

Bref panorama scientifique de l'estuaire de la Gironde 2018

Sous la coordination de Benoit Sautour et Jérôme Baron

Christophe Boschet, Laure Carassou, Anne Gassiat,
Baptiste Hautdidier (Irstea), Guy Bachelet, Gérard
Blanc, Patrick Point, Sabine Schmidt (U. de Bordeaux)
pour les chapitres

Rédacteurs : Guy Bachelet, Jérôme Baron, Gérard Blanc, Christophe Boschet,
Laure Carassou, Aurélie Chaalali, Baptiste Hautdidier, Anne Gassiat, Patrick Point,
Benoit Sautour, Sabine Schmidt, Aldo Sottolichio

Financement : Université de Bordeaux, Irstea, CNRS, Smiddest, Agence de l'eau Adour Garonne, Labex COTE

université
de BORDEAUX



I

INTRODUCTION

Coucher de Soleil sur un carrelet s'élevant sur la rive droite de l'estuaire (cliché : Jfda, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

Les écosystèmes côtiers et littoraux constituent des zones d'interface entre domaines continental et marin. Ils occupent environ 6% de la superficie des océans mais figurent parmi les zones les plus productives de la planète. Les estuaires, souvent associés à de forts enjeux économiques et sociétaux, contribuent à eux seuls à 33% de la valeur économique des systèmes marins. Ces écosystèmes ont également une grande importance écologique associée, historiquement, à une exploitation de la ressource biologique (notamment piscicole et conchylicole). Ils sont donc soumis à des pressions anthropiques fortes et variées susceptibles de moduler ou d'exacerber l'incidence du dérèglement climatique actuel : ces écosystèmes figurent parmi les plus sensibles au changement global¹. Les estuaires, comme l'ensemble des écosystèmes, procurent de nombreux services écologiques² associés à leur fonctionnement. La forte concentration d'enjeux autour des zones estuariennes est un témoin de la richesse des services écosystémiques rendus. C'est aussi un élément moteur majeur de la recherche environnementale actuelle qui repose à la fois sur une volonté de préservation des services rendus dans un contexte de perturbation environnementale forte et sur le besoin de développer des actions d'aménagement sur des territoires fragilisés.

Plus vaste estuaire d'Europe occidentale, l'estuaire de la Gironde est situé dans le sud-ouest de la France en région Nouvelle-Aquitaine. Il est constitué par la confluence de la Garonne et de la Dordogne. Son fonctionnement est très largement influencé par les apports liquides et solides provenant de l'amont et par les déplacements de masses d'eau liés aux débits et à la marée. Son hydrodynamique sédimentaire particulière provoque, en amont, une concentration de particules à l'origine d'un « bouchon vaseux » extrêmement dense qui limite la pénétration de la lumière et donc la production des végétaux aquatiques. L'estuaire est cependant un lieu de forte production biologique exploitée (poissons, bivalves). La biodiversité, par essence intégratrice des conditions environnementales, est actuellement soumise à de nombreuses contraintes liées aux activités humaines internes à l'estuaire ou développées sur le bassin versant. Alors que l'estuaire de la Gironde était réputé il y a encore quelques années comme en « relativement bon état écologique », certaines espèces ont vu leurs effectifs progressivement chuter. Ce déclin de la biodiversité est le témoin de l'accentuation des contraintes liées au changement global. Les contraintes accrues sont le fait combiné de l'évolution actuelle du climat (marinisation de l'estuaire, réchauffement...) et du développement des pressions anthropiques.

1. définit l'ensemble des causes entraînant la modification de l'environnement à l'échelle planétaire. Cinq grandes composantes définissent celui-ci : la modification d'usage des terres, la pollution, le climat, les espèces invasives et la surexploitation des ressources

2. ou services écosystémiques : « avantages socio-économiques retirés par l'homme de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes » (Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques : EFESE)

Alors que les pressions s'accroissent sur les écosystèmes, une dynamique de gestion durable des environnements s'est développée ces dernières décennies aux échelles internationale et nationale. Ces démarches ont permis, par exemple, les créations pour l'estuaire de la Gironde d'une zone Natura 2000, d'un Parc marin, d'un conseil scientifique de l'estuaire, d'une commission locale de l'eau qui, couplés à des initiatives plus spécifiques (ex. programme «Renaturation Île Nouvelle»), vont dans le sens d'une acquisition partagée des connaissances pour des questionnements co-construits [société]/ [recherche]. Cette dynamique s'accompagne, à une échelle locale, d'un regain d'attractivité pour l'estuaire développé grâce au dynamisme de ses acteurs se traduisant par une reconquête de son image. Les travaux de recherche sur l'estuaire de la Gironde sont menés depuis de nombreuses décennies. Une première synthèse³ avait permis, en 1994, de partager les connaissances acquises et de mettre en perspective les évolutions de recherches futures. Les travaux réalisés depuis cette synthèse ont apporté des éléments de réponses, parfois très aboutis, en se développant de manière de plus en plus interdisciplinaire, profitant notamment d'un investissement important des sciences humaines et sociales. Les connaissances acquises sont issues de programmes de recherche pour beaucoup co-construits en relation avec la société en réponse à des questionnements concertés. A titre d'exemple les programmes «ETIAGE», «Renaturation Île Nouvelle», «Défi Cadmium» peuvent être mentionnés. Dans le même temps, l'estuaire de la Gironde est devenu un des estuaires les mieux suivis sur le long terme. Ayant bénéficié historiquement de suivis de surveillance associés à l'implantation de la Centrale du Blayais, il a profité, depuis, du développement de nombreux autres suivis d'observation récurrents (ex. SOMLIT, DCE, MAGEST...). À l'heure actuelle l'estuaire est suivi pour un nombre remarquable de ses compartiments physiques, chimiques ou biologiques.

3. Livre Blanc – Estuaire de la Gironde : ouvrage collectif financé par l'Agence de l'eau Adour Garonne

L'intérêt pour cette synthèse s'est développé en réponse au constat partagé avec les acteurs de la société d'un besoin de bilan des connaissances. Ce document est le fruit d'une démarche pluridisciplinaire des «Sciences du milieu» et des «Sciences humaines et sociales». Le travail de synthèse a été produit par un ensemble de coordinateurs alimentés par un nombre important de rédacteurs et de contributeurs. Cette synthèse constitue, à notre sens, une première étape indispensable pour aller vers des questionnements plus transversaux, par essence pluridisciplinaires. Certains ont déjà été abordés dans des programmes de recherche (ex. ANR Adapt'Eau : *adaptation aux variations des régimes hydrologiques dans l'environnement fluvio-estuarien de la Garonne-Gironde*). Nous sommes aussi conscients de la quantité et de la qualité des savoirs issus des activités d'autres catégories d'acteurs de l'estuaire et de l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir compléter/croiser nos connaissances.

L'estuaire de la Gironde est donc un système actuellement fragilisé, présentant des modifications de fonctionnement rapides. Les outils utiles à une meilleure définition des usages en relation avec une gestion durable des services rendus sont déjà nombreux. Il convient de les utiliser au mieux. Cet ouvrage de synthèse des connaissances s'inscrivant dans une démarche globale de partage des connaissances (et des interrogations), nous espérons qu'il permettra d'identifier de nouvelles réponses, mais aussi des lacunes, qui conduiront à des développements ultérieurs tant du point de vue de la recherche que de la gestion. De manière plus générale, nous espérons que les lecteurs y trouveront une source d'information et de réponses à leurs questionnements.

Les éléments développés dans cet ouvrage constituent une version résumée d'une synthèse plus exhaustive à paraître fin 2018 : *L'estuaire de la Gironde : un écosystème altéré? Entre dynamique naturelle et pressions anthropiques* (Presses Universitaires de Bordeaux)

1

DYNAMIQUE HYDRO-MORPHO-SÉDIMENTAIRE ET QUALITÉ DES EAUX

La plage de l'Arnèche à Meschers-sur-Gironde
(cliché : patrick janicek, licence CC BY 2.0, flickr).

Dynamique hydro-morpho-sédimentaire

Situé sur la façade Atlantique (45°6'N, 0°40'W), le système fluvio-estuarien de la Gironde est formé par la confluence de la Garonne et de la Dordogne, avec une limite amont de remontée de la marée dynamique située à environ 170 km de l'embouchure (La Réole pour la Garonne et Pessac-sur-Dordogne pour la Dordogne). La morphologie globale de l'estuaire se décompose en quatre compartiments distincts : (i) l'estuaire fluvial, (ii) l'estuaire amont, (iii) l'estuaire aval et (iv) l'embouchure.

La dynamique hydro-morpho-sédimentaire dans l'estuaire est le résultat de l'interaction entre la marée, les débits fluviaux et la morphologie.

Composantes du fonctionnement physique de l'estuaire

La marée, onde océanique à dominante semi-diurne, induit une variation périodique de hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer (marnage) entre 1,5 m en mortes eaux et 5,5 m en vives eaux à l'embouchure. Vers l'amont, l'onde de marée devient asymétrique : la marée montante est plus courte que la marée descendante. De plus le marnage s'amplifie jusqu'aux environs de Podensac (à 30 km en amont de Bordeaux), pouvant être modulé par le frottement de l'eau sur les berges ou par le débit fluvial. Un ressaut de marée dirigé vers l'amont, est sou-

vent observé dans l'estuaire fluvial au début de la marée montante. Son déferlement lors des grandes marées correspond à ce qu'on appelle le mascaret.

Un gradient horizontal de salinité est observé, résultant du mélange entre les eaux salées apportées par la marée et les eaux douces apportées par les fleuves. Ce gradient se déplace en fonction de l'excursion de la marée et des variations saisonnières de débit fluvial. De plus, un gradient vertical de salinité se produit très en aval de l'estuaire, avec des eaux douces en surface et des eaux plus salées au fond. Ailleurs, le mélange vertical des eaux est favorisé par les forts courants de marée.

Les courants sont principalement contrôlés par la marée, mais varient spatialement en fonction de la morphologie estuarienne et temporellement en fonction du débit fluvial. Les vitesses maximales sont observées dans les chenaux, pouvant atteindre en surface et en vives eaux jusqu'à 3 m.s⁻¹. À l'opposé, les vitesses près du fond sont toujours moins élevées, mais elles restent importantes (jusqu'à 1,5 m.s⁻¹) et de ce fait contrôlent les remises en suspension de sédiment. Par ailleurs, du fait de l'asymétrie de l'onde de marée, les courants de flot¹, sont plus intenses que les courants de jusant². Les vitesses de courant les plus fortes sont généralement observées en amont de Bordeaux, là où le marnage est le plus important.

En filtrant les oscillations amont-aval de l'eau dues aux courants de flot et de jusant, une circulation dite « résiduelle » se dégage. Celle-ci est une caractéristique physique fondamentale qui contrôle le piégeage et le

1. courants de marée montante

2. courants de marée descendante



Figure 1 : Mascaret sur la Dordogne. Photo : S. Schmidt

transfert net de l'eau et de substances dissoutes et particulaires dans les différents compartiments de l'estuaire. La circulation résiduelle induit un courant net d'eau vers l'aval en surface et vers l'amont au fond, selon un système à deux couches. Cette circulation est contrôlée par la marée et par les stratifications de densité, elles-mêmes modulées par le débit fluvial (qui renforce les stratifications en période de crue).

Dynamique sédimentaire

L'estuaire de la Gironde est caractérisé par une zone de turbidité maximale appelée « bouchon vaseux » résultant de deux mécanismes physiques principaux présentés précédemment : l'asymétrie de la marée et la circulation résiduelle de densité.

À cause de l'asymétrie des vitesses de courant, les sédiments fins sont davantage remis en suspension en flot qu'en jusant, davantage

transportés pendant le flot que pendant le jusant, et décantent sur le fond plus massivement à l'étale de pleine mer qu'à basse mer. De ce fait, un transport résiduel de matières en suspension (« MES ») s'effectue vers l'amont et un piégeage des sédiments fins est observé autour d'un point nodal de marée dont la position varie saisonnièrement avec le débit fluvial. Une particule provenant de l'amont et qui décante vers la couche de fond sera reconduite vers l'amont par l'écoulement des eaux marines avant d'être de nouveau transportée vers l'aval par les eaux de surface. La répétition de ce cycle conduit à une accumulation de particules dans le bouchon vaseux autour d'un point nodal de densité.

De manière générale, les cartes globales de répartition des sédiments superficiels présentent peu de changements à l'échelle pluri-décennale. Les changements observés sont saisonniers et liés à la présence (ou non) d'un stock de vase sur le fond associé aux excursions

sions du bouchon vaseux, résultant lui-même de changements de régime fluvial. Malgré leur apparente stabilité sur le long terme, les faciès sédimentaires présentent donc une forte variabilité entre l'hiver et l'été. Les flux de MES annuels expulsés vers l'océan sont difficilement quantifiables. Très dépendants des conditions hydrologiques dans l'estuaire et de la position du bouchon vaseux, ils ont été estimés à environ 1,6 Mt/an, mais cette valeur nécessite encore d'être vérifiée.

Évolution récente de l'hydromorphologie

L'estuaire de la Gironde se comble progressivement depuis environ 2000 ans, en accord avec les évolutions sédimentologiques à long terme classiquement observées dans les environnements côtiers semi-fermés. Depuis les

années 1950, les sections ont toutefois peu évolué, et un relatif équilibre entre érosion et comblement a été observé sur l'ensemble de l'estuaire. Les zones en érosion et en dépôt basculent de l'amont vers l'aval de l'estuaire au cours du temps, principalement en fonction de la position moyenne du bouchon vaseux.

L'étude des enregistrements de la marée depuis 1950 a révélé une nette amplification du marnage et de l'asymétrie de l'onde de marée dans la Garonne tidale. Les changements morphologiques y sont dus principalement aux extractions des granulats, qui seraient les principaux responsables de l'amplification du marnage. Cette amplification a contribué à l'augmentation des concentrations en MES et à la plus forte remontée du bouchon vaseux dans la section fluviale.

Perspectives

- Les caractéristiques physiques des particules en suspension sont mal connues, ce qui pénalise la performance des modèles hydro-sédimentaires ; des études dédiées à la caractérisation des propriétés physiques des particules sont à privilégier.
- Il existe une grande incertitude sur la future évolution morphologique de l'estuaire en relation avec le climat, qui pourrait être réduite grâce au développement de modélisations morphodynamiques.
- Dans le contexte actuel d'évolution des caractéristiques de l'estuaire, il faudra développer les travaux sur la dynamique des zones amont (rivières tidales) et préciser en aval de l'estuaire les mécanismes de transfert et les flux de matières en suspension vers la mer.
- Il est important de développer des recherches spécifiques sur les zones intertidales, en associant mesures directes d'érosion-dépôt à l'échelle annuelle, observations par télédétection, et modélisation morpho-dynamique.
- Le transport de sable dans l'estuaire est très mal connu : ceci est un obstacle majeur à la bonne estimation des bilans sédimentaires actuels.

Les inondations : situation après une histoire mouvementée

Les inondations de l'estuaire de la Gironde sont étudiées depuis une période récente, bénéficiant des apports d'outils de modélisation depuis le milieu des années 1990.

Retour d'expérience historique : les événements récents sont-ils inédits ?

Les études s'appuient sur de nombreuses archives historiques avec une continuité chronologique depuis le ^{xv}^e siècle, depuis d'anciennes délibérations municipales aux séries plus récentes du port de Bordeaux. Ces sources ont révélé deux types de situations météorologiques distinctes ayant mené à des phénomènes d'inondations catastrophiques : les crues océaniques classiques résultant du passage d'une perturbation, et les crues pyrénéennes causées par d'importantes précipitations provenant de la Montagne Noire et des Pyrénées. Au total 23 événements de tempête ont été décrits entre 1840 et 1940, et parmi eux 30% de forte intensité qui ont donné lieu à d'importants travaux de remise en état, notamment sur la période 1920-1930. La stabilité de la côte en nord médoc était déjà une source d'inquiétude en 1924, après le raz de marée du 9 janvier qui conduisit à de sévères modifications des fonds à l'embouchure, et en 1927 après la tempête du 19 novembre durant laquelle les dunes du front de mer de Soulac furent considérablement rongées et plusieurs immeubles et habitations en partie écroulés.

Les paramètres générateurs, les niveaux et leurs combinaisons possibles

L'estuaire de la Gironde concentre plusieurs processus physiques susceptibles de conduire à des phénomènes d'inondation, d'origines

océanique, météorologique et hydrologique. Plusieurs évaluations ont permis de révéler de multiples combinaisons de facteurs pouvant générer des niveaux d'eau importants, regroupés en 3 grandes familles d'évènements : «Tempête», caractérisé par une marée moyenne et des vents très forts ; «Maritime», caractérisé par une marée forte et des vents moyens à forts ; «Fluvial», caractérisé par des débits de la Garonne et/ou de la Dordogne > 10 ans. L'influence d'une surcote à l'embouchure a également été identifiée comme particulièrement majorante. De plus, la morphologie de l'estuaire, en forme d'entonnoir, peut amplifier l'onde de marée, plus particulièrement dans un contexte de vent fort orienté dans l'axe de l'estuaire, générant des niveaux d'eau plus conséquents sur les zones amont.

Le système de protection

L'endiguement de l'estuaire (digues en béton ou en terre) s'est développé dès le ^{xvii}^e siècle pour empêcher la pénétration des eaux à marée haute. Ce système, qui s'étend aujourd'hui sur un linéaire de plus de 300 km, n'a jamais été conçu globalement et il est composé de différents tronçons hétérogènes dont la hauteur diminue globalement de l'aval vers l'amont, alors que c'est là que les enjeux sont les plus importants. L'état des ouvrages est globalement vieillissant et les multiples gestionnaires sont impliqués à des degrés divers et sans coordination entre eux.

Définition des aléas

Suite à une sollicitation de l'État en 2007, «le Référentiel Inondation Gironde» (RIG), outil d'aide à la décision, a été créé par le SMIDDEST et ses partenaires afin d'améliorer la connaissance de la vulnérabilité du territoire. Il s'agit d'une combinaison d'un modèle hydraulique à grande échelle, auquel s'intègrent 5 modèles de détails à mailles fines correspondant aux 5 grands casiers hydrauliques de l'estuaire, et d'une base de données. Ce référentiel évolutif se base sur une connaissance précise des caractéris-

tiques morphologiques du territoire et des phénomènes dynamiques de crue influençant directement les inondations et il permet de réaliser des études prospectives.

