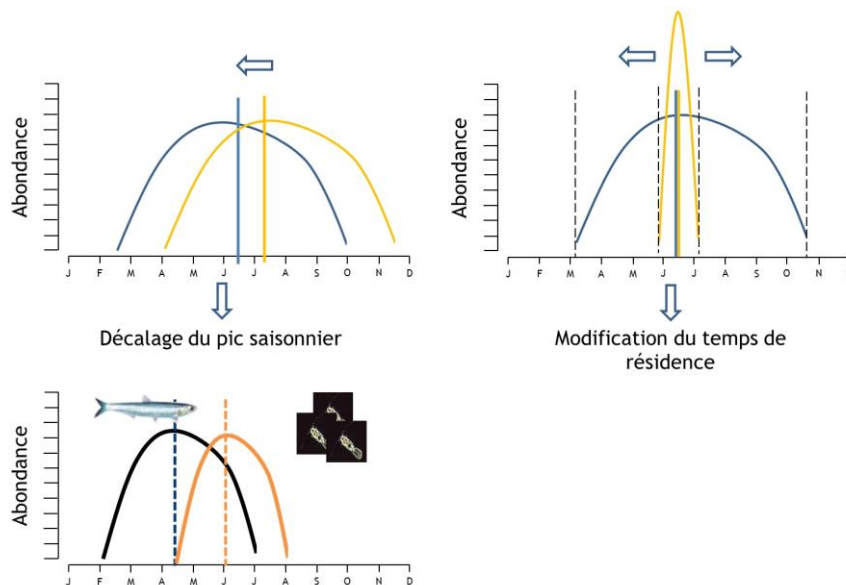


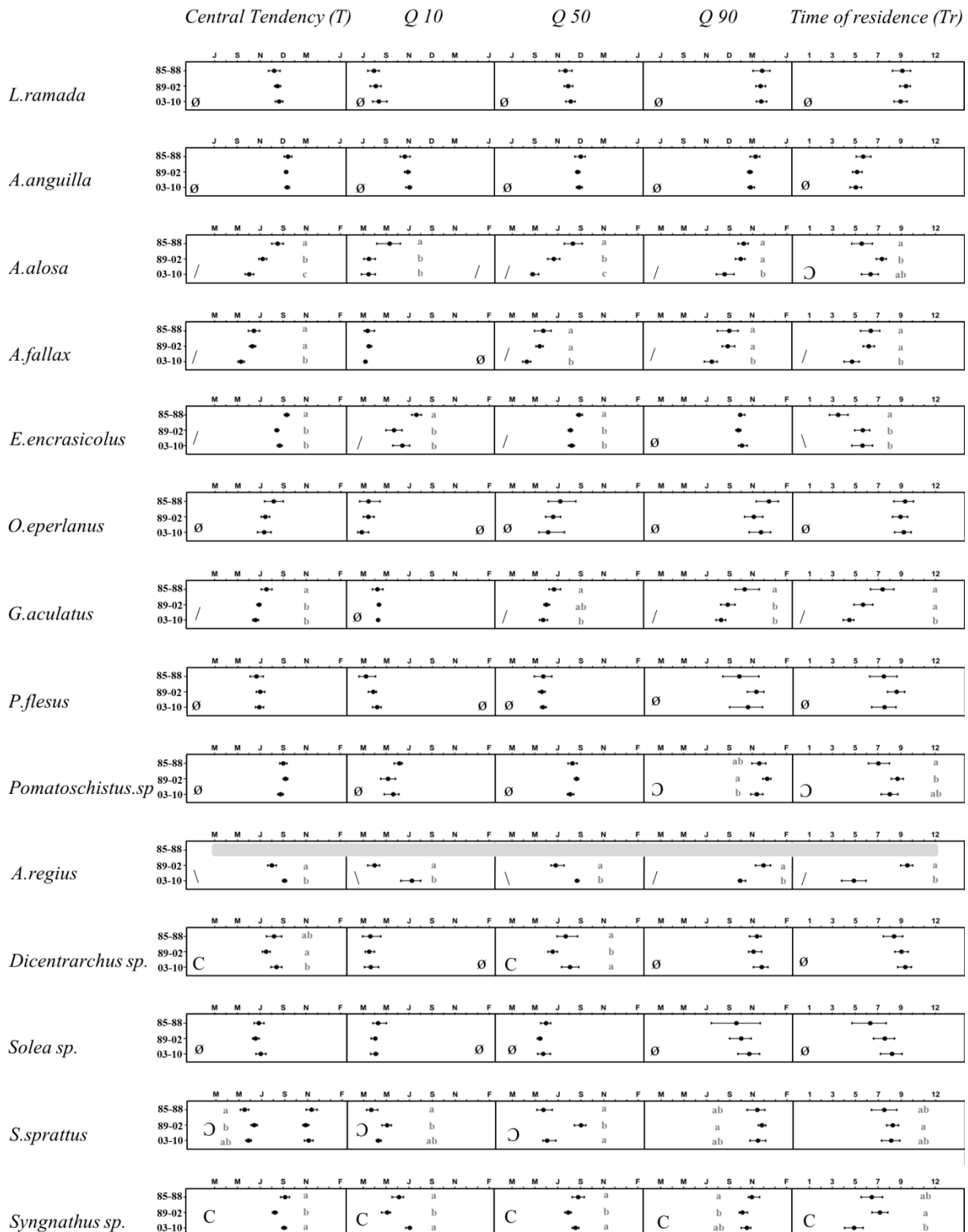
Figure 24. Représentation synoptique simplifiée des changements observés dans la distribution annuelle de la présence des espèces dans l'estuaire.

Sur les 19 espèces considérées, 14 présentent une modification significative de leur phénologie pour au moins un des descripteurs étudiés (Figure 25).

Ainsi, sur les 14 espèces de poisson recensées régulièrement lors des campagnes TRANSECT, 8 présentent une modification significative dans leur patron saisonnier d'abondance dans le milieu pour au moins une des périodes décrites ci-dessus. Il s'agit de l'aloise vraie *Alosa alosa*, de l'aloise feinte *Alosa fallax*, de l'anchois *Engraulis encrasicolus*, du gobie *Pomatoschistus sp.*, du syngnathe *Syngnathus sp.*, de l'épinoche *Gasterosteus aculeatus*, du sprat *Sprattus sprattus*, et de la sole *Solea sp.*. Pour 7 de ces espèces, il semble qu'elles apparaissent dans l'estuaire plus tôt aujourd'hui qu'il y a 30 ans. Ce résultat est cohérent avec les observations empiriques effectuées lors des campagnes scientifiques (Girardin et al., 2004; Girardin pers. Com. ; Girardin et al., 2005) ainsi qu'avec les principales hypothèses que l'on retrouve dans la littérature (Petitgas et al., 2013 ; Krabbenhoft et al., 2014).

Nos résultats montrent aussi que, pour 40% des populations de poissons étudiées, le temps de séjour dans l'estuaire a aussi significativement changé au cours des 3 décennies. Bien que les situations soient contrastées, pour la plupart d'entre elles, le temps de séjour a raccourci. Ce résultat paraît quelque peu contre-intuitif. En effet, la plupart des constats empiriques réalisées lors des campagnes laissent à penser que les juvéniles de poissons marins passaient plus de temps dans l'estuaire. Cependant, ces constats se fondent essentiellement sur l'observation de l'anchois pour lequel effectivement le temps de

résidence dans l'estuaire semble avoir augmenté. Anchois qui est devenu une des espèces les plus abondantes de l'estuaire et qui donc masque les disparités.



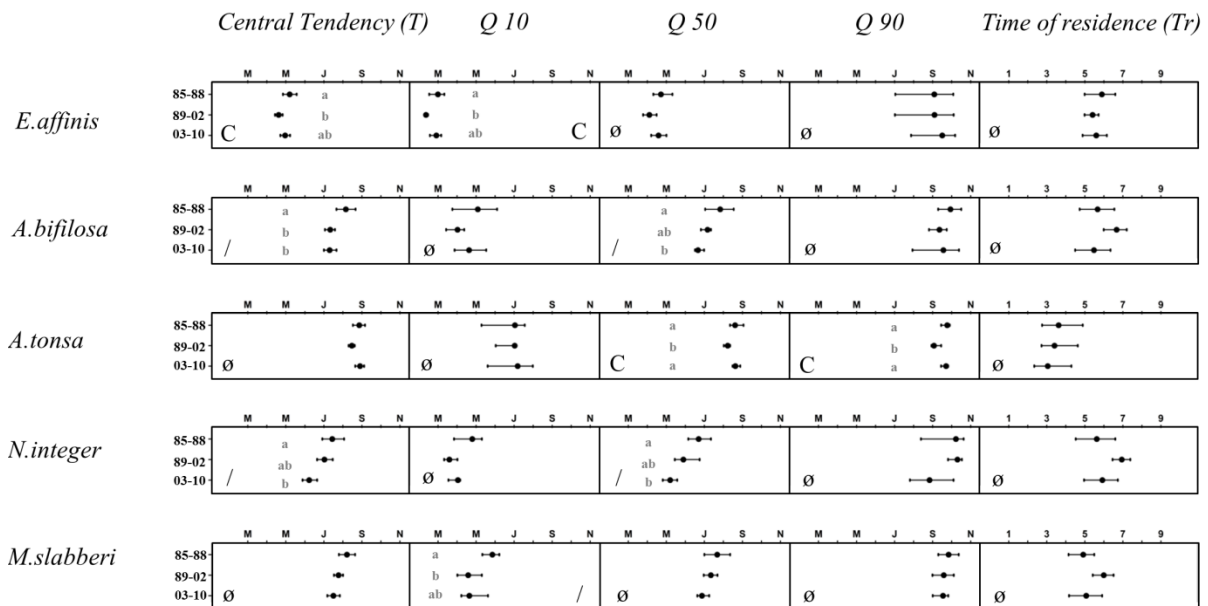


Figure 25. Evolution des 5 indicateurs phénologiques au cours des 3 périodes pour les poissons (1^{ère} partie de la figure) et le zooplancton (2^{ème} partie). Le point représente la valeur moyenne et les barres autour du point les intervalles de crédibilité à 95%. Les indicateurs sont : la tendance centrale (T), les mois au cours desquels sont atteints 10% (Q10), 50% (Q50) et 90% (Q90) de l'abondance totale annuelle pour la période. Tr correspond au nombre de mois de résidence de la population dans l'estuaire. Les lettres a, b, c indiquent les éventuelles différences significatives entre périodes. Les patrons de changement sont symbolisés : C indique à une précocité en période 2 suivi d'un retour à la valeur initiale ; Ø correspond à la situation inverse ; / indique une précocité globale sur l'ensemble des périodes et \ la situation inverse.

Ces changements dits « phénologiques » dans les dynamiques saisonnières des poissons et du zooplancton dans l'estuaire sont des marqueurs profonds des changements globaux qui impactent la biodiversité aquatique. Et ces changements posent de nombreuses questions. Parmi elles, la question de l'heure du dîner...

En effet, on constate que les changements phénologiques sont intervenus sur les poissons et leurs proies. Les résultats montrent une potentielle désynchronisation entre les pics d'abondance des poissons et de leurs proies dans l'estuaire. La synchronie en entre proie et prédateur est évaluée ici en estimant les variations du taux de chevauchement des distributions annuelles du prédateur et de sa proie potentielle au cours des 3 périodes (cf. 3^{ème} cas, Figure 24). Nos résultats (Figure 26) montrent que, du fait des changements observés dans la phénologie des espèces, la synchronie entre les juvéniles de poissons et leurs proies zooplanctoniques a été modifiée pour plusieurs des couples proie-prédateur et concerne 9 des 14 espèces de poissons prises en compte dans cette analyse. Cela suggère que de potentiels 'mismatch' peuvent se produire et les chaînes et réseaux alimentaires pourraient être déstructurés et la viabilité du système mise en questions.

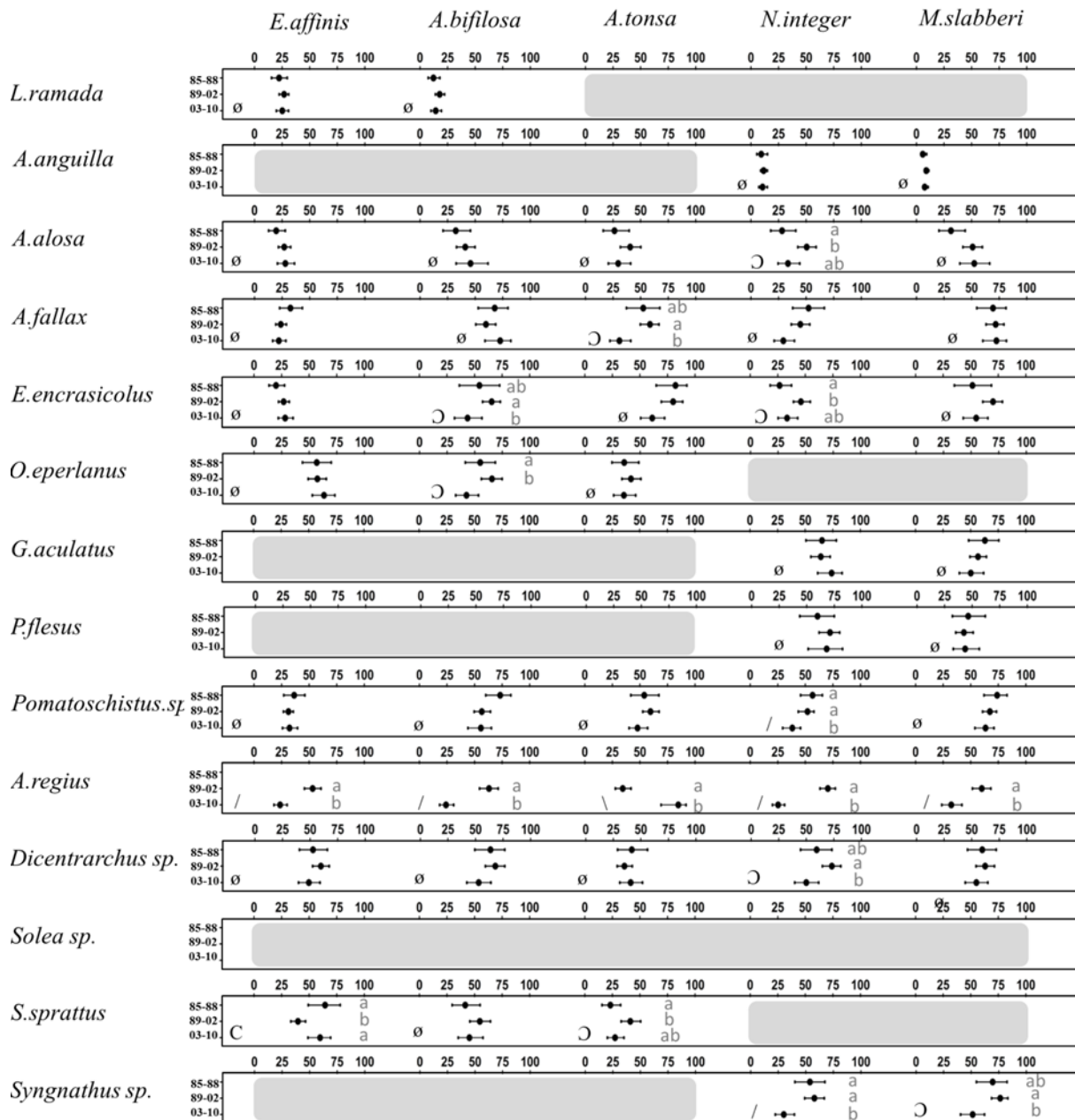


Figure 26. Evolution du taux de recouvrement (en %) des patrons de distribution annuels entre prédateurs et proies potentielles au cours des 3 périodes. Le point représente la valeur moyenne et les barres autour du point les intervalles de crédibilité à 95%. Les lettres a, b, c indiquent les éventuelles différences significatives entre périodes.

2.2.4 Synthèse : la fonction de nourricerie de l'estuaire est-elle menacée ?

Nous avons examiné l'évolution de la biodiversité et du fonctionnement du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde au cours des 3 dernières décennies à différentes échelles.

L'ensemble de ces constats nous conduit à nous interroger sur la viabilité du fonctionnement de l'écosystème ou du moins sur sa capacité à réaliser effectivement les fonctionnalités écologiques qui lui sont associées, et notamment la fonction de nourricerie pour les poissons.

Les 3 angles sous lesquels nous avons analysé les évolutions dans le fonctionnement de l'écosystème sont complémentaires. Evidemment, chacune des approches et partielle, repose sur un certain nombre d'hypothèses discutables et aurait pu s'accompagner d'analyses plus approfondies mais nous avons fait le choix de la complémentarité des regards.

La perspective que nous offrent ces trois regards nous questionne.

En premier lieu, les modifications de la biodiversité observées traduisent à la fois l'impact de changements profonds de l'environnement aux échelles globales (changement climatique) et locales (modifications hydrologiques) sur la dynamique de la biodiversité estuarienne mais aussi une capacité certaines des communautés écologiques à s'adapter. Cette forte capacité d'homéostasie environnementale est un marqueur général des communautés écologiques estuariennes (Elliott & Quintino, 2007)

Pour autant ces modifications sont abruptes et profondes. Elles se traduisent par plusieurs éléments saillants. Si les causes de l'effondrement des populations de poissons migrateurs amphihalins de l'estuaire sont multiples (surpêche, destruction des frayères, qualité de l'eau), l'augmentation de l'abondance des juvéniles de poissons marins dans l'estuaire est clairement liée au phénomène de marinisation de la Gironde. Les juvéniles de poissons sont donc plus nombreux, arrivent plus tôt et remontent plus haut dans l'estuaire.

Cependant, la surface d'habitats potentiels n'augmente que très peu en proportion (cf. 2.1.4.2 ci-dessus), les proies sont plutôt moins nombreuses et ne sont pas toujours au rendez-vous du dîner. La capacité d'accueil trophique apparaît de plus en plus limitée. Deviendra-t-elle limitante ? Elle conditionne l'effectivité de la fonction de nourricerie.

