Garonne, Dordogne et « bouchon vaseux » estuarien : des destins liés

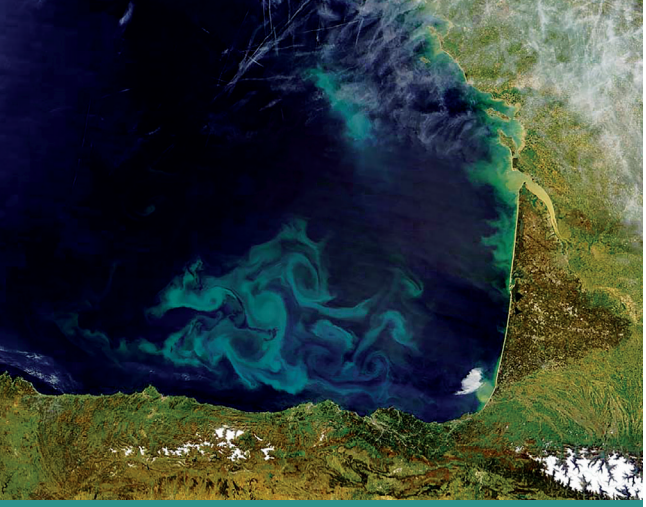
(Michel Le Callan)

Un film et une plaquette synthétiques sont également disponibles

Pourquoi ce document ?

Les partenaires du consortium MAGEST* et les CLE* des SAGE Dordogne atlantique, Garonne et Estuaire, ont constaté la nécessité d'une meilleure appropriation des enjeux associés au bouchon vaseux dans la gestion de l'eau sur le continuum Garonne-Dordogne-Estuaire. Ce document vise à rendre accessibles les connaissances acquises afin qu'elles soient intégrées dans les pratiques et les politiques. Le SMIDDEST (structure porteuse du SAGE Estuaire) en a confié la réalisation à l'association Terre & Océan avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour Garonne et du Département de la Gironde.

SYNDICAT MIXTE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE l'Estuaire DE LA GIRONDE
Gironde LE DÉPARTEMENT
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE
MAGEST
Terre & Océan médiation culturelle des sciences et de l'histoire des environnements



Les estuaires sont des environnements intermédiaires entre le milieu marin côtier et **leurs bassins versants régionaux en amont, dont ils sont le réceptacle.** A l'interface entre continent et océan, leurs qualités écologiques sont particulièrement **vulnérables aux évolutions climatiques** et sociétales constatées depuis 40 ans.

LEXIQUE

Adsorption : fixation d'atomes, ions ou molécules sur des surfaces solides

Anoxie : très nette insuffisance d'oxygène pour les organismes

Avalaison : descente des poissons migrateurs des rivières vers l'océan

Biomasse : ensemble de la matière organique animale et végétale

Bioaccumulation : capacité de certains organismes à absorber et concentrer certaines substances chimiques

Circulation résiduelle : déplacement net (de l'eau ou des particules) à l'issue d'un cycle de marée

Clapage : dépôts des sédiments dragués

Classes Eco-Fleuves : réseau scientifique et pédagogique (1994-1998) avec 50 stations (lycée, collèges, ...) à l'échelle des bassins versants de la Garonne, de la Dordogne et de l'Adour conçu par Henri Etcheber, prix de la culture scientifique de l'Académie des Sciences, 1996

Consortium MAGEST : groupement des partenaires du réseau d'observation automatisée de la Gironde

Écoulement hypodermique : écoulements sous la surface du sol mais au-dessus des nappes phréatiques permanentes

Étiage : débit minimal d'un cours d'eau

Évapotranspiration : évaporation de l'eau du sol et transpiration des végétaux

Exondé : se retrouvant au-dessus de l'eau

Floculation : agglomération des matières en suspension

Flot : marée montante

Jusant : marée descendante

Hypoxie : insuffisance d'oxygène pour les organismes

Macro-tidal : soumis à une marée de grande ampleur

Marinisation : influence grandissante de la marée océanique

Marnage : écart entre le niveau de la marée haute et de la marée basse

Minéralisation : la décomposition des matières organiques par les micro-organismes

Mortes eaux : (marée) de coefficients inférieurs à 40

Oscillation atlantique multi-décennale (OAM ou AMO) : variation de la température de surface de l'océan atlantique Nord sur plusieurs décennies

PCB : polychlorobiphényle, composé chimique toxique

Vives eaux : (marée) de coefficients supérieurs à 80

Le réchauffement global de la planète est désormais clairement mesurable, et depuis bientôt une quinzaine d'années son interprétation **ne prête plus au doute** : ce sont bien les actions humaines qui sont en cause, via l'accumulation largement irréversible des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
Ces **évolutions rapides** imposent de porter une attention aux capacités d'adaptation de notre environnement physique ou biologique. La dimension nécessairement régionale de cette démarche est parfaitement illustrée par la complexité de ce qui se passe aujourd'hui **dans l'estuaire de la Gironde. Il s'y mêle de manière étroite l'impact des diminutions de l'apport d'eau douce par les fleuves et rivières, celui du relèvement du niveau de la mer, avec des conséquences sur le bouchon vaseux de l'estuaire,** sur le déplacement du littoral, sur la dé-poldérisation de certaines zones, sur la biodiversité des zones découvertes par les marées. La vigilance sur ces évolutions doit s'appuyer sur une compréhension précise des processus qui les provoquent.