Globalement, cinq des sept événements ayant induit les plus forts niveaux enregistrés par le marégraphe de Bordeaux ont été observés ces 20 dernières années ; deux étaient à prédominance maritime. La tempête Martin de décembre 1999 constituant l'événement de référence, des simulations avec le RIG ont permis d'estimer qu'un niveau supérieur (30 cm) aurait été observé à Bordeaux en l'absence de brèches dans les digues à l'aval ayant conduit aux inondations de zones agricoles et de marais.

Les enjeux dans la zone inondable

Sur la base de l'évènement de référence, la zone inondable de l'agglomération bordelaise recouvre une superficie d'environ 320 km², soit un total de 27 000 personnes vivant dans cette zone et 12 000 bâtiments (15 000 habitants pour la seule commune de Bordeaux). D'après une étude récente sur les activités

industrielles soumises au risque d'inondations, sur les 174 installations recensées, 50 se trouvent en zone inondable pour un événement de référence et présentent une vulnérabilité supérieure ou égale à la moyenne et quatre sites une vulnérabilité très forte.

Perspectives : Quelle stratégie pour réduire la vulnérabilité ?

Sur la base de scénarios successifs, les travaux de simulation du RIG ont permis d'aboutir en 2013 à un scénario global d'aménagement appelé « scénario 7 », s'appuyant sur des propositions à la fois de protection totale des zones d'habitat par la création de digues et par l'utilisation renforcée de zones d'expansion (zones de sur-inondation dans les marais et les zones agricoles). Le projet global n'a pas réuni de consensus et il a été remplacé par un projet moins ambitieux 2016-2022 ultérieurement validé par l'État dans le PAPI³ Estuaire porté par le SMIDDEST. Ce programme est basé sur la restauration d'ouvrages à hauteur constante et sur des réseaux hydrauliques d'évacuation. Il résout des problèmes immédiats mais pas ceux qui se poseront à moyen terme.

Perspectives

- Une attention particulière devra être portée sur le lien entre événements extrêmes, inondations et trajectoires possibles en termes de gestion.
- Dans un contexte de protection des enjeux, la coordination des acteurs doit être améliorée pour gagner en efficacité, et intégrer un schéma intégrant protections et compensations.

Estuaire et nappes profondes

Vision géologique et hydrogéologique de l'estuaire

La morphologie de l'estuaire de la Gironde est caractérisée par une importante dissymétrie entre rives résultant des contraintes géologiques régionales (plissements et failles). L'estuaire est positionné dans une «goulotte» synclinale⁴. Les variations du niveau marin, d'un passé récent à l'échelle géologique, supérieures à 100 m, expliquent le relief et la formation des bassins-versants de l'estuaire. La mise en place de l'estuaire, débutée durant la période ante-flandrienne (- 20 000 ans avant le présent), est ainsi relativement complexe ; le creusement des lits de la Garonne et de la Dordogne résultant de successions d'épisodes de glaciations et de réchauffement au Quaternaire, d'épisodes torrentiels, de périodes d'accalmies, et de variations du niveau marin.

Relations eaux de surface/eaux souterraines

Le fonctionnement hydrogéologique estuarien est complexe du fait à la fois de la configuration géologique des terrains et des relations hydrauliques existant entre l'estuaire et les nappes d'eau souterraine sises dans les roches «aquifères», notamment celles datant de l'Éocène (56 à 34 millions d'années).

Les zones de contact, dans le fond du chenal de grande navigation, sont limitées dans l'espace et les interactions difficiles à évaluer, tant qualitativement que quantitativement. Néanmoins, les flux échangés semblent très

limités en regard des débits de l'estuaire. De plus, en raison d'une pression hydraulique de la nappe, supérieure à celle de l'estuaire, celui-ci aurait un rôle d'exutoire de la nappe Éocène. Néanmoins, le sens et les directions des flux peuvent s'inverser, menant à de possibles contaminations des nappes.

Le relief de la rive orientale de l'estuaire, formé par des coteaux calcaires du Crétacé, soumis à une intense fracturation, est à l'origine d'importants échanges verticaux. Les eaux profondes de la nappe du Turonien-Coniacien (Crétacé Supérieur) émergent en de nombreuses sources «karstiques» le long de la rive droite avec d'importants débits (de 300 à 3 000 m³/h en moyenne selon les sites). Ces dernières sont souvent captées pour l'alimentation en eau potable. Sur la rive occidentale, dans la pointe Médoc, existe une paléo-dépression fossilisée remplie d'une eau saumâtre ancienne. Elle est responsable d'une contamination locale, par diffusion, du réservoir Éocène.

Gestion des eaux : le fond de l'estuaire à l'interface de deux SAGE

Le fond de l'estuaire est une zone d'interface entre deux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux : celui des *nappes profondes de Gironde* et celui de *l'estuaire de la Gironde et des milieux associés*. L'estuaire y est présenté comme un réceptacle des eaux souterraines. Les flux d'eau vers l'estuaire sont induits par le fonctionnement des différents aquifères et de l'estuaire. Des principes de gestion des nappes ont été posés, précisant la notion de «bon état quantitatif» des eaux souterraines profondes et visant notamment à empêcher la pénétration des eaux de l'estuaire dans le réservoir de l'Éocène.

Perspectives

- Les enjeux liés aux flux sortant du réservoir de l'Éocène vers l'estuaire doivent être caractérisés.
- La dynamique des nappes profondes doit être précisée dans le contexte actuel de changement climatique (variation du niveau de l'océan et de l'estuaire).

4. structure de pli concave vers le haut où les couches les plus récentes sont celles à l'intérieur de la courbure



Figure 2 : Vue de l'estuaire fluvial, la Garonne à Langoiran. Photo S. Schmidt.

Qualité des eaux de surface

La qualité physico-chimique des eaux de l'estuaire de la Gironde est influencée par les apports fluviaux des bassins-versants de la Garonne et de la Dordogne et par la dynamique marine, auxquels s'ajoute l'impact des activités intra-estuariennes (ex. : activités humaines et processus biogéochimiques). Afin de décrire simplement le fonctionnement de ce système et son évolution, plusieurs paramètres sont mesurés : la salinité, la température, l'oxygénation et la turbidité des eaux, pour lesquels il existe une grille de seuils de qualité basée sur la sensibilité de poissons estuariens. Le suivi à long terme de ces paramètres permet d'identifier des variations, indicatrices d'une perturbation ou d'un changement de la qualité des eaux estuariennes. Par exemple, les variations de la température de l'eau sont susceptibles d'enregistrer l'effet du changement climatique (élévation de la température de l'air) à l'échelle de plusieurs décennies. L'oxygénation de l'eau est indispensable aux communautés aquatiques. La turbidité reflète, quant à elle, la réduction de la transparence de l'eau avec la présence de particules en suspension.

Gammes des paramètres physico-chimiques

Les plus fortes salinités sont généralement enregistrées de juillet à octobre, lorsque les débits fluviaux bas favorisent l'intrusion marine. Les moyennes mensuelles de salinité observées dans l'estuaire central (Pauillac) fluctuent entre 0,3 et 11,3 alors que les eaux bordelaises affichent une gamme de variation plus réduite : 1 à 2.

La variabilité saisonnière des températures des eaux est conforme à un climat de type océanique aquitain avec des hivers doux et des étés chauds. En moyenne, les plus basses sont observées en février (7 °C) et les plus élevées en juillet (24 °C). Un gradient longitudinal est également observable dans l'estuaire, avec un écart maximal moyen de température d'environ 3 °C entre les eaux marines (à l'embouchure) et fluviales (à l'amont), interrompu à proximité de la centrale nucléaire de production électrique du Blayais en raison des rejets d'eaux chaudes (réchauffement local).

L'évolution mensuelle des concentrations d'oxygène dissous suit une évolution inverse à celle de la température. En effet, la capacité de l'oxygène à se dissoudre dans l'eau diminue à mesure que la température de l'eau

augmente. Les concentrations les plus élevées sont ainsi observées en hiver, avec des valeurs comprises entre 10,0 et 12,5 mg.L⁻¹. Avec l'augmentation printanière des températures, une diminution progressive de l'oxygène dissous est observée aboutissant à des minimas en été. Les plus fortes désoxygénations sont mesurées en Garonne aval, avec des moyennes mensuelles estivales entre 3,1 et 8,9 mg.L⁻¹ à Bordeaux.

La turbidité est très différente dans les sections centrales et fluviales de l'estuaire. À Pauillac, la turbidité varie peu au fil des saisons : le bouchon vaseux y est présent toute l'année, en dehors des périodes de fortes crues. À l'opposé, il y a une large gamme de variation des turbidités dans l'estuaire fluvial, inverse aux variations du débit fluvial. Le bouchon vaseux est présent entre 5 et 8 mois par an à Bordeaux et entre 2 et 5 mois par an à Libourne.

Quelles évolutions ?

Les apports liquides sont liés à la Garonne (2/3 des apports) et à la Dordogne. En Garonne, le débit moyen annuel et le nombre de jours de forte crue tendent à diminuer depuis plusieurs décennies alors que le nombre de jours d'étiage (<110 m³.s⁻¹) augmente. Cette évolution des débits s'explique par le changement climatique, mais aussi par des usages accrus de la ressource en eau sur le bassin versant. Le débit de la Dordogne présente une évolution similaire.

L'essentiel des apports solides entrant dans l'estuaire de la Gironde, par transport de sédiments fins en suspension, a lieu lors des fortes crues. Le flux solide moyen, quantifié

à la Réole, pour la période 1994-2016 est de 1 430 000 t.an⁻¹, mais peut varier d'un facteur 20, entre 200 000 t.an⁻¹ durant les années sèches et 4 600 000 t.an⁻¹ durant les années humides. Ignorés jusqu'à peu, les apports de débris végétaux peuvent induire de fortes perturbations pour des activités industrielles qui requièrent la filtration de larges volumes d'eau (ex. CNPE, pêche...), notamment en période de crues hivernales.

Des observations récurrentes, de mars à novembre, ont mis en évidence une augmentation moyenne de la salinité d'environ +2,8 entre 1978 et 2011 dans la zone estuarienne médiane, révélant une marinisation de l'estuaire. Cette tendance à long terme, concomitante à la baisse des débits fluviaux, s'est accompagnée d'une intrusion plus marquée d'eaux marines à l'aval. À l'instar de la variabilité des forçages climatiques, cette évolution n'a pas été continue. De plus, les enregistrements continus du réseau MAGEST montrent des incursions estivales systématiques d'eaux saumâtres à Bordeaux, révélant une intrusion haline plus forte dans l'estuaire fluvial.

Les observations récurrentes ont également permis d'identifier une hausse de la température de l'eau, d'environ +1,9 °C en 30 ans, soit en moyenne +0,56 °C par décennie. Cette augmentation a été simultanée à celle des températures de l'air, et de même amplitude. Un forçage climatique, décelé à l'échelle de l'Atlantique nord, semble être le facteur de contrôle majeur de cette tendance à long terme. Outre l'augmentation à long terme des températures, les projections climatiques pour la région Nouvelle Aquitaine prévoient une augmentation du nombre de jours de

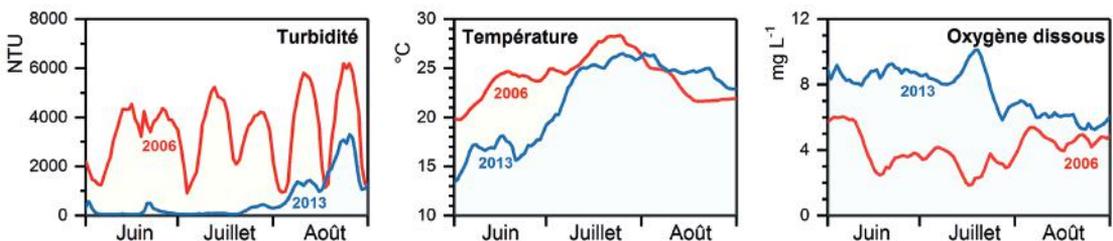


Figure 3 : Évolutions de juin à août de la turbidité, de la température et de l'oxygénation des eaux bordelaises pour une année sèche et chaude (2006) et une année humide (2013).

vagues de chaleur en été, ce qui conduira à des situations préoccupantes : par exemple la vague de chaleur du 18 au 22 juin 2017 a induit un réchauffement des eaux avec des maxima de 26,0 °C à Pauillac, 27,8 °C à Bordeaux ou 29,8 °C à Cadillac et une oxygénation médiocre (<3 mg.L⁻¹) à Bordeaux où le bouchon vaseux était présent.

Il y a une étroite relation entre le débit et la turbidité dans l'estuaire fluvial : les débits inférieurs à 100 m³.s⁻¹ de la Dordogne et à 200 m³.s⁻¹ de la Garonne favorisent l'installation du bouchon vaseux respectivement à Libourne et à Bordeaux. La durée de présence

et de la concentration du bouchon vaseux s'expliquent par l'historique des variations de débit des fleuves. Un déficit de crues pendant l'hiver et le printemps limite l'expulsion des sédiments vers l'aval et l'embouchure. Suivi par une longue période d'étiage, ce contexte peut conduire à un bouchon vaseux très concentré (plusieurs grammes de sédiment secs par litre) avec une présence dans la Garonne aval pouvant se prolonger jusqu'à 8 mois. Un été sec et chaud conduira de surcroît à une désoxygénation sévère des eaux, pouvant atteindre des seuils critiques pour la vie aquatique (Figure 3)

Perspectives

- Face au risque de dégradation de la qualité des eaux de l'estuaire fluvial, il y a nécessité d'actions de gestion adaptées (débits, dragages...) afin de limiter les situations à risque (notamment oxygénation).
- Les zones amont et aval concentrent de forts enjeux dans le contexte de changement climatique actuel mais sont aussi les moins suivies : une réflexion sur l'élargissement de la couverture spatiale des réseaux d'observation doit être menée.

2

CONTAMINATION ET POLLUTION DE L'ESTUAIRE

Epave du Frisco à Gauriac (Gironde, France) sur la rive droite de l'estuaire de la Gironde (cliché : Franck-fnba, licence CC BY SA 4.0, wikimedia commons).

La contamination métallique

La pollution en cadmium de la Gironde a fait l'objet de nombreuses études soutenues par l'Agence de l'Eau Adour Garonne (AEAG), les départements de l'entente Lot, les conseils départementaux de Gironde et Charente Maritime, la région Aquitaine, l'Europe, le CNRS, l'INSU, l'ANR, l'OASU et l'Université de Bordeaux. Les propositions pour remédier à sa pollution estuarienne peuvent être étendues à d'autres métaux ayant un comportement non conservatif additif (augmentation de leur biodisponibilité dans les eaux saumâtres) et à de nombreux

composés organiques toxiques, notamment les hydrophobes.

Le cadmium (Cd), élément chimique de numéro atomique 48, est indestructible dans l'environnement et toxique pour les organismes vivants, même en faible concentration. Il n'existe pas à l'état natif et sa forme la plus commune est associée au principal minéral de zinc, la sphalérite (ZnS), constituant un sous-produit de la métallurgie du zinc.

Le traitement de minerais de zinc durant plus d'un siècle sur le site de Viviez (Riou-Mort, Aveyron) a produit 10 000 tonnes de Cd à raison de 3 kg/tonne de zinc (Zn), stockées



Figure 4 : Photo du site métallurgique UMICORE de Viviez montrant deux zones de stockage de déchets thermiques et d'hydrométallurgies constituant la première étape de remédiation après 1986.

sous la forme de déchets thermiques et hydro-métallurgiques dans les sols du bassin versant. Leur lessivage a mené à une contamination locale des nappes phréatiques mais aussi des rivières et fleuves, jusqu'à l'estuaire de la Gironde et à Marennes-Oléron, soit une propagation de près de 500 km.

L'incident de 1986 (pic accidentel) a conduit à l'arrêt de la production de Zn sur site depuis 1987 et à la mise en œuvre de mesures de limitation des rejets de Cd en milieu naturel et de plans de remédiation (1987-1994 et 2006-2018, Figure 4). Les flux de cadmium ont très nettement baissé entre 1998 et 2014 (moins de 1 t/an), la contribution du Riou-Mort correspondait en 1999-2000 à 47-62 % du flux annuel de cadmium de Garonne pour 1 % de décharge hydrique.

Des concentrations atteignant 10 à 20 mg/L étaient encore observées en 2006 au niveau de la nappe alluviale polluée par les activités historiques. Pour parvenir à une résilience totale du système, il faudrait encore diviser

les flux actuels de Cd d'un facteur 10, ce qui semble possible à l'horizon de quelques dizaines d'années.

Une autre source de Cd est liée à la remise en suspension de sédiments contaminés du Lot, piégés au niveau des retenues hydroélectriques en aval du Riou-Mort. En conditions hydrologiques normales, ces retenues assurent une régulation des flux de Cd exportés à la Garonne (1 à 2 t/an). Toutefois, lors d'épisodes de forte crue, dont l'occurrence devrait augmenter sous l'effet des changements climatiques, ces sédiments pollués peuvent constituer une source secondaire avec des apports jusqu'en zone côtière (Figure 5).

À ces sources s'ajoutent les apports de Cd des fertilisants phosphatés estimés à 1 à 4 g/ha/an, et de l'épandage de boues des stations d'épuration (STEPS) bordelaises, par érosion et lessivage des sols agricoles.