Plus largement, cette fonction de nourricerie apparaît potentiellement dégradée, non seulement du fait d'un déficit potentiel de la capacité d'accueil du milieu mais aussi du fait d'une qualité de l'eau assez mauvaise. La plupart des études montre que la contamination des milieux influence la qualité écologique des nourriceries (voir par exemple Le Pape et al., 2003 ; Gilliers et al., 2006a ; Gilliers et al., 2006b ; Le Pape et al., 2007 ; ou Courrat et al., 2009). Or, la Gironde est un estuaire très pollué. En témoignent par exemple les déformations exosquelettiques des crevettes blanches. Déficit de la capacité d'accueil et contamination ne semblent pas se traduire ici par des mortalités élevées chez les juvéniles de poissons marins puisque leur abondance augmente. Ils peuvent se traduire en revanche par des croissances plus faibles, des réserves lipidiques moins importantes et par la bioaccumulation de certains

contaminants. Tous ces éléments peuvent affecter la contribution des juvéniles sortant de l'estuaire aux stocks marins et, considérant que la Gironde est la plus vaste nourricerie littorale du Golfe, à terme, la fitness des populations.

Nos travaux montrent enfin que semble se dessiner un nouveau shift autour de 2010-2011. Nous n'avons pas assez de recul sur les données pour le caractériser de façon pertinente, toutefois, il ressort avec suffisamment d'intensité de nos analyses pour ne pas nous interroger. Là encore, l'implication d'un tel shift est ambivalente. Elle est synonyme d'une forte capacité de réponse du système aux changements environnementaux, mais peut être aussi le reflet d'une instabilité forte. Compte-tenu de nos interrogations sur la capacité trophique du milieu et sur la qualité de la nourricerie estuarienne, il est difficile d'effectuer des projections. Tout juste peut-on raisonner par analogie et imaginer que les situations observées peuvent se répéter et se succéder en fonction des conditions climatiques et hydrologiques. C'est ce raisonnement par analogie qui fondera les perspectives sur le fonctionnement de l'écosystème qui seront intégrées dans les scénarios détaillés au point 3.3.

2.3 Etat des lieux socio-économique rétrospectif

2.3.1 Principaux déterminants du contexte socio-économique de l'estuaire

Les retours de la participation des acteurs de TRAJEST au projet ANR ADAPT'EAU font apparaître une vision très segmentée du contexte socio-économique. Il n'y a pas à proprement parler de vision générale. Les déterminants du contexte socio-économique estuariens sont donc difficiles à cerner et à hiérarchiser.

Nous avons retenus 3 facteurs principaux déterminant la dynamique socio-économique récente :

- La métropolisation
- La gestion des crues/inondations
- La dynamique économique du Grand Port Maritime de Bordeaux (Bordeaux Port Atlantique).

Ces facteurs ont été essentiellement analysés dans le cadre du projet ADAPT'EAU. Les principaux éléments sont repris en Annexe 6 et ne seront pas détaillés ici.

2.3.2 Evolution socio-économique de la filière pêche-aquaculture (C. Boschet, C. Crochot, G. Castelnaud, C. Cazals)

Parmi les activités socio-économiques autour de l'estuaire, la filière pêche-aquaculture a été particulièrement impactée par les changements au sein de l'écosystème. C'est sur cette filière que nous avons mis l'accent dans ce travail.

2.3.2.1 Rappel des objectifs

Des données socio-économiques sur la pêcherie professionnelle dans l'estuaire de la Gironde ont été collectées depuis des décennies. Plusieurs synthèses ont été réalisées relativement à différentes époques (années 1980 et 1990) et les évolutions temporelles des pêcheries de certaines espèces d'intérêt halieutique ont été analysées. Cependant, jusqu'à présent, aucune étude globale de l'évolution de la pêcherie professionnelle en Gironde n'a été réalisée. Ce projet se propose de contribuer en ce sens à partir des données recueillies par Irstea et d'approches d'économie institutionnelle développée sur l'aquaculture dans le projet ANR GEDI (Gouvernement Européen des Industries) et d'économie des réseaux appliquée à la coordination des acteurs sur l'estuaire de la Gironde. Le cœur de cette tâche a été réalisé dans le cadre du stage de M2 de Céline Crochot (Annexe 7).

2.3.2.2 Introduction

La pêche et l'aquaculture sont deux activités économiques qui sont au cœur du fonctionnement des écosystèmes marins et estuariens reconnus pour leur fonction de production et de réserve de biomasse (Costanza, 1998). Ces activités créent de la richesse et structurent le tissu socio-économique des territoires (Léauté et al, 2003). De plus la production issue de la pêche et l'aquaculture qui répond à une demande en forte croissance devrait dépasser celle des autres productions animales d'ici dix ans au niveau mondial. Cependant, aujourd'hui, le développement économique de cette filière, notamment en Europe, ne semble pas en mesure de répondre à ces attentes. Différentes raisons sont énoncées, gouvernance inadaptée, conflits d'usage sur les ressources naturelles et sur les espaces etc... Toutefois, la trajectoire d'une telle filière est nécessairement marquée par des déterminants écologiques et économiques territoriaux.

Ainsi le patrimoine biologique de l'estuaire de la Gironde a permis le développement de la pêche et de l'aquaculture depuis la fin du 19^{ème} siècle. Ces activités se sont considérablement développées après 1945 grâce à une amélioration des techniques faisant de la pêche une activité rémunératrice grâce à la production de caviar sauvage (Castelnaud 2011) dans un premier temps, puis des alevins d'anguille par la suite. Des prix de vente très élevés ont provoqué un engouement sans précédent pour la pêche dans l'estuaire de la

Gironde de ces alevins entre 1950 et 1970 (Castelnaud et al, 1994, 2002). En parallèle, l'activité ostréicole s'est développée depuis 1900 et s'est orientée vers la production de naissains et de demi-élevage à destination d'Arcachon et de Marennes-Oléron (Bregeon et Chandor, 1978). En 1969, la côte médocaine constituait la première réserve d'huîtres portugaises française et produisait un tiers du naissain français (Barthou, 2006). En 1970, l'activité pêche-aquaculture était donc en plein essor et faisait vivre plus de 1500 familles (Conservatoire de l'Estuaire, 2000).

Depuis la moitié du 20^{ème} siècle et notamment depuis 1970, l'estuaire de la Gironde est soumis à de nombreuses pressions anthropiques et environnementales liées aux activités telles que le transport fluvial, la pêche et la production d'énergie nucléaire sur ses rives (Castelnaud, 1978). Ce bassin constitue le réceptacle de pollution en amont ainsi que des rejets urbains (Bodin et al, 2014). Le développement de la pêche de loisir dans les années 1950 a d'ailleurs accéléré la dégradation des stocks de certaines espèces (Barthou, 2005). L'aménagement des rives de l'Estuaire pour les constructions portuaires et l'extraction de graviers a fortement endommagé les frayères et les réservoirs de géniteurs. En outre, depuis 1970, la température de la Gironde a augmenté de 1.5 °C et son débit a fortement diminué sous l'effet du réchauffement climatique (Béguer, 2009, Le Treut 2013).

Dans ce contexte, l'hypothèse de travail a été que la trajectoire d'une telle filière dépend de facteurs économiques et écologiques multiples dont les événements et les choix du passé. Considérant que sur l'estuaire de la Gironde la filière pêche ostréiculture est composée de trois sous-filières : la pêche fluviale, la pêche maritime et l'ostréiculture, cette hypothèse générale a permis d'énoncer trois questions de recherche

- Quels sont les facteurs écologiques et économiques permettant d'expliquer la trajectoire de la filière pêche ostréiculture ?
- Quelles stratégies les acteurs ont-ils développées pour pérenniser la filière ?
- Est-il cohérent de parler d'une filière pêche-ostréiculture ?

La réponse à ces questions sera organisée en quatre points. Après avoir (1) présenté la grille d'analyse mise en œuvre lors de la recherche, (2) l'évolution d'une production dépendante de ressources naturelles, (3) l'évolution des conditions commerciales et (4) les stratégies productives mises en œuvre par les acteurs pour s'adapter au contexte incertain seront exposés. Un focus sera fait sur une analyse de l'adaptation et de la vulnérabilité de la pêche par la modélisation économique

2.3.2.3 Méthodologie : l'économie institutionnelle pour appréhender la trajectoire de la filière

L'étude d'une trajectoire d'un système économique comme une filière consiste à identifier les points de rupture, les tendances lourdes mais aussi la diversité des contributions des composantes de ce système à ces évolutions.

Pour atteindre cet objectif, nous adoptons le cadre d'analyse d'économie institutionnelle proposé par Jullien et Smith (2012)⁴ en analysant la filière comme un ordre institué déterminé par quatre formes de relations instituées (approvisionnement, emploi, financière et commerciale) (Figure 27).



Figure 27. Schéma des 4 relations instituées de la filière pêche-ostréiculture

Ces relations instituées sont constituées de toute forme d'interactions structurantes pour la filière étudiée, qu'elles soient formelles à travers des réglementations ou informelles, via des compromis et des arrangements entre acteurs. L'analyse de ces quatre relations instituées permet de mettre en évidence la diversité des déterminants de la filière qui peut conduire à identifier des sous-filières. Ce travail d'analyse repose sur la prise en compte des dispositifs formels mais aussi des stratégies mises en œuvre par les acteurs de la filière pour défendre leurs intérêts et s'adapter aux mutations de leur environnement qualifiées de « travail politique ». L'application de cette grille d'analyse pour étudier la trajectoire d'une filière suppose de mobiliser des données quantitatives et qualitatives permettant d'avoir une approche rétrospective pour dessiner les contours des perspectives d'évolution.

Les données quantitatives mobilisées sont majoritairement issues du suivi écologique de l'estuaire de la Gironde réalisé depuis 1980 et de l'évolution de la pêcherie et des principales espèces halieutiques évaluée annuellement à la demande d'EDF depuis 1977 (Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde, Castelnaud et Girardin 2013). Ces deux suivis ont

⁴ Bernard Jullien et Andy Smith, « Le gouvernement d'une industrie. Vers une économie politique institutionnaliste renouvelée », Gouvernement et action publique 2012/1 (n° 1), p. 103-123

permis d'abonder une base de données et de mener des analyses statistiques sur l'évolution : (1) de la démographie des pêcheurs professionnels, (2) des captures totales, des efforts et des Cpue par métier de pêche (sensées refléter l'abondance des espèces) et (3) des prix au kg et des CA par espèce.

Par ailleurs, des enquêtes halieutiques et socio-économiques menées sur la pêche estuarienne en 1982, 1989 et 2000 (Gérard Castelnaud et al, Irstea) et sur l'ostréiculture en 1978 (Brégeon et Chandor) et 2005 (Barthou) ont été mobilisées. L'analyse des documents d'archives départementales ainsi que les enquêtes par entretiens réalisées auprès des acteurs de la filière ont permis de disposer de données qualitatives permettant d'expliquer les évolutions observées.

2.3.2.4 Une activité productive face à la raréfaction continue des ressources naturelles

La filière pêche-ostréiculture est totalement tributaire de la dynamique de l'écosystème et de l'approvisionnement en matières premières qu'elle permet. Or depuis la fin des années 70, les stocks des espèces halieutiques dans l'estuaire de la Gironde ont fortement fluctué. Certaines espèces, abondantes autrefois, sont aujourd'hui sérieusement menacées alors que d'autres sont réapparues. Il est actuellement difficile d'identifier tous les facteurs expliquant ce phénomène complexe. Néanmoins, les acteurs économiques et politiques ont pris des décisions pour s'adapter à ces évolutions qui ont eu des conséquences sur l'activité économique. La filière ostréicole a été la plus sévèrement touchée par les aléas de l'environnement à travers les épizooties et les diverses pollutions. Par exemple, en 1968 la virose de l'huître a décimé la quasi-totalité des stocks français (Ifremer, 1991). Cette évolution dans le stock des espèces, couplée à la prise de conscience croissante de la pollution du milieu estuarien, a conduit au développement d'une réglementation des activités de pêche-ostréiculture à l'échelle locale, nationale et européenne. L'Europe et les pouvoirs publics français ont mis en place des restrictions de pêche dans le but de protéger la ressource halieutique et la santé des populations en lien avec la contamination des produits. De même, en lien avec les directives européennes, l'exploitation des huîtres a été interdite pendant près de dix-huit ans, entre 1996 et 2014, à cause de leur contamination au cadmium. En outre, l'activité aquacole a également été limitée dans son accès au foncier étant donné que les marais médocains présentent la singularité d'être la propriété du port autonome de Bordeaux (PAB – aujourd'hui GPMB Grand Port Maritime de Bordeaux) depuis 1980 et qu'ils dépendent, de ce fait, de la politique d'aménagement nationale du territoire des zones industrialo portuaires. Que ces restrictions réglementaires d'accès à la ressources soient prolongées ou ponctuelles (Figure 29), elles interviennent sur des espèces dont les stocks étaient effectivement bas et dont les perspectives économiques d'exploitation étaient très incertaines (Figure 28).

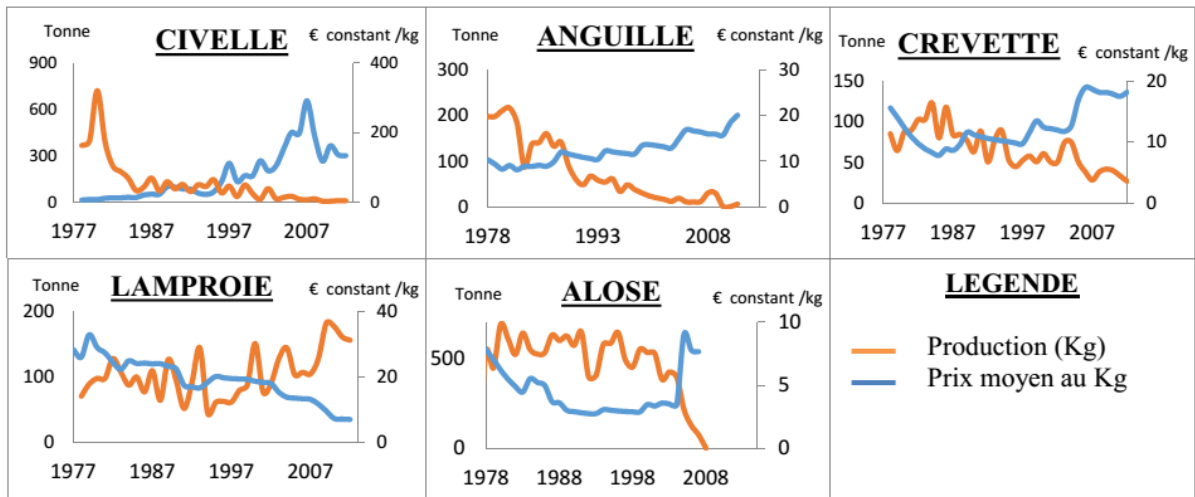


Figure 28. Volatilité des prix en lien avec la production. Source : Jeu de données Irstea (2015), calculs par auteur- Données non disponibles pour la filière ostréicole

La conjugaison des évolutions écosystémiques et institutionnelles ont eu des impacts sur la quantité produite et ses composantes. La production de la filière ostréicole a été divisée par soixante et le nombre d’ostréiculteurs par vingt depuis 1968. La production de la filière pêche a quant à elle été divisée pratiquement par cinq et le nombre de pêcheurs par trois depuis 1978. L’évolution de l’accès de la filière à la ressource halieutique a surtout conduit à un appauvrissement de la diversité de sa production la rendant dépendante d’un nombre réduit d’espèces accentuant la nécessité de faire des choix productifs adaptés à sa vulnérabilité commerciale.

2.3.2.5 Des stratégies productives diversifiées selon les filières

La mise en œuvre des nouvelles réglementations que ce soit en termes de capture ou d’accès à la profession (qualification obligatoire, quota de licence ...) ont eu un impact négatif sur le nombre de pêcheurs professionnels qui a été divisé par trois depuis 1978 (Figure 29).

De nombreux départs en retraite et des cessations d’activité même des plus jeunes ont été accélérés par des plans de sortie de flotte. La baisse des revenus liée à l’augmentation des charges et à la fragilité du chiffre d’affaires, en lien avec l’accès restreint à la ressource, a accentué ce phénomène. De plus, avec la création des permis de mise en exploitation des navires (PME), des quotas de licences, de la diminution des aides à l’installation et des possibilités de pêche qui se réduisent, très peu de jeunes se sont installés ces dernières années.