Hervé Le Treut
Ex-membre du GIEC et coordonateur du rapport régional sur les changements climatiques

SOMMAIRE

Histoire et géographie du « Bouchon vaseux » 04
- Le bassin versant de l'estuaire 04
- La « zone estuaire » 05
- Le bouchon vaseux 06
- La dynamique hydro-sédimentaire estuarienne 08
- Le suivi journalier de Magest 09

Évolution du bouchon vaseux depuis 40 ans 10
- La position et l'intensité du bouchon vaseux 10
- La « qualité » du bouchon vaseux 14
- Les conséquences sur l'écosystème 16

Le bouchon vaseux face aux perspectives climatiques et sociétales 18
- Les éléments « naturels » : projections 18
- Les éléments anthropiques : projections 20

Comment freiner les processus et s'adapter ? 22

Les pêcheurs professionnels sont les veilleurs de l'environnement par leurs observations pragmatiques des cours d'eau, des estuaires et du littoral. Dès la création de la **commission du milieu naturel aquatique de bassin** et de son groupe de travail **«estuaire»** soutenus par l'Agence de l'Eau Adour Garonne, j'ai sollicité le représentant d'Ifremer chargé d'étudier nos observations depuis 1974 : l'augmentation des matières en suspension et de la température ont entrainé la modification des pratiques de pêche (à l'alose en particulier). Ainsi fut initié **ce qui aboutira en 2004 au «réseau MAGEST»**, en associant les chroniques de pêche au filet et les études scientifiques avec le soutien financier d'un consortium original. **MAGEST répond au besoin urgent de connaitre mieux et en continu notre estuaire et son bouchon vaseux.** Car les pêcheurs veulent défendre les espèces migratrices patrimoniales. **Une quantité d'eau suffisante et de qualité est nécessaire aux migrateurs** pour se reproduire dans le haut bassin (sur les frayères ou en pleine eau) et à leurs juvéniles pour dévaler sainement vers la mer en passant par les estuaires, zones spécifiques et sensibles. Dans ces eaux estuariennes mêlées et saumâtres, ces espèces doivent adapter leur physiologie pour aller vivre en mer avant de revenir selon un cycle mémorisé depuis des millénaires...

A-t-on oublié l'importance de l'alose sur les sarments, de la lamproie à la bordelaise ou de l'anguille sur le grill dans la renommée de la gastronomie régionale ?

Jacqueline Rabic,
Présidente du réseau MAGEST
et Directrice de l'association agréée des pêcheurs professionnels en eau douce de Gironde

Le phénomène naturel du bouchon vaseux, qui vous est présenté dans ce document, est devenu au cours du temps un élément de préoccupation central pour les acteurs de l'estuaire de la Gironde : Il **amplifie les désoxygénations en étiage,** il génère une turbidité accrue, il concentre les pollutions, **depuis plusieurs années, en parallèle à la baisse mesurée des débits des fleuves, son étendue et sa densité ont fortement augmenté.** Les connaissances sur le bouchon vaseux et ses enjeux sont importantes grâce aux travaux du réseau MAGEST. Or, avec la CLE du SAGE Estuaire, nous avons constaté un manque d'appropriation de ces enjeux dans la gestion de l'eau sur le continuum Garonne-Dordogne-Estuaire. **La CLE a donc souhaité l'élaboration d'outils, pour synthétiser et rendre accessibles à tous les différents enjeux liés au bouchon vaseux,** afin qu'ils soient mieux intégrés dans les pratiques et les politiques. Elle a sollicité le SMIDDEST pour en porter la réalisation. Je formule le vœu que cet outil et ses déclinaisons (colloque, film, résumé) permettent à tous de bien se rendre compte des enjeux auxquels nous allons être confrontés dans l'avenir du fait du changement climatique global, et participent à la **prise de conscience nécessaire.**

Philippe Plisson
Président de la CLE du SAGE Estuaire,
vice-président du SMIDDEST

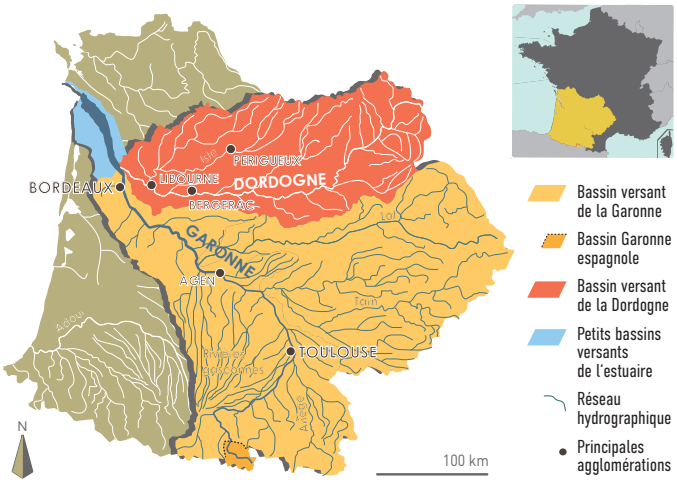
Histoire et géographie du « Bouchon vaseux »

A l'exutoire des bassins fluviaux, le bouchon vaseux est un phénomène naturel lié à la dynamique estuarienne, définie par la confrontation entre l'écoulement des fleuves et la marée océanique. D'amont en aval, les phénomènes géologiques et climatiques globaux et régionaux ont façonné l'hydro-géographie des bassins fluviaux et de l'estuaire. Depuis un peu plus d'un siècle, les **sciences modernes** ont posé les connaissances et plus récemment mis en place **les suivis des évolutions en cours.**

Le bassin versant de l'estuaire

Géographie

L'estuaire de la Gironde est l'**exutoire d'un bassin versant de 83 000 km²**, incluant les Pyrénées centrales et la face occidentale du Massif Central. Le réseau hydrographique intègre de multiples sous-bassins, dont les principaux sont ceux de la Garonne amont « toulousaine » (incluant l'Ariège, le Salat et la Neste), du Tarn (incluant l'Aveyron), du Lot et de la Dordogne. S'y ajoutent les rivières gasconnes (Gers, Baïse, ...) en rive gauche et le Dropt en rive droite. La zone estuarienne comporte de nombreux petits cours d'eau issus de sous-bassins mineurs. Les eaux douces de l'estuaire ont ainsi une double origine : **les Pyrénées** (et contreforts pyrénéens avec les coteaux gascons) pour une part et **le Massif Central** pour une autre part plus importante.