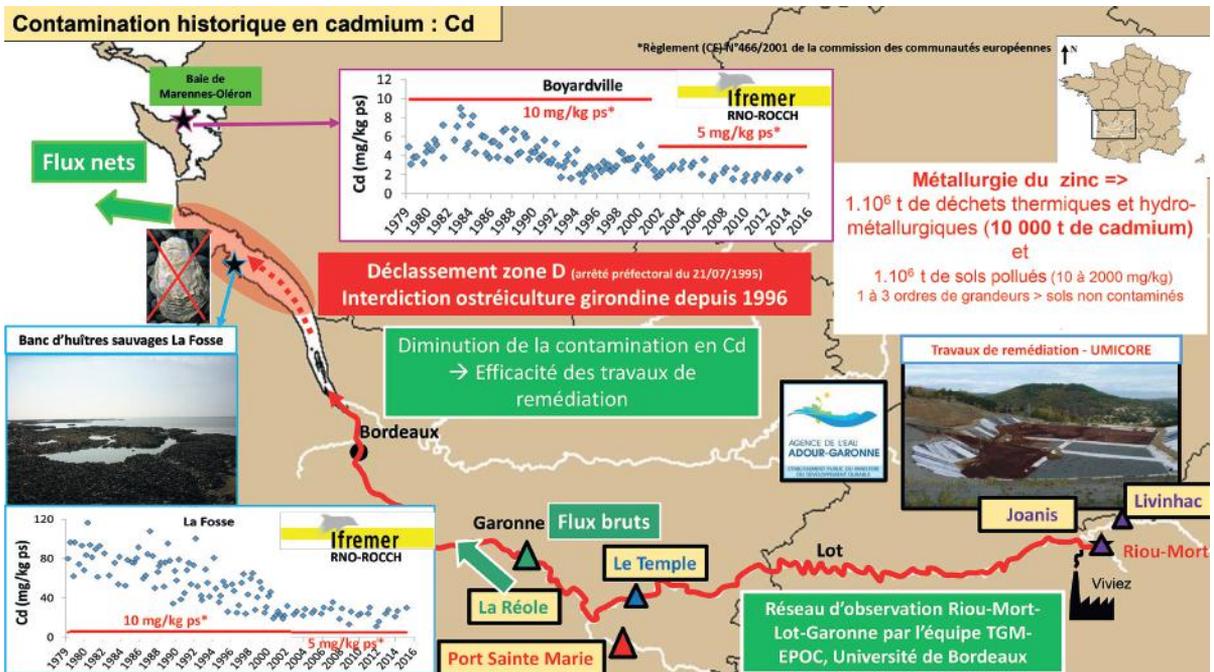


Figure 5 : Trajet de contamination historique en cadmium depuis la source principale (ancien site métallurgique de Vivier en Aveyron) jusqu'aux zones côtières. Cette contamination est suivie dans le continuum Lot-Garonne par l'université de Bordeaux pour le compte de l'AEAG et dans les huîtres sauvages de la Gironde et de la Baie de Marennes-Oléron par l'IFREMER. La contamination des huîtres a été divisée par 5 depuis les années 1980, toutefois elle persiste aujourd'hui malgré de gros efforts de remédiation de la source principale.

Les changements de salinité dans l'estuaire permettent une désorption du cadmium vers une forme dissoute, biodisponible dans la colonne d'eau. Ainsi, plus le temps de résidence des particules dans l'estuaire est élevé, plus les concentrations de Cd dissous sont fortes. La zone de potentiel écotoxicologique maximal est observée pour des salinités comprises entre 15 et 20. L'estuaire de la Gironde constituant une zone de sédimentation avec des remises en suspension des sédiments dépendant des courants tidaux, la répartition spatiale des concentrations de Cd dans les sédiments de surface résulte de l'hydrodynamisme et des dépôts de particules fines (ex. : crème de vase) les plus enrichies. Deux zones principales d'accumulation sont observées : au niveau des îles entre Le Bec d'Ambès et Pauillac, et dans la partie aval du canal de Saintonge, sur la rive droite. Une estimation de la quantité de Cd à l'échelle de l'estuaire donne un ordre de grandeur de 400 tonnes de Cd accumulés dans les 2 premiers mètres,

ce qui questionne l'éventualité d'un changement de la gestion des sédiments dans l'estuaire.

De récents travaux suggèrent que l'essentiel du transfert de Cd de l'estuaire à Marennes-Oléron, se fait par le Pertuis de Maumusson, lorsque le panache turbide de la Gironde est connecté avec le Pertuis de Maumusson (en moyenne 110 jours par an d'octobre à mai pour différentes conditions des débits, de marées et de directions de vent). La poursuite de tels travaux, combinés à des études d'impact, pourrait permettre de proposer des recommandations pour un relargage en mer des sédiments pollués : dans des eaux de salinité supérieures à 32, plutôt en direction de la vasière Sud-Gironde et en période estivale. D'autres actions de dépollution progressive sont à l'étude, comme par exemple une séquestration sédimentaire passive vers des casiers en amont de Bordeaux, en forte crue.

Perspectives

- Consécutivement au dernier plan de remédiation, Il est nécessaire de tester le potentiel d'échange eau-particules du cadmium émis par le bassin de Decazeville.
- Le clapage en mer franche, pourrait être envisagé à la suite d'une étude permettant de préciser les modes de dispersion des composés dissous et particulaires sur les zones côtières adjacentes.
- La quantification des métaux dits rares, à des concentrations très faibles, dans des matrices chargées est complexe : de nouvelles procédures de quantification doivent être développées.
- Dans un contexte de pollution accrue, il est indispensable de soutenir les observations de terrain et les mesures quantitatives discrètes, fiables et représentatives des apports et du devenir des métaux. Une réflexion devrait être conduite sur la mise en place d'une observation pérenne de la spéciation des métaux dans l'estuaire aval et la zone côtière.

Quel risque d'eutrophisation ?

Dans l'estuaire de la Gironde, où les concentrations de nitrate et de phosphate sont plus faibles qu'en Loire ou dans la Seine, des épisodes d'eutrophisation ne sont pas observés. La turbidité des masses d'eaux estuariennes constitue un paramètre limitant la production des végétaux aquatiques et les risques d'eutrophisation. Il semble néanmoins nécessaire de connaître les sources de nutriments et leurs processus de transformation dans l'estuaire pour évaluer le risque d'eutrophisation en zone aval (moins turbide) et en zone côtière.

Les sources d'azote et de phosphore dans la Gironde sont multiples et sont principalement localisées sur le bassin versant. Malgré plusieurs suivis (AEAG et SOMLIT) et plusieurs programmes ponctuels, les données de concentrations en composés azotés et phosphorés le long du gradient de salinité sont peu abondantes.

En eaux douces oxygénées, la forme d'azote minéral la plus stable est le nitrate. L'ammonium, issu de la minéralisation de l'azote organique, est la forme stable de l'azote en absence d'oxygène. Les concentrations en nitrate évoluent de manière linéaire en fonction de la salinité, diminuant avec les fortes salinités, à l'exception de la zone de turbidité maximale (apports d'azote au système). Les rejets des STEPs, fournissent près de 2,5 tonnes d'ammonium par jour qui sont rapidement oxydées en nitrate au niveau du bouchon vaseux, notamment à faible débit. Hormis les apports de STEPs, l'ammonium a des teneurs inférieures à 5 μM le long de l'estuaire.

Le phosphore dissous minéral est principalement présent sous la forme d'ions phosphates. Le comportement du phosphore dans les eaux est non conservatif. Sa distribution en cloche avec un maximum autour de 15 de salinité est en grande partie gouvernée par les échanges entre phases dissoute et particulaire.

Perspectives

- Des suivis réguliers des concentrations en composés azotés et phosphorés le long du gradient de salinité permettraient de préciser la dynamique des apports et de la consommation de ces nutriments en relation avec les changements globaux actuels.
- La chimie du phosphore étant complexe, elle doit être abordée en étudiant la spéciation solide de cet élément, en Gironde, en comparaison avec d'autres estuaires.

Les contaminants organiques dans les compartiments abiotiques

Les micropolluants organiques sont des composés chimiques organiques carbonés susceptibles d'avoir un effet toxique sur les organismes, même en faible concentration. Ils sont généralement synthétisés par l'Homme même si certains peuvent avoir une source naturelle, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou les hormones. Émis dans l'environnement, par exemple lors de leurs utilisations agricole ou industrielle, ces substances chimiques peuvent être transférées dans différents compartiments de l'environnement (sol, air, milieux aquatiques, continental et marin), exposant des êtres vivants à une possible multi-contamination chronique.

Si l'on s'intéresse à la contamination organique des masses d'eau de l'estuaire, un premier groupe de substances est celui des polluants organiques persistants (POP). Bioaccumulables, toxiques et persistants, ils peuvent être transportés sur de longues distances. Leur caractère hydrophobe leur assure une adsorption sur les matières en suspension ou sur les sédiments. Ils sont donc principalement recherchés dans les sédiments et/ou dans les organismes.

Les pesticides organochlorés, produits destinés à lutter contre les parasites animaux et végétaux et les plantes indésirables, peuvent être classés selon leur groupe chimique, leur cible ou leur statut réglementaire. Leurs voies d'introduction dans l'environnement sont variées¹. L'emploi d'échantillonneurs passifs sur plusieurs sites de l'estuaire a permis d'évaluer les concentrations moyennes mensuelles en pesticides, révélant un pic printanier de contamination, observé de façon récurrente, majoritairement composé de S-métolachlore et de ses deux principaux métabolites. Cette observation souligne l'intérêt de suivre les

produits de transformation et leurs éventuels effets en plus des seules substances actives. Ce suivi pluriannuel a également révélé un pic de concentration hivernal, dominé par la présence des métabolites du S-métolachlore, en possible lien avec la remontée de nappes phréatiques. D'autres biocides présents dans les rejets de stations d'épuration sont également fréquemment détectés dans le milieu, en plus faibles concentrations.

Parallèlement aux pesticides, des substances synthétisées pour améliorer la santé et le bien-être de l'Homme sont également devenues des micropolluants : les produits de soins corporels et les substances pharmaceutiques. Ces micropolluants sont présents dans l'estuaire car le traitement des eaux usées ne permet pas leur élimination complète. Les molécules les plus fréquemment détectées sont la caféine, puis le kétoprofène, un anti-inflammatoire non stéroïdien, et la carbamazépine, dotée de propriétés antiépileptiques, neurotropes et psychotropes. Des récents programmes de recherche ont permis de déceler la présence de 49 substances pharmaceutiques et révélé l'impact des crues du fleuve sur leurs niveaux de concentration (plus élevées en périodes d'étiage). Parmi elles, 5 substances pharmaceutiques présentes dans l'environnement pourraient poser problème : la caféine, le kétoprofène, l'ibuprofène, la carbamazépine et le diclofénac. La question de leur impact toxique sur le milieu et la biocénose mérite d'être mieux documentée afin de consolider des valeurs de PNEC fiables (plus forte concentration sans risque pour l'environnement) dans l'estuaire. Les sédiments constituent un compartiment d'accumulation pour de nombreux micropolluants organiques, plus particulièrement pour les composés les plus hydrophobes et les plus résistants à la dégradation (POP et HAP). La qualité du compartiment sédimentaire est considérée comme bonne à très bonne au regard du référentiel de valeurs seuils du Système d'Évaluation de la Quali-

1. Dans le cadre des suivis réglementaires de la qualité des eaux de la Directive Cadre sur l'Eau, sur les 53 molécules listées comme prioritaires, plus d'un tiers sont des pesticides (22 composés) contre 1200 substances phytosanitaires utilisées en agriculture.

té de l'eau. Cependant, le fonctionnement particulier du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde, basé essentiellement sur le comportement détritique, peut induire des niveaux de concentration non négligeables dans les organismes vivants.

L'estuaire de la Gironde présente dans l'ensemble un niveau de contamination en micropolluants organiques assez faible, dans la

moyenne basse des concentrations observées pour d'autres estuaires français ou européens, et ce malgré la présence de la métropole bordelaise. Cela peut s'expliquer par une pression anthropique plus faible (4 millions d'habitants sur le bassin versant de la Garonne).

Perspectives

- La connaissance de la dynamique spatio-temporelle des micropolluants organiques dont des molécules organiques d'intérêt émergent, doit être approfondie (en particulier : cosmétiques, désinfectants, détergents...).
- Il est nécessaire de mener une réflexion pour la mise en place d'un réseau de suivi pérenne des niveaux de contamination des eaux.
- Dans l'hypothèse de la mise en place d'un suivi, une stratégie doit être adoptée concernant les micropolluants cibles (et traceurs), les méthodes d'analyse chimique et les approches basées sur l'utilisation de bio-tests de toxicité.

3

BIODIVERSITÉ

Le port du Verdon
(cliché : Port Autonome de Bordeaux, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

Les compartiments biologiques et leurs interrelations

Les organismes vivants de l'estuaire de la Gironde sont adaptés à un environnement naturellement contraignant. De nombreux facteurs conditionnent la diversité biologique observée ; parmi eux, la taille de l'estuaire et la largeur de son embouchure ont une grande importance, tout comme la proportion des zones intertidales et le gradient de salinité. Les estuaires sont aussi soumis à des pressions anthropiques croissantes.

Les poissons

Un récent recensement a permis (i) d'estimer à 88 le nombre d'espèces de poissons observées entre Royan et la limite amont de la marée dynamique, et (ii) de noter une prédominance du gobie buhotte (fréquence d'occurrence > 50 % des échantillons). L'estuaire de la Gironde constitue un habitat transitoire pour une majorité d'espèces de poissons. Il joue un rôle de nurserie, correspondant à une zone de refuge, d'alimentation et de croissance pour les juvéniles de nombreuses espèces de poissons marins qui y séjournent de quelques semaines comme l'anchois (*Engraulis encrasicolus*) à plusieurs années comme la sole commune (*Solea solea*). Certains poissons marins adultes utilisent ponctuellement l'estuaire comme zone d'alimentation complémentaire lorsque les conditions hydrologiques leur sont favorables. C'est aussi le cas pour certaines espèces d'eau douce, comme par exemple le barbeau (*Barbus bar-*

bus) ou l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*). Pour cette dernière, l'estuaire peut également servir de refuge thermique, favorable à sa survie, notamment lors d'étiages sévères avec une forte baisse du niveau des eaux, observée dans les habitats des zones humides. Plusieurs espèces migratrices, qui naissent en rivière puis grandissent en mer (ex. : le saumon *Salmo salar* ou les aloses *Alosa* spp.) ou inversement (ex. : l'anguille européenne *Anguilla anguilla*), sont également observées dans l'estuaire qui leur permet d'acquérir les capacités physiologiques nécessaires à la vie en milieu marin ou fluvial. Finalement, seule une minorité d'espèces sont résidentes et passent l'intégralité de leur vie dans l'estuaire. Il s'agit essentiellement de gobies, notamment le gobie buhotte (*Pomatoschistus minutus*) et le gobie tacheté (*P. microps*).

De récents travaux ont aidé à caractériser la diversité de stratégies d'histoire de vie des espèces de poissons résidentes, la reliant aux caractéristiques environnementales de l'estuaire.

Les habitats et la faune benthiques

Une cartographie des principaux habitats benthiques de l'estuaire a été réalisée de 2010-2012. Le domaine intertidal¹ de l'estuaire interne, de la Pointe de Grave aux environs de Bordeaux, se caractérise en grande partie par des vasières estuariennes sans végétation (les « sliques ») en rive gauche et plus enclavées en rive droite. Elles sont associées à une dominance d'espèces de mollusques, de polychètes et d'oligochètes. Le domaine sub-

1. zone de balancement des marées

tidal² est largement dominé par des habitats vaseux à salinité variable. À l'aval de la Pointe de Grave, le domaine intertidal présente de larges vasières dominées par les polychètes et les bivalves, avec par exemple l'habitat à *Ruditapes philippinarum* (palourde japonaise), alors que le domaine subtidal est dominé par des substrats de sables grossiers et de graviers.

De manière générale, les espèces benthiques vivant en estuaire tolèrent de fortes variations de conditions environnementales et un environnement riche en matière organique. Un net gradient de répartition de la richesse spécifique est observé dans le sens amont-aval, lié au gradient de salinité, avec un nombre d'espèces plus important dans la zone aval de l'estuaire (pénétration d'espèces marines). À cette hétérogénéité spatiale, se superpose une variabilité saisonnière résultant de processus dynamiques favorables à l'accroissement des populations (ex. : recrutement de larves et/ou de juvéniles ou apport d'individus par dispersion) ou bien défavorables (ex. : mortalité, compétition, parasitisme, pollution, etc.). Les densités d'individus en un site donné peuvent ainsi varier au cours de l'année de quelques dizaines à plusieurs dizaines de milliers d'individus par m².

Des cartes de répartition des densités et des biomasses du macrobenthos (organismes de taille supérieure à 0,5 mm) ont été réalisées. Le macrobenthos intertidal présente des valeurs élevées en densités et en biomasses, les plus fortes ayant été relevées au Verdon, à proximité de l'embouchure, avec plus de 200 000 ind.m². Dans l'estuaire interne, les densités maximales ont été observées sur la rive gauche, dépassant 20 000 ind.m². Dans la partie fluviale de l'estuaire, n'ont été recensés que des oligochètes avec des densités maximales de 19 000 ind.m². Dans le domaine subtidal, le macrobenthos est caractérisé par des abondances et biomasses beaucoup plus faibles (10 à 100 fois moindres) que pour les vasières intertidales.

La faune méiobenthique³ regroupe les organismes de taille intermédiaire entre le macrobenthos et le microbenthos. Malgré leur importance écologique, ils ont été peu étudiés dans l'estuaire, où le groupe dominant est constitué par les nématodes. Les densités varient beaucoup à de faibles échelles spatio-temporelles. Dans le domaine intertidal, la méiofaune est présente en abondance élevée (> 500-1 000 ind.10 cm⁻²) dans tous les secteurs de l'estuaire, y compris dans la partie fluviale, alors que ses densités sont extrêmement faibles dans le domaine subtidal, dépassant rarement 100 ind.10 cm⁻².

Le zooplancton

La diversité zooplanctonique de l'estuaire de la Gironde est faible, en particulier dans les zones oligo- et méso-halines où seulement 5 espèces principales ont été recensées à ce jour : les copépodes *Eurytemora affinis* (Figure 6), *Acartia tonsa*, *Acartia bifilosa* et les mysidacés *Neomysis integer* (Figure 7) et *Mesopodopsis slabberi*. Dans la zone polyhaline la diversité est beaucoup plus importante. Le groupe dominant (copépodes) y représente à lui seul 30 espèces, dont l'assemblage varie en fonction des caractéristiques hydroclimatiques.

Le copépode dominant *Eurytemora affinis* est préférentiellement observé en amont du bouchon vaseux, dans les zones oligohaline et limnique, alors qu'*Acartia bifilosa* est observé plus en aval (zones méso- et polyhaline), où l'espèce dominait jusqu'à la fin des années 1990, avant l'introduction du copépode *A. tonsa*. Depuis son introduction, *A. tonsa* a atteint des abondances comparables à l'espèce dominante native, *E. affinis*.

Le cycle de développement de ces espèces est marqué par une dynamique saisonnière. Deux périodes de production sont observées pour *E. affinis*, une période printanière importante, autour de mars/avril et une se-

2. continuellement immergé

3. organismes benthiques de petite taille constituant un maillon trophique intermédiaire entre producteurs primaires et niveaux trophiques supérieurs et participant à la minéralisation et à la régénération des nutriments.



Figure 6 : *Eurytemora affinis* (crustacé copépode) espèce dominante du zooplancton de l'estuaire (photo : R. Parra – Université de Bordeaux)



Figure 7 : *Neomysis integer* (crustacé, mysidacé) (photo : R. Parra – Université de Bordeaux)

conde, plus modeste, fin automne. La période de production des deux espèces d'*Acartia* est observée en été.