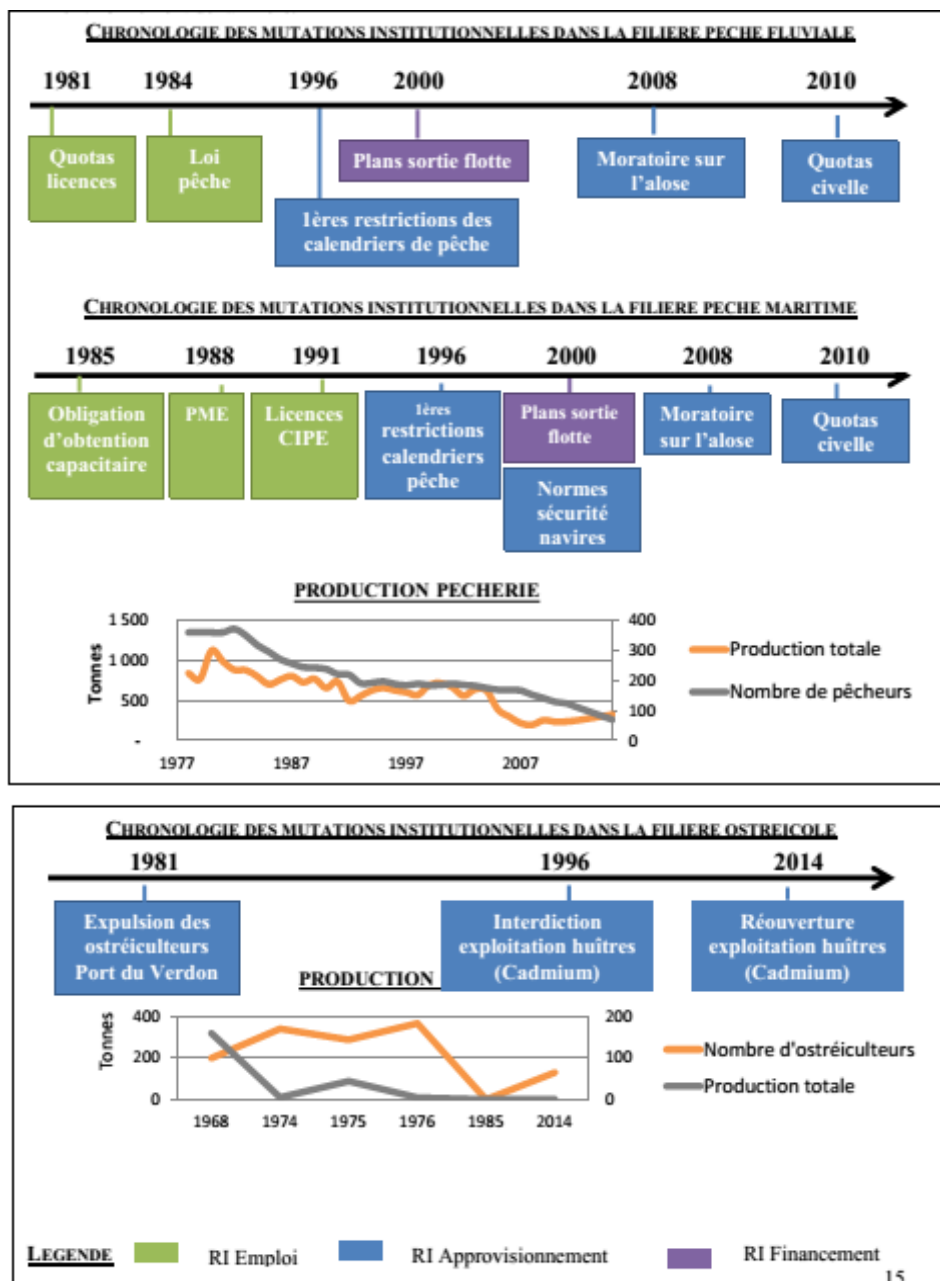


Figure 29. Chronologie des mutations institutionnelles au sein des sous-filières

Pour autant l'adaptation des pratiques des professionnels et la très forte diminution du nombre de pêcheurs sur l'estuaire a permis de maintenir la productivité par actif. Entre 1977 et 2004, alors que la production totale diminuait de 25 %, la production par pêcheur augmentait de 56 %. Cette intensification a été possible grâce à des innovations techniques (les filets monofilament, les vire-filets et les moteurs « in-bord »). Néanmoins, les stratégies des pêcheurs fluviaux ont été limitées par rapport à celles des pêcheurs marins : modernisation moindre de la flotte et faible possibilité de diversification en termes d'espèces. La situation de la filière ostréicole a été différente. Les professionnels n'ont pu s'appuyer que sur une seule espèce fortement soumise aux aléas du milieu. La poursuite de leur activité a

été possible grâce à la délocalisation d'une partie de l'activité sur Arcachon et la création de circuits fermés pour ne plus dépendre du milieu.

2.3.2.6 Une marché concurrentiel où la différenciation des produits est difficile

La production de la filière est très saisonnière alors que les leviers pour faire évoluer la demande sont limités. Ceci conduit de façon récurrente à des périodes d'effondrement des prix pour cause de débarquements trop importants. Les écarts entre les quantités offertes et les quantités demandées déterminent d'importantes variations des prix car la concurrence pour la commercialisation est rude. D'autant que, sur la période étudiée, l'accès à certains débouchés nationaux et internationaux a diminué sous l'influence de décisions institutionnelles (ouverture puis fermeture des débouchés). Ainsi, en 2007, face au déclin de la population d'anguilles, l'Europe a interdit l'export de civelles vers l'Asie qui représentait la quasi-totalité des débouchés de la filière de l'estuaire de la Gironde. Dans le cadre du plan européen de l'anguille, il existe un quota "consommation" destiné au marché alimentaire et un quota "repeuplement" destiné au programme de transferts européens d'anguilles. Or, depuis quelques années la consommation d'anguille diminue et les débouchés ouverts par les programmes de repeuplement stagnent sous l'effet des difficultés budgétaires (FranceAgrimer, 2014). Cette saturation des débouchés a provoqué une diminution de 60% des prix de la civelle en 2007. Dans ce contexte où les producteurs subissent les lois du marché, les règlementations sanitaires et commerciales imposée à l'échelle nationale et européenne ne leur laisse que peu d'opportunités économiques, d'autant que la filière a toujours été concurrencée par la vente des produits issus de filières illégales. Pour faire face à ces conditions de marché peu porteuses, les professionnels ont modifié leurs pratiques de commercialisation en développant la vente directe pour les produits dont la consommation locale pouvait absorber la production.

Contrairement aux espèces précédentes, l'huître de l'estuaire n'a jamais été exportée à l'étranger. Néanmoins ce produit était largement échangé à l'intérieur du territoire français. Avant les années 1980, l'ostréiculture produisait un tiers du naissain français. A partir des années 1980, la plupart des centres ostréicoles se sont mis à produire leur propre naissain et ont commencé à se détourner de celui du médoc (Bregeon et Chandor, 1978). Pour maintenir leur chiffre d'affaires, les ostréiculteurs ont fait évoluer leur mode de valorisation de leurs produits ; dans un premier temps en 1978, en passant de la production de naissain à la production d'huîtres finies, puis dans un second temps en 2014, via la production d'huîtres affinées.

ENCADRE 1 : Adaptation et vulnérabilité de la pêche sur l'estuaire de la Gironde : une approche par la modélisation économique (détails en Annexe 8)

Les investigations menées durant 35 ans par Irstea permettent de disposer de chroniques complètes décrivant l'évolution des captures de migrateurs, des effectifs de pêcheurs, les prix moyens pour chaque année ainsi que des données comptables représentatives des deux catégories de pêcheurs professionnels sur l'estuaire (marins-pêcheurs et professionnels fluviaux). A partir de ces données l'objectif de ce travail était de montrer le comportement d'adaptation des pêcheurs vis-à-vis de leur environnement, en s'appuyant notamment sur les facteurs inhérents au milieu estuarien. Un autre objectif était également de sortir de la vision d'un comportement « moyen » chez les producteurs, afin d'en dégager des enseignements en termes de politiques publiques.

Pour cela, les modèles globaux mobilisés s'emploient à expliquer la variabilité de la CPUE en fonction de deux paramètres synthétiques : l'effort de pêche (standardisé) qui résume l'activité de pêche, et une variable environnementale qui impacte implicitement la quantité de biomasse soit sur l'abondance ou la capturabilité, voire les deux à la fois. Ainsi le recours à la modélisation permet de montrer à partir de données quantitative que les facteurs déterminant le comportement les pêcheurs de l'estuaire ne se limitent pas au prix des captures et à la maximisation de la rentabilité. Ils sont également soumis à l'influence environnementale, et leurs connaissances du milieu et l'expérience engrangée sur les saisons de pêche est un facteur important de leur activité. Force est de constater également que plusieurs postes-clés de l'entreprises figurent à la stratégie des pêcheurs (productivité, carburant, capital), et pas seulement la capacité à capturer un maximum de poisson. Le fait d'ajuster les facteurs de production aux capacités de production, en d'autres termes les compétences du pêcheur, semble jouer particulièrement dans cette pêcherie. Malgré la taille de l'échantillon de pêcheurs à disposition, ce travail donne une certaine représentativité de l'activité de pêche sur l'estuaire de la Gironde et permet de valider l'hypothèse qu'il est nécessaire de sortir de la vision du « pêcheur moyen » pour pouvoir appréhender une gestion à la fois efficace de la ressource et efficace économiquement pour les entreprises qui les exploite. Il reste que les résultats issus de la décomposition du profit montrent que sous le régime de gestion actuel, la stratégie dominante reste la maximisation de la production.

2.3.2.7 Conclusion

L'analyse de la trajectoire de la filière pêche-ostréiculture a permis de montrer sa forte dépendance à son environnement institutionnel, économique et écologique qui l'a rendu plus vulnérable. Cette vulnérabilité se constate à travers la baisse de la production et des effectifs de professionnels, l'instabilité du chiffre d'affaire, la grande dépendance vis-à-vis d'un nombre limité d'espèces et les difficultés à se coordonner pour défendre des positions

communes dans les instances de gouvernance locales. Si les acteurs ont mis en place des stratégies techniques, économiques et politiques pour inverser la tendance générale marquée par le déclin de la filière, les différentes capacités d'adaptation des acteurs ont conduit à une différenciation potentielle des trajectoires entre la pêche maritime, la pêche fluviale et l'ostréiculture. La filière ostréicole quoiqu'encore très anecdotique est fortement soutenue politiquement et peut se destiner à un marché de niche avec la perspective de la création d'une IGP. En revanche la filière pêche reste confrontée à un marché saturé et une production de plus en plus réglementée. Néanmoins la filière pêche ostréiculture est marquée par un fort ancrage territorial et porteuse d'identité pour l'estuaire de la Gironde, sur cette base une implication coordonnée des acteurs dans la gouvernance du parc naturel régional et du parc marin pourrait lui offrir de nouvelles perspectives économiques. La poursuite de recherches spécifiques et de collecte de nouvelles données tant quantitatives que qualitatives sur ces questions sur l'estuaire de la Gironde mais également sur d'autres territoires estuariens et/ou marins à l'échelle nationale et internationale permettrait de développer des analyses comparées et d'approfondir les résultats de ce travail.

3 ... Et maintenant ? Approche prospective et construction de scénarios

3.1 Introduction

La combinaison de savoirs fonctionnalistes sur les écosystèmes estuariens et d'analyse socio-économique en termes d'héritage et d'innovation soumis à des interprétations diverses n'a pas encore été menée. Il s'agit ici de construire une méthode pour intégrer : (i) ce que peuvent dire les différentes disciplines scientifiques sur le socio-écosystème, (ii) les capacités des acteurs et (iii) différents choix possibles. Ceci permettra de compléter la démarche prévue de manière empirique dans le projet ANR ADAPT'EAU par une réflexion méthodologique en tenant compte des enseignements des projets LITEAU précédents, notamment le projet BEEST.

3.2 Méthodologie mise en œuvre

La tâche 3 du projet ANR ADAPT'EAU (www.adapteau.fr) « Consilience, scénarios et conditions de diffusion des innovations » a été consacrée à une démarche d'intégration des connaissances et à la mise en débat des résultats scientifiques. Cette démarche a donné lieu à la construction de quatre scénarios d'évolution de l'environnement fluvio-estuarien (EFE) de Garonne-Gironde. Les chercheurs du projet TRAJEST se sont focalisés plus spécifiquement sur l'estuaire en intégrant des connaissances spécifiques à ce milieu et ses activités dont, en particulier, celles qui ont été acquises durant ce projet.

3.2.1 Les méthodes de construction de scénarios (G. Bouleau)

L'étude de l'évolution d'un système complexe se heurte souvent au manque d'information sur certaines variables, à des informations de formats hétérogènes et peu compatibles, à des points de vue sur le système qui ne sont pas forcément conciliables. La construction de scénarios permet d'explorer l'avenir de ces systèmes en tenant compte de ces contraintes.

La construction de scénarios est un outil qui permet d'intégrer des savoirs déterministes (modélisables), des savoirs non déterministes (choix d'acteurs) et les implications morales ou politiques des choix. Le principe de l'intégration repose sur trois opérations : l'exploration combinatoire de toute l'étendue possible des différentes variables du système, l'élimination des combinaisons impossibles ou peu probables et la construction d'une cohérence interne par un récit qui ait du sens.

Les méthodes existantes pour construire des scénarios sont multiples mais elles ne sont pas équivalentes.

Il existe des méthodes qui distinguent un **système biophysique** modélisable et une arène de discussion où les acteurs explorent des **stratégies** soumises comme données d'entrée au modèle (Alcamo, 2001). Ces méthodes privilégient un point de vue sur le système biophysique et ne permettent pas de mettre en discussion les incertitudes de la modélisation (Fernandez et al., 2011). Dans le projet ADAPT'EAU, les stratégies des acteurs et les savoirs biophysiques ont été traités de manière à la fois plus symétriques et plus intégrées en explicitant les incertitudes et les hypothèses faites pour chaque variable sociale, biologique, physique ou hybride. (Salles, Labbouz 2015)

Les différentes écoles de prospective se distinguent en fonction de l'importance qu'elles donnent au fait d'associer des acteurs du système. Certaines considèrent que seuls les gestionnaires sont légitimes pour faire ces scénarios parce qu'ils vont être en situation d'agir (Purseley & Van Oosterhout, 2001). D'autres au contraire plaident pour que des scientifiques sans mandat de gestion puissent s'autosaisir de l'avenir de systèmes complexes pour « étudier des écologies futures » (Mermet, 2005). Sur la Garonne, plusieurs exercices de construction de scénarios ont été **participatifs** (Garonne 2050, ...), c'est-à-dire qu'ils ont associé des acteurs du territoire pour construire les visions du futur. Le projet ADAPT'EAU a cherché à compléter ces exercices par un travail de chercheurs.

Néanmoins, les scénarios produits dans un premier temps « en chambre » par les scientifiques ont dans un second temps, été mis en discussion lors de trois séances publiques de restitution. Les débats organisés à cette occasion ont montré que les acteurs du territoire se retrouvaient bien dans ces scénarios qui reflétaient la diversité des points de vue normatifs et des incertitudes. Ces scénarios ont exploré des pistes qui n'étaient pas prises en compte dans les exercices participatifs précédents (scénario 3 : organisation des filières et des métropoles, scénario 4 : initiatives bottom-up...).

Il existe des méthodes qui reposent sur « l'art de faire » d'un prospectiviste qui s'imprègne de connaissances sur le système auprès d'experts, glane des signaux faibles sur les changements possibles et s'appuie sur son expérience pour construire des scénarios (Schwartz, 1991). Cette méthode exploite le **caractère cumulatif des expériences de prospective**. En effet, un prospectiviste qui a travaillé sur l'évolution des consommations d'énergie, sur les déterminants du transport, sur les facteurs d'influence de la démographie, etc... pourra trouver dans cette culture générale des arguments pour construire la cohérence d'un scénario sur un autre système complexe qui dans le futur sera forcément contraint par la démographie, l'énergie et les modes de transport. Mais, a contrario, les connaissances mobilisées ne seront que celles qui ont du sens pour cette personne et lors de la discussion de ces scénarios, le dialogue peut faire apparaître des angles-morts. Dans le projet ADAPT'EAU, la construction des scénarios a été un processus collectif où chaque chercheur a

apporté sa connaissance. Il y a donc des lacunes qui dépendent des compétences mises en commun, mais chaque récit a été discuté de manière collective et possède ainsi une robustesse éprouvée par le dialogue. La réutilisation de ces scénarios dans TRAJEST tient compte du caractère cumulatif de l'exercice prospectif : les variables mises en évidence par les chercheurs de l'espace fluvio-estuarien de la Garonne restent pertinentes pour l'estuaire moyennant quelques modifications. Les futurs possibles de la Garonne décrivent en partie les futurs possibles de l'estuaire : tout n'est pas à réinventer. Les spécificités estuariennes (filière pêche et aquaculture, relation entre port et métropole, fonctionnement hydrosédimentaire, marinisation de l'estuaire) ont été abordées comme des variables complémentaires qui infléchissent les quatre scénarios identifiés.

Les méthodes de construction de scénarios diffèrent enfin dans leur manière de réduire l'étendue des possibles à un petit nombre de scénarios. Les méthodes de prospective stratégique consistent à **hiérarchiser les variables en fonction de leur influence réciproque** (cette hiérarchisation se fait de manière collective par les participants à l'exercice). Les variables considérées comme les plus influentes sont choisies pour structurer les scénarios autour de leurs valeurs extrêmes. Ces méthodes sont dites stratégiques parce qu'elles explorent l'avenir en ciblant quelques leviers d'action jugés les plus importants (Godet, 2004). Ces méthodes excluent qu'une variable puisse être déterminante dans certains scénarios et pas dans d'autres. Les effets des variables les unes sur les autres sont étudiés de manière structurelle, dans une matrice de motricité/dépendance. Une autre option (De Jouvenel, 1999) consiste à ne pas hiérarchiser les variables mais à envisager pour chacune plusieurs futurs possibles et à **explorer la crédibilité des scénarios construits par combinatoire**. Pour réduire le caractère fastidieux de la démarche, les variables peuvent être groupées en grandes composantes pour construire d'abord des micro-scénarios par composante puis des scénarios globaux avec l'ensemble des composantes. C'est la méthode qui a été retenue dans ADAPT'EAU et TRAJEST.

3.2.2 La méthodologie mise en œuvre (B. Labbouz)

Plus précisément, la méthode suivie pour conduire la prospective ADAPT'EAU et élaborer des scénarios interdisciplinaires repose sur six ateliers organisés entre février 2014 et mars 2015, auxquels ont participé 25 chercheurs, issus de l'ensemble des disciplines du projet. Le continuum Garonne-Gironde et son évolution à long terme ont été structurées autour des quatre grandes composantes suivantes : le changement climatique et l'hydrologie naturelle, le fonctionnement de l'écosystème de l'EFE (ECOSYS), les dynamiques sociales et territoriales de l'EFE (DYNA), et la gouvernance de l'EFE (GOUV). Pour chaque composante, plusieurs variables clefs ont été sélectionnées pour répondre au double objectif (1) de rendre compte des résultats obtenus dans le cadre du projet ADAPT'EAU et (2) de caractériser la

composante (voir Tableau 3). Le choix de l'année 2050 comme horizon temporel a été guidé par la disponibilité de données (notamment climatique) ainsi que par la volonté d'entrer en discussion avec la prospective Garonne2050⁵ conduite par l'Agence de l'Eau Adour Garonne en 2014. Des équipes pluridisciplinaires de chercheurs ont été constituées pour décrire et expliciter, à partir des résultats de leurs recherches, les états actuels et les évolutions passées de chaque variable. Des hypothèses d'évolution à long terme de chaque variable ont alors été formulées.