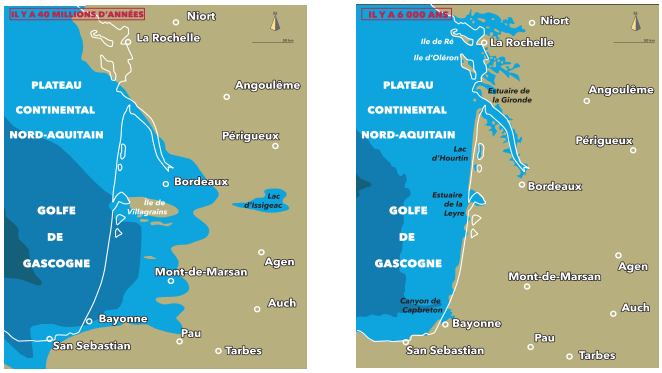


Bassin versant de l'estuaire *(T. Boniface, Terre & Océan)*

Histoire géologique et climatique

L'estuaire est un cadre géographique récent à l'échelle géologique. Le réseau hydrographique (Tarn-Aveyron, Lot, Dordogne) issu du Massif Central (300 millions d'années) a été rejoint par la Garonne remontant vers le Nord suite à la fermeture au Sud du bassin aquitain par les Pyrénées (46 millions d'années). Depuis, **ces rivières ont transporté et déposé les produits érodés sur ces chaînes montagneuses,** comblant le bassin aquitain par ces argiles, sables et graviers. Côté océanique, le comblement a été complété par des dépôts de calcaires.

A l'ère quaternaire (2 derniers millions d'années), les importantes variations du niveau marin ont déplacé les positions de l'estuaire, d'est en ouest. Ainsi, depuis le dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, le niveau de l'océan atlantique s'est élevé progressivement de 120 mètres, puis s'est stabilisé proche de son niveau actuel il y a environ 6 000 ans, fixant alors les contours de l'estuaire actuel.



Cartes du bassin aquitain il y a 40 millions d'années et 6 000 ans[1]

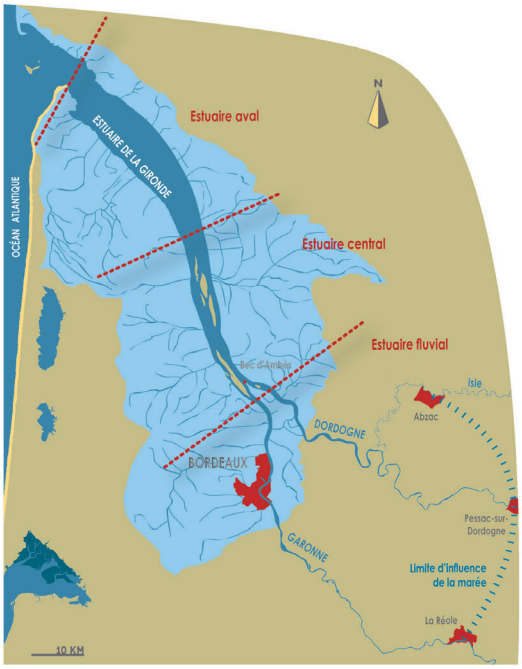
La zone « estuaire »

Définition : hydrodynamique et géographie

Les bassins fluviaux peuvent être appréhendés selon des secteurs différenciés par leurs morphologies et leurs dynamiques hydro-sédimentaires : zone à forte pente en amont, plaine intermédiaire d'inondation à méandres et zone d'embouchure. Sur les façades maritimes soumises à la marée, la remontée de l'influence directe ou indirecte de celle-ci définit la **« zone estuaire ».** L'estuaire de la Gironde est un **estuaire macro-tidal***, avec un marnage notable (2 à 6 mètres selon le lieu et le coefficient de marée) et une ample pénétration de l'onde de marée (170 Km). C'est ainsi **un milieu aquatique en variations constantes accueillant un écosystème très particulier** devant s'adapter en permanence à ces fluctuations.

Estuaire : une notion hydrologique

Le mot estuaire est issu du latin aestuarium, « lieu où le flux pénètre » et aestus « flux de la mer » ou « mouvement des flots ». La « zone estuaire » est ainsi définie par la pénétration de la marée salée ou dynamique dans l'embouchure d'un fleuve. Sur notre bassin versant, la notion d'estuaire est parfois strictement associée à la Gironde faisant nominativement suite à la confluence de la Garonne et de la Dordogne. Mais la marée et occasionnellement la salinité remontent bien en amont du bec d'Ambès en Garonne et en Dordogne. Dans ce document, la zone estuaire sera définie comme la zone s'étendant jusqu'à La Réole en Garonne, Pessac sur Dordogne sur la Dordogne et Coutras sur l'Isle.