Bien que l'estuaire constitue un corridor migratoire pour de nombreux poissons, la richesse spécifique du compartiment zooplanctonique de la partie fluviale de l'estuaire était très peu connue jusque dans les années 2000. Cette zone, sous l'influence majeure de pressions anthropiques directes (agglomération de Bordeaux), présente des phases d'hypoxies sévères en période d'étiage avec de possibles conséquences sur les communautés biologiques. D'anciennes études recensaient deux espèces de mysidacés (*Neomysis integer* et *Mesopodopsis slabberi*) en amont du Bec d'Ambès mais des travaux récents ont révélé la présence d'autres espèces comme l'amphipode *Gammarus zaddachi* ou le copépode *Eurytemora affinis*, anciennement décrits plus en aval dans l'estuaire. Les périodes d'occurrence saisonnière de *N. integer*, *M. slabberi* et *G. zaddachi* sont relativement similaires à celles décrites plus en aval : pics d'abondance successifs (en période printanière pour *G. zaddachi* et en été pour les deux mysidacés). Ces travaux ont aussi permis d'identifier un développement atypique du copépode *E. affinis* en début d'été (juin) en Garonne avec des caractéristiques physico-chimiques inhabituelles pour cette espèce (température ≈ 25 °C) et des abondances proches de $25\ 000\ \text{ind.m}^{-3}$. Ces nouvelles observations suggèrent une colonisation de l'espèce vers l'amont, comme cela a pu être

observé dans l'Escaut, en dehors des préférences thermiques et halins classiques de l'espèce.

Les microphytes

L'estuaire de la Gironde est connu pour sa forte turbidité qui limite le développement d'organismes autotrophes. La biomasse phytoplanctonique, de l'ordre de $5\ \mu\text{g.L}^{-1}$, y est faible en comparaison d'autres estuaires. Cette biomasse phytoplanctonique étant largement inférieure à celle des bactéries hétérotrophes intervenant dans la dégradation de la matière organique au sein du bouchon vaseux, l'estuaire de la Gironde est qualifié de hautement hétérotrophe. La production primaire la plus élevée est observée dans les fleuves (Dordogne et Garonne) ou en aval du bouchon vaseux.

La diversité de taxons phytoplanctoniques, est structurée spatialement avec : (i) en zone oligohaline, une majorité de matériel détritique d'origine continentale et du microphytobenthos remis en suspension ; (ii) en zones mésosaline et polyhaline intra-estuarienne, une dominance de diatomées et, en moindre proportion, de dinoflagellés ; et (iii) dans le panache de dilution de l'estuaire, une production phytoplanctonique caractérisée par une efflorescence précoce suivie d'un développement printanier atypique du fait d'une fraction importante de cellules de très petite taille.

Le microphytobenthos (microalgues d'origine benthique) a été peu étudié à ce jour. Sa dynamique saisonnière est caractérisée par un début de production en aval au début du printemps qui s'étend ensuite de manière plus homogène vers l'amont. Les biomasses microphytobenthiques mesurées en période de production sont supérieures à 200 mg de chlorophylle *a* par m² et se situent dans la gamme des valeurs trouvées dans les vasières intertidales d'autres estuaires. Ces premiers travaux nécessiteraient d'être poursuivis pour permettre d'évaluer la production microphytobenthique annuelle des estrans vaseux de l'estuaire de la Gironde.

Le compartiment microbien

Peu d'études se sont intéressées à ce jour au compartiment microbien de l'estuaire de la Gironde, et en l'occurrence à deux lignées taxonomiques d'êtres vivants unicellulaires : les bactéries et les archées⁴. Une étude a été réalisée dans les zones oligohaline et polyhaline de l'estuaire afin d'évaluer la composition des communautés de bactéries de la couche superficielle des sédiments (0-5 cm). Elle a mis en évidence des différences de composition des communautés de bactéries benthiques entre ces deux zones estuariennes suggérant : (i) des changements de communautés au sein du continuum estuarien, potentiellement à relier à la salinité, (ii) une spécificité des communautés de bactéries de l'estuaire comparativement à des écosystèmes proches (ex. : Bassin d'Arcachon).

D'autres travaux ont permis d'estimer des densités, biomasses et productions bactériennes entre Bordeaux et Le Verdon de 1992 à 1994 : les eaux de la Gironde contiendraient environ 105 bactéries par mL, pour une biomasse bactérienne variable autour de 55 µg de carbone par litre et une production maximale variant de 41 à 235 mgC.m⁻³.j⁻¹. Cette production bactérienne serait par ailleurs intégralement consommée par des prédateurs planctoniques de taille < 5 µm. En plus d'une contribution non négligeable au réseau trophique par leur production de biomasse, les

bactéries sont également impliquées dans différentes transformations de la matière : (i) conversion de matière organique dissoute (MOD) en biomasse, (ii) transformation de débris végétaux grossiers, (iii) reminéralisation de la MOD en CO₂ et (iv) processus de nitrification et de dénitrification influençant donc la dynamique de l'azote et de l'oxygène.

Les interactions trophiques dans l'estuaire

Les interactions trophiques figurent parmi les interactions directes les plus structurantes au sein d'un écosystème, permettant une circulation d'énergie et de matière depuis les producteurs primaires, à la base du réseau trophique, vers les prédateurs supérieurs au sommet. Dans l'estuaire de la Gironde, la base du réseau trophique est constituée de composés très diversifiés (bactéries, micro-algues, détritus...), auxquels se sont adaptés les consommateurs. Dans ce contexte particulier, l'un des enjeux majeurs pour la compréhension du fonctionnement trophique de la Gironde consiste à identifier la (ou les) principale(s) source(s) de nourriture à la base des chaînes alimentaires selon les zones de l'estuaire considérées.

La structure du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde varie au cours de l'année, principalement en relation avec les changements de conditions hydrologiques et la phénologie des espèces. L'essentiel des travaux réalisés a porté sur le fonctionnement trophique de l'estuaire en zone oligo-mésohaline, identifiant deux périodes distinctes dépendantes des conditions hydrologiques, avec un changement s'opérant en début d'été. Certains travaux ont également révélé que la forte diversité observée en période estivale induit un fonctionnement complexe du réseau trophique associé à des ressources benthiques et planctoniques abondantes et diversifiées pour les prédateurs supérieurs (poissons).

4. généralement distinguées par des outils de biologie moléculaire.

Perspectives

- La contribution du compartiment bactérien au fonctionnement actuel de l'écosystème estuarien est à préciser, notamment en amont, en relation avec l'évolution climatique actuelle.
- La caractérisation de la faible biodiversité de l'estuaire fluvial doit être approfondie et la question de la cause abordée.

Les effets des pressions anthropiques sur la biodiversité

Écosystème à l'interface entre continent et océan, l'estuaire de la Gironde est soumis à de nombreuses pressions liées aux activités humaines directes ou trouvant leur origine plus en amont.

Les impacts des contaminants

L'estuaire subit une pression industrielle relativement faible comparativement à d'autres estuaires; pour autant les niveaux de contamination en composés organiques observés chez certaines espèces s'avèrent préoccupants. Ainsi, les teneurs en polychlorobiphényles (PCB), dépassant les normes sanitaires, ont conduit à des interdictions de consommation d'anguilles et d'aloses feintes à partir de 2009 (levées en 2016). L'origine de la contamination des anguilles a depuis été reliée à leur alimentation. En effet, le réseau trophique de l'estuaire est fortement basé sur de la matière détritique, ce qui induit des niveaux de contamination élevés dans la petite faune vagile qui se répercutent sur les prédateurs supérieurs tels que l'anguille. Des différences de comportement alimentaire peuvent ainsi expliquer des niveaux de contamination différents entre les anguilles de l'estuaire aval et celles de l'estuaire amont. Les niveaux de contamination en micropolluants organiques émergents les plus élevés sont enregistrés chez la sole commune *Solea solea* et l'annélide polychète *Hediste diver-*

sicolor, deux organismes benthiques, ce qui suggère, là aussi, l'importance du compartiment sédimentaire contaminé.

D'autres études se sont intéressées aux impacts des contaminants métalliques sur les organismes et ont montré que la bioaccumulation du cadmium par le zooplancton (copépode *Eurytemora affinis*) varie au cours du temps et dans l'espace (maximum observé de 13,75 mg Cd.kg⁻¹ de poids sec en septembre). Le programme national de biosurveillance sur l'environnement marin côtier (ROCCH) a révélé une pollution importante par les métaux (Cd essentiellement) dans les huîtres de l'estuaire, dont la consommation est interdite depuis 1995. Parmi les taxons benthiques, les mollusques bivalves, représentés par l'huître japonaise *Magallana gigas* (auparavant dénommée *Crassostrea gigas*), sont les plus touchés par une contamination polymétallique (cuivre, zinc, cadmium et mercure), alors que les accumulations de métaux sont plus faibles chez les crustacés. Les concentrations de ces quatre éléments dosés dans les huîtres diminuent de l'amont (St-Christoly) vers l'aval (Le Verdon).

Jusqu'à récemment, aucune donnée n'était disponible sur les niveaux de contamination des poissons par les métaux, malgré leur importance écologique et économique. Selon les espèces et les métaux étudiés, des différences de concentrations très marquées ont été mises en évidence. Plusieurs facteurs explicatifs permettent d'interpréter ces différences: l'âge des poissons, la durée estimée de séjour dans l'estuaire, leur habitat et leur régime alimentaire. Peu d'études à ce jour ont porté sur la contribution possible de la pollution au déclin des populations de l'anguille. Par conséquent, les effets des contaminants sur le succès de reproduction des

anguilles restent méconnus. Il a cependant été montré que le Cd est un perturbateur endocrinien fort pour les anguilles, affectant le métabolisme du foie ou responsable d'une surexpression du gène codant pour l'hormone de croissance.

L'impact des perturbations physiques des habitats

Diverses perturbations physiques des habitats sont observées dans l'estuaire de la Gironde, à commencer par les activités d'entretien du chenal de navigation pour maintenir une profondeur supérieure à 10 m, permettant aux navires de grand tonnage un accès sécurisé au Grand Port Maritime de Bordeaux. L'activité de dragage des sédiments accumulés en fond de chenal représente un volume annuel moyen de 8,7 millions de m³, qui sont ensuite déversés dans des zones dédiées. Ces opérations conduisent à une destruction de l'habitat benthique local et de la faune associée (par extraction ou recouvrement) mais aussi à une augmentation de la turbidité et une remobilisation de contaminants. L'accroissement de turbidité, réduisant la pénétration de lumière peut affecter les organismes pélagiques et planctoniques et induire une diminution de l'oxygène dissous. Si les effets des dragages sur la biodiversité dans l'estuaire de la Gironde n'ont jamais été étudiés, une étude récente a été réalisée pour mesurer l'impact du clapage sur le benthos, révélant, dans ce cas particulier une quasi-absence d'impact sur la faune benthique, probablement en raison de l'acclimatation des espèces aux conditions de turbidité et du fort hydrodynamisme du site étudié.

Une autre perturbation physique des habitats est celle des extractions de granulats dont l'impact immédiat est la destruction totale de la faune benthique, au moins temporairement, suivi d'un impact ultérieur lié à la modification de la nature du substrat (comblement du site d'extraction). Bien qu'on ignore la vitesse de recolonisation par le benthos après arrêt des extractions, le risque encouru

sur les communautés biologiques justifie une absence d'autorisation dans l'estuaire de la Gironde.

Une destruction de 15 hectares de vasières intertidales a été nécessaire à la création de Port Médoc, au Verdon. La perte de biomasse benthique (macro- et méiofaune) a été estimée entre 0,7 et 1,9 tonnes de carbone, équivalente à une production benthique annuelle de 2,9 à 6,2 tonnes de carbone, représentant une perte annuelle de 6,7 à 14,1 tonnes (en poids frais) de poissons et d'oiseaux.

L'impact des installations industrielles

Le refroidissement des réacteurs du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) du Blayais conduit au piégeage d'organismes et de débris végétaux. Les mortalités d'organismes qui en résultent sont de trois ordres, celle de 1^{er} ordre est induite par le passage sur les tambours filtrants, celle de 2^e ordre est liée aux chocs mécaniques et au stress dans le canal de rejet vers la berge, et la mortalité de 3^e ordre consiste en une mortalité post-traumatique. Une étude réalisée au début des années 1980 a permis d'estimer un ordre de grandeur de macro-organismes piégés et aussi un calendrier des périodes de plus fortes abondances (d'organismes piégés). Ces abondances varient saisonnièrement, avec le recrutement des espèces et en fonction de la salinité, de la température et de la phase de marée. Elles sont les plus faibles en mars-avril et les plus fortes en période estivale. Les espèces piégées se divisent en deux groupes : (i) celles dont la mortalité atteint 100% des individus du fait de la fragilité des stades biologiques impactés, et (ii) celles dont la mortalité varie en fonction du moment de la marée et de l'utilisation de la haute ou basse pression. À titre d'exemple, pour les crevettes, le taux moyen de mortalité est de 23% dans le cas d'un fonctionnement en condition normale alors que l'utilisation de la haute pression entraîne une augmentation moyenne du taux de mortalité de 46%.

L'impact du passage dans les circuits de refroidissement du CNPE du Blayais sur la production primaire, le zooplancton (copépodes) et la petite faune vagile a été évalué en 2006 pour trois saisons : printemps, été et automne. Cette étude a révélé une réduction de production primaire de 82-85%, malgré une biomasse chlorophyllienne stable. Quarante-trois à 77% des abondances de copépodes ont disparu lors de leur passage dans les circuits de refroidissement. Par rapport à leur production annuelle, cette disparition représente une perte de 4% pour *Eurytemora affinis* et 1% pour *Acartia bifilosa*. Pour *Mesopodopsis slabberi*, l'impact négatif est plus marqué, avec une mortalité additionnelle de 46% en été. En ce qui concerne les larves de crevettes du genre *Palaemon*, une perte de 60% des abondances a été observée en été lors de leur pic de production.

L'impact de la pêche

L'impact de la pêche sur la communauté de poissons est particulièrement difficile à évaluer car il se superpose à d'autres impacts, ceux de la qualité de l'eau et des habitats, la croissance et l'état sanitaire des espèces, le tout dans un contexte de changement climatique. L'impact de la pêche se serait de plus fortement réduit en relation avec l'évolution à la baisse du nombre de pêcheurs professionnels depuis plus de 40 ans. Une récente étude indique que la qualité de l'eau a les effets les plus importants sur la restauration de la communauté de poissons.

Les introductions d'espèces non-indigènes

Vingt-six espèces aquatiques ont été volontairement ou accidentellement introduites par l'Homme dans l'estuaire de la Gironde, en dehors de leur aire de répartition naturelle ; elles sont qualifiées d'espèces non-indigènes. Ainsi l'huître japonaise (*M. gigas*) est un organisme introduit volontairement, par l'implantation en 1972-1973 de 60 tonnes en provenance de Colombie Britannique, afin de remplacer les stocks d'huîtres portugaises décimées par diverses maladies. Le nombre d'introductions accidentelles identifiées actuellement est probablement sous-évalué, certaines espèces ayant potentiellement disparu avant d'être capturées ou repérées.

En cas d'implantation réussie, la plupart des espèces exotiques s'intègrent dans leur nouvel écosystème de manière discrète, sans engendrer de perturbations. À l'inverse, dans certains cas, les espèces exotiques peuvent devenir invasives, provoquant des effets majeurs sur l'environnement ou sur la conservation de la biodiversité autochtone, assortis parfois de conséquences économiques et financières. Plusieurs cas récents d'introductions accidentelles dans la Gironde, concernant des organismes gélatineux, des copépodes planctoniques et des crevettes, s'avèrent avoir déjà des conséquences majeures sur le fonctionnement de cet écosystème.

Perspectives

- Les organismes estuariens étant soumis à des pollutions organiques et métalliques variées, un suivi pérenne de leur niveau de contamination doit être développé.
- À l'échelle de l'estuaire, l'impact cumulé d'activités anthropiques locales sur la biodiversité doit être abordé et décliné en termes de gestion.

Les évolutions récentes

L'estuaire de la Gironde bénéficie de séries d'observations récurrentes uniques pour de nombreux compartiments biologiques, permettant l'étude des évolutions récentes de la biodiversité.

L'environnement physico-chimique

De profonds changements du contexte physico-chimique de l'estuaire de la Gironde ont été identifiés ces dernières décennies, en réponse aux modifications du climat à l'échelle de l'Atlantique Nord tempéré. Deux paramètres déterminants pour le métabolisme et la distribution des organismes, la température et la salinité des eaux, ont augmenté sur l'ensemble du continuum estuarien. En parallèle de ces évolutions, une remontée du bouchon vaseux est observée, avec des temps de résidence plus longs dans la partie fluviale de l'estuaire. Cette remontée est susceptible d'induire des événements hypoxiques plus fréquents dans cette zone. Au-delà des changements à long terme précédemment décrits, de récents travaux ont identifié deux phases de changements abrupts majeurs : l'une à la fin des années 1980, en lien avec une intensification du réchauffement climatique, et la seconde au début des années 2000, associée à une modification des courants de circulation atmosphérique à l'échelle de l'Atlantique Nord.

Les invertébrés benthiques

L'augmentation de salinité, ou « marinisation » du système, n'a pas induit d'augmentation de la surface d'habitats potentiels pour les espèces benthiques marines (zones intertidales restreintes). En raison de leur caractère sédentaire, les organismes benthiques sont souvent considérés comme de bons marqueurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. Le macrobenthos fait aussi l'objet du suivi écologique du CNPE du Blayais depuis 2004, en 6 stations des parties cen-

trale et amont de l'estuaire halin. L'analyse de cette série a permis d'observer des valeurs maximales d'abondance de la faune benthique de substrat meuble en 2004-2005 et en 2015, et une période de 9 années (2006 à 2014) caractérisée par de faibles abondances et richesses spécifiques. De nombreux facteurs, biotiques ou environnementaux, pouvant agir seuls ou en synergie, peuvent être responsables de ces variations. Néanmoins, aucune corrélation n'a été mise en évidence et il est important de mentionner qu'il est fréquent d'observer sur les séries d'abondances de macrobenthos des cycles de 6-7 et 10-11 ans en relation avec différents cycles climatiques et astronomiques.