Tableau 3. Présentation des différentes composantes, variables et disciplines mobilisées dans la construction des scénarios.

Composante	Variables	Disciplines impliquées
Changement climatique et hydrologie naturelle	Changement climatique et hydrologie naturelle	Climatologie, hydrologie
Fonctionnement de l'écosystème de l'EFE (ECOSYS)	Hydrologie et ressources en eau Hydro-morphologie et héritages Sources, circuits et transferts de matières et de contaminants métalliques Fonctionnalités écologiques Diversité biologique	Hydrologie, géohistoire, biogéochimie, biologie, écologie estuarienne, écologie fluviale, ichtyologie
Dynamiques sociales et territoriales de l'EFE (DYNA)	Démographie de l'EFE Occupation des sols sur l'EFE Qualité de vie des communes de l'EFE Expérience habitante du cours d'eau Usages de l'eau sur l'EFE	Géographie, sociologie, statistique, anthropologie,
Gouvernance de l'EFE (GOUV)	Mise en visibilité du changement climatique Gestion locale des risques liés à l'eau Instruments économiques pour la gestion de la ressource et des milieux aquatiques Conflits et lobbying sur l'EFE Science, expertise et référentiels de gestion Politiques environnementales européenne	Sociologie, géographie, science politique, hydrologie, économie, mathématiques appliquées

Les deux ateliers suivants ont été consacrés à un premier travail d'intégration des connaissances pour les trois composantes (ECOSYS, DYNA et GOUV). Les hypothèses d'évolution des variables de chaque composante ont été croisées et assemblées afin d'aboutir à des images contrastées et cohérentes de futurs possibles. Les deux derniers ateliers ont été consacrés à l'élaboration de quatre scénarios interdisciplinaires qualitatifs qui articulent une évolution possible de ces trois composantes et une hypothèse de changement climatique.

5 Voir : <http://www.garonne2050.fr>

Chacun des scénarios propose une vision plausible, robuste et cohérente du continuum Garonne-Gironde à l'horizon 2050. Il est constitué d'un récit long (environ 4 pages), d'un résumé, d'un titre, de trois mots clés et d'un schéma représentatif. Les scénarios intègrent tous, avec des niveaux et des degrés différents, l'état de l'écosystème, les modes de gouvernance de l'eau et des milieux, la mise en œuvre d'options d'adaptation, les modes de vie, les pratiques et les préoccupations sociétales sur le territoire de l'EFE Garonne-Gironde.

Ces scénarios ont ensuite été mis en discussion avec les acteurs du territoire à l'occasion de deux journées organisées en avril et en mai 2015, respectivement sur l'estuaire de la Gironde et sur la Garonne moyenne ; puis lors du colloque de restitution finale du projet en octobre 2015. Ces trois journées ont permis porter au débat les enjeux soulevés par ces scénarios et d'animer des discussions publiques et pluralistes sur les politiques à privilégier pour s'adapter aux variations des régimes hydrologiques sur le territoire de l'EFE Garonne-Gironde.

3.3 Résultats : 4 scénarios pour l'estuaire (B. Labbouz, D. Salles, J. Lobry)

Nous présentons ici une version courte des scénarios avec un focus sur la partie Gironde qui est donc l'input de TRAJEST dans la démarche. Ce focus reprend des éléments proposés par le consortium TRAJEST au moment de la construction des scénarios mais aussi certains éléments complémentaires issus de travaux spécifiques menés dans TRAJEST (dynamique de la filière pêche-aquaculture, métropolisation) qui n'ont pu être mobilisés dans ADAPT'EAU en raison des timings parallèles.

Les versions longues des scénarios sont en cours de stabilisation après le colloque de restitution finale du projet qui a eu lieu à Bordeaux le 15 octobre 2015. Ils seront inclus dans leur version définitive dans le rapport à l'ANR ADAPT'EAU et dans un ouvrage collectif dont la maquette est programmée début 2016.

3.3.1 Scénario n°1 : Tout bouge mais rien ne change – Une adaptation par ajustement

3.3.1.1 Résumé

Dans ce scénario (voir Figure 30), l'EFE connaît en 2050 une dynamique d'urbanisation identique à celle des années 2010. Le territoire se structure autour de deux types d'espaces qui se développent et se confrontent : des villes qui s'étalent et se densifient autour des deux métropoles (Bordeaux et Toulouse) et une agriculture intensive dont les prélèvements en eau sont conséquents. Malgré ses impacts avérés, le changement climatique n'est toujours pas considéré comme un enjeu central sur l'EFE. Les organismes gestionnaires interviennent

punctuellement pour répondre à des situations de crise. L'écosystème est doublement impacté par le mode de développement territorial et par l'absence de décisions politiques proactives en faveur de l'environnement. Ainsi, les débits moyens de la Garonne diminuent et la qualité écologique de l'hydrosystème se dégrade continuellement à partir des années 2010 pour atteindre un état critique en 2050.

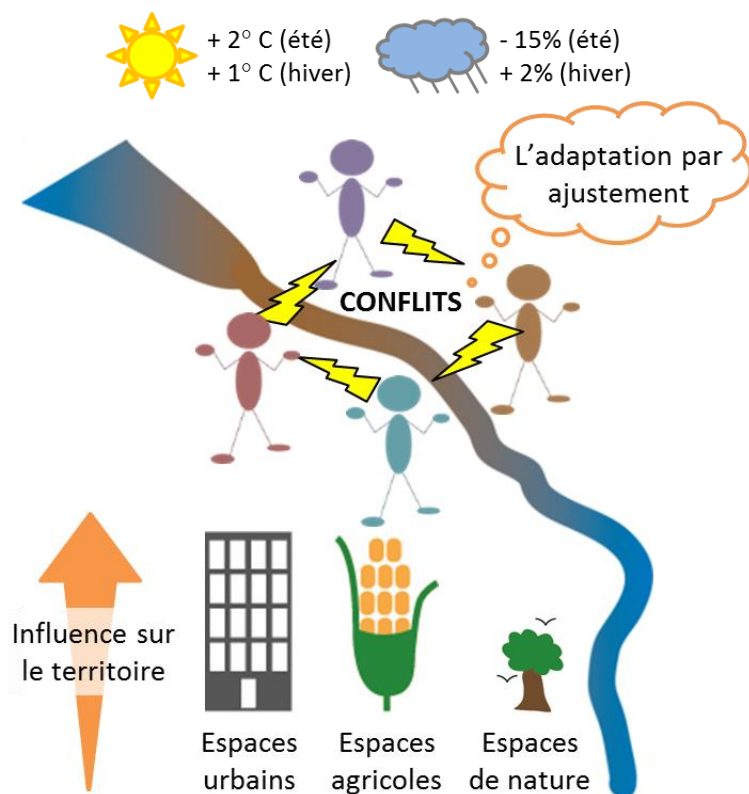


Figure 30. Schéma représentatif du scénario n°1.

3.3.1.2 Focus sur l'estuaire

Ce scénario fait figure de scénario tendanciel. La période 2010 – 2050 voit une poursuite de la diminution globale des débits de la Garonne. En période hivernale, les débits connaissent une légère diminution (- 2%) qui s'accroît en période d'étiages (- 15%).

Les moindres débits de la Garonne entraînent une diminution du transfert sédimentaire global et des flux métalliques bruts associés. Le temps de résidence des eaux et des matières en suspension estuariennes augmente, et avec lui la taille du « bouchon vaseux » et l'étendue vers l'amont des eaux salées. Cette tendance peut entraîner des rétroactions morphodynamiques dans l'estuaire amont, actuellement difficiles à prévoir. L'envasement entraîne une forte diminution des sections estuariennes, qui peut se traduire (1) par l'augmentation de l'effet de convergence, et par la même une augmentation de l'amplitude et de l'asymétrie de la marée, et donc une amplification de la remontée du

bouchon vaseux jusqu'au comblement des voies fluviales; ou bien (2) par une augmentation de l'effet de frottement, et donc un amortissement inattendu de la marée, qui entraînera une repositionnement du bouchon vaseux et de l'intrusion saline plus en aval, limitant les effets de marinisation.

Sans tenir compte de ces modifications morphodynamiques imprévisibles, on considère dans ce scénario que le processus de marinisation se poursuit. Les fonctionnalités écologiques sont profondément modifiées par cette baisse des débits moyens dans la Garonne. D'une manière générale, la qualité écologique de l'EFE diminue et la note DCE sur l'ensemble de l'écosystème baisse régulièrement. Un des premiers effets observés concerne l'augmentation de la salinité de l'estuaire due à la diminution des débits. Les communautés écologiques sont profondément modifiées. Les espèces marines sont ainsi de plus en plus abondantes. Cependant, du fait de l'augmentation de la contamination chimique et de la faible diversité des habitats disponibles (notamment intertidaux) dans les parties médiane et haute de l'estuaire, le bénéfice écologique est nul, voire négatif pour ces populations. Parallèlement, la remontée du bouchon vaseux engendre des épisodes d'hypoxie voire d'anoxie) durable, constituant une barrière physique et chimique pour les poissons migrateurs dont le déclin se poursuit. Plus largement, la régression des zones humides latérales entraîne une diminution des zones de reproduction, de nurserie et de refuge qui affecte l'ensemble des espèces.

Marinisation et réchauffement climatique provoquent l'apparition de plus en plus fréquente de discontinuités spatio-temporelles et de mismatch trophiques. Globalement, la capacité d'accueil trophique continue à diminuer et la viabilité du fonctionnement du réseau trophique est menacée. De nouveaux regime shifts apparaissent. La composition spécifique des communautés est profondément modifiée et les compétitions trophiques s'accroissent (par ex. l'abondance du maigre continue de croître, induisant des compétitions avec d'autres espèces comme le bar). Les politiques de conservation sont toujours soutenues pour certaines espèces emblématiques comme l'esturgeon ou le saumon, mais les objectifs de conservation sont de plus en plus difficiles à atteindre, sinon par des procédés artificiels (migration assistée pour la remontée et la dévalaison). Dans ce contexte de maintien de l'abondance du maigre, la filière pêche pourrait se trouver des remèdes à ses fragilités en se restructurant autour de cette pêcherie et d'aides au maintien de la pêche artisanale.

3.3.2 Scénario n°2 : Puisqu'il faut de l'eau – Une adaptation par développement de l'offre en eau

3.3.2.1 Résumé

En 2050 (voir Figure 31), l'agriculture irriguée est considérée comme le facteur principal de la gestion de l'eau sur l'EFE. Une priorité politique est accordée aux surfaces agricoles irriguées ainsi qu'aux aménagements de stockage et de prélèvement d'eau. Les dispositifs de gestion et de gouvernance de l'eau (comité de bassin, SAGE, EPTB...) sont dominés par les acteurs de la filière agro-industrielle. Les enjeux quantitatifs de la ressource monopolisent la question de l'adaptation au changement climatique. Les outils de gestion de l'eau sont mobilisés pour favoriser la mise à disposition et l'écoulement de l'eau pour satisfaire les usages. L'anthropisation de l'EFE est renforcée par des aménagements dédiés aux besoins quantitatifs de la ressource, au contrôle et à l'atténuation des événements extrêmes (crues, sécheresses...). Les débits moyens connaissent donc une diminution progressive. En 2050, l'EFE est devenu un milieu homogène dont la qualité écologique n'intéresse plus les acteurs : les espèces tolérantes de l'aval colonisent les eaux douces et l'estuaire connaît une marinisation importante.

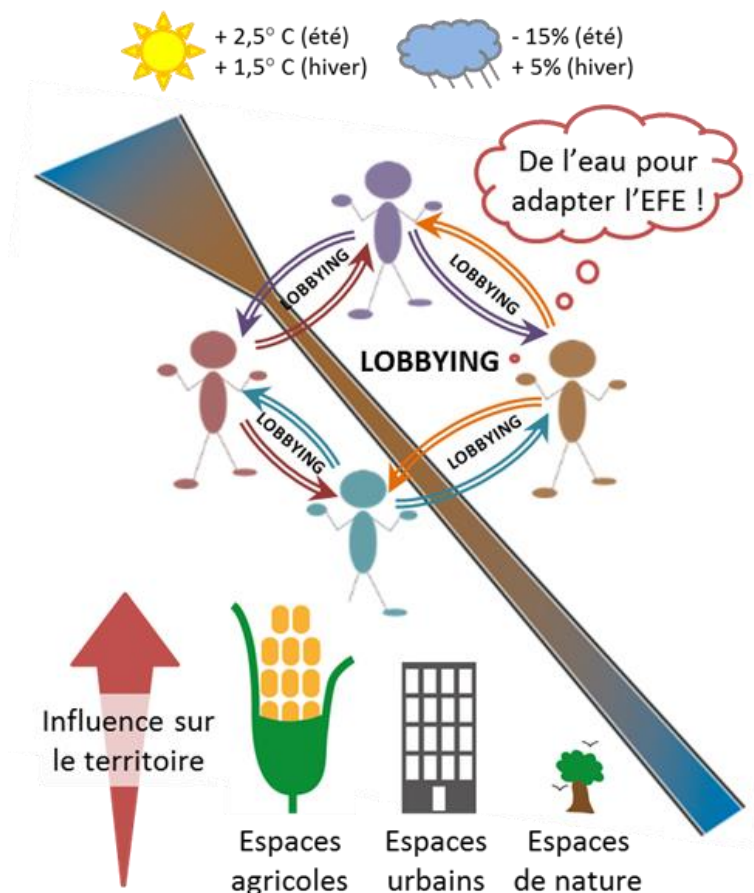


Figure 31. Schéma représentatif du scénario n°2.

3.3.2.2 Focus sur l'estuaire

Les nombreux aménagements hydrauliques permettent d'atténuer et de lisser les effets des évènements extrêmes. On assiste à une diminution globale mais progressive des débits de la Garonne sur la période 2010 – 2050, perturbée par une alternance répétée d'évènements extrêmes dont la fréquence augmente (pour les étiages et pour les crues), mais pas l'intensité. Les débits connaissent une légère augmentation en période hivernale (+2%), mais ils diminuent fortement à l'étiage (- 15%). La priorité de gestion est mise sur le développement de l'offre en eau.

L'estuaire connaît une dégradation forte : l'endiguement est privilégié pour protéger les zones urbaines des submersions marines, et le bouchon vaseux, dont la taille augmente, remonte continuellement. Le bouchon vaseux n'étant plus expulsé, les concentrations des matières en suspension augmentent dans l'estuaire. Ce phénomène est accentué par le dragage massif de l'estuaire et la remobilisation de sédiments contaminés lors des travaux d'aménagement du lit. Lors des crues exceptionnelles, les flux et les concentrations des contaminants particuliers augmentent considérablement. Les possibilités de rétroactions morphodynamiques dues à la persistance du bouchon vaseux, cette fois, seront sous l'influence supplémentaire de l'endiguement, qui limitera fortement toute expansion latérale du flux liquide et rendra plus difficile le maintien de l'équilibre morphologique naturel de l'estuaire. Ces aménagements auront tendance à favoriser l'augmentation de l'asymétrie de la marée et des courants, et donc l'effet du flot et la remontée plus massive des eaux salées et du bouchon vaseux. A terme, un possible effet seuil dû au fort envasement pourrait finalement entraîner un amortissement de la marée et une réduction de l'effet de marinisation. Deux effets antagonistes peuvent être favorisés : approfondissement par creusement du lit ou bien envasement par dépôt excessif du bouchon vaseux.

La qualité écologique de l'EFE n'est pas une préoccupation centrale des gestionnaires. La priorité est donnée à la construction de digues, à l'aménagement portuaire, et aux ouvrages permettant de protéger les zones urbaines (casiers hydrauliques, bassins de rétention...). Dans l'estuaire, l'absence d'expulsion du bouchon vaseux et son « engraissement » continu provoquent des phénomènes d'hypoxie récurrents. Les zones latérales étant aménagées, les zones de reproduction et de nourricerie des poissons migrateurs et estuariens disparaissent. Les poissons marins sont « piégés » dans l'estuaire. Ils sont nombreux mais leur contribution au stock est faible et menace la fitness des populations du Golfe de Gascogne.

Le réchauffement climatique, la régulation planifiée des débits et la régression des zones de nourricerie impactent la phénologie des populations aux différents niveaux du réseau trophique. Dans l'estuaire, les espèces marines sont favorisées mais la qualité écologique et la disponibilité d'habitats fonctionnels diminuant, ces populations peinent à s'installer durablement. La contribution de l'estuaire aux populations marines diminue tandis

que les populations migratrices sont particulièrement impactées. De nouveaux régimes shifts apparaissent et la viabilité du fonctionnement du réseau trophique est menacée. Dans ces conditions, les capacités d'adaptation de la filière pêche-aquaculture pour maintenir son activité économique semblent compromises. Les exploitations ostréicoles restent anecdotiques tandis que le nombre de pêcheurs continue de s'effondrer.