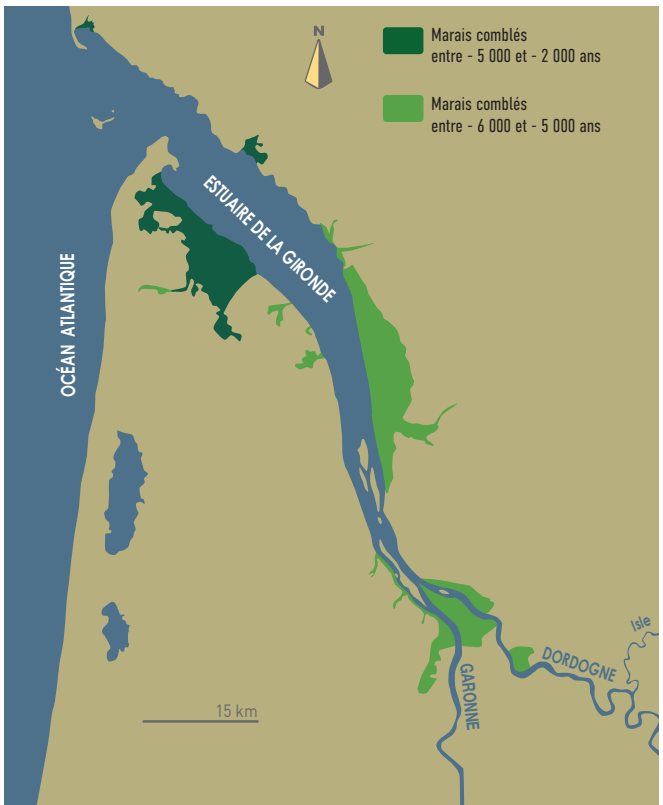


Carte de la « zone estuaire » *(T. Boniface, Terre & Océan)*

Le comblement historique de l'estuaire : sédiments, marais et îles

Depuis 6 000 ans, les zones latérales, bras secondaires et marais, se sont progressivement comblées. L'érosion et le dépôt de sédiments dans l'estuaire et les zones littorales proches se sont accrus lors des périodes de déforestations sur les bassins versants : lors des défrichements néolithiques, mais surtout lors de l'expansion gallo-romaine puis médiévale et moderne[2].

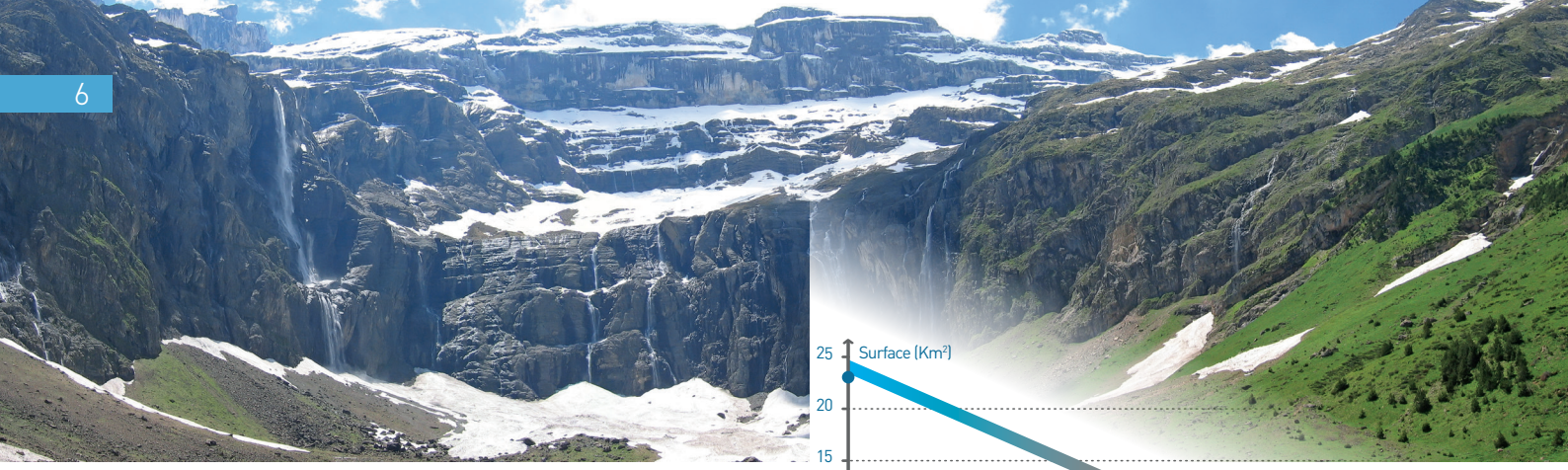
Comblements des zones humides autour de l'estuaire[2] *(T. Boniface, Terre & Océan)*



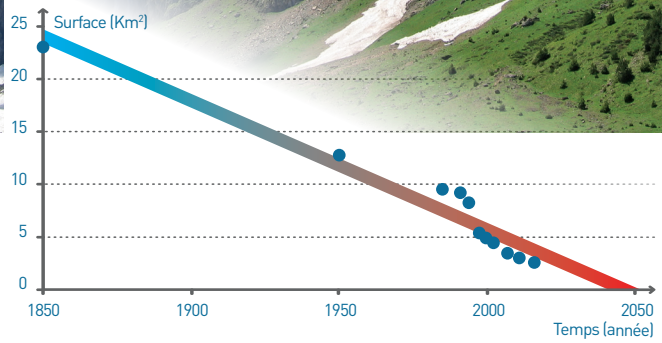
Avant les endiguements, **les très vastes zones de marais** (Médoc, Saintonge, presqu'ile d'Ambès, Montferrand, Blanquefort et Bordeaux lac, Chartrons, Bordeaux Bastide, paluds en amont de Bordeaux, etc ...) **étaient submergées par les marées hautes déposant les sédiments** portés par les eaux[3]. L'homme accélérera le comblement de ces marais en alliant endiguement et drainage pour générer des espaces agricoles.

Le petit âge glaciaire (15ème - 19ème siècle) provoquera l'augmentation des volumes des glaciers pyrénéens. Ceux-ci en s'écoulant (l'été) et plus encore en se réduisant (du 18ème et 20ème siècles) renforcèrent les débits d'étiage et apportèrent lors des crues, des sables et des graviers en abondance jusqu'au cœur de l'estuaire. **Quelques crues historiques ont notablement contribué à la « construction » des îles les plus récentes,** notamment celle de 1770 à l'origine des Îles Verte et Nouvelle.