Le zooplancton

L'analyse de suivis d'observation opérés depuis la fin des années 1970 a permis de mettre en évidence des modifications d'assemblages zooplanctoniques et une progression des communautés vers l'amont en conséquence de la marinisation du milieu. Néanmoins, ces modifications ne résultent pas uniquement d'une remontée passive des organismes en lien avec une pénétration accrue de masses d'eaux marines et d'une baisse des débits, mais aussi d'un comportement actif. En effet, dans le cas du copépode *Eurytemora affinis*, la progression observée ne correspond pas à un maintien dans les conditions optimales de l'espèce mais à des conditions en dehors de ses préférences classiques (15 °C et 15 unités de salinité), suggérant un comportement migratoire vertical pour utiliser les courants résiduels de fond orientés vers l'amont. Outre ces modifications, des changements de dynamique saisonnière ont également été décrits, comme par exemple pour le mysidacé *Neomysis integer*, pour lequel une désynchronisation de la période de présence avec celle de ses prédateurs a été documentée. Un autre exemple, plus surprenant, concerne le paradoxe du maintien des abondances d'*E. affinis* malgré une baisse du nombre de femelles portant des œufs et du nombre d'œufs portés par chacune, qui laisse

supposer un changement de stratégie de reproduction de l'espèce, avec des œufs émis libres dans le milieu.

La faune ichthyologique

L'étude de l'ichtyofaune, à partir des suivis à long terme, a permis d'identifier de profonds changements de communauté. Les premiers à avoir été décrits dans la littérature concernent une modification de la distribution géographique de certaines espèces en relation avec le changement climatique. Le réchauffement des eaux dans l'estuaire aurait été défavorable à une espèce nordique comme l'éperlan mais favorable à une espèce méridionale, le maigre, devenu depuis les années 2000 une espèce majeure de l'estuaire. Néanmoins, en dehors de ces deux espèces, aucune modification de richesse spécifique n'a été observée, avec cependant des changements de représentativité des espèces.

Une augmentation des juvéniles d'espèces marines a aussi été décrite ces dernières décennies, en relation avec le réchauffement et la marinisation de l'estuaire. Plus précisément, trois périodes distinctes ont pu être identifiées entre 1985 et 2014, avec le passage d'un assemblage caractérisé par une présence significative de poissons migrateurs dans l'estuaire médian à un peuplement actuel dominé par les juvéniles de poissons marins, notamment pélagiques (anchois, sprats). Si les changements majeurs observés sur les espèces marines ont principalement été associés au changement climatique et aux modifications d'hydrologie locale, d'autres facteurs tels que la destruction d'habitats (frayères) et la mauvaise qualité de l'eau peuvent expliquer l'effondrement des espèces migratrices.

Les crustacés

Des modifications ont également été documentées chez les crustacés, avec l'exemple notable de l'établissement de la crevette exotique *Palaemon macrodactylus*, compétitrice de l'espèce native, la crevette blanche

P. longirostris. Cette dernière a fait l'objet de travaux ayant mis en lumière d'importantes déformations de sa carapace (jusqu'à 80% des prélèvements).

Les évolutions du point de vue des communautés biologiques

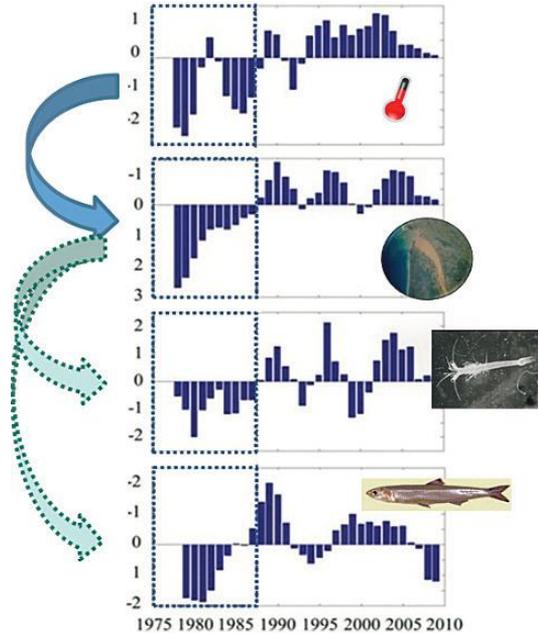


Figure 8 : Modifications temporelles de (de haut en bas) : la température des eaux, les caractéristiques physico-chimiques des eaux, la biodiversité du zooplancton et celle des poissons. D'après Chaalali *et al.*, 2011.

Le changement abrupt observé à la fin des années 1980 sur les conditions environnementales (Figure 8), essentiellement marqué par une marinisation et un réchauffement du système, a été également observé sur les communautés biologiques, avec (i) une augmentation marquée des abondances du copépode planctonique *Acartia bifilosa*, du mysidacé *Mesopodopsis slabberi*, du flet, de l'anchois et du mulot porc et (ii) une diminution des abondances de poissons migrateurs et d'espèces d'eau douce. Depuis le début des années 2000, l'environnement a subi des modifications environnementales fortes avec des années exceptionnelles, en particulier du

point de vue des températures et de la pluviométrie, auxquelles ont répondu les communautés biologiques.

Ainsi, les communautés zooplanctoniques et piscicoles ont vu la proportion d'espèces marines s'accroître (par exemple, le copépode *Calanus helgolandicus*, l'anchois, la sole, le maigre) et la représentativité des poissons migrateurs diminuer.

Dans ce contexte de changements d'assemblages importants, se pose la question de possibles modifications du fonctionnement du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde, dont l'étude a été réalisée par modélisation. Des travaux récents ont souligné une augmentation de la pression de prédation, notamment des poissons benthiques et démersaux marins - dont la biomasse a beaucoup augmenté ces dernières décennies (bar, maigre, poissons plats) -, sur la macrofaune benthique (abondance en baisse et structure de population modifiée pour les crevettes). Cette étude de la nurricerie estuarienne

pose la question d'une éventuelle limitation de sa capacité d'accueil, à la fois du fait d'une surface d'habitats potentiels limitante mais aussi de la mauvaise qualité de l'eau.

La faune avienne

L'évolution temporelle des stationnements d'oiseaux hivernants a été abordée sous l'angle de l'effet du changement climatique sur les assemblages d'espèces de limicoles côtiers, par le développement d'indicateurs de suivi. Les résultats ont permis de montrer que certaines espèces migratrices ont tendance à nicher plus au nord de l'Europe qu'auparavant en réponse au changement climatique, ce qui se traduit localement par une augmentation des espèces qui hivernent dans des régions plus chaudes comme le héron garde-bœufs *Bubulcus ibis*, la barge rousse ou la cigogne blanche *Ciconia ciconia* par rapport à des espèces à affinité plus septentrionale.

Perspectives

- Il est indispensable de renforcer les dispositifs d'observation à long terme de la biodiversité dans l'estuaire qui, comme montré ci-dessus, sont porteurs d'enseignements très riches.
- Un approfondissement des connaissances sur le fonctionnement du réseau trophique doit être envisagé dans un contexte d'évolution du climat à court terme, incluant des compartiments non pris en compte actuellement (bactéries).

4

LES ZONES HUMIDES

Photo aérienne du chenal de Mortagne sur Gironde vu depuis l'Estuaire (cliché : Swan17, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

Le lien terre-eau dans l'estuaire de la Gironde

Les zones humides regroupent une grande variété d'habitats, comme par exemple les estrans, les berges de rivières, d'estuaires, de lacs ou d'étangs, les marais ou marécages, les tourbières, les prairies humides, les forêts alluviales ou les mares permanentes et temporaires. L'intérêt majeur des zones humides en termes de rôles écologiques et services écosystémiques rendus aux sociétés humaines a été reconnu dès 1975 par la convention de RAMSAR. Sur les bords de l'estuaire de la Gironde, une superficie totale de 714 km² a été identifiée en tant qu'habitats de zones humides par le SAGE. Les définitions de ces habitats sont multiples, mais toutes partagent des critères communs concernant l'hydromorphologie des sols (ex. : présence d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire) et la nature de la végétation hygrophile¹, qui, si elle existe, est présente au moins une partie de l'année (Figure 9).

Les zones humides de l'estuaire de la Gironde font l'objet de plusieurs zonages réglementaires superposés, certains d'eux ayant un statut juridique réel (permettant une réglementation légale des activités sur les zones concernées), tandis que d'autres ont une simple vocation d'inventaire du patrimoine naturel n'induisant pas forcément d'actions de protection des écosystèmes. À cette complexité des zonages réglementaires, s'ajoute

une multiplicité des critères de caractérisation écologique ou biophysique des zones humides.

L'histoire des zones humides de l'estuaire de la Gironde est complexe. Diverses zones humides se sont succédé depuis l'Holocène et leur formation est à relier à l'influence du chenal d'écoulement de l'estuaire ainsi qu'à des forçages naturels (ex. : variabilité climatique) d'une part, et anthropiques d'autre part. Elles ont donc également été façonnées par les intenses modifications humaines successives intervenues dès le XVI^e siècle en faveur d'un assèchement délibéré des marais et ce pour des besoins agricoles et de protection contre les eaux.

Enjeux/Fonctions écologiques

Bien que représentant une petite surface à l'échelle mondiale, les zones humides contribuent à pourvoir une très grande biodiversité, notamment végétale. La mosaïque de communautés végétales observée s'organise selon différents gradients écologiques (*i.e.* en fonction des conditions environnementales rencontrées et de la faculté des espèces à tolérer des immersions variables). Certaines espèces ont ainsi développé des adaptations morphologiques leur permettant d'assurer photosynthèse et respiration en condition d'immersion et d'utiliser les nutriments disponibles dans des sols pauvres en oxygène et à forte salinité. Leur structuration est influencée par les activités humaines et la gestion de ces zones, notamment les activités de fauchage ou le pâturage.

1. Hygrophile : Ayant une préférence pour les zones humides.



Figure 9 : Zone humide rivulaire de l'estuaire de la Gironde (Wikimedia commons)

En termes de biodiversité animale, l'estuaire de la Gironde et les zones humides qui le bordent étant situés à mi-distance entre la Sibérie occidentale et l'Afrique de l'Ouest, sont au cœur de l'une des plus grandes voies ouest-européenne de migration d'oiseaux. Chaque année, des milliers d'oiseaux de plus de 200 espèces peuvent ainsi être observés sur l'estuaire et ses alentours. C'est notamment une escale importante pour certaines espèces menacées, comme par exemple le Phragmite aquatique (*Acrocephalus paludicola*). Les espèces utilisent ces zones pour des besoins différents : alors que les vasières sont principalement utilisées par les anatidés et les limicoles pour leur alimentation, ces derniers utilisent les zones humides arrières littorales comme zone de repli lorsque la marée monte. Les zones humides riveraines de l'estuaire de la Gironde jouent également un rôle important de nurserie et de refuge pour de nombreuses espèces de poissons et de macro-crustacés, parmi lesquelles des espèces d'intérêt commercial comme la sole

commune (*Solea solea*), le flet (*Platichthys flesus*), l'anguille (*Anguilla anguilla*) ou la crevette blanche (*Palaemon longirostris*). La présence, l'accessibilité et la superficie de vasières intertidales dans les parties avales de l'estuaire de la Gironde semblent, quant à elles, favoriser de nombreuses espèces et groupes fonctionnels de poissons, en particulier les juvéniles d'espèces marines et diadromes².

Enjeux socio-économiques

La complexité des zonages réglementaires évoquée précédemment est à associer à une multiplicité d'enjeux socio-économiques entre acteurs du milieu. Les zones humides assurent en effet de nombreuses fonctions écologiques et fournissent un vaste ensemble de biens et de services à la société. Elles sont dans le même temps soumises à d'importantes pressions économiques (urbaine, industrielle et agricole) mettant en jeu la capacité d'adaptation face aux pressions anthropiques sur ces écosystèmes, leur

2. Espèce migratrice vivant alternativement en eau douce et en mer.

résilience et donc la durabilité des services rendus, plus particulièrement l'approvisionnement en eau et la production halieutique. La mise en péril des capacités des zones humides estuariennes à produire durablement certains de ces services dans le contexte actuel de pressions humaines croissantes a été mise en évidence par de récents travaux de recherche.

À l'heure actuelle, seuls la gestion et l'entretien des digues de protection et des ouvrages hydrauliques permet d'assurer la régulation des échanges d'eau entre les marais et l'estuaire, la conciliation des différents usages agricoles et la préservation du capital naturel sur ce territoire (Figure 10). Or ce sont les propriétaires fonciers qui ont la responsabilité de leur gestion. L'efficacité de la protection des zones humides sur les terres privées dépend donc des usages des propriétaires fonciers et de leur participation volontaire aux programmes de préservation des zones humides.

Parce qu'elles font l'objet depuis une trentaine d'années d'un traitement accru en termes de formalisation théorique, de reconnaissance institutionnelle et de gestion, les zones humides font également l'objet d'études sociogéographiques, notamment sur la définition et la cartographie par le SDAGE Adour Garonne 2016-2021, les en-



Figure 10 : Paysage estuarien – Mortagne sur Gironde (Wikimedia commons)

jeux de concertation associés sur les territoires viticoles de la Gironde ou de démonstration dans ces habitats.

Quel avenir ?

Les littoraux estuariens européens ont été historiquement massivement poldérisés, ce qui signifie qu'ils ont été endigués à des fins de protection contre les risques de submersion marine et d'augmentation de surfaces disponibles pour l'agriculture. Néanmoins, l'endiguement des zones humides est devenu une source de contestation croissante ces dernières décennies, en particulier en Gironde. En effet, l'argument du coût d'entretien des digues par rapport aux bénéfices générés par l'endiguement (ex. : rentabilité des activités agricoles) est avancé pour justifier de la remise en eau de certains marais.

Perspectives

- Une approche de recherche intégrée sciences du milieu, sciences humaines et sociales et société est nécessaire pour mieux caractériser les services rendus par ces écosystèmes et leurs évolutions.
- Les réglementations et processus de gestion associés à ces écosystèmes sont complexes : la possibilité d'une simplification des outils à la disposition des gestionnaires est à aborder.
- Les efforts importants entrepris pour la préservation de ces milieux sont encore trop souvent déconnectés de ceux initiés sur l'estuaire : une démarche de préservation plus intégrative est à promouvoir.

5

ÉCONOMIE

Les grottes de Régulus dans les falaises vives de l'estuaire de la Gironde (cliché : Jack ma, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

L'estuaire facteur de production pour des activités marchandes

Comment et pourquoi approcher les valeurs marchandes générées par l'estuaire ?

Les travaux autour de l'évaluation des écosystèmes¹ s'appuient sur l'importance d'une gestion durable du patrimoine naturel pour le maintien de l'activité économique et le bien-être des populations. Cette démarche nécessite de recenser, quantifier et évaluer les services rendus par l'estuaire de la Gironde et leur contribution au bien-être humain.

Les services écosystémiques rendus par l'estuaire peuvent être classés en trois catégories: (i) des services de régulation (ex.: autoépuration des eaux ou maintien de la biodiversité), (ii) des services sociaux à caractère non-marchand et (iii) des services sociaux à caractère marchand. Ces derniers ne pourraient pas exister en tant que tels sans la présence de l'estuaire. La création de richesse brute associée est évaluée sur la base du chiffre d'affaires généré par les activités et des dépenses engagées par les usagers des services. Il est à noter qu'il n'existe pas d'étude antérieure à ce jour sur la création de richesse marchande dans l'estuaire ni sur les externalités générées, c'est-à-dire les conséquences positives ou négatives que l'activité d'un acteur économique entraîne pour au moins un autre acteur sans contrepartie monétaire. Bien que l'équilibre entre

les activités marchandes soit dynamique puisque les activités évoluent, une image stabilisée de l'équilibre du moment a été établie. Deux types d'activités ont été examinés: celles liées au transport *in situ* et celles liées au prélèvement de ressources, toutes deux pouvant induire des rejets d'effluents.

L'estuaire comme vecteur de mobilité et de transport

L'estuaire joue un rôle clé dans le transport de marchandises (Figure 11) et de passagers et dans le développement d'activités connexes, de construction ou de réparation navale. Le transport de marchandises est géré par le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB). La localisation en amont de l'estuaire génère des surcoûts d'exploitation qui impactent la compétitivité et ont conduit

Figure 11 : Le navire roulier Ville de Bordeaux à l'appontement de Trompeloup, Pauillac.



1. initiés par le Secrétaire Général de l'Organisation des Nations Unies en 2001



Figure 12: Traversée de l'estuaire en aval : Ferry à la Pointe de Grave (Wikimedia commons).

au développement d'avant-ports spécialisés ; Ambes et Bassens drainent ainsi autour de 90 % du trafic.

Depuis la fermeture de trois raffineries bordelaises, le GPMB est devenu un acteur stratégique pour l'importation, le stockage et la distribution d'hydrocarbures à l'échelle du quart sud-ouest. La faible industrialisation de l'hinterland du GPMB a favorisé une offre polyvalente plutôt qu'un transport de masse. Le GPMB traite une diversité de marchandises, pour un volume total constant autour de 8,5 millions de tonnes, soit l'équivalent de 360 000 camions. Si ce chiffre est resté stable ces dix dernières années, le nombre de mouvements a baissé alors que le tonnage des navires s'est accru dans le même temps. L'activité portuaire du GPBM mobilise 4 900 emplois et génère un produit brut d'exploitation de 50 millions d'euros.

L'activité de transport de passagers comprend les croisières maritimes et fluviales. Leur développement récent, qui connaît une croissance considérable, a favorisé l'accroissement du trafic estuarien et fluvial autour de trois ports équipés d'infrastructures d'accueil adaptées : Bordeaux, Bassens et Le Ver-

don. La descente à terre des passagers et des membres d'équipage livre d'importantes retombées économiques locales. Par exemple, pour l'année 2014, c'est un flux de dépense de l'ordre de 3,5 millions d'euros qui a été estimé. C'est le même constat pour les excursions associées aux activités de croisière fluviale, qui proposent des croisières à la journée ou itinérantes avec nuitée et escales en différents points de l'estuaire pour découvrir les vignobles et le patrimoine.

La plaisance estuarienne, qui se situe entre plaisance maritime et plaisance fluviale, est déployée sur seize ports avec des capacités d'accueil variables. Les retombées économiques liées à la plaisance, comprenant les frais de stationnement aux ports et les dépenses de fonctionnement engagées par les plaisanciers pour la navigation et l'entretien, génèrent une dépense annuelle autour de 16,5 millions d'euros.

À ces activités s'ajoutent les traversées en ferry dont le transport de passagers s'élevait en 2013 à 950 000 passagers et 300 000 véhicules entre Le Verdon et Royan et 172 000 passagers et 55 000 véhicules

entre Blaye et Lamarque, soit une valeur brute marchande de 12 millions d'euros au total (Figure 12).

Le secteur de la construction-déconstruction-maintenance navale est un secteur d'activité bien représenté au sein du GPMB. Un site de démantèlement de navires, infrastructure classée pour la protection de l'environnement, opère à Bassens avec une unité de traitement des déchets toxiques à proximité. Si l'activité de rénovation et de maintenance de yachts sur le site des bassins à flot rencontre quelques difficultés du fait d'une mauvaise cohérence du projet avec le développement du quartier d'habitation, la Construction Navale de Bordeaux est un des leaders dans la construction de yachts d'exception.