3.3.3 Scénario n°3 : Un EFE apprivoisé par et pour ses métropoles – Une adaptation par l'économie verte

3.3.3.1 Résumé

En 2050 (voir Figure 32), la lutte contre le changement climatique est au cœur des dispositifs de gestion de l'eau. Très interventionnistes, les décideurs publics mettent en œuvre des aménagements afin de contrôler les variations des régimes hydrologiques, quitte à contraindre la dynamique naturelle de l'EFE. Les acteurs, organisés autour de puissantes filières socio-économiques (tourisme, industrie, énergie), mettent en œuvre des options d'adaptation, dans la mesure où elles sont recevables socialement et économiquement. L'urbanisation se densifie sur une partie du territoire, alors que certains tronçons de l'EFE sont aménagés pour offrir des services aux urbains et favoriser des options d'adaptation. Ce développement permet d'améliorer l'attractivité touristique de l'EFE tout en diminuant les prélèvements en eau par une sobriété collective. L'érosion de la qualité écologique de l'EFE ralentit, la diminution des débits moyens est enrayée, et la biodiversité s'améliore.

3.3.3.2 Focus sur l'estuaire

L'évolution du climat sur la zone de l'EFE (stabilisation des températures et des précipitations aux niveaux des années 2010), couplée à des mesures fortes de gestion des étiages par un soutien des débits et une baisse des prélèvements, conduit à une faible diminution puis une stabilisation globale des débits en moyenne.

Cette stabilisation des débits moyens se traduit par une forte hydraulité de l'hydrosystème, favorisée par l'aménagement d'espaces de liberté. Les gestionnaires font le choix d'aménagements permettant l'expression de la mobilité latérale du fleuve et de l'estuaire en tolérant, sur certains tronçons, une dégradation des protections existantes (enrochements, digues), ce qui conduit à une régénération des zones humides. Cette nouvelle dynamique contribue à la restauration écologique. L'augmentation de l'hydraulité et la liberté (re)gagnée par le fleuve permettent de diminuer et de repousser le bouchon vaseux vers l'aval.

Une autre conséquence de cette nouvelle dynamique fluviale concerne l'augmentation des flux sédimentaires et de contaminants métalliques particulaires et une diminution des concentrations des contaminants métalliques. Le transfert sédimentaire vers l'estuaire se déroule de manière régulière et, dans le même temps, l'augmentation des débits permet une meilleure dilution des contaminants métalliques. Cependant, les substances piégées à un moment donné sont susceptibles d'être remobilisées, ce qui participe à la quantité de métaux bio-disponibles en zone côtière.

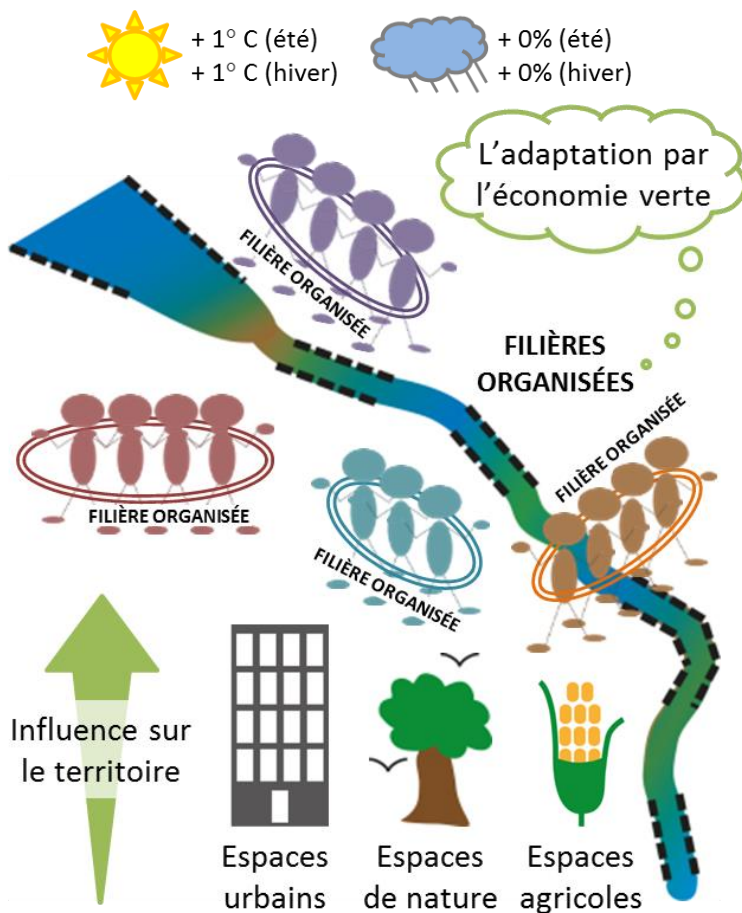


Figure 32. Schéma représentatif du scénario n°3.

Du point de vue hydromorphosédimentaire, la forte hydraulité favorise l'effet de jusant, et donc une limitation de la remontée du bouchon vaseux, qui sera positionné plus en aval mais avec une plus forte concentration, donc une tendance au comblement de la partie aval. La restauration des zones humides favorise un état d'équilibre morphologique de l'ensemble de l'estuaire, avec probablement plus de variations rapides des sections et de l'hydraulique des courants de marée, pour assurer une stabilité morphodynamique globale. La dynamique latérale sera plus forte, en particulier en ce qui concerne la submersion et la sédimentation dans les zones humides. Cet équilibre peut toutefois être modifié par l'augmentation progressive du niveau marin, qui favorisera une asymétrie plus forte de la marée, et donc une nouvelle remontée du bouchon vaseux, avec toutefois des effets

d'envasement moindre si les crues hivernales sont suffisamment fortes pour jouer l'effet de chasse.

D'une manière générale, la qualité et les fonctionnalités écologiques de l'EFE augmentent progressivement grâce aux interventions des gestionnaires. La stabilisation des débits moyens de la Garonne permet à la fois une diminution de la salinité de l'estuaire qui retrouve une dynamique typique des milieux de transition, ainsi qu'une stabilisation, voire une migration vers l'aval du bouchon vaseux certaines années. La restauration des continuités latérales et longitudinales sur certains tronçons entraîne une amélioration sensible des fonctions de nurserie de l'estuaire, notamment pour les poissons marins. La superficie des zones intertidales retrouve son niveau des années 2010, et augmente même dans certains secteurs. Cette amélioration globale de la qualité écologique de l'estuaire se traduit par une augmentation progressive de la note DCE qui finit par atteindre un palier.

Les espèces emblématiques amphihalines, comme le saumon ou l'esturgeon qui ne dépendent pas entièrement de la qualité de l'habitat, restent dépendantes des efforts de conservation. Les autres espèces emblématiques (soles, bars), dont les abondances dépendent beaucoup de la qualité de l'environnement, sont favorisées par une amélioration progressive de leurs habitats. Malgré l'augmentation de la température causée par le réchauffement climatique, la stabilisation globale des débits permet un certain contrôle de la température de l'eau. Dès lors, les phénomènes de discontinuités spatio-temporelles phénologiques restent faibles. Favorisées par les interventions de restauration des continuités latérales et longitudinales, le soutien des effectifs, et le contrôle des espèces invasives, les populations natives et d'intérêts patrimoniaux se maintiennent dans l'écosystème. Plus généralement, le système connaît une restructuration progressive des différents compartiments biologiques. Les conditions sont réunies pour que la filière pêche se pérennise et que la filière ostréiculture se (re)développe. Toutefois, les perspectives économiques de ces filières continuent à dépendre de la capacité des acteurs à s'organiser pour défendre leurs intérêts vis-à-vis des autres acteurs du territoire. L'existence de quelques ports de pêche le long de l'estuaire devient un facteur d'attractivité paysagère et certains pêcheurs professionnels jouent la carte du tourisme

3.3.4 Scénario n°4 : Une voix pour l'écosystème – Une adaptation par les pratiques alternatives

3.3.4.1 Résumé

En 2050 (voir la Figure 33), la dynamique du fleuve et ses aléas sont acceptés. Une nouvelle logique de gestion et de gouvernance est partagée sur l'ensemble du territoire :

l'adaptation à la nouvelle dynamique de l'EFE s'impose et se substitue à la volonté de la contraindre. Étiages sévères et crues se succèdent pour façonner un EFE qui se régénère périodiquement et dont les débits moyens diminuent « en dents de scie ». La diminution de la qualité écologique de l'EFE ralentit mais reste préoccupante. La variation des régimes hydrologiques est devenue une préoccupation centrale pour la population. Les modes de vie et de consommation changent et les rares aménagements s'effectuent dans le respect de l'environnement. L'adaptation est impulsée par des pionniers dont les pratiques alternatives se diffusent puis servent de modèle sur l'ensemble du territoire. Une nouvelle approche intégrative de l'environnement est prônée par les gestionnaires qui favorisent et soutiennent la mise en œuvre d'options d'adaptation.

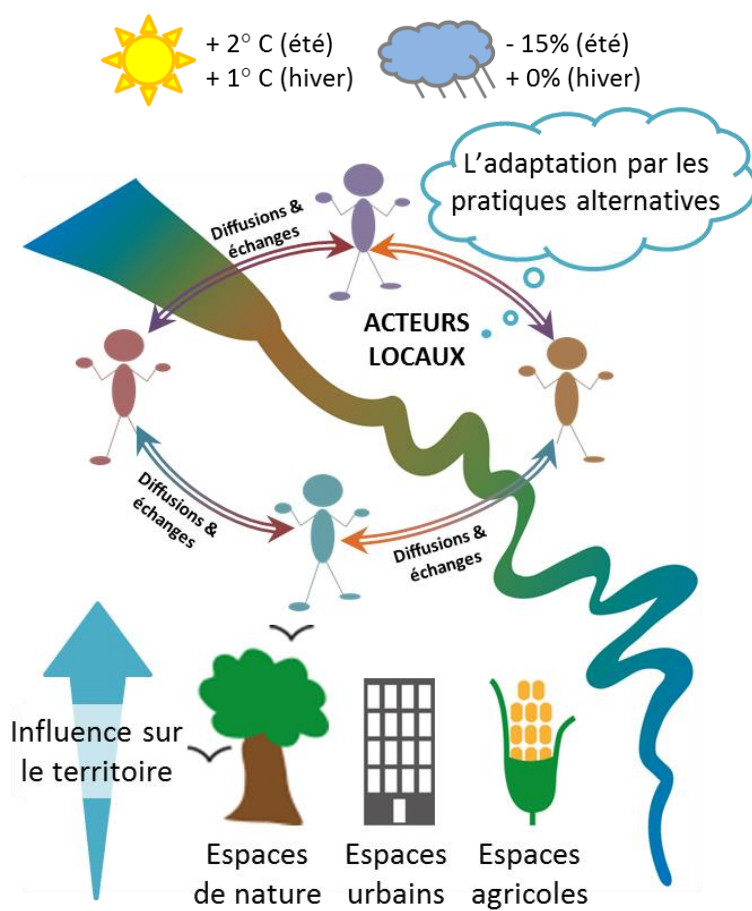


Figure 33. Représentation schématique du scénario 4

3.3.4.2 Focus sur l'estuaire

Dans ce scénario, les débits moyens de la Garonne connaissent une diminution globale sur la période 2010 – 2050, couplée à une augmentation des événements extrêmes en fréquence, intensité et durée pour les étiages ; en fréquence et en intensité pour les crues

(des crues débordantes tous les 10 ans). Cette diminution s'effectue ainsi « en dents de scie » avec l'alternance d'années sèches et d'années humides.

Durant les périodes de sécheresse, le bouchon vaseux s'accroît fortement et remonte vers l'amont. À l'inverse, des crues débordantes plus intenses permettent une certaine régénération de l'hydrosystème. Elles entraînent notamment le bouchon vaseux très en aval. Les gestionnaires décident de tirer profit de ces crues débordantes en restaurant au coup par coup certains secteurs par désendiguement, dépoldérisation, désenrochement, injection de galets, ou encore réouverture de bras morts.

Du point de vue hydro-morphosédimentaire, le contraste saisonnier des débits fluviaux et la restauration des zones humides favorisent les dynamiques longitudinales et latérales, assurant un meilleur équilibre morphologique à l'estuaire. Les mécanismes de déplacement du bouchon vaseux très en aval ou vers l'amont pourraient théoriquement favoriser une distribution plus équilibrée des flux de dépôt entre l'amont et l'aval, avec peu de modifications notables des sections. Toutefois, s'agissant d'effets antagonistes, les conséquences à plus long terme sont très difficiles à prévoir, en ce qui concerne la forme de l'onde de marée et la tendance à la remontée du bouchon vaseux et des eaux salées.

La récurrence et l'amplitude des étiages et des crues produisent des situations extrêmes qui impactent les milieux et leurs fonctionnalités écologiques. Le stock « naturel » de poissons migrateurs est fortement impacté par le bouchon vaseux. Durant les épisodes d'étiages sévères, le phénomène d'hypoxie s'accroît et entraîne des mortalités importantes (mulets, alosons). La continuité latérale et longitudinale reste en moyenne faible sur l'hydrosystème, même si celle-ci est restaurée lors des années humides grâce aux crues débordantes. Finalement, les bienfaits des crues régénératrices ne font que retarder la dégradation progressive de la qualité écologique de l'EFE.

Le réchauffement climatique et la diminution des débits en moyenne entraînent une augmentation de la température de l'eau sur l'estuaire. Les périodes d'occurrence dans l'estuaire sont modifiées, provoquant l'apparition de plus en plus fréquente de discontinuités spatio-temporelles de la phénologie. Malgré des effets perturbateurs, l'alternance d'années sèches et d'années humides permet de dynamiser des milieux hétérogènes qui se régénèrent régulièrement. Dans l'estuaire, la répétition des périodes d'étiages entraîne un accroissement moyen de la salinisation, ce qui favorise les peuplements plutôt marins. Cependant, l'augmentation de la contamination chimique et la diminution d'habitats disponibles pénalisent les populations qui utilisent l'estuaire comme zone de nurserie. Globalement, la qualité écologique de l'estuaire n'augmente pas. La situation du début des années 2000 perdure finalement. Les poissons marins sont « piégés » dans l'estuaire. Ils sont nombreux mais leur contribution au stock est faible et menace la fitness des populations du Golfe de

Gascogne. Les conditions de maintien de la filière pêche-aquaculture sont très incertaines. La survie de l'activité dépend alors essentiellement de la capacité des acteurs à identifier des stratégies très alternatives comme celles basées sur différentes formes d'agrotourisme

4 Synthèse : des pistes de recherche pour demain

La démarche prospective a permis de mettre en lumière les difficultés actuelles de la communauté scientifique à proposer des projections objectives et quantifiées à moyen terme des différents aspects du fonctionnement du socio-écosystème estuarien. Ce constat peut être fait du point de vue disciplinaire, il est encore plus vrai du point de vue interdisciplinaire.

Nous proposons ici quelques pistes disciplinaires pour aller en ce sens ?

Du point de vue HMS, il apparaît fondamental de poursuivre l'étude rétrospective des changements morphologiques récents dans l'estuaire. Pour le moment ces changements semblent corrélés aux diminutions des débits fluviaux, mais ceux-ci ne suffisent pas à expliquer seuls la complexité des alternances sédimentation-érosion observées dans l'estuaire. De même, dans une perspective de meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, il faut pouvoir mieux analyser les transformations de l'onde de marée, en augmentant la densité d'observations : ajout d'années pour lesquelles l'on dispose de bathymétries, et ajout de stations marégraphiques intermédiaires entre l'embouchure et Bordeaux.

Le travail par modélisation numérique permettra d'accéder, par le calcul, à des variables non accessibles par la mesure. D'un part, la simulation avec des bathymétries anciennes permettra de mieux connaître les champs de salinité, turbidité et courant passés, et donc de mieux caractériser les habitats. D'autre part, la simulation de scénarios faisant varier les niveaux moyens, les marnages, débit liquides et solides, permettra de mieux affiner et de rendre plus robustes les scénarios proposés ici sur la base essentiellement de l'expertise.

De même, il est important de s'engager vers une modélisation dynamique du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde afin de pouvoir explorer des scénarios quantitatifs et en déduire des facteurs de viabilité. Les travaux récents de modélisation trophique ont essentiellement consisté à comparer des images statiques du réseau trophique estuarien. Si cette comparaison permet d'effectuer un diagnostic pertinent sur l'« état » du réseau trophique pour les différentes périodes étudiées, elle ne permet ni de prendre en compte explicitement la variabilité temporelle, ni de faire des projections. L'objectif est donc d'implémenter une version plus dynamique des modèles trophiques disponible sur la Gironde pour adresser notamment des questions du type : **Quelle est la viabilité à moyen terme de la fonction de nourricerie de l'estuaire ?** Cette question est au cœur des recherches menées dans le cadre du projet NAVIRE (SceNArios of bioeconomic VIability and REsilience for ecosystem-based fisheries management in Aquitaine) financé par le LabEx COTE et dans

lequel s'inscrit une partie des perspectives de TRAJEST. En se basant sur les modèles Ecopath déjà calibrés (Lobry et al., 2008 ; Chevillot et al., 2015) et sur les longues (30 ans) séries chronologiques sur les différents compartiments trophiques de l'estuaire, il s'agira de calibrer et implémenter les versions dynamiques de la suite EwE (Ecopath with Ecosim, www.ecopath.org) à savoir EcoTroph et Ecosim. L'objectif, *in fine*, est de pouvoir implémenter des scénarios crédibles d'évolution à moyen terme de la biodiversité et de discuter leur impact sur la résilience et la viabilité du fonctionnement trophique de l'estuaire.

Par ailleurs, puisque, d'un point de vue écologique, une des questions majeures porte sur la qualité de la nurserie de la Gironde aujourd'hui, il apparaît nécessaire de travailler sur la contribution de l'estuaire aux stocks marins. Cette question de recherche doit se décliner en plusieurs sous-questions. Parmi ces sous-questions figure l'analyse de l'impact des conditions hydrologiques et de la qualité de l'eau sur la dynamique des poissons marins. Le projet MOMBASAR (**MO**deling **ME**chanistic **Bio**Accumulation of organic contaminants in the food web of the **Sole** *Solea solea* in the Gironde estu**ARY**) finance lui-aussi par le LabEx COTE, est un premier pas en ce sens. Il vise à construire un modèle mécaniste de la bioaccumulation de plusieurs familles de contaminants organiques dans le réseau trophique de la sole. L'objectif, *in fine*, est de pouvoir modéliser l'impact de ces contaminants et du contexte hydrologique sur le cycle de vie de la sole et sur la dynamique de sa population.