Bras de Macau - *(Michel Le Collen)*



Cirque de Gavarnie *(Stock Images)*



Évolution des surfaces des glaciers des Pyrénées de 1850 à 2050 *(P. René, Association Moraine)*[4]

Un fleuve et un estuaire, ce n'est pas que de l'eau !

Les rivières et les fleuves se définissent et se distinguent par leurs écoulements liquides, mais aussi par leurs flux ou débits solides. Ces débits solides sont fonction de la pente, de la pluviométrie, de l'occupation des espaces et de la nature des sols. Les exportations solides vers les zones d'estuaire ou de delta, calculées par unité de surface, présentent une très grande diversité de 1 t/km²/an (Nil) à 1 200 t/km²/an (Fleuve Jaune). Sur les bassins de la Garonne et de la Dordogne, les valeurs vont de 10 (Dronne) à 150 t/km²/an (Tarn). Les apports solides sont essentiels pour la stabilité des zones d'embouchure (estuaires ou deltas).

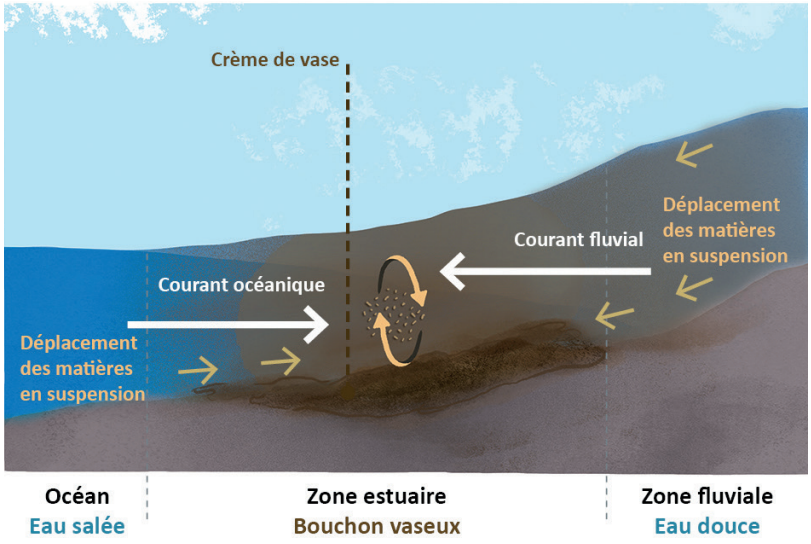
Cette période de fin du « petit âge glaciaire » a vraisemblablement été caractérisée par des débits fluviaux annuels plus soutenus qu'aujourd'hui *(voir figure p.11)*. Pardé[5] citant Fargues et Baumgarten[6] note un débit moyen annuel de 673 m³/s pour la Garonne (à Langon) au milieu du 19ème siècle (1839-1859). Pour les flux sédimentaires, les premières estimations avancent 1,5 à 9 Mt/an[6] pour la Garonne (1839-1846, 5,7 Mt/an en moyenne) et 0,5 à 1,1 Mt/an pour la Dordogne, soit un apport global à l'estuaire entre 2 et 10 Mt/an au milieu du 19ème siècle, en fonction des débits des différentes années.

Le bouchon vaseux

1938 : Glangeaud « invente » le bouchon vaseux

Les eaux de la **« zone estuaire »** se caractérisent par une forte turbidité permanente (de 0,1 à plusieurs g/l en surface), en contraste avec les charges variables des eaux fluviales en amont, et celles plus faibles des eaux marines en aval. Le cœur de ces eaux estuariennes très turbides a été appelé **« bouchon vaseux »** par Glangeaud en 1938[7] ou « zone de turbidité maximale ». Ce « bouchon vaseux » est **constitué d'un « stock mobile »** estimé à environ 4,5 Mt de matériels solides, résultant de la reprise de sédiments fins par la marée. Associée au bouchon vaseux, la **« crème de vase »** (plusieurs dizaines de g/l) constitue une lentille de boue liquide sur le fond des chenaux[8] et mobilisable selon les conditions hydrodynamiques. La « crème de vase » et le « bouchon vaseux » forment un couple sédimentaire lié par des échanges réguliers.

La formation du bouchon vaseux et ses échanges avec la crème de vase anoxique *(Sauvage Garage)*

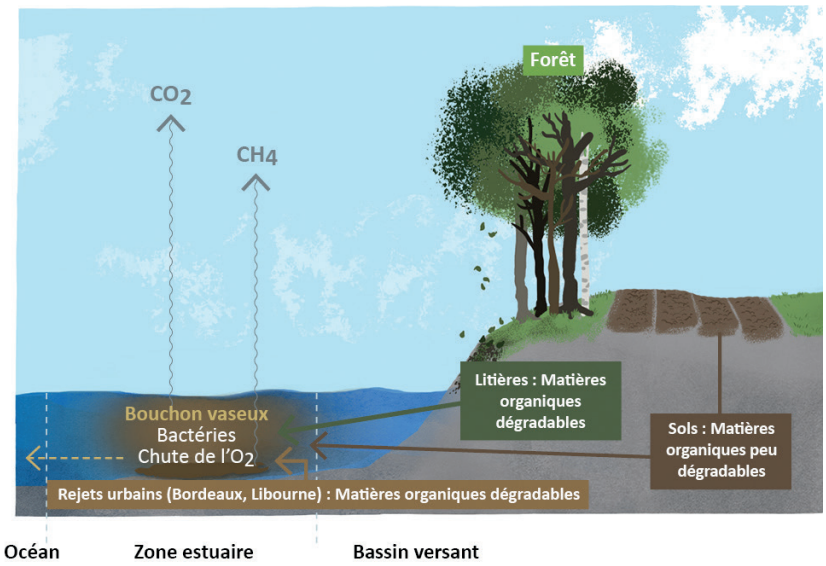


Définition du bouchon vaseux : Au cœur des perpétuelles oscillations estuariennes, le bouchon vaseux se définit comme **la zone de concentrations maximales des sédiments fins, qui en surface approchent ou dépassent 1 g/l**[9-10]. Le bouchon vaseux concentre ainsi les apports naturels et anthropiques amont et locaux, et **la lumière y pénètre très peu.**