L'activité de transport a par ailleurs toujours suscité des aménagements pour faciliter le déplacement des navires et l'accès à terre : aménagements portuaires, endiguements, dragage et clapage. Le déploiement actuel d'ouvrages d'aménagement pour le débarquement, le chargement et l'entreposage représente un facteur d'altération de l'hydromorphologie, de la qualité de l'eau, des sédiments et des écosystèmes estuariens. Il peut également se faire au détriment d'autres usages, comme ce fut le cas pour l'ostréiculture avec les aménagements de l'avant-port du Verdon.

Les événements autour du fleuve, en particulier la Fête du fleuve, sont également source de dépenses non négligeables. Le total imputable à la Fête du fleuve se situe autour de 9,4 millions d'euros tous les 2 ans.

L'estuaire comme support d'activités de captage et de prélèvement

Les activités de prélèvement de ressources biologiques de l'estuaire ont également un apport économique local (Figure 13). Les pêcheurs professionnels se répartissent entre

une activité liée à une flottille côtière avec des sorties à la journée et une activité de pêche dans l'estuaire de la Gironde.

La pêche estuarienne cible principalement l'alose, l'anguille adulte et son stade civelle, la lamproie, le maigre et la crevette. Néanmoins, une baisse de production de la filière pêche-ostréiculture est observée en réponse à la chute des stocks d'anguilles et de poissons plats depuis les années 1980, ou encore de l'alose depuis 2003.

La pêche estuarienne est en effet confrontée à une raréfaction des ressources mais aussi à une contamination des ressources conduisant à des interdictions de pêche (moratoire fixé par les pêcheurs eux-mêmes). L'exercice de la pêche en estuaire et de la pêche d'espèces migratrices amphihalines est très réglementé² et sa production moyenne annuelle avoisine les 300 tonnes, soit une valeur de 5 millions d'euros. Si cette activité contribue à une veille sur le milieu et au maintien des traditions culturelles, un « pescatourisme » se développe depuis quelques années. En parallèle de la pêche, l'ostréiculture a connu des périodes de prospérité alternant avec des périodes de régression. La découverte d'une contamination par le cadmium a notamment conduit à la promulgation d'un arrêté préfectoral en 1996, classant l'estuaire en zone d'interdiction de toute récolte ou élevage de coquillages. Mais une relance est possible depuis 2014 en zone de marais. Une importante production de gambas *Penaeus japonicus* par les fermes aquacoles des marais du Nord Médoc génère un chiffre d'affaires total de 0,64 millions d'euros pour 10 tonnes de gambas par an.

L'apport économique local de captage et de la pêche apparaît modeste par rapport à celui généré par la centrale électronucléaire (CNPE) (supérieur à 160 millions d'euros). L'étude des prélèvements d'eau dans l'estuaire de la Gironde par le CNPE a révélé des prélèvements d'organismes aquatiques relativement importants, représentant 300 à

2. licence nationale annuelle.



Figure 13: Navires de pêche à la civelle, équipés de pibalours, dans l'estuaire de la Gironde (Wikimedia commons)

400 tonnes de biomasse par an. L'impact de ces prélèvements d'eau induirait des mortalités de l'ordre de 11 à 12% pour les juvéniles de grande alose. Les rejets liés à cette activité, se déclinent en pollution thermique, chimique et radioactive.

On mentionnera également l'alimentation en eau industrielle de la presqu'île d'Ambès dont l'objectif est de limiter les prélèvements dans la nappe de l'Eocène. Mais l'irrégularité de l'approvisionnement et la qualité insuffi-

sante de l'eau livrée ont conduit des industriels à limiter la consommation de cette eau. En 2015, la recette totale du service de l'eau industrielle s'élevait à 0,598 millions d'euros. L'extraction de granulats, autre activité associée à l'estuaire qui par le passé a généré un important chiffre d'affaires, est exclue dans l'aire du SAGE Estuaire. Les projets à la marge de ce périmètre ont aussi été exclus en raison des impacts hydro-sédimentaires et faunistiques possibles.

Perspectives

- Des études concernant l'identification et l'évaluation des services écosystémiques sont nécessaires afin de mieux les prendre en compte.
- L'évaluation des dépenses engagées pour mettre en valeur et gérer l'estuaire est à déterminer.

6

HABITER L'ESTUAIRE

Vue aérienne de la presqu'île de Talmont
(cliché : Pierre Mairé, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

Pluralité et changement

Une réappropriation en cours

Depuis deux décennies, l'estuaire de la Gironde fait l'objet d'un net regain d'intérêt, dont est témoin une abondante production littéraire. Devenu (ou redevenu) un objet qu'il faut étudier, faire connaître et gérer, l'estuaire s'inscrit dans un cycle récent d'appropriation-abandon-réappropriation par les populations riveraines, qui s'accompagne tant d'un renforcement que d'une diversification des regards, pratiques et représentations.

L'estuaire de la Gironde est composé de paysages d'eau, façonnés par les activités humaines et les évolutions climatiques. L'ensemble des politiques publiques récentes - environnementales, culturelles ou mixtes - témoigne d'une démarche de réappropriation de l'estuaire, à la fois comme patrimoine naturel et culturel. L'omniprésence de l'eau a fait de l'estuaire un espace attractif et ce depuis le début de la sédentarisation des populations au cours du Néolithique. Un important travail archéologique a révélé des traces d'établissements, notamment dans les zones humides des deux rives, avec des spécificités propres à chaque rive, liées à leur physiologie et à leurs particularités géologiques. L'estuaire est un milieu propice à la pêche (poissons et coquillages), à la production de sel et à l'élevage. Les techniques agricoles et le choix de cultures adaptées ont permis de développer l'agriculture sur les terrains engorgés ou secs alors que le fleuve a favorisé

les échanges, en plus des voies de communication terrestres présentes sur les deux rives dès le Néolithique.

L'occupation romaine a tendu à singulariser l'estuaire de la Gironde comme une frontière ethnique et culturelle puis administrative. L'étude récente des monnaies circulant pendant le second âge de fer nous apprend toutefois que la région était depuis le Néolithique intégrée à des réseaux culturels atlantiques et continentaux. Plus encore, l'estuaire était le lieu d'échanges spécifiques, comme en atteste l'existence de monnayages uniquement partagés entre les rives saintongeaise et médocaine. Pendant l'époque médiévale, l'importance économique du fleuve s'est maintenue, cet axe étant décrit comme « l'artère de circulation et le poumon économique » du Bordelais et des régions plus en amont. La région a connu dans le même temps un important développement religieux et culturel.

Si de petits ports isolés ou secondaires se sont développés à cette période, ce sont les ports principaux de Bordeaux et Libourne qui sont sortis renforcés de la conjonction d'épisodes de famines et disettes avec les dernières offensives françaises de la Guerre de Cent Ans. Bordeaux voit sa dimension portuaire s'affirmer à la fin de l'époque moderne, figurant parmi les dix premiers ports mondiaux. On doit au travail d'historiens et d'associations militantes d'avoir établi la part du commerce triangulaire dans les intenses échanges de Bordeaux avec les nouvelles colonies. Cet effort initié dans les années 1990 a abouti à une reconnaissance tardive par la ville de ce passé esclavagiste.

Comme de nombreux ports estuariens de l'arc Atlantique, le port de Bordeaux connaît une phase de déclin de son activité durant le ^{xx}^e siècle. Un retour au fleuve est initié depuis ces dernières décennies, au travers de projets urbains visant à une reconquête des quais par les habitants, ce qui s'accompagne du développement de manifestations sportives emblématiques (voile, traversée de Bordeaux à la nage).

Notamment basée sur le transport de passagers entre les deux rives ou de fret (pièces de l'A380 sur barges), la relance de la navigation s'est également appuyée sur l'essor d'un tourisme dit « fluvestre¹ », articulant croisière fluviale et découverte des terroirs viticoles. Axe de transport historique, vecteur de l'évolution des spécificités écologiques du vignoble bordelais, l'environnement fluvio-estuarien occupe dès lors un grand rôle dans la mise en scène de cette offre œnotouristique.

Une grande diversité des regards habitants

Comprendre la façon dont est habité l'estuaire amène à considérer l'ensemble des personnes qui contribuent à pratiquer et construire les lieux, ce qui implique une grande diversité de regards et de liens. Or le fleuve n'a pas une place centrale dans la structuration de la qualité de vie de tous les riverains, comme en atteste l'étude d'indicateurs résumant les conditions socio-économiques, politiques et environnementales à la maille communale. L'évolution de ces indicateurs, et les résultats de travaux d'enquêtes dans différentes régions estuariennes, ont révélé l'importance relative des services et de l'emploi par rapport à celle des aménités fluviales, ainsi qu'une décorrélation entre les avis exprimés à titre individuel et les attributs de la commune de résidence. Par ailleurs, d'autres sondages adressés aux habitants de la métropole bordelaise se sont attachés à identifier la façon dont la demande sociale en matière de cadre de vie s'exprime à travers les en-

jeux paysagers. Les unités paysagères jugées les plus représentatives de l'aire bordelaise élargie sont ainsi : le fleuve (auquel sont attribuées des valeurs économique, esthétique et récréative), la ville-centre (valeur patrimoniale) et le vignoble (valeurs économique et patrimoniale). Il apparaît ainsi que la ville-centre n'est pas reconnue pour sa valeur économique (alors qu'elle représente la majorité des emplois de la métropole), mais surtout que la valeur « écologique » du fleuve souffre du même manque de reconnaissance de la part des habitants enquêtés.



Figure 14 : Rencontre entre le vignoble et le fleuve : le Château Latour à Pauillac.

Des travaux qualitatifs menés dans le Médoc peuvent constituer un contrepoint à ce constat. Ce sont l'enclavement par rapport à la métropole bordelaise et les fortes valeurs esthétiques et récréatives découlant de la variété de ses espaces naturels qui offrent un cadre de vie à même d'attirer médocains d'origine et nouveaux arrivants. Dans l'expérience habitante des individus interrogés, la présence de l'eau, support à nombre d'usages récréatifs, joue un rôle central et récurrent.

Contraignantes et peu accessibles, les zones humides et îles estuariennes ont été assez nettement désinvesties au cours du ^{XX}^e siècle, devenant de fait moins présentes dans le quotidien des résidents. Vues de Pauillac et Blaye, les îles font par exemple l'objet d'un sentiment d'appropriation et d'une accessibilité assez contrastés, largement conditionnés par la rareté des aménagements de

1. néologisme issu de la contraction de fluvial et terrestre visant à désigner les pratiques touristiques combinant étroitement croisière fluviale et visites sur les rives.



Figure 15: Centrale nucléaire du Blayais (Wikimedia commons).

berges et un manque d'attrance pour les milieux vaseux. Les professionnels du tourisme y ont néanmoins développé une offre de niche, en tentant de capitaliser sur le regain d'intérêt pour des pratiques traditionnelles dont la vivacité s'observe en certains lieux de l'estuaire.

Sur ce dernier plan, les travaux sur la perception de la centrale nucléaire du Blayais (Figure 15) montrent de manière assez emblématique la façon dont des modes de vies marginaux (mais également des clivages linguistiques) ont pu être mobilisés par les habitants des marais des alentours de Braud-et-Saint-Louis dans des processus d'affirmation identitaire. Sur la rive gauche, les visions des habitants sur une zone humide riveraine de l'estuaire (le marais de Reysson) montrent des tensions similaires.

À une conception « traditionnelle » - impliquant une diversité d'usages de production et de prélèvement dans un environnement

changeant et imprévisible - s'est progressivement substituée une vision plus réductrice du marais. Celle-ci intègre à la fois les enjeux de la mise en valeur par la maïsiculture - dans une logique plus ségrégative avec le vignoble avoisinant - et l'essor de pratiques excursionnistes axées sur le bourrelet alluvial. Ces résultats rejoignent en cela ceux d'enquêtes sur la fréquentation touristique des îles, qui font ressortir un assez faible intérêt pour la dimension naturaliste de la visite de ces lieux. Ils permettent de saisir que si l'estuaire et ses zones humides ne disparaissent pas pour autant du regard des habitants, ils font dorénavant l'objet d'un rapport plus distant, tenant potentiellement plus de la « toile de fond » que d'une entité environnementale pleinement appropriée comme telle.

Des discontinuités qui subsistent

À la distance imposée par le fleuve et la discontinuité administrative entre Gironde et Charente-Maritime se superposent d'autres disparités : géologiques, ecclésiastiques, linguistiques. Qu'elles se déploient entre rives ou entre Bordeaux et son aval estuarien, ces formes de tensions et de clivages peuvent être plus ou moins fortuites mais se déploient sur la longue durée. L'analyse historique des relations entretenues entre Bordeaux et sa couronne suburbaine montre ainsi qu'elles s'expriment dès le Moyen-Âge par des formes complexes de tutelles foncière et juridique de la part des élites bordelaises.

Parmi les ruptures ou revendications réactivées au cours des années 2000, les conflits cynégétiques (liés à la chasse), sont probablement un des exemples les plus emblématiques d'une forme d'irrédentisme « estuarien ». La Pointe de Grave est en effet un des lieux de passage des migrations de la tourterelle des bois, espèce afro-paléarctique menacée par la raréfaction de son habitat et la pression de chasse. L'oiseau a fait l'objet d'un long conflit porté par un comité médocain, en réaction à la volonté politique d'appliquer plus strictement l'interdiction des tirs de printemps. Assorti de pratiques tenant de la confrontation publique, le contentieux mené par ce Comité Tourterelle s'assèche progressivement à partir de la dissolution de l'association en 2001. C'est vers un espace public plus institutionnel que se sont tournées dans le même temps les contestations cynégétiques, l'estuaire de la Gironde fournissant au mouvement Chasse, Pêche, Nature et Tradition un de ses plus forts bastions électoraux. Connaissant son apogée aux élections européennes de 1999, ce parti fonde alors son assise territoriale sur une rhétorique générique de la ruralité et un discours revalorisant les milieux et les pratiquants de la chasse. Son déclin ultérieur, en parallèle avec la captation par le Front National de discours sur l'agriculture et les inégalités territoriales, a entraîné un relatif décroisement des électorats, ce qui se traduit par l'élection sur

le canton Nord-Médoc d'un binôme FN aux élections régionales de 2015. Ces comportements électoraux peuvent en partie être interprétés comme l'expression d'une forme de « ressentiment rural » à l'égard de la métropole bordelaise, amplifié par les inégalités de revenus et de patrimoines, ainsi qu'un rapport ambigu à la mémoire ouvrière de l'estuaire. Les votes protestataires, tels que notamment exprimés aux scrutins présidentiels de 2012 sont d'autant plus importants dans les communes ouvrières et périurbaines que les disparités socio-spatiales y étaient fortes. Des données socioéconomiques permettent ainsi de montrer qu'autour de Bordeaux, l'espace se divise en un centre à la grande mixité, une première couronne avec ses classes moyennes et populaires et une deuxième couronne avec ses ménages aisés et propriétaires. Plus en aval sur la rive droite, le peuplement est dispersé, avec une forme de pauvreté rurale combinant bas revenus et forts taux de propriété. Sur la rive gauche, le motif spatial est celui d'un « habiter » plus disparate, avec une alternance resserrée de grandes propriétés et de poches de pauvreté en partie conditionnées par l'activité viticole. Si les métamorphoses industrielles de l'estuaire sont relativement récentes, elles font suite à une sévère phase de désindustrialisation survenue entre 1955 et 1975. La reconstitution des changements d'occupation du sol autour du site de Trompeloup, situé au nord de Pauillac, permet d'illustrer la rapidité de ces dynamiques, d'autant que les empilements et effacements des strates de l'activité industrielle a des dimensions tout autant matérielles que mémorielles. Cette hégémonie retrouvée du monde du vin dans le paysage estuarien est ainsi contrebalancée par des efforts récents, en particulier des services de l'inventaire, pour réexaminer et faire connaître les dimensions de ce patrimoine industrialo-portuaire, marqué par l'industrie lourde et les usages pétroliers. Un autre exemple est celui de l'établissement des usines Ford-Blanquefort en 1975, qui conduisit à un important développement et boom démographique sur la commune

de Blanquefort, jusqu'alors principalement tournée vers le maraîchage. L'ancrage territorial de ces établissements fut néanmoins ambigu : avec un recours longtemps minimal aux sous-traitants régionaux, il impliqua également de la part du groupe Ford une exploitation erratique et peu publicisée de Bordeaux Port Atlantique.

Les exemples précédents révèlent que la transformation des activités économiques de transport ou de production ont donc été de grande ampleur sur les espaces riverains de

l'estuaire. D'autres encore, comme l'abandon du projet de terminal méthanier du Verdon-sur-Mer ou relatif à l'évolution des contestations autour de la CNPE du Blayais, sont révélateurs de configurations inédites dans les rapports entre militantisme associatif et expertise. Elles ont notamment permis l'émergence d'argumentaires originaux sur les modes d'« habiter » de l'estuaire, cherchant à éviter les pièges conjoints du recours à une identité « traditionnelle » hermétique et d'une mise sous cloche environnementale.

Perspectives

- La documentation par l'archéologie des modalités d'adaptation des sociétés aux changements environnementaux est à poursuivre.
- L'étude de l'histoire sociale et des espaces marginalisés de l'estuaire est à approfondir.

7

GOVERNANCE

*Le cargo Arklow Ruler dans l'estuaire de la Gironde
(cliché : Coyau, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).*

Des enjeux environnementaux

Les enjeux environnementaux ont une temporalité complexe puisque des actions passées peuvent avoir des effets se manifestant de façon différée dans le temps. Leur gouvernance traverse les frontières administratives et concerne différents acteurs avec des missions propres. Le terme «gouvernance» renvoie à un *«processus de négociation et de décision à visée normative qui favorise des interactions négociées entre une pluralité d'acteurs concernés par la régulation d'un problème commun. Elle est fondée sur une coopération élargie, plus horizontale que hiérarchique, plus conventionnelle ou contractuelle que réglementaire et elle fonctionne comme un principe directeur partagé pour rechercher des accords, à vocation de résolution pragmatique et décentralisée de problèmes, au plus près de leur expression et des acteurs concernés»*. Dans ce chapitre, la description de la gouvernance des enjeux environnementaux de l'estuaire de la Gironde sera centrée sur deux niveaux d'observation : (i) celui des espaces institutionnels et (ii) celui plus fonctionnel, associé à des espaces mouvants, tous deux étant très interconnectés.