Plus globalement, d'un point de vue sociétal, la métropolisation du territoire est une préoccupation majeure. En effet, les territoires périphériques des métropoles estuariennes sont confrontés à des enjeux qui concernent la pression de l'urbanisation périurbaine ou touristique, l'exposition aux risques d'inondation et l'encadrement de leur développement futur par des réglementations restrictives en matière d'urbanisme (PPRI, PAPI, Directive européenne inondation, loi Gemapi pour la France). Ces territoires sont également marqués par le recul des activités rurales et estuariennes traditionnelles (industrie portuaires, agriculture, conchyliculture, pêche, chasse....) ; par des enjeux de conservation de biodiversité et de corridor écologique (trame verte-bleue du Grenelle de l'environnement), le potentiel de développement d'activités touristiques ou récréatives (notamment croisières fluviales) concernent tout particulièrement ces espaces estuariens. Dans ce contexte, alors qu'historiquement les intérêts et les logiques de gouvernance propres à chacun de ces territoires estuariens urbains ou ruraux ont été pensés de manières relativement séparées voire antagonistes, le changement climatique tend à imposer une gouvernance adaptative intégrative et « sans frontière » qui prend en compte tout un ensemble d'interdépendances entre les territoires estuariens : territoriales (reconfiguration géopolitique), cognitives (mises en visibilité des problèmes publics), stratégiques (influence des stratégie d'acteurs) et

politiques (espaces de définition et de régulation du changement global). L'estuaire de la Gironde est au cœur de ces interdépendances.

D.

Gestion du projet

1 Rappels : Informations administratives

Date d'engagement de la subvention : La convention a été signée le **24 septembre 2012**

Budget total du projet : Le budget total du projet s'élève à **897 451 €** incluant les coûts complets pour le partenaire 1 (Irstea) et les coûts marginaux pour le partenaire 2 (EPOC).

Montant de la subvention MEDDE : La subvention allouée par le MEDDE à **100 000 €**. Elle correspond à 11,14% du coût complet de la recherche tel qu'il a été calculé dans les fiches financières et à 12,14% de la dépense subventionnable du projet telle qu'elle est indiquée dans la convention.

Cofinancements obtenus (organisme, montant, durée)

	IRSTEA	UB1 (EPOC)	<i>Total</i>
Fonds propres (salaires permanents)	313 639,53	73 500	<i>387 139,53</i>
Fonds propres (environnement scientifique)	340 014,19		<i>340 014,19</i>
CR Aquitaine	70 333,20		<i>70 333,20</i>

Participants au projet (nom fonction affiliation)

Prénom NOM	Fonction	Affiliation	Thématique
Jérémy LOBRY	IR	Irstea	Modélisation écologique
Gérard CASTELNAUD	IR	Irstea	Halieutique
Philippe BOËT	DR	Irstea	Ecologie
Michel GIRADIN	IR	Irstea	Ecologie halieutique
Maud PIERRE	AI	Irstea	Biostatistiques
Xavier CHEVILLOT	CDD Doct.	Irstea	Modélisation trophique
Flavien FAUVEL	CDD IE	Irstea	Géomatique
Clarisse CAZALS	CR	Irstea	Economie
Gabrielle BOULEAU	IPEF	Irstea	Sociologie
Christophe BOSCHET	IE	Irstea	Economie
Denis SALLES	DR	Irstea	Sociologie
Caitriona CARTER	DR	Irstea	Economie
Aldo SOTTOLICHIO	MCF	U. Bordeaux	Modélisation HMS
Vincent MARIEU	IR CNRS	U. Bordeaux	Transfert particuliers et HMS
NN	CDD Post-Doct.	U. Bordeaux	Modélisation HMS

2 Valorisation et diffusion

2.1 Livrables et outputs

2.1.1 HMS et Habitats

Les premiers développements de ce travail ont fait l'objet de différents rapports de stages de fin d'étude en amont du projet TRAJEST.

Les résultats sur l'historique des bilans sédimentaires et de la marée sont destinés à faire l'objet d'une publication scientifique dans une revue de rang A du domaine.

- 1 rapport M2 Océanographie de l'Université de Bordeaux : Joselyn Arriagada (2013) Évolution morphologique récente de l'estuaire de la Gironde, 1953-1994.
- 1 rapport M1 Océanographie de l'Université de Bordeaux : Yoann Bichot (2015) Analyse des variations multi-décennales de l'onde de marée dans l'Estuaire de la Gironde.

2 communications internationales :

- Sottolichio, A., V. Hanquiez, H. Périnotto, L. Sabouraud, O. Weber (2013) Evaluation of the recent morphological evolution of the Gironde estuary through the use of some preliminary synthetic indicators. 12th Int. Coastal Symposium, Plymouth (GB), 8-12 Avril 2013
- Sottolichio, A., Arriagada, J., Jalon Rojas, I., Hanquiez, V., Schmidt, S. (2015) Recent morphology evolution of a macrotidal convergent turbid estuary (the Gironde, France). 23rd CERF Biennial Conference, Portland (OR, USA), 8-12 novembre 2015

1 publication courte dans une revue internationale rang A

- Sottolichio, A., V. Hanquiez, H. Périnotto, L. Sabouraud, O. Weber (2013) Evaluation of the recent morphological evolution of the Gironde estuary through the use of some preliminary synthetic indicators. **Journal of Coastal Research**, Sp. Issue 65, 1224-1229, DOI: 10.2112/SI65-207.1

Les résultats du volet SIGHF ont fait l'objet de plusieurs valorisations :

- 1 Rapport M2
- 1 Rapport d'étude (AEAG)
- 1 Communication orale en juin 2012 dans un colloque international :
- Fauvel, F.; Just, A.; Marieu, V.; Sottolichio, A.; Lobry, J. Towards the evaluation of ecological consequences of hydromorphological evolutions of the Gironde estuary: A

preliminary approach combining GIS and hydrodynamics modelling. ECSA 50, 03/06/2012 - 07/06/2012. Venise, ITA; 2012

Par ailleurs, à moyen terme, le SIG-HF tel que développé dans le cadre de ce travail a vocation à devenir un outil de synthèse des connaissances qui pourrait être mis en œuvre à destination des gestionnaires de l'estuaire dans des démarches de concertation/discussion. Des outils similaires développés sur l'estuaire de la Loire par le GIP Loire Estuaire (www.loire-estuaire.org) et sur la Seine par le GIP Seine Aval (<http://seine-aval.crihan.fr>) sont déjà utilisés en ce sens. Des discussions sont en cours avec l'Agence de l'Eau Adour Garonne.

2.1.2 Le fonctionnement trophique du système et son évolution

Cette partie a fait l'objet de diverses valorisations académiques :

1 mémoire de M2 :

- Rigaud A., 2013. Les petits pélagiques dans l'estuaire de la Gironde : Evolutions des abondances des principales espèces dans le contexte du changement global. Mémoire Ingénieur Agronome, Spécialisation Halieutique, AgroCampus Ouest, Rennes.

Trois publications scientifiques

- Chevillot, X., Pierre, M., Drouineau H., Chaalali A., Sautour B., Lobry J. Accepté. Abrupt shifts in the Gironde fish community: an indicator of ecological changes in an estuarine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*. (Annexe 3)
- Chevillot X., Drouineau, H., Lambert, P., Sautour, B. & Lobry, J. Soumis. Toward a phenological mismatch in estuarine pelagic food web. *PLoS ONE*. (Annexe 4)
- Chevillot X., Tecchio S., Chaalali A., Lassalle G., Selleslagh J., Castelnaud G., David V., Bachelet G., Niquil N., Sautour B., Lobry J. Global changes jeopardize the trophic capacity of estuarine ecosystems: the Gironde food web as case study. *Progress in Oceanography* (en preparation, texte non diffusable -)

Plusieurs communications à des colloques scientifiques

- Chevillot, X., Pierre, M., Drouineau H., Chaalali A., Sautour B., Lobry J. 2014. Impact of climate abrupt shift on fish biodiversity: the case of the Gironde estuary. ECSA 54, 12/05/2014 - 16/05/2014, Sesimbra, POR.
- Chevillot, X., Pierre, M., Drouineau H., Rigaud A., Luczak, C., Sautour B., Lobry J. Investigating impacts of environmental factors on the Gironde estuarine fish species dynamics: a typology and modelling of species trajectories using Dynamic Factor Analysis (DFA) and Generalized Linear Mixed Models (GLMM). ECSA 54, 12/05/2014 - 16/05/2014, Sesimbra, POR.

- Chevillot X, Selleslagh J, Lassalle G, David V, Bachelet G, Sautour B, Lobry J (2015) Abrupt ecological changes in estuarine food webs. The Gironde estuary as case study ISOBAY 2014, Arcachon, France
- Chevillot X, Selleslagh J, Lassalle G, David V, Bachelet G, Sautour B, Lobry J (2015) Abrupt ecological changes in estuarine food webs. The Gironde estuary as case study ECSA55, London, UK
- Chevillot X., Pierre M., Drouineau H., Sautour B., Lobry J., 2015. Changements abrupts et modifications phénologiques : des indicateurs de changements fonctionnels dans les écosystèmes estuariens. 12ème colloque scientifique organisé par l'AFH - Montpellier, 1-3 juillet 2015.

2.2 Synthèse des livrables et outputs

Le tableau suivant reprend les livrables, moyens et objectifs tels qu'ils étaient affichés dans le projet. Chacun de ces items a été soit réalisé (X), soit reporté (/), soit abandonné (-).

Les items réalisés ont pu l'être conformément à ce qui était prévu dans le texte du projet ou de façon différente en lien avec la dynamique du projet ou les résultats obtenus.

Les items reportés sont commentés. Pour la plupart d'entre eux, les actions sont planifiées à moyen terme.

Les items abandonnés l'ont été pour différentes raisons : choix de la thèse ou dynamique du projet (cf. gestion de projet 3.1.1 ci-dessous)

Tâches / moyens / Livrables		Commentaire	
<i>Axe 1</i>	<i>Evolution rétrospective du socio-écosystème</i>		
A1.1	Analyse de l'évolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires (HMS).		
Objectifs	caractériser l'évolution de la morphologie au cours des dernières décennies, basée sur des indicateurs tels que les sections mouillées, les surfaces intertidales et les bilans érosion-dépôt	X	
	retracer l'évolution des habitats physiques en termes de conditions hydrodynamiques (propagation de la marée, dynamique de la salinité et du bouchon vaseux)	X	
	Ces évolutions seront comparées à celles de l'estuaire de la Seine	/	prévu 2016
Moyens	CDD post-doctoral géré par le laboratoire EPOC	X	
Livrables	<i>Publication scientifique,</i>	X	+ d'autres prévues en 2016
	input pour la partie A1.2.	X	
	Participation à des colloques internationaux.	X	+ d'autres prévues en 2016
A1.2	Caractérisation des fonctions écologiques associées aux différents habitats estuariens		
Objectifs	le développement de cet outil sera consolidé	X	
	La cohérence des cartographies obtenues avec les données d'observation disponibles sur l'estuaire sera analysée	X	
	La sensibilité des cartes obtenues à certains paramètres d'habitats utilisés pour la cartographie sera testée afin d'évaluer l'incertitude associée aux cartes produites	X	
	le SIG-HF sera mobilisé afin d'établir une situation « historique » de la distribution et de la surface des habitats fonctionnels.	-	travaux reportés
	Cette situation historique sera comparée à la situation actuelle	-	
Moyens		X	Stage + CDD Flavien Fauvel
Livrables	<i>Rapport de synthèse sur les potentialités d'utilisation du SIG-HF en Gironde</i>	X	
	<i>1 à 2 Publications scientifiques combinant les résultats de A1.1 et A1.2</i>	-	travaux reportés
	<i>Participation à des colloques internationaux</i>	X	

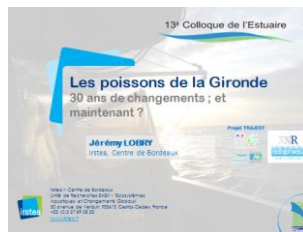
Tâches / moyens / Livrables		Commentaire	
A1.3	Modélisation du fonctionnement trophique des systèmes et son évolution		
Objectifs	l'évolution de la structure et du fonctionnement des réseaux trophiques de la Gironde	X	
	Un premier travail spécifique sera mené à partir des séries temporelles	X	
	(i) d'explorer les évolutions dans les dynamiques prédateurs-proies au moyen de modèles de type Lotka-Volterra et/ou NPZ+	-	Tâche abandonnée dans la thèse
	(ii) de calibrer une version dynamique (en utilisant par exemple ECOSIM) du modèle à l'équilibre développé par Lobry et al. en 2008.	X	3 modèles / shifts
Moyens	doctorant recruté en CDD à Irstea-EPBX.	X	Ms soumis en décembre
Livrables	1 à 3 publications scientifiques	X	3 publications soumises
	mémoire de doctorat	X	soumission en décembre
	participation à des colloques internationaux	X	
A1.4.	Etat des lieux socio-économique rétrospectif global.		
Objectifs	Ce volet sera exclusivement traité dans le cadre du projet ANR ADAPT'EAU	-	reprise d'ADAPT'EAU
Livrables	Input pour l'analyse des parties A1.1, A1.2 et A1.3	X	ADAPT'EAU
A1.5.	Evolution socio-économique de la filière pêche-aquaculture		
Objectifs	développer une analyse de la filière pêche-aquaculture	X	
	à partir de données recueillies par Irstea sur la pêche professionnelle dans l'Estuaire de la Gironde	X	
	des données qualitatives et quantitatives collectées dans le cadre de ce projet	X	
Moyen	Stage de M2	X	Stage Céline Crochot
Livrables	Mémoires de stage	X	
	1 à 3 publications scientifiques	/	prévu 2016
	participations à des colloques	/	prévu 2016
Axe 2.	Modélisations prospectives et constructions de scénarios		

Tâches / moyens / Livrables		Commentaire	
A2.1.	Méthodologie de construction de scénarios et prise en compte de l'incertitude		
Objectifs	compléter cette démarche prévue de manière empirique par une réflexion méthodologique en tenant compte des enseignements des projets LITEAU précédents, notamment le projet BEEST.	X	
Livrables	<i>1 publication scientifique</i>	X	Livre ADAPTEAU + Publication collective 2016
	<i>participation à la démarche ADAPT'EAU</i>	X	
	<i>séminaire d'échange avec les acteurs de la Seine (GIPSA)</i>	X	Séminaire Seine Aval - décembre 2015
A2.2.	Evolutions possibles des conditions hydrodynamiques dans un contexte de changement climatique		
Objectifs	simulations hydrodynamiques	X	hypothèses empiriques
	comparés avec les travaux similaires menés sur la Seine	-	travaux reportés
A2.3	Evaluations de certaines trajectoires prospectives possibles des communautés écologiques estuariennes.		
Objectifs	simulations à partir du SIG-HF (A1.2) et des modèles trophodynamiques	-	hypothèses empiriques, inclus dans scénarios
	Des comparaisons seront effectuées mettant en regard des surfaces d'habitats potentiels actuelles et des surfaces modélisées à horizon lointain	-	travaux reportés
	Des hypothèses d'aménagement ou de restauration de certains habitats rivulaires seront également testées	X	hypothèses empiriques, inclus dans scénarios
	d'envisager par exemple les effets possibles sur le réseau trophique des évolutions éventuelles	X	hypothèses empiriques, inclus dans scénarios
	apporter des éléments d'éclairages à la démarche de consilience programmée dans le projet ANR ADAPT'EAU	X	
Livrables	<i>2 à 3 publications scientifiques,</i>	/	prévu 2016
	<i>participation à la démarche de consilience d'ADAPT'EAU</i>	X	

2.3 Valorisations « publiques », Actions de diffusion, de médiation

Au-delà de la valorisation scientifique académique, les connaissances acquises lors de ce projet ont donné lieu à plusieurs valorisations publiques et à des actions de diffusion et de médiation, en particulier au travers de conférences.

1. Lobry J., Chevillot X., Sautour B., Bachelet G., 2015. Quelle évolution à long terme de la biodiversité aquatique de l'estuaire de la Gironde ? Colloque « Écosystèmes estuariens, quels enjeux pour la biodiversité ? », Royan, 29 janvier 2015
2. Lobry J., 2015. Les poissons de la Gironde - 30 ans de changements ; et maintenant ? 13^e Colloque de l'Estuaire, Conservatoire de l'Estuaire, Blaye, 28 mars 2015
3. Lobry J., 2015. Changement climatique, biodiversité et fonctionnement des écosystèmes côtiers. Séminaire stratégie d'adaptation aux changements climatiques des estuaires et du domaine côtier en Aquitaine, Bordeaux, 18 Mai 2015
4. Lobry J. et Lepage M., 2015. Les milieux naturels et les poissons. Séminaire du SAGE « L'estuaire de la Gironde : entre littoral et bassins versants » - Quelles interactions et quelle coordination dans la gestion de ces continuums ? Artigues-près-Bordeaux, 21 mai 2015
5. Lobry J., 2015. La marinisation de l'estuaire de la Gironde. Séminaire de Conseil Scientifique du comité de bassin Adour-Garonne, Toulouse, 9 juin 2015
6. Lobry J., Etcheber H., 2015. « L'estuaire de la Gironde est-il encore en bonne santé? ». Les jeudis culturels de l'Aquaforum, Bègles, 19 Novembre 2015.



Au travers de ces 6 conférences, nous nous sommes adressés tantôt à un grand public (1, 2, 3, 6) tantôt à des élus et des gestionnaires (1, 3, 4, 5).