La nature du bouchon vaseux

Les particules en suspension des eaux de l'estuaire sont constituées d'un **mélange de matières minérales très majoritaires (argiles pour l'essentiel et sables pour 1 à 2%[11]) et organiques** pour 1,8% de la fraction totale[12]. Les matières organiques « naturelles » sont issues de la production primaire fluviale, phytoplancton, macrophytes (biodégradables), mais surtout des litières des ripisylves (biodégradables) et de molécules plus complexes issues des sols du bassin versant (peu dégradables). De leur temps de transit dans la « zone estuaire » et de leur nature dépendent leurs dégradations par les bactéries consommatrices d'oxygène, fortement présentes dans le bouchon vaseux.

Apports de matières organiques à l'estuaire et au bouchon vaseux[15] *(E. Veyssy, Sauvage Garage)*



Les bilans sédimentaires modernes : continuité de la tendance au comblement ?

A partir des années 1980, plusieurs études situent les apports sédimentaires fluviaux des bassins versants vers l'estuaire entre 2 et 3,5 Mt/an[13-14-15]. Ces réductions d'apports par rapport au 19ème siècle, sont dues à la baisse des débits et aux retenues[15-16]. Les apports d'eau et de sédiments peuvent être découpés par sous-bassins : Massif Central (Dordogne, Tarn-Aveyron et Lot), Pyrénées (Ariège, Garonne, Salat, Neste), coteaux gascons (Gers, Baïse, etc...). Les bassins du Massif Central sont dominants en superficie, débits cumulés d'eau et apports de sédiment[4]. Ces dernières années, **la diminution des débits a fait chuter les apports annuels autour de 1 Mt/an[17]**.

A l'aval, les croisements des courants de salinité et de densité différente, limitent les expulsions des matières vers l'océan[8] : les particules floculent vers les courants de fond dirigés vers l'amont. Les expulsions lors des jusants* sont atténuées par les réintroductions lors des flots*. **Les bilans de sortie d'estuaire, très incertains[18-19]**, ont été estimés à 1,5 Mt/an[8-13-20] en moyenne. Une grande part de ce flux annuel se produit pendant quelques jours de crues soutenues (de l'ordre de 4 à 5 000 m³/s global Garonne + Dordogne).

Ainsi, environ 0,8 Mt/an[9] de sédiments engraissent le « stock mobile » estimé entre 4,5 et 6 Mt[8-21]. Une part de ce stock sédimentaire mobile est expulsée lors des grandes crues concomitantes avec les grandes marées : jusqu'à 0,6 Mt/marée[22], soit plus de 1 Mt/jour[23] transférées vers l'océan.

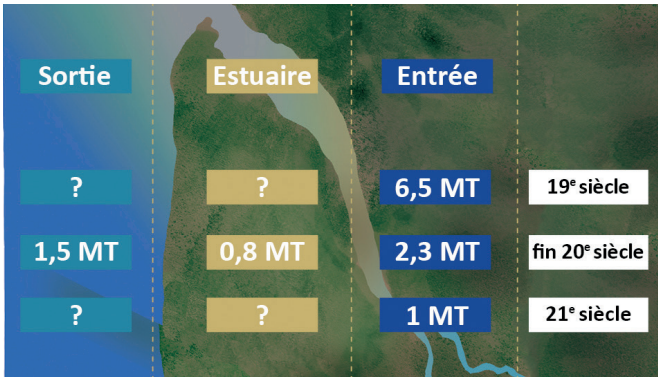
L'estuaire constitue **un piège temporaire à sédiments.** Son volume a diminué de 7,5% entre 1900 et 1973. Ce phénomène est la **continuation du processus naturel de comblement** commencé il y a 6 000 ans lorsque le niveau de l'océan est parvenu à un niveau proche de l'actuel[13]. Depuis la fin du 19ème siècle, l'entretien du chenal de navigation y a concentré l'énergie hydrodynamique et les chenaux secondaires (bras de Macau, chenal de Saintonge, chenaux entre les îles) ont fait l'objet de sédimentation.

A court terme, le bilan sédimentaire global est probablement proche de l'équilibre avec des « vidanges » partielles du stock sédimentaire mobile (bouchon vaseux-crème de vase) lors des crues des années plus humides. Même si le bouchon vaseux était totalement expulsé, il se reconstituerait par l'hydrodynamique estuarienne en remobilisant les vases constituant le substrat des fonds estuariens[8].

Les apports fluvio-estuariens à l'océan : un enjeu régional et mondial

Les transferts d'eau, de sédiments, de nutriments et de polluants, passant par la « zone estuaire » intermédiaire entre les bassins d'apports et l'océan, ont des **répercussions qualitatives (nutriments, contaminants chimiques, ...) sur les zones littorales de pêche** selon les dispersions du panache turbide et des courants. Les forces relatives des débits sortant ont aussi une **influence sur la courantologie côtière.**

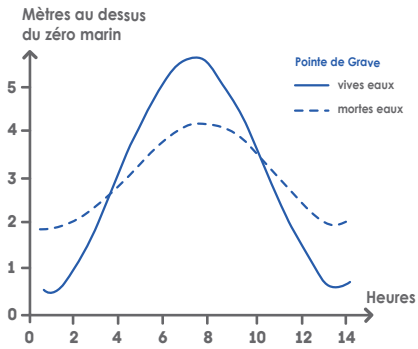
Bilans sédimentaires de l'estuaire[13-14-15-16-17-18-19-20-21] *(E. Veyssy, Sauvage Garage)*