Qui sont les porteurs des enjeux environnementaux sur l'estuaire de la Gironde ?

S'intéresser aux enjeux environnementaux revient en premier lieu à étudier quels sont les principaux porteurs engagés. Le classement juridique de l'estuaire de la Gironde dépend de plusieurs zonages. Au sens strict, l'estuaire fait partie du Domaine Public Fluvial¹ et à l'aval, c'est-à-dire au-delà de l'axe reliant la pointe de Grave et la pointe de Suzac, au Domaine Public Maritime². En matière de police de l'eau, la compétence est partagée entre l'Etablissement Public Territorial de Bassin EPIDOR sur la Dordogne, Voies Navigables de France sur la Garonne et la Direction Interrégionale de la Mer à l'aval du Bec d'Ambès. Le Grand Port Maritime de Bordeaux gère à la fois le plan d'eau (aménagement et entretien des accès maritimes par exemple) et les activités humaines (police, sécurité, gestion et préservation) du domaine public. Compte tenu des différents usages en présence sur l'estuaire, une Commission Locale de l'Eau (CLE), créée en 2005, a pour but d'élaborer de manière concertée un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de l'estuaire de la Gironde et de ses milieux associés. L'animation de la CLE est confiée au Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (SMIDDEST) depuis 2007, qui réunit

1. ensemble des cours d'eau appartenant en France à l'État (ou autre personne publique), dont les limites sont déterminées par le lit mineur
2. sols et sous-sols marins appartenant en France à l'État, principalement définis entre la limite extérieure de la mer territoriale et celle, côté terre, du haut du rivage

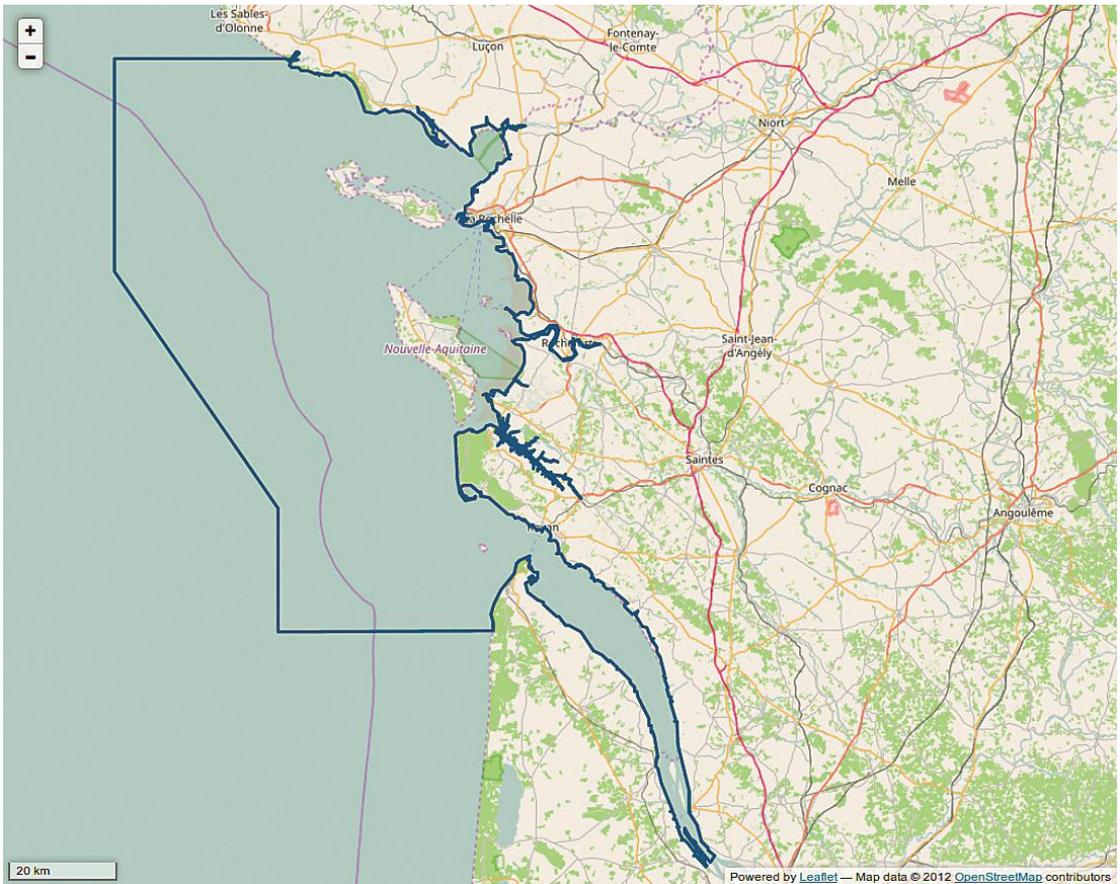


Figure 16 : Périmètre du Parc Naturel Marin Estuaire de la Gironde et Mer des Pertuis (Wikimedia commons)

sept collectivités territoriales, dont la Région Nouvelle-Aquitaine et les départements de la Gironde et la Charente-Maritime.

Le SAGE définit les objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection des ressources en eau, des écosystèmes aquatiques et des zones humides. Ce dispositif permet d'avoir une assise juridique à la conciliation des usages des ressources naturelles.

Parallèlement à l'action du SAGE, (i) l'Agence Française pour la Biodiversité, autorité de tutelle du Parc Naturel Marin de l'estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis (Figure 16), veille au fonctionnement des milieux aquatiques ; (ii) le Conservatoire du Littoral exerce, en les acquérant, une gestion des parcelles du littoral menacées par l'urbanisation ou dégradées ; (iii) et le Conseil Scientifique de l'Estuaire de la Gironde donne des avis scien-

tifiques sur des questions de préservation de l'estuaire, de gestion ou d'aménagement des milieux naturels.

Compte tenu de sa taille et de son morcellement politico-administratif, la prise en charge des enjeux écologiques à l'échelle de l'estuaire a favorisé l'émergence de « dispositifs institutionnels environnementaux » à la fin des années 1990. Parmi les plus connus, la Directive Cadre sur l'Eau, d'inspiration européenne et de nature réglementaire, mise en œuvre par le SAGE, veille à la qualité de l'eau. D'autres outils présentés dans le chapitre ont émergé suite à des collaborations entre plusieurs niveaux de décision, comme par exemple le Parc Naturel Régional du Médoc, lors d'une contractualisation entre l'État et les collectivités.

Comment se coordonnent les différents acteurs afin d'articuler le traitement des enjeux environnementaux avec ceux du développement économique ?

Face à cette diversité de porteurs d'enjeu, il est possible de s'interroger sur la coordination et l'articulation du traitement des enjeux environnementaux, notamment avec les autres domaines de politiques publiques et les secteurs économiques. L'emploi de zonages réglementaires, pour limiter les pressions humaines sur le milieu naturel et préserver les ressources, permet de transformer une problématique de gestion en une coordination collective sur l'évolution des usages du sol et l'aménagement de l'espace. La régulation des usages du sol est au cœur des politiques de développement des communes avec des allocations variables (réserve foncière, maintien d'espaces naturels...). Dans ce contexte hétérogène entre communes, le SAGE est chargé de la définition d'un Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD) pour une unité hydrographique cohérente, qui se heurte à des contestations. Associées à quelques groupes socioéconomiques et municipalités riveraines de l'estuaire, ces contestations rendent compte de la difficulté d'une coopération de tous les acteurs. Le premier processus de consultation a ainsi conduit à l'abandon d'une nouvelle cartographie des zones humides. Les avis désapprouvant le PAGD se sont appuyés sur deux enjeux principaux : (i) le risque inondation et (ii) et l'enjeu « zones humides ». Concrètement, la première disposition visait au renoncement par certaines communes riveraines à une portion de leurs espaces en les « rendant à la mer » pendant les épisodes de crues importantes, *i.e.* créant des zones d'expansion des crues pour réduire le risque inondation en fond d'estuaire. La seconde, visant à définir des zones humides d'intérêt environnemental particulier, aurait annulé la possibilité d'activité productive viticole future, ou à extraire des surfaces à vocation agricole.

Pour comprendre tous les enjeux socio-économiques des communes du SAGE, il semble nécessaire de prendre en compte les territoires qui ne font pas partie du SAGE mais qui participent à la dynamique des migrations résidentielles. Ainsi, l'analyse des disparités de revenu des habitants et de ressources fiscales semblent indiquer que les perspectives socio-économiques d'une économie résidentielle (*versus* agricole) seraient l'un des facteurs importants à l'origine des contestations à l'encontre des zonages réglementaires.

Quelle coordination entre les acteurs publics pour appréhender le risque inondation ?

Si l'on s'intéresse plus en détails à la coordination des acteurs publics autour du risque inondation, le Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) vise à définir les modalités de protection des habitants des communes littorales en cas de tempête et de débordement des eaux de l'estuaire. Des oppositions à ce programme ont été reportées par la presse, liées pour partie à des logiques différentes de gouvernance : échelle centralisée par l'État *versus* échelle incombant aux acteurs eux-mêmes. Un autre point important au cœur des débats concerne le partage du fardeau entre l'aval et l'amont de l'estuaire. Compte tenu de la structure spatiale de l'estuaire, décomposable en trois zones, la Pointe-Médoc, le Centre-Médoc et la Métropole, la question des moyens investis se pose en échange de compensations financières (avec une protection des rives plus importante en Pointe-Médoc, intermédiaire en Centre-Médoc et moindre pour la Métropole). Cette protection ne se résumerait pas à une digue parallèle à la rive mais bien à créer un système de protection complexe composé à la fois de digues de contournement, de portes à flot, de vannes, de levées latérales, de chenaux de flot, de retenues naturelles ou artificielles de nature à jouer le rôle de zones de compensation. S'agissant d'une coopération bénéfique mutuelle, les trois zones sont en négociations.

À l'heure actuelle, seule la bonne gestion des ouvrages hydrauliques permet une régulation d'eau entre marais et estuaire, néanmoins leur entretien revient aux associations syndicales de propriétaires de marais (ASP), qui ont une capacité réactive de contrôle et de surveillance des ouvrages en cas d'urgence. Néanmoins ces ASP se heurtent à des lourdeurs administratives et des ressources financières parfois insuffisantes, sans aides publiques, pour rénover certains ouvrages. Une union des ASP leur permettrait une économie d'échelle de l'ordre de 10% mais des obstacles subsistent actuellement quant au partage des gains.

L'estuaire de la Gironde, une transformation silencieuse

La dégradation des fonctionnalités écologiques de l'estuaire de la Gironde est un constat de plus en plus partagé par les différents acteurs de l'estuaire. Néanmoins s'il existe une unité géographique commune, des clivages perdurent ; urbain/rural, entre deux rives ou encore liés à des cohabitations d'activités diverses. La controverse associée à la délimitation des zones humides du SAGE confronte par exemple des visions différentes entre zones à potentiel écologique et zones à potentiel d'exploitation agricole, vi-

ticole ou résidentielle. De récents projets ont proposé des scénarios d'adaptation possible au changement climatique. L'un des scénarios a révélé que le changement climatique peut s'avérer ne pas être un enjeu central pour tous les acteurs ou encore qu'un enjeu central est lié à la gestion de l'eau pour satisfaire les usages, au détriment de la qualité écologique. Un autre scénario a proposé une adaptation possible par l'économie verte, quitte à contraindre la dynamique naturelle de l'hydrosystème. Enfin, une nouvelle logique de gestion et de gouvernance partagée sur l'ensemble du territoire est apparue comme un scénario durable.

Le projet emblématique de renaturation de l'Île Nouvelle concentre de nombreuses attentes de la part de la plupart des acteurs gestionnaires du territoire. Si des critiques se sont cristallisées autour de la concurrence entre un projet de renaturation comme Île Nouvelle et l'agriculture, ces dernières s'effacent mises dans une perspective économique (rendement) et la nostalgie associée à un déficit d'information sur le projet sont les arguments qui perdurent. Hormis ces quelques oppositions, la majorité des acteurs s'accorde sur les gains écologiques associés au projet de renaturation et cette entreprise peut apparaître stratégique pour certains.

Perspectives

- Les acteurs de la sphère privée sont encore peu représentés dans les dispositifs d'action publique ayant émergé au début des années 2000 : la représentation des acteurs concernés doit être renforcée dans la définition des politiques publiques.
- La superposition des outils ad hoc de politiques publiques, opérée de manière ad hoc, doit amener à une réflexion soit sur une simplification des outils existants, soit sur une coordination pertinente des diverses actions menées sur l'Estuaire de la Gironde.

C

CONCLUSION

Vignes et cultures sur la rive droite de l'estuaire de la Gironde à St-Bonnet-sur-Gironde (cliché : Cobber17, licence CC BY SA 3.0, wikimedia commons).

Quelques propositions pour une meilleure connaissance de l'estuaire

Une observation de l'environnement plus intégrative

Depuis le début des années 1980, pour répondre aux différents enjeux environnementaux, à des problématiques de surveillance de l'environnement ou de recherche, de nombreux suivis de l'environnement se sont développés souvent sans concertation. L'importance des acquis issus de ces suivis pluri-décennaux, couplés à une analyse pertinente des données n'est plus à démontrer. Dans le contexte actuel d'évolution rapide de l'environnement estuarien, il est nécessaire de maintenir, voire de renforcer, ces dispositifs d'observation récurrente à long terme de l'estuaire de la Gironde.

L'environnement évoluant rapidement, l'amélioration de la couverture spatiale de l'observation passe par une réflexion sur les stratégies et les outils à mettre en place pour répondre aux objectifs. Le suivi à long terme de paramètres porteurs d'information globale sur l'environnement (température, salinité, turbidité, oxygène...), est opéré dans l'estuaire médian et amont, alors que les zones amont fluviales et aval, subissant actuellement des modifications importantes, ne sont suivies que très partiellement. Il conviendrait d'y définir des stations de suivis pérennes complémentaires aux suivis haute fréquence qui y sont déjà opérés (ex. : MAGEST).

Devant les atteintes portées à l'environnement en termes de contamination, il serait nécessaire de progresser dans notre connaissance des apports en contaminants et de leur devenir en Gironde. Il conviendrait de développer une surveillance récurrente des niveaux de contaminations organique et métallique des eaux, des sédiments et des organismes vivants de l'estuaire, complémentaire des suivis existants (ex. ROCCH, IFREMER).

Vers une observation coordonnée ?

L'évolution vers une observation récurrente à long terme plus intégrative, donc plus développée qu'à l'heure actuelle, nécessite une concertation large entre acteurs pour optimiser les moyens : définition des objectifs, de la stratégie générale, de l'emprise spatiale, de la fréquence, des prises en charge opérationnelles, des financements, etc. À court terme la solution consisterait à développer une dynamique concertée des acteurs de l'estuaire pour optimiser l'existant (mise en commun des stratégies en cours et des acquis) et prioriser des suivis complémentaires pour les développer de manière coordonnée et réaliste sur le long terme. Ceci pose les questions de la volonté des différents acteurs à progresser en ce sens et du fonctionnement du consortium impliqué (animation, diffusion de l'information, lisibilité...).

Vers un renforcement du lien recherche/société

De nombreux acteurs sont d'ores et déjà impliqués dans une dynamique de projets associant recherche et monde socio-économique.

Cependant des efforts soutenus restent nécessaires pour éclairer la complexité tant écologique que socio-économique du fonctionnement estuarien, via des programmes de recherche et de gestion impliquant acteurs socio-économiques et scientifiques.

Les services écosystémiques

Bien que l'estuaire de la Gironde concentre de nombreux enjeux, les connaissances intégrées sur son écologie sont encore incomplètes. Les manques ne permettent pas actuellement de prendre des décisions de gestion et d'aménagement prenant en compte l'ensemble des services écosystémiques rendus, pour lesquels des investigations interdisciplinaires devraient être poursuivies, notamment sous l'angle des modifications actuelles de l'environnement. L'objectif à terme consisterait à mieux appréhender la résilience de l'écosystème et à alimenter la réflexion en termes de gestion.

Des connaissances fondamentales à faire progresser

Les efforts importants entrepris pour une meilleure connaissance et préservation de l'estuaire et de ses zones rivulaires sont encore trop souvent envisagés localement : les enjeux de préservation des zones humides sont souvent déconnectés de ceux de l'estuaire, le fonctionnement de l'estuaire est principalement illustré au travers des caractéristiques des zones amont et médiane, les perturbations sont souvent analysées d'un point de vue très local... Ces approches, nécessaires dans un premier temps afin de cerner processus, enjeux et solutions doivent évoluer vers une approche à l'échelle de l'estuaire, incluant les dynamiques des bassins-versants proches, les apports provenant de l'amont ou de l'aval et les flux sortant vers le Golfe de Gascogne et le Bassin de Marennes-Oléron.

Caractéristiques physiques

L'évolution morphologique future de l'estuaire face aux conséquences des modifications actuelles du climat, est associée à une connaissance encore partielle due principalement :

- aux incertitudes sur les futurs apports sédimentaires qu'il conviendrait de réduire en étudiant la sensibilité de l'estuaire aux forçages météo marins et continentaux ;
- à la connaissance encore incomplète des caractéristiques des particules en suspension dont les propriétés physiques seraient à caractériser dans le détail ;
- au manque d'information sur le transport de sable, obstacle majeur à la bonne estimation des bilans sédimentaires : les flux entrant dans l'estuaire et la mobilité de la couverture sédimentaire à l'intérieur de l'estuaire seraient à préciser.

Les enjeux liés aux flux sortant du réservoir de l'Eocène vers l'estuaire doivent être mieux identifiés (biodiversité, biotopes particuliers...) et, en cas d'enjeu identifié, il conviendrait d'évaluer les flux nécessaires pour ne pas mettre en péril le milieu.

Dans le contexte du dérèglement climatique actuel l'influence de la variation du niveau de l'océan et de l'estuaire sur la dynamique des nappes profondes serait à préciser.

Perturbations chimiques

Des études récentes montrent que des métaux dits émergents d'origine urbaine impactent les huîtres girondines. De nouvelles études seraient à développer sur ces métaux dits rares, voire économiquement critiques, afin d'identifier les sources et de hiérarchiser les processus responsables de la contamination des organismes et d'envisager des solutions de remédiation dont l'efficacité pourrait être appréciée lors de suivis spécifiques.

Le niveau de connaissance sur les micropolluants organiques reste incomplet dans un contexte d'utilisation accrue et diversifiée sur le bassin versant : leurs dynamiques spatiale et temporelle seraient à préciser en par-

ticulier pour de nombreuses classes de composés jusqu'à présent peu pris en compte, dont de nombreuses molécules organiques d'intérêt émergent pouvant présenter des PNEC¹ faibles.