Elles ont permis à ces différents publics d'appréhender les dernières connaissances (1) sur l'évolution à long terme de l'écosystème et de la biodiversité associée, (2) sur l'impact du changement climatique mais aussi de la gestion hydrologique locale sur cet écosystème et sa biodiversité et (3) sur les interrogations actuelles sur la viabilité future des fonctionnalités majeures associées à cet espace.

Tous ces éléments contribuent aujourd'hui à déconstruire l'image d'Epinal dont bénéficiait jusqu'à très récemment encore l'estuaire de la Gironde, celle d'un estuaire riche, préservé, avec tout son cortège de poissons migrateurs amphihalins.

2.4 En termes de gestion et d'action publique

Ces conférences, mais surtout la diffusion des scénarios ont vocation à éclairer les politiques publiques et les décisions locales à moyen terme.

Les scénarios ont été mis en discussion avec les acteurs du territoire à l'occasion de deux journées organisées en avril et en mai 2015, respectivement sur l'estuaire de la Gironde et sur la Garonne moyenne ; puis lors du colloque de restitution finale du projet en octobre 2015. Ces trois journées ont permis porter au débat les enjeux soulevés par ces scénarios et d'animer des discussions publiques et pluralistes sur les politiques à privilégier pour s'adapter aux variations des régimes hydrologiques sur le territoire de l'EFE Garonne-Gironde.

3 Dynamique du projet

3.1.1 Dynamique scientifique

La dynamique du projet s'est articulée en plusieurs temps complémentaires.

Dans un premier temps, en début de projet, les actions ont été lancées individuellement et séparément. En particulier, la thèse de Xavier Chevillot a démarré en novembre 2012. Deux comités de thèse se sont déroulés en décembre 2013 et décembre 2014. Ils ont permis de préciser la dynamique de la thèse et d'effectuer des choix méthodologiques et des réajustements. Le démarrage des tâches A1.4 et A1.5 a été reporté en raison de contraintes administratives internes à Irstea relatives au travail des stagiaires.

Dans un second temps, une grande partie des chercheurs du consortium TRAJEST a été impliquée dans la dynamique prospective ADAPT'EAU. Le déroulement conjoint des deux projets a été un moteur pour chacun d'eux. Les échanges ont été nombreux et riches. Ils ont permis d'élever significativement le niveau de pertinence de la démarche prospective conjointe. Cela a abouti à la construction des 4 scénarios présentés dans le rapport scientifique (cf. 3.3). Vu de l'extérieur, nous sommes conscients que cela a pu conduire à une vision assez floue du contour du projet TRAJEST et à sa visibilité. Néanmoins, la démarche les apports de la démarche TRAJEST à la prospective ADAPT'EAU ont été significatifs et ils ont été soulignés lors du colloque de restitution du projet ADAPT'EAU et le seront dans les livrables du projet (rapport ANR, ouvrage collectif, publications...) qui ne sont pas encore finalisés au moment de la rédaction de ce rapport. A l'inverse, la démarche ADAPT'EAU a eu un effet de levier considérable sur la prospective autour de l'estuaire. Elle a d'accéder à un niveau de résultat qui n'aurait pu être atteint dans le seul projet TRAJEST (cf. 3.2.1).

En parallèle, des séminaires internes au projet, moins formels, se sont déroulés pendant la 3^e année du projet à raison de deux réunions par trimestre en moyenne. Ces

réunions visaient moins à présenter l'avancement du projet qu'à discuter des enjeux autour de l'estuaire au sein du groupe pluridisciplinaire qui constitue le consortium TRAJEST. Proposés en parallèle du processus ADAPT'EAU, l'organisation et la tenue de ces séminaires de discussions ont été hétérogènes soulignant la difficulté de mettre en place de multiples lieux d'échanges, en particulier, pluridisciplinaires. Cependant, ces échanges entre consortium et entre disciplines ont permis de poursuivre les efforts d'implications des équipes de TRAJEST dans des dynamiques interdisciplinaires. Efforts qui avaient déjà été entrepris au cours du projet BEEST (LITEAU III).

Au final, un seul véritable axe du projet aura été partiellement abandonné. Il s'agit de la démarche relative à l'Axe 1 et à la tâche A1.2 sur « la mobilisation du SIG-HF afin d'établir une situation « historique » de la distribution et de la surface des habitats fonctionnels. ». Et ce, pour des raisons de divers ordres (cf. section 2.1.4.1) que l'on rappelle ici :

En premier lieu, pour des raisons humaines. Depuis plusieurs années, il n'y a plus de géomaticien dans l'UR EABX d'Irstea dans laquelle était réalisée cette étude. Les aspects techniques se sont révélés plus complexes que prévu et tout n'a pu être résolu durant le CDD de Flavien Fauvel mobilisé sur cette tâche. D'autant que, en second lieu, la mobilisation de SiAM pour des analyses rétrospectives n'a finalement pas pu être mise en œuvre au même moment. En effet, le calibrage du modèle sur des bathymétries anciennes nécessitait des développements supplémentaires qui n'ont pu être implémentés à temps. Tout cela a conduit à abandonner cette partie de la tâche.

A l'inverse, l'investissement des équipes de TRAJEST dans la démarche prospective, via notamment ADAPT'EAU, a été plus importante qu'initialement prévu. En effet, la méthode des scénarios mise en œuvre demande un investissement important : rédactions de fiches variables, participation à des groupes de travail, à des séminaires, démarches de restitution... Cet investissement a, nous semble-t-il, été pertinent car les scénarios réalisés sont riches et pertinents.

3.1.2 Bilan budgétaire

Pour rappel :

Budget total du projet : Le budget total du projet s'élève à **897 451 €** incluant les coûts complets pour le partenaire 1 (Irstea) et les coûts marginaux pour le partenaire 2 (EPOC).

Montant de la subvention MEDDE : La subvention allouée par le MEDDE à **100 000 €**. Elle correspond à 11,14% du coût complet de la recherche tel qu'il a été calculé dans les fiches financières et à 12,14% de la dépense subventionnable du projet telle qu'elle est indiquée dans la convention.

Décomposition de l'assiette subventionnable par nature de dépense et partenaire

Nature de la dépense	IRSTEA	UB (EPOC)	Total
Charges de personnel autres que permanents	200,332	25,000	225,332
Autres frais de fonctionnement	24,600	4,000	28,600
Prestations de service / sous-traitance			0
Equipement	1,800	0.00	1,800
Frais généraux limités à 4%	9,069	1,160	10,229
Total assiette subventionnable par partenaire	235,801	30,160	
Total assiette subventionnable du projet	265,961.42		

L'essentiel du montant de la subvention obtenue est liée au salaire du CDD Doctorant (Xavier Chevillot) recruté sur la base d'un co-financement LITEAU – Irstea (subvention Région Aquitaine). Ce salaire représente 38% de la subvention demandée.

Cofinancements obtenus (organisme, montant, durée)

	IRSTEA	UB (EPOC)	Total
Fonds propres (salaires permanents)	313 639,53	73 500	387 139,53
Fonds propres (environnement scientifique)	340 014,19		340 014,19
CR Aquitaine	70 333,20		70 333,20

Etat des dépenses Irstea au 15 novembre 2015

L'état des dépenses présenté ci-dessous est un état prévisionnel. Il ne tient pas compte des dépenses relatives à l'équipe UMR EPOC (REPORTING en cours). Il s'arrête au 15 novembre 2015 et n'inclut donc pas les dépenses qui auront lieu entre fin novembre et fin 2016 et qui

comprendront notamment : la finalisation des documents, la finalisation et la soutenance de la thèse de Xavier Chevillot, la participation au colloque de restitution LITEAU...

DÉPENSES	PREVUES	REALISEES	DIFF.	%
1 - Coût complet de la Recherche (incluant coûts de personnel, de fonctionnement et utilisation des équipements généraux)				
1.1) PERSONNEL PERMANENT (salaires+charges)	313,640	188,193	125,446	60
1.2) PERSONNEL PERMANENT (environnement scientifique+frais généraux)	253,419	161,963	91,456	64
2.1) PERSONNEL NON PERMANENT (salaires+charges)	113,737	131,454	-17,717	116
2.2) PERSONNEL NON PERMANENT (environnement scientifique+frais généraux)	86,595	110,303	-23,708	127
2 - Equipement spécifique indispensable aux recherches	1,800	2,664	-864	148
3 - Frais d'investissement et de fonctionnement n'entrant pas dans le coût complet	24,600	12,479	12,121	51
TOTAL GENERAL	793,791	607,056	186,735	76
DEPENSES SUBVENTIONNABLES	140,137	146,597	-6,460	105
PERS. PERMANENT + FES/FGA	653,654	460,459	193,195	70

3.1.3 Implication des acteurs dans le projet

Comme spécifié dans la proposition, les résultats et les éléments de connaissances obtenus dans TRAJEST ont été présentés et mis à la discussion auprès de la communauté scientifique, des acteurs et des gestionnaires régionaux dans le cadre de la démarche de consilience programmée dans la dernière année du projet ADAPT'EAU (en 2015).

Par ailleurs, dans le cadre des coopérations avec le programme Seine Aval (J. Lobry, coordinateur du projet est membre du Conseil Scientifique du programme Seine Aval), la démarche et les résultats seront présentés aux acteurs de la Seine lors du Séminaire Seine Aval des 1 et 2 décembre 2015 pour faire dialoguer les différentes démarches (<http://seine-aval.crihan.fr/web/pages.jsp?currentNodeId=206>).

E.
Annexes

Annexe 1. Fauvel F. et Lobry J., 2014. Evaluation préliminaire des conséquences écologiques des évolutions morphologiques de l'estuaire de la Gironde. Une approche par SIG et modélisation hydrodynamique. Rapport technique sur les travaux relatifs au développement du SIGHF sur l'estuaire de la Gironde. Co-Financements AEAG, LITEAU-TRAJEST, CR Aquitaine et FEDER.

Annexe 2. Fauvel F., 2012. Développement d'un outil de cartographie écologique sur l'estuaire de la Gironde : une approche par SIG et modélisation hydro-morpho-sédimentaire. Mémoire de Master 2 Mention Science de la terre et environnement, écologie, Spécialité Biologie des écosystèmes continentaux, Mention Fonctionnement et dysfonctionnement des écosystèmes aquatiques. Université de Bordeaux I, 25p. + annexes.

Annexe 3. Chevillot, X., Pierre, M., Drouineau H., Chaalali A., Sautour B., Lobry J. Accepté. Abrupt shifts in the Gironde fish community: an indicator of ecological changes in an estuarine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*.

Annexe 4. Chevillot X., Drouineau, H., Lambert, P., Sautour, B. & Lobry, J. Soumis. Toward a phenological mismatch in estuarine pelagic food web. *PLoS ONE*.

Annexe 5. Chevillot X., Tecchio S., Chaalali A., Lassalle G., Selleslagh J., Castelnaud G., David V., Bachelet G., Niquil N., Sautour B., Lobry J. Global changes jeopardize the trophic capacity of estuarine ecosystems: the Gironde food web as case study. *Progress in Oceanography (DRAFT NON DIFFUSABLE)*

Annexe 6. Bouleau G., Salles D., Carter C. 2015. Relation métropole-estuaire. Fiche variable réalisée dans le cadre de la démarche prospective.

Annexe 7. Crochot C., 2015. Analyse de la trajectoire socio-économique de la filière pêche -aquaculture de l'Estuaire de la Gironde depuis 1970. Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Systèmes Agricoles et Agroalimentaires Durables au Sud -Option Elevage en milieux difficiles. Montpellier SupAgro, 37p. + annexes.

Annexe 8. Boschet C. et Castelnaud G., 2015. Adaptation et vulnérabilités de la pêche sur l'estuaire de la Gironde. Une Approche économique. Rapport d'étude réalisé dans le cadre du projet TRAJEST. Irstea, 20p.

F.

Bibliographie

Alcamo, J., 2001. Scenarios as Tools for International Assessments. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark.

Babin, D., 1993. Contribution à l'étude d'une ressource naturelle renouvelable : la pêche professionnelle en eau douce en France. Thèse de doctorat de Géographie, Univ. de Rennes II, 300 pp.

Baird, D. & Ulanowicz, R.E., 1993. Comparative-Study on the Trophic Structure, Cycling and Ecosystem Properties of 4 Tidal Estuaries. Marine Ecology-Progress Series 99: 221-237.

Baird, D., 2009. An assessment of the functional variability of selected coastal ecosystems in the context of local environmental changes. ICES Journal of Marine Science 66: 1520-1527.

Barnston, A.G. & Livezey, R.E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. Monthly Weather Review 115: 1083-1126.

Barthou J. "L'exploitation Des Gisements D'huîtres de L'estuaire de La Gironde et de Son Embouchure Depuis 1870." In Ils Vivent Avec Le Rivage, Pêche Côtière et Exploitation Du Littoral, p 100-150, 2006.

Beaugrand, G., 2009. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. Deep-Sea Res II 56: 656-673.

Beaugrand, G., Harlay, X. & Edwards, M., 2014. Detecting plankton shifts in the North Sea: A new abrupt ecosystem shift between 1996 and 2003. Marine Ecology Progress Series 502: 85-104.

Beaulaton, L., 2008. Systèmes de suivi des pêches fluvio-estuariennes pour la gestion des espèces: construction des indicateurs halieutiques et évaluation des impacts en Gironde. Thèse de doctorat, INP Toulouse, Ecole doctorale Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénierie, Spécialité Agrosystèmes, Ecosystèmes et Environnement, 340 pp.

Béguer, M., 2005. Analyse de l'importance relative du régime thermique et des caractéristiques des bassins versants dans la distribution des assemblages de poissons migrateurs amphihalins de l'Europe de l'Ouest. Mémoire de Master II, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 33 pp.

Béguer, M., 2009b. Réponses d'une population aux forçages environnementaux et anthropiques : le suivi à long terme de la crevette *Palaemon longirostris* de l'estuaire de la Gironde (1979-2007). Thèse doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 252 pp.

Blandin, P., 1986. Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. Bulletin d'écologie Tome 17, n°4.

Bregeon, L., and Chandor M. "Etudes écologiques Liées Au développement Du Port Du Verdon." Centre régional d'études biologiques et sociale, Rennes et laboratoire de l'ISTPM, la Rochelle, 1978, 50p.

Budzinski, H., Jones, I., Piérard, C., Bellocq, J. & Garrigues, P., 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Marine Chemistry* 58: 85-97.

Bürgi, M. & Gimmi, U., 2007. Three objectives of historical ecology: the case of litter collecting in Central European forests. *Landscape Ecology* 22: 77-87.

Carter C. "Globalization, Scottish Fisheries and 'Political Work': Global-EU-Local Dialectics." *Industries and Globalization: The Political Causality of Divergent Responses*, 2008, sec. Chapter 6.

Carter C., Cazals C. "The EU's Government of Aquaculture: Completeness Unwanted." In *The EU's Government of Industries: Markets, Institutions and Politics*, 84–114, 2014.

Castelnaud G., 2002. Caractéristiques de la pêcherie civellière du golfe de Gascogne. Contrat Européen N° 99/023EC/DG FISH (DG XIV). Historique des captures de civelles, intensité actuelle de leur exploitation, variation de leur capturabilité par la pêche professionnelle maritime et indices de colonisation sur la bassin versant de l'Adour. Cemagref, Groupement de Bordeaux, 32 p.

Castelnaud G., 2011. Sturgeon fishing and landings, caviar production during the XXth century in the Garonne Basin and the coastal sea In: Williot P, Rochard E, Desse-Berset N, Kirschbaum F, Gessner J (eds) *Biology and conservation of the Atlantic European sturgeon *Acipenser sturio* L., 1758*. Springer, Chap. 13, 177-194.

Castelnaud G., Guéraud D., Désaunay Y., Elie P., 1994. Production et abondance de la civelle en France au début des années 90. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (1994) 335 : 263-287.

Castelnaud, G. & Babin, D., 1992. La pêche professionnelle fluviale et lacustre en France. *Enquête au fil de l'eau*. CEMAGREF/Min. Environnement, 291 pp.

Castelnaud, G. & Cauvin, G., 2002. Site atelier de la Gironde. Caractéristiques des petites pêches côtières et estuariennes de la côte Atlantique du sud de l'Europe. Cemagref, Groupement de Bordeaux, Rapport final, contrat européen PECOSUDE n°99/024 ED/DG FISH (DGXIV), 58 pp.

Chaalali, A., Beaugrand, G., Boët, P. & Sautour, B., 2013a. Climate-Caused Abrupt Shifts in a European Macrotidal Estuary. *Estuaries and Coasts*: 1-13.

Chaalali, A., Beaugrand, G., Raybaud, V., Goberville, E., David, V., Boët, P. & Sautour, B., 2013b. Climatic Facilitation of the Colonization of an Estuary by *Acartia tonsa*. *PLoS ONE* 8.

Chaalali, A., Chevillot, X., Beaugrand, G., David, V., Luczak, C., Boët, P., Sottolichio, A. & Sautour, B., 2013c. Changes in the distribution of copepods in the Gironde estuary: A warming and marinisation consequence? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Chaalali, A., Chevillot, X., Beaugrand, G., David, V., Luczak, C., Boët, P., Sottolichio, A. & Sautour, B., 2013d. Changes in the distribution of copepods in the Gironde estuary: A warming and marinisation consequence? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 134: 150-161.

Chevillot, X., Selleslagh, J., Lassalle, G., David, V., Bachelet, G., Sautour, B. & Lobry, J., 2015. Abrupt ecological changes in estuarine food webs. The Gironde estuary as case study, ECSA55, London, UK.

Christensen, V. & Pauly, D., 1992. ECOPATH II - a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling* 61: 169-185.

Christian, R.R., Baird, D., Luczkovich, J., Johnson, J.C., Scharler, U.M. & Ulanowicz, R.E., 2005. Role of network analysis in comparative ecosystem ecology of estuaries. In: Belgrano, A., Scharler, U.M., Dunne, J.A. & Ulanowicz, R.E. (Eds), *Aquatic Food Webs: an Ecosystem Approach*. Oxford University Press, pp. 25-40.