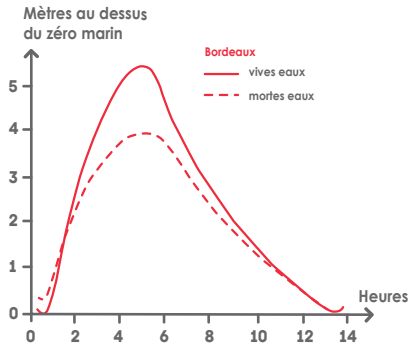


La dynamique hydro-sédimentaire estuarienne

Les fondamentaux

Confrontée aux écoulements fluviaux, l'onde de marée est retardée et distordue au fur et à mesure de sa progression à l'intérieur de la « zone estuaire ». En amont, la durée du jusant s'allonge au détriment de la durée du flot (au cours duquel les courants sont généralement plus forts). Ainsi à Bordeaux sur la Garonne ou à Libourne sur la Dordogne, le jusant dure entre 7 et 8h alors que le flot se réduit de 4 à 5h. Cette asymétrie de la marée ne modifie pas la durée de son cycle global qui reste inchangée partout dans la « zone estuaire », soit 12h25 comme le long de la façade atlantique néo-aquitaine.





Chaque semaine, l'évolution des coefficients de marée définit **les cycles de mortes eaux* puis de vives eaux*.** Le marnage et l'intensité des courants augmentent avec les coefficients de marée et favorisent les remises en suspension des sédiments. Les dépôts sont eux plus importants en mortes eaux.

Arrivées dans la « zone estuaire », les eaux fluviales sont donc opposées à celles de la marée et de sa répercussion dynamique. Au cours de chaque marée montante, 1,1 (mortes eaux) à 2 milliards (vives eaux) de m^3 d'eaux salées pénètrent dans l'embouchure de l'estuaire. Elles se mélangent aux eaux douces, générant un **gradient de salinité d'aval en amont.** Quels que soient les coefficients de marée et les débits fluviaux, les courants océaniques du flot sont toujours plus puissants et propagent l'onde de marée au-delà de la pénétration saline : c'est **la marée dynamique qui remonte jusqu'à 170 km en amont de l'embouchure** en Garonne (La Réole), en Dordogne (Pessac sur Dordogne) et sur l'Isle (Abzac). **Dans la « zone estuaire », les eaux s'écoulent alternativement vers l'aval lors du jusant et vers l'amont lors du flot.** A l'issue d'un cycle de marée, la circulation résiduelle* de l'eau la déplace généralement vers l'aval de quelques kilomètres. Dans l'estuaire amont, le transport résiduel des sédiments se dirige vers l'amont lorsque le débit du fleuve est faible.

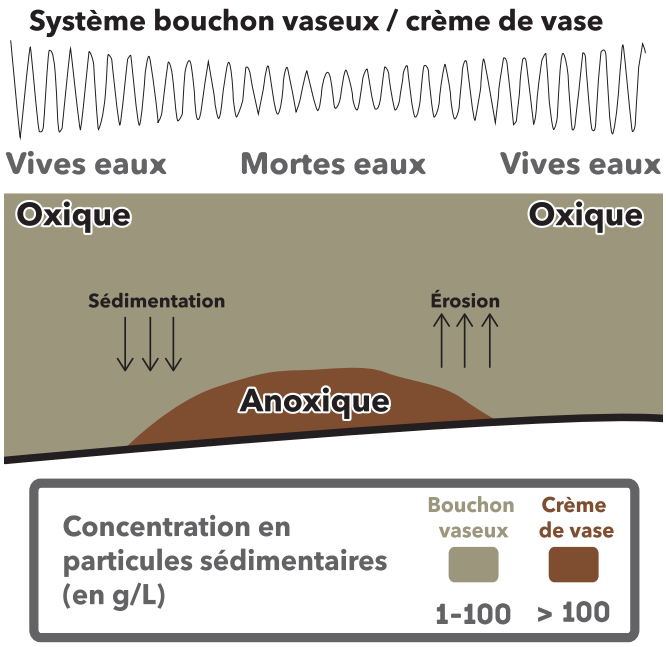
(Eric Veyssy)

Les eaux et les sédiments ont un temps de résidence dans l'estuaire de quelques jours à plusieurs mois. L'eau douce se renouvelle totalement en 10 à 20 jours en période de crue et en près de 3 mois en étiage[8-12-24].

L'accumulation des sédiments résulte essentiellement de l'asymétrie de la marée et du **croisement frontal des courants fluviaux et de marée.** Ce sont les principaux phénomènes en amont. En aval, l'accumulation des sédiments est renforcée par le croisement « stratifié » des eaux douces et salées de densités différentes et par **la floculation des particules favorisée par l'effet de la salinité sur les matières organiques portées par les sédiments en suspension.**

Lorsque les courants s'affaiblissent (faibles marées, étales de marée, frictions sur les zones latérales et en aval des confluences), les particules transportées décantent et se déposent, engraissant la crème de vase à partir du bouchon vaseux. En aval de l'estuaire, la salinité accélère la floculation et la décantation. Les courants vifs occasionnés par les fortes marées favorisent la remise en suspension de la crème de vase vers le bouchon vaseux.