Perturbations de la biodiversité

Toute modification anthropique du système estuarien devrait s'accompagner d'un état des lieux avant modification et de la mise en place d'une évaluation des effets différés issus de cette modification.

La biodiversité de l'estuaire fait face à de multiples contraintes notamment physiques (modifications d'habitats, réchauffement des eaux...), chimiques et climatiques. L'impact de ces perturbations est actuellement envisagé au cas par cas. Du fait de la multiplicité de ces contraintes, il conviendrait d'appréhender de manière globale, à l'échelle de l'estuaire, l'impact sur le vivant de l'ensemble de ces perturbations.

Fonctionnement du réseau trophique

La production primaire pélagique est fortement limitée dans les parties amont et médiane de l'estuaire de la Gironde et les réseaux trophiques y sont basés sur la matière organique détritique. Paradoxalement, cette caractéristique a été jusqu'alors très peu étudiée du point de vue du compartiment bactérien qui est pourtant un compartiment clé du fonctionnement de cet écosystème.

La diminution de turbidité en aval (marinisation de l'estuaire, remontée du bouchon vaseux), combinée à la faible consommation des sels nutritifs dans les zones amont et médiane, laisse envisager un accroissement de la production primaire et une modification du réseau trophique qu'il conviendrait de caractériser.

Les changements phénologiques non synchrones observés dans la dynamique des poissons et de leurs proies posent question : ils pourraient être à l'origine d'une déstructuration des réseaux trophiques qui serait à préciser.

Économie

La connaissance des dépenses constitue le point faible du système d'information de l'estuaire : pas d'enregistrement des fonds mobilisés, de description des circuits de financement, d'affectation des dépenses aux différentes opérations : qui paye, combien, pour quoi faire et au profit de qui ? Cette information est cruciale pour gérer l'estuaire.

Géographie

Support d'activités productives et commerciales depuis la période antique, la Gironde a été marquée par d'importants changements des activités humaines. Il importe d'y maintenir les efforts de recherche afin de mieux comprendre les modalités d'adaptation des sociétés girondines face aux changements environnementaux et d'approfondir l'histoire sociale des populations et des espaces marginalisés de l'estuaire.

Gouvernance

La multiplicité des processus d'inventaires écologiques et de concertations devant tenir compte de perceptions et enjeux contradictoires entre acteurs du milieu a induit une complexité des réglementations, des zonages réglementaires, des processus de gestion et des responsabilités associées multiples, limitant leur efficacité. Dans un contexte d'évolution des conditions socio-économiques contribuant à augmenter la vulnérabilité du territoire, la question d'une simplification des outils à la disposition des gestionnaires serait à aborder afin de gagner en efficacité.

1. Predicted No Effect Concentration

Les orientations proposées ici sont issues du travail de synthèse et de réflexion mené par la communauté scientifique impliquée dans la rédaction de ce document. Cette communauté est en grande partie engagée dans des actions de recherche à l'interface avec le monde socio-économique. Cette relation a permis l'identification des manques exprimés ci-dessus, identification probablement incomplète et à enrichir : il s'agit donc de propositions à mûrir et faire évoluer.

G

GLOSSAIRE

Âge du fer : deuxième partie de la protohistoire, dominée par la métallurgie du fer. Allant pour la France métropolitaine de 800 av. J.-C. au changement d'ère, elle est divisée en deux périodes (1^{er} et 2^e âge) autour de 450 av. J.-C.

Aléa : possibilité qu'un phénomène naturel physique relativement brutal menace ou affecte un environnement donné.

Aménité (naturelle) : toute caractéristique de l'environnement appréciable et agréable pour l'humanité.

Amphihalin : se dit d'un organisme aquatique migrateur dont une partie du cycle de vie s'effectue en mer et une autre en eau douce.

Aquifère : terrain perméable, poreux, permettant l'écoulement d'une nappe souterraine et le captage de l'eau.

Autotrophe : organisme capable de synthétiser de la matière organique à partir de matière inorganique.

Bassin versant : espace géographique drainé par un cours d'eau.

Benthique : qui se rapporte au benthos.

Benthos : ensemble des organismes aquatiques vivant en étroite connexion avec un substrat (sédiment, roche, bois, etc.). Il est constitué d'espèces végétales (phytobenthos) et/ou animales (zoobenthos). Certaines espèces vivent à l'intérieur du substrat (endobenthos), d'autres – libres ou fixées – à la surface du substrat (épibenthos), d'autres encore – dotées de capacités natatoires – évoluent dans la tranche d'eau à proximité du fond (supra- ou hyperbenthos). **Benthonte :** organisme appartenant au benthos.

Bioaccumulation : capacité d'un organisme vivant à absorber des substances chimiques présentes dans l'environnement et à les concentrer dans certains de ses tissus.

Biocénose : ensemble des êtres vivants qui occupent un milieu donné (le biotope), ainsi que les interactions qui relient ces êtres vivants entre eux et avec le milieu.

Biodisponibilité : capacité d'un élément chimique à pénétrer dans un organisme et à atteindre des organes ou cellules en franchissant les différentes barrières qui séparent tout organisme de son milieu environnant.

Chaîne alimentaire : représentation linéaire simplifiée d'un réseau trophique se présentant sous la forme d'une suite de différents niveaux trophiques, chacun étant le consommateur du précédent. Les végétaux sont le niveau primaire, broutés par les consommateurs secondaires (herbivores), qui à leur tour sont proies des consommateurs tertiaires (carnivores).

Civelle : alevin de l'anguille.

Clapage : opération de rejet en milieu aquatique de sédiments (généralement issus de dragages).

Communauté (d'organismes) : ensemble d'organismes appartenant à des espèces différentes et constituant un réseau de relations à un moment donné et un endroit donné.

Composition spécifique : identification de l'ensemble d'espèces constituant un groupe d'organismes.

Contaminant : molécule dont la concentration augmente au-dessus de son bruit de fond géochimique ou molécule synthétique présente accidentellement dans le milieu naturel.

Cynégétique : en lien avec la chasse.

Démersal : s'applique à un poisson vivant près du fond sans pour autant y vivre en permanence, ou à la tranche d'eau proche du fond.

Écosystème : ensemble des êtres vivants (biocénose), des éléments non vivants et des conditions climatiques et géologiques (biotopes) qui sont liés et interagissent entre eux.

Ecotoxicologie : discipline scientifique à l'interface entre l'écologie et la toxicologie, s'intéressant aux relations entre polluants et organismes, dont les effets sur les organismes.

Éléments traces métalliques : éléments métalliques naturellement présents dans les sols à de très faibles teneurs. Certains sont nécessaires à la vie (oligo-éléments) mais tous peuvent devenir toxiques lorsque trop abondants ou présents sous certaines formes chimiques.

Espace : objet social défini par sa dimension spatiale, a minima caractérisé par une métrique, une échelle et une substance.

Espèce diadrome : espèce migrant régulièrement entre eau douce et eau de mer.

Espèce invasive : espèce introduite dans un milieu situé hors de son aire de distribution naturelle et dont le développement atteint, dans son nouveau milieu, des niveaux tels que l'espèce est source de nuisances environnementales, économiques ou de santé humaine.

Espèce non-indigène/exotique/alien : espèce introduite par l'Homme (soit volontairement, soit accidentellement) en dehors de son aire de répartition naturelle.

Espèce halieutique : espèce concernée par l'exploitation des ressources vivantes aquatiques.

Estuaire fluvial : aussi appelé « haut estuaire » ; caractérisé par de l'eau douce mais sujet aux actions quotidiennes de la marée. Désigne ici la zone comprise entre le Bec d'Ambès (limite de la marée saline) et La Réole et Castillon (limites d'action de la marée dynamique respectivement sur la Garonne et la Dordogne).

Estuaire marin : aussi appelé « bas estuaire » ; partie de l'estuaire ouverte sur l'océan, où l'influence marine domine. Désigne ici la zone comprise entre Saint-Christoly-Médoc et la Pointe-de-Grave.

Étiage : qualifie le débit minimal d'un cours d'eau. Il correspond à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas

Expression d'un gène : ensemble des processus biochimiques par lesquels l'information héréditaire stockée dans un gène est lue pour aboutir à la fabrication de molécules qui auront un rôle actif dans le fonctionnement cellulaire.

Forçage anthropique : action humaine agissant sur un système dynamique et en capacité de le perturber.

Forçage climatique : perturbation dans l'équilibre énergétique de la Terre qui engendre des changements de températures.

Gammaré : petit crustacé (amphipode) aquatique.

Hétérotrophe : organisme ne pouvant synthétiser sa propre biomasse qu'à partir de molécules organiques constitutives de la biomasse des organismes qu'il consomme ; il est ainsi également désigné sous le terme de consommateurs.

Hinterland (naturel) : arrière-pays (naturel)

Holocène : deuxième époque géologique du Quaternaire, entamée il y a environ 11 700 ans. Sur le plan climatique, elle correspond à un interglaciaire.

Hygrophile : ayant des affinités avec l'eau ou les milieux aquatiques

Hypoxie : elle correspond à un très faible taux d'oxygène dans l'eau (< 2-3 mg L⁻¹). Des conditions particulières (température

estivale, faible renouvellement des masses d'eau, apports importants de matières organiques lors d'un orage, par exemple) peuvent conduire à une consommation excessive de l'oxygène dissous et à des eaux dont l'oxygénation est très faible.

Ichtyofaune : ensemble de la faune constituée des poissons au sens large.

Interaction biotique : interaction s'exerçant entre des êtres vivants (par exemple, compétition, prédation, ou parasitisme).

Intertidal : relatif à la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées (= zone de balancement des marées).

Levée latérale : ouvrage élevé sur les berges pour éviter les débordements des eaux lors des crues.

Macro(zoo)benthos (ou macrofaune benthique) : organismes benthiques visibles à l'œil nu, retenus par un tamis de vide de maille compris entre 1 et 0,5 mm.

Marée dynamique : correspond à la propagation de l'onde de marée dans la vallée fluviale jusqu'au point où le courant du fleuve vers l'aval n'est plus inversé par les marées.

Matériel détritique : matière organique non vivante en cours de dégradation.

Méiobenthos (ou méiofaune) : organismes benthiques de taille intermédiaire entre le macrobenthos et le microbenthos. Conventionnellement, les métazoaires et les protozoaires de grande taille (tels que les foraminifères) qui passent à travers un tamis de maille de 1 à 0,5 mm et qui sont retenus par un tamis de maille de 40 à 63 µm font partie de la méiofaune.

Mésohalin : relatif à des eaux de salinité comprise entre 5 et 18.

Mode d'habiter : relation singulière d'un individu ou groupe à l'espace, dans ses dimensions matérielles (pratique des lieux) et idéelles (normes et représentations).

Mysidacé : petit crustacé (pélaracide) pélagique, ayant l'allure d'une petite crevette.

Nourricerie : en écologie se dit d'un environnement utilisé par des organismes pour se nourrir.

Œnotourisme : forme de tourisme basée sur la découverte des régions viticoles (vins, domaines et patrimoine associé).

Oligohalin : relatif à des eaux de salinité comprise entre 0,5 et 5.

Pélagique : qualifie un organisme aquatique vivant dans la colonne d'eau.

Phénologie : événements périodiques (annuels, par exemple) dans le cycle de vie des organismes vivants, déterminés par les variations saisonnières du climat.

Plancton : ensemble des organismes flottant passivement dans les milieux aquatiques; regroupe des organismes végétaux (phytoplancton) et animaux (zooplancton).

Polluant : contaminant qui exerce des effets nocifs sur l'environnement, c'est-à-dire qui impacte la structure ou le fonctionnement d'un écosystème.

Polyhalin : relatif à des eaux de salinité comprise entre 18 et 30.

POP hydrophobe : polluant organique persistant non soluble dans l'eau.

Production primaire : quantité de matière organique élaborée à partir de matière non vivante (matière inorganique : composés nutritifs et CO₂) par les végétaux photosynthétiques, pendant une période donnée et grâce à l'énergie lumineuse.

Recrutement : terme traduisant une arrivée de jeunes organismes, par exemple l'entrée de poissons juvéniles dans une gamme de taille permettant leur pêche, ou encore la sédentarisation sur le fond de larves planctoniques dans le cas des invertébrés benthiques.

Réseau trophique : ensemble de végétaux et d'animaux ayant un lien trophique (de nourriture). À la base se trouvent les végétaux photosynthétiques produisant de la matière organique. Cette matière organique est consommée par les animaux herbivores. Ceux-ci sont à leur tour la proie des carnivores.

vores. Les détritivores interviennent à tous les niveaux pour recycler la matière organique.

Richesse spécifique : nombre d'espèces présentes dans un échantillon ou dans un environnement donné.

Services écosystémiques : bénéfiques que les sociétés humaines retirent des écosystèmes.

Slikke : vasière intertidale.

Spéciation : forme chimique et structurale sous laquelle se trouve un élément (métal, par exemple).

Stratégie de reproduction : ensemble de comportements, de stratégies qui s'appliquent aux processus de reproduction des organismes afin d'optimiser la valeur sélective d'un individu ou d'une espèce.

Submersion marine : inondation momentanée de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques atypiques générant des conditions extrêmes.

Subtidal : relatif au domaine aquatique constamment immergé, ne découvrant jamais à marée basse.

Succès de reproduction : efficacité, réussite de la reproduction pour une espèce donnée.

Taxon : entité regroupant tous les organismes vivants possédant en commun certaines caractéristiques bien définies. Ce terme est souvent employé comme synonyme d'espèce, mais il peut aussi désigner un niveau supérieur de la classification hiérarchique des êtres vivants (genre, famille, ordre, etc.).

Traits de vie : ensemble des informations qualitatives et quantitatives associées à la biologie des organismes et à leurs relations avec l'environnement.

Transgression marine : envahissement sur le long terme du littoral par la mer.

Unité hydrographique : variable environnementale permettant le calcul de l'IPR et relative à une zone territoriale ayant été délimitée selon des critères faunistiques.

Vagile : qualifie un organisme capable de se déplacer dans son environnement (par opposition à un organisme sessile).

Vasière intertidale : aire de dépôt de particules fines située dans la zone de balancement des marées.

Zooplancton : partie du plancton composée d'organismes animaux.

Coordinateurs : Benoit Sautour et Jérôme Baron

Anne Gassiat, Christophe Boschet, Laure Carassou, Baptiste Hautdidier, Philippe Boët (Irstea), Guy Bachelet, Gérard Blanc, Patrick Point, Sabine Schmidt (U. de Bordeaux) pour la rédaction des chapitres

Contributeurs : Marie-Laure Acolas (Irstea, UR EABX), Elsa Alfonsi (INRA, UMR Biogeco) Christelle Aluome (INRA, UMR ISPA), Pierre Anschutz (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Guy Bachelet (CNRS, UMR EPOC), Jérôme Baron (Smiddest), Jean-Pierre Baudet (Ligue de Protection des Oiseaux), Magalie Baudrimont (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Aurélien Besnard (Ligue de Protection des Oiseaux), Gérard Blanc (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Hugues Blanchet (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Michel Bochaca (Université de La Rochelle, UMR LIENSs), Philippe Boët (Irstea, UR EABX), Christophe Boschet (Irstea, UR ETBX), Hélène Budzinski (CNRS, UMR EPOC), Laure Carassou (Irstea, UR EABX), Sylvain Cardonnel (Ligue de Protection des Oiseaux), Aurélie Chaalali (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Xavier Chevillot (Irstea, UR EABX), Anne Colin (Université de Bordeaux, UMR AUSONIUS), Laurent Couzi (Ligue de Protection des Oiseaux), Alexandra Coynel (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Françoise Daverat (Irstea, UR EABX), Valérie David (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Dominique Davout (Université Paris 6, UMR 7144), Bruno de Grissac (SMEREG), Yolanda del Amo (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Aurélie Dessier (Université de La Rochelle, UMR LIENSs), Marie-Hélène Dévier (Université de Bordeaux, UMR EPOC), David Doxaran (Université Paris 6, UMR 7093), Alain Dupuy (ENSEGID), Brice Ephrem (Université de Bordeaux, UMR AUSONIUS), Didier Felts (CEREMA), Sylvie Ferrari (Université de Bordeaux, Gretha, UMR 5113), Frédéric Garabetian (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Emmanuel Garnier (CNRS, Laboratoire Chrono-Environnement), Anne Gassiat (Irstea, UR ETBX), Eric Goberville (Université Lille 1, UMR LOG), Benoît Goullieux (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Pierre-Yves Gourves (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Vincent Hanquiez (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Baptiste Hautdidier (Irstea, UR ETBX), Isabel Jalon-Rojas (School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, UNSW, Australie), Philippe Jatteau (Irstea, UR EABX), Sarah-Jane Krieger (Centre Emile Durkheim), Pierre Labadie (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Mathilde Lauzent (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Pierre Le Hir (IFREMER, DYNECO-PHYSED), Alain Lechêne (Irstea, UR EABX), Michel Leconte (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Alexia Legeay (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Vincent Lelong (Ligue de Protection des Oiseaux), Marie Lemarié-Boutry (Irstea, UR ETBX), Mario Lepage (Irstea, UR EABX), Séverine Lescure (Université Paris 1, UMR 8591), Jérémy Lobry (Irstea, UR EABX), Régine Maury-Brachet (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Gabriel Munoz (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Raphaël Musseau (Biosphère Environnement), Antoine Nowaczyk (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Aimé Roger Nzigou (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Stéphanie Pasquaud (University of Lisbon, Marine and Environmental Sciences Centre), Christian Paucot (Ligue de Protection des Oiseaux), Jean-Christophe Pereau (Université de Bordeaux, Gretha, UMR 5113), Fabien Pierron (CNRS, UMR EPOC), Patrick Point (Université de Bordeaux, Gretha, UMR 5113), Tina Rambonilaza (Irstea, UR ETBX), Julien Richirt (Université d'Angers, UMR 6112), Eric Rochard (Irstea, UR EABX), Lauren Ross (University of Maine), Yohan Sahraoui (Université de Bordeaux, LabEx Cote), Denis Salles (Irstea, UR ETBX), Pierre-Guy Sauriau (Université de La Rochelle, UMR LIENSs), Benoît Sautour (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Nicolas Savoye (Université de Bordeaux, Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers), Jörg Schäfer (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Sabine Schmidt (CNRS, UMR EPOC), Aldo Sottolichio (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Nathalie Tapie (Université de Bordeaux, UMR EPOC), Florence Verdin (Université de Bordeaux, UMR AUSONIUS), collectif Faune-Aquitaine.org