Corcuff, P., 1995. *Les nouvelles sociologies. Constructions de la réalité sociale*. sociologie. Nathan.

Coreau, A., Pinay, G., Thompson, J.D., Cheptou, P.-O. & Mermet, L., 2009. The rise of research on futures in ecology: rebalancing scenarios and predictions. *Ecology Letters* 12: 1277-1286.

Costanza, Arge, De groot, Farber, Grasso, Hannon, Limburg, et al. "The Value of Ecosystem Services: Putting the Issues in Perspective." *Ecological Economics* 25 Special section : forum on valueation of ecosystem services (1998): 67–72.

Costanza, R., D'arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & Van Den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.

Courrat, A., Lobry, J., Nicolas, D., Laffargue, P., Amara, R., Lepage, M., Girardin, M. & Le Pape, O., 2009. Anthropogenic disturbance on nursery function of estuarine areas for marine species. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 81: 179-190.

Dauvin, J.-C., 2007. Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future. *Marine Pollution Bulletin* 55: 271-281.

David, P., 1985. Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*: 332-7.

David, V., Chardy, P. & Sautour, B., 2006a. Fitting a predator-prey model to zooplankton time-series data in the Gironde estuary (France): Ecological significance of the parameters. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 67: 605-617.

David, V., Sautour, B. & Chardy, P., 2007a. The paradox between the long-term decrease of egg mass size of the calanoid copepod *Eurytemora affinis* and its long-term constant abundance in a highly turbid estuary (Gironde estuary, France). *Journal of Plankton Research* 29: 377-389.

David, V., Sautour, B. & Chardy, P., 2007b. Successful colonization of the calanoid copepod *Acartia tonsa* in the oligo-mesohaline area of the Gironde estuary (SW France) - Natural or anthropogenic forcing? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71: 429-442.

David, V., Sautour, B. & Chardy, P., 2007c. Successful colonization of the calanoid copepod *Acartia tonsa* in the oligo-mesohaline area of the Gironde estuary (SW France) - Natural or anthropogenic forcing? *Estuarine Coastal and Shelf Science* 71: 429-442.

David, V., Sautour, B., Chardy, P. & Leconte, M., 2005. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 171-184.

David, V., Sautour, B., Galois, R. & Chardy, P., 2006b. The paradox high zooplankton biomass-low vegetal particulate organic matter in high turbidity zones: What way for energy transfer? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 333: 202-218.

De Jonge, V.N., Elliott, M. & Brauer, V.S., 2006. Marine monitoring: Its shortcomings and mismatch with the EU water framework directive's objectives. *Marine Pollution Bulletin* 53: 5-19.

De Jouvenel, H., 1999. La démarche prospective. Un bref guide méthodologique. *Futuribles*, Paris.

Décamps, H. (Ed.), 2010. Evènements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux. *EDP Sciences*, 194 pp.

Decastro, M., Lorenzo, N., Taboada, J.J., Sarmiento, M., Alvarez, I. & Gomez-Gesteira, M., 2006. Influence of teleconnection patterns on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula), *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, pp. 63-73.

Delpech, C., Girardin, M., Lepage, M. & Boët, P., 2010. Long-term changes within the Gironde estuarine small fish and shrimp communities: Effects of hydrologic and climatic factors. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Elliott, M. & Quintino, V., 2007. The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin* 54: 640-645.

Eu, 2000. Parliament and Council Directive 2000/60/EC of 23rd October 2000. Establishing a Framework for Community Action in the field of Water Policy. Official Journal PE-CONS 3639/1/00 REV 1, Brussels.

Eu, 2005. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council, establishing a Framework for Community Action in the field of Marine Environmental Policy. COM (2005), 505 final, SEC (2005), 1290, Brussels, 31 pp.

Fernandez, S., Bouleau, G. & Treyer, S., 2011. Reconsidérer la prospective sur l'eau en Europe. Développement Durable et Territoires 2.

Feuillassier, L., Beguer, M., Pauliac, G., Boët, P., Girardin, M. & Elie, P., 2012. Morphological anomalies in estuarine shrimp larvae. Crustaceana 85: 11-25.

Finn, J.T., 1980. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. Ecology 61: 562-571.

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. & Norberg, J., 2005. Adaptive governance of social-ecological systems, Annual Review of Environment and Resources. Annual Reviews, Palo Alto, pp. 441-473.

Fox, D., 2007. Back to the no-analog future. Science 319: 823-825.

Gilliers, C., Le Pape, O., Desaunay, Y., Bergeron, J.P., Schreiber, N., Guerault, D. & Amara, R., 2006a. Growth and condition of juvenile sole (*Solea solea* L.) as indicators of habitat quality in coastal and estuarine nurseries in the Bay of Biscay with a focus on sites exposed to the Erika oil spill. Scientia marina 70: 183-192.

Gilliers, C., Le Pape, O., Desaunay, Y., Morin, J., Guerault, D. & Amara, R., 2006b. Are growth and density quantitative indicators of essential fish habitat quality? An application to the common sole *Solea solea* nursery grounds. Estuarine, Coastal and Shelf Science 69: 96-106.

Girardin M. et Castelnaud G., 2013. Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde. Suivi des captures 2012- étude de la faune circulante 2012. Rapport pour EDF CNPE du Blayais, étude n°152, Irstea Bordeaux EPBX, Cestas, 256 p.

Girardin, M. & Castelnaud, G., 2010. Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde. Suivi des captures 2009 - étude de la faune circulante 2009. Cemagref groupement de Bordeaux, Cestas, Rapport pour EDF CNPE du Blayais, 239 pp.

Girardin, M., Castelnaud, G. & Beaulaton, L., 2004. Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde : Suivi des captures 2003. Etude de la faune circulante 2004. Cemagref, Etude, 105, Cestas, 211 pp.

Girardin, M., Castelnaud, G. & Beaulaton, L., 2005. Surveillance halieutique de l'estuaire de la Gironde : Suivi des captures 2003. Etude de la faune circulante 2004. Cemagref, Etude, 105, Cestas, 211 pp.

Gironde estuary. *Ecological Indicators* 15: 18-29.

Goberville, E., Beaugrand, G., Sautour, B. & Tréguer, P., 2010. Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe. *Marine Ecology Progress Series* 408: 129-147.

Godet, M., 2004. Manuel de prospective stratégique. Dunod, Paris.

Guchan, A., 1988. Le droit de la pêche en eau douce. Thèse de doctorat, CEMAGREF de Bordeaux, Division ALA Equipe PMPC/Université Bx I, Bordeaux, 535 pp.

Guesnet, V., Lassalle, G., Chaalali, A., Kearney, K., Saint-Béat, B., Karimi, B., Grami, B., Tecchio, S., Niquil, N. & Lobry, J., 2015. Incorporating food-web parameter uncertainty into Ecopath-derived ecological network indicators. *Ecological Modelling* 313: 29-40.

Hénocque, Y. & Denis, J. (Eds), 2001. A Methodological Guide: Steps and Tools Towards Integrated Coastal Area Management. *Manuals and guides*, 42. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, 65 pp.

Hering, D., Borja, A., Carstensen, J., Carvalho, L., Elliott, M., Feld, C.K., Heiskanen, A.S., Johnson, R.K., Moe, J., Pont, D., Solheim, A.L. & Van De Bund, W., 2010. The European Water Framework Directive at the age of 10: A critical review of the achievements with recommendations for the future. *Science of the Total Environment* 408: 4007-4019.

Hermant, M., Lobry, J., Bonhommeau, S., Poulard, J.C. & Le Pape, O., 2010. Impact of warming on abundance and occurrence of flatfish populations in the Bay of Biscay (France). *Journal of Sea Research* 64: 45-53.

Hillebrand, H. & Matthiessen, B., 2009. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters* 12: 1405-1419.

Hoegh-Guldberg, O. & Bruno, J.F., 2010. The impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science* 328: 1523-1528.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y. & Visbeck, M., 2001. The North Atlantic Oscillation. *Science* 291: 603-605.

Jalón-Rojas, I., Schmidt, S. & Sottolichio, A., 2015. Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19: 2805-2819.

Jullien B. and Smith A. "Le Gouvernement D'une Industrie. Vers Une économie Politique Institutionnaliste Renouvelée." *Gouvernement et Action Publique* 1, no. 1 (2012): 103–23. doi:10.3917/gap.121.0103.

Keddy, P.A., 1992. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science* 3: 157-164.

Knight, J.R., Allan, R.J., Folland, C.K., Vellinga, M. & Mann, M.E., 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letters* 32: 1-4.

Kones, J.K., Soetaert, K., Van Oevelen, D. & Owino, J.O., 2009. Are network indices robust indicators of food web functioning? A Monte Carlo approach. *Ecological Modelling* 220: 370-382.

Krabbenhoft, T.J., Platania, S.P. & Turner, T.F., 2014. Interannual variation in reproductive phenology in a riverine fish assemblage: Implications for predicting the effects of climate change and altered flow regimes. *Freshwater Biology* 59: 1744-1754.

Le Pape, O., Gilliers, C., Riou, P., Morin, J., Amara, R. & Desaunay, Y., 2007. Convergent signs of degradation in both the capacity and the quality of an essential fish habitat: state of the Seine estuary (France) flatfish nurseries. *Hydrobiologia* 588: 225-229.

Le Pape, O., Holley, J., Guerault, D. & Desaunay, Y., 2003. Quality of coastal and estuarine essential fish habitats: estimations based on the size of juvenile common sole (*Solea solea* L.). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58: 793-803.

Le Treut, H., 2013. *Prévoir pour agir. La Région Aquitaine anticipe le changement climatique*, Pessac.

Léauté, Jean-Pierre, and Nathalie Caill-Milly. *Caractéristiques des petites pêches côtières et estuariennes de la côte Atlantique du sud de l'Europe: synthèse du contrat PECOSUDE. Bilans & perspectives*. Plouzané, France : Brest: Ifremer ; Diffusion, ALT Brest, 2003.

Legendre, P. & Legendre, L. (Eds), 1998. *Numerical ecology* Elsevier.

Legendre, P., Dallot, S. & Legendre, L., 1985. Succession of species within a community: chronological clustering, with applications to marine and freshwater zooplankton. *American Naturalist* 125: 257-288.

Lévêque, C., Boët, P., Bocquené, G., Bouleau, G., Etcheber, H., Foussard, V., Just, A., Lepage, M., Lobry, J., Moussard, S., Sirost, S. & Sottolichio, A., 2011. Synthèse du projet Liteau III - BEEST ('Vers une approche multicritère du Bon Etat écologique des grands ESTuaires'), 99 pp.

Libralato, S., 2008. System Omnivory Index. In: Jørgensen, S.E. & Fath, B.D. (Eds), *Ecological Indicators*, vol. 4 of *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, Oxford, pp. 3472-3477.

Livingston, R.J., 2002. Trophic organization in coastal systems. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 412 pp.

Lobry, J., David, V., Pasquaud, S., Lepage, M., Sautour, B. & Rochard, E., 2008. Diversity and stability of an estuarine trophic network. *Marine Ecology Progress Series* 358: 13-25.

Lobry, J., Mourand, L., Rochard, E. & Elie, P., 2003. Structure of the Gironde estuarine fish assemblages: a European estuaries comparison perspective. *Aquatic Living Resources* 16: 47-58.

Loreau, M., De Mazancourt, C. & Holt, R.D., 2004. Ecosystem Evolution and Conservation. In: Ferrière, R., Dieckmann, U. & D., C. (Eds), *Evolutionary Conservation Biology*. Cambridge University Press, International Institute for Applied Systems Analysis, London, pp. 327-343.

Loreau, M., Naeem, S. & Inchausti, P. (Eds), 2002. *Biodiversity and ecosystem functioning: synthesis and perspectives*. Oxford University Press, New York, 312 pp.

Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D. & Wardle, D.A., 2001. Ecology - Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science* 294: 804-808.

Marshall, J., Kushnir, Y., Battisti, D., Chang, P., Czaja, A., Dickson, R., Hurrell, J., McCartney, M., Saravanan, R. & Visbeck, M., 2001. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology* 21: 1863-1898.

Matthiessen, P. & Law, R., 2002. Contaminants and their effects on estuarine and coastal organisms in the United Kingdom in the late twentieth century. *Environmental Pollution* 120: 739-757.

Mccann, K.S., 2000. The diversity-stability debate. *Nature* 405: 228-233.

Mermet, L. (Ed.), 2005. *Etudier des écologies futures*. P.I.E. Peter Lang, Bruxelles.

Monaco, M.E. & Ulanowicz, R.E., 1997. Comparative ecosystem trophic structure of three US mid- Atlantic estuaries. *Marine Ecology-Progress Series* 161: 239-254.

Nicolas, D., Chaalali, A., Drouineau, H., Lobry, J., Uriarte, A., Borja, A. & Boët, P., 2010. Impact of global warming on European tidal estuaries: some evidence of northward migration of estuarine fish species. *Regional Environmental Change*: 1-11.

Nicolas, D., Chaalali, A., Drouineau, H., Lobry, J., Uriarte, A., Borja, A. & Boët, P., 2011. Impact of global warming on European tidal estuaries: some evidence of northward migration of estuarine species. *Regional Environmental Change* 11: 639-649.

Niquil, N., Chaumillon, E., Johnson, G.A., Bertin, X., Grami, B., David, V., Bacher, C., Asmus, H., Baird, D. & Asmus, R., 2012. The effect of physical drivers on ecosystem indices derived from

ecological network analysis: Comparison across estuarine ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 108: 132-143.

North, D.C., 1990. *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge University Press.

Pasquaud, S., Béguer, M., Larsen, M.H., Chaalali, A., Cabral, H. & Lobry, J., 2012a. Increase of marine juvenile fish abundances in the middle Gironde estuary related to warmer and more saline waters, due to global changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 104–105: 46-53.

Pasquaud, S., Brind'amour, A., Berthelé, O., Girardin, M., Elie, P., Boet, P. & Lepage, M., 2012b. Impact of the sampling protocol in assessing ecological trends in an estuarine ecosystem: The empirical example of the

Pasquaud, S., David, V., Lobry, J., Girardin, M., Sautour, B. & Elie, P., 2010a. Exploitation of trophic resources by fish under stressful estuarine conditions. *Marine Ecology-Progress Series* 400: 207-219.

Pasquaud, S., Pillet, M., David, V., Sautour, B. & Elie, P., 2010b. Determination of fish trophic levels in an estuarine system. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 86: 237-246.

Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R. & Reynolds, J.D., 2005. Climate change and distribution shifts in marine species. *Science* 308: 1912-1915.

Petitgas, P., Rijnsdorp, A.D., Dickey-Collas, M., Engelhard, G.H., Peck, M.A., Pinnegar, J.K., Drinkwater, K., Huret, M. & Nash, R.D.M., 2013. Impacts of climate change on the complex life cycles of fish. *Fisheries Oceanography* 22: 121-139.

Pierson, P., 2000. *Increasing Returns, Path Dependence, and the Study of Politics*. *American Political Science Review*.

Polovina, J.J., 1984. Model of a coral reef ecosystem. The Ecopath model and its application to French Frigate Shoals. *Coral Reefs* 3: 1-11.

Pronier, O. & Rochard, E., 1998. Fonctionnement d'une population d'éperlan (*Osmerus eperlanus*, *Osmériformes Osmeridae*) située en limite méridionale de son aire de répartition, influence de la température. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 350-51: 479-497.

Pursey, P.H. & Van Oosterhout, J., 2001. To boldly go where no man has gone before: integrating cognitive and physical features in scenario studies. *Futures* 33: 861-872.

Rodionov, S.N., 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters* 31: L09204 1-4.

Sala, E. & Knowlton, N., 2006. Global marine biodiversity trends, Annual Review of Environment and Resources. Annual Reviews, Palo Alto, pp. 93-122.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. & Walker, B., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature 413: 591-596.

Schwartz, P., 1991. The art of the long view. Planning for the future in an uncertain world. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 272 pp.

Selleslagh, J., Lobry, J., Amara, R., Brylinski, J.-M. & Boët, P., 2012. Trophic functioning of estuarine ecosystems along a gradient of anthropogenic pressures: a French case study with emphasis on a small and low impacted estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science 112: 73-85.

Tecchio, S., Chaalali, A., Raoux, A., Rius, A.T., Lequesne, J., Girardin, V., Lassalle, G., Cachera, M., Riou, P., Lobry, J., Dauvin, J.-C. & Niquil, N., In press. Evaluating ecosystem-level anthropogenic impacts in a stressed transitional environment: the case of the Seine estuary. Ecological Indicators.

Tonn, W.M., Magnuson, J.J., Rask, M. & Toivonen, J., 1990. Intercontinental comparison of small-lake fish assemblages: The balance between local and regional processes. The American Naturalist 136: 345-375.

Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A. & Martello, M.L., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences 100: 8074-8079.

Ulanowicz, R.E., 2004. Quantitative methods for ecological network analysis. Computational Biology and Chemistry 28: 321-339.

Ulanowicz, R.E., 2011. Quantitative Methods for Ecological Network Analysis and Its Application to Coastal Ecosystems. In: Wolanski, E. & Mcluskay, D.S. (Eds), Treatise on Estuarine and Coastal Science Vol 9. Waltham: Academic Press, pp. 35 - 57.

Villeger, S., Miranda, J.R., Hernandez, D.F. & Mouillot, D., 2010. Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. Ecological Applications 20: 1512-1522.

Vitousek, P.M., 1997. Human domination of Earth's ecosystems (vol 277, pg 494, 1997). Science 278: 21-21.

Weijerman, M., Lindeboom, H. & Zuur, A.F., 2005. Regime shifts in marine ecosystems of the North Sea and Wadden Sea. Marine Ecology Progress Series 298: 21-39.

Winemiller, K.O., 1995. Aspects structurels et fonctionnels de la biodiversité des peuplements de poissons Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 337/338/339: 23-45.