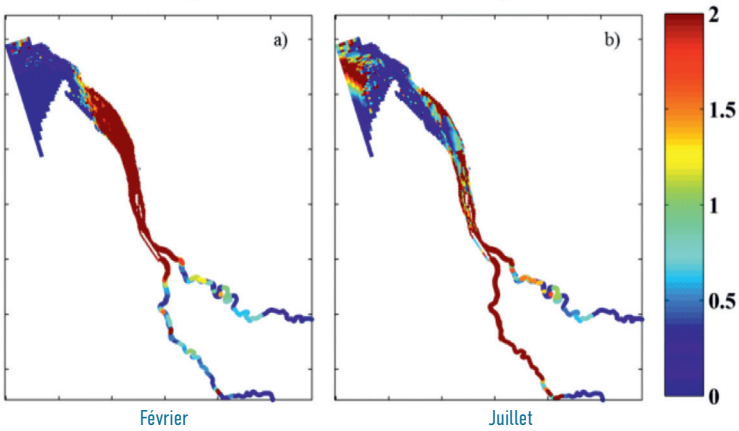
Dépôts et remise en suspension de la crème de vase[19-8]



Les déplacements saisonniers du bouchon vaseux selon les débits fluviaux

Migration saisonnière du bouchon vaseux : février et juillet *(A. Sottolichio)*

Concentration en matières en suspension en g/l



(Eric Veyssy)

En période de crue, le bouchon vaseux se forme à la limite de l'intrusion saline. **En période d'étiage,** les vitesses maximales des courants de flots, nettement supérieures à celles des courants de jusants repoussent **le bouchon vaseux vers l'amont de la « zone estuaire », dans « l'estuaire fluvial ».** Lorsque les crues annuelles sont faibles (moins de 3000 m³/s pour la Garonne et 1500 m³/s pour la Dordogne) lors de plusieurs années successives, cette remontée s'amplifie d'années en années[13].

La position saisonnière du bouchon vaseux répond donc aux variations des débits fluviaux[20] : en aval de Pauillac pour des débits fluviaux (Garonne + Dordogne) supérieurs à 800 m³/s, autour d'Ambès à 400 m³/s, autour de Bordeaux pour un débit de la Garonne de l'ordre de 200 m³/s à Tonneins, autour d'Izon pour un débit de Dordogne de 100 m³/s.

En été, le bouchon vaseux aval reste présent entre Blaye et Pauillac et un second bouchon vaseux issu d'une dissociation du premier, apparait en amont en Garonne entre Ambès et Cadillac et en Dordogne entre Bourg et Castillon. Cette dissociation saisonnière était déjà notée à la fin du 19ème siècle[25].

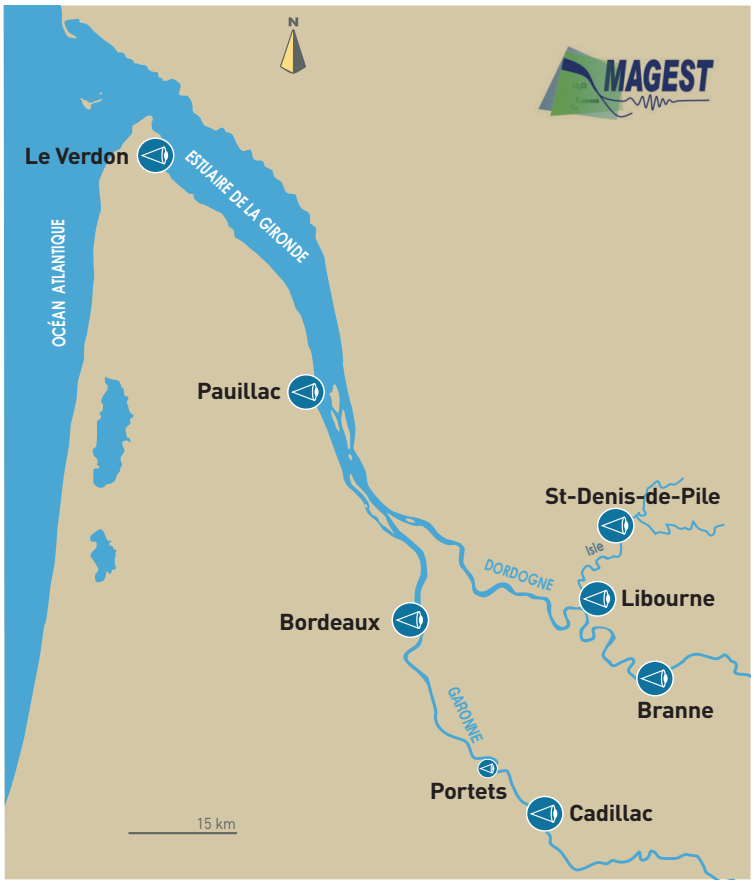
Le suivi journalier de MAGEST

Depuis 2004, les suivis de qualité de l'estuaire fluvial et central se sont précisés à travers le réseau MAGEST. **Au pas journalier et à haute fréquence (une mesure toutes les 10 minutes), 7 stations de mesures (turbidité, salinité, oxygène) ont été mises en place à :**

- **Pauillac** (estuaire aval à 55 km de l'embouchure),
- **Bordeaux** (Garonne à 100 km de l'embouchure),
- **Portets** (Garonne en amont de Bordeaux, à 120 km de l'embouchure) puis **Cadillac** (à 135 km de l'embouchure),
- **Libourne** (Dordogne amont à 120 km de l'embouchure)
- **Le Verdon** (embouchure)
- **Saint Denis de Pile** (Isle à 140 km de l'embouchure)
- **Branne** (Dordogne amont à 135 km de l'embouchure)

https://twitter.com/Gironde_Magest

Depuis 15 ans, leurs résultats ont permis de préciser les grands traits de connaissance aujourd'hui disponibles et de cerner les domaines d'incertitudes persistantes.



Carte du réseau MAGEST des stations d'échantillonnage

Évolutions du « Bouchon vaseux » depuis 40 ans

(Eric Veyssy)

La position et l'étendue du bouchon vaseux, variables par définition, connaissent une évolution nette depuis 40 ans, concomitante avec une dégradation des conditions écologiques de l'estuaire. Depuis 2004, le suivi Magest éclaire sur les causes de ces tendances et les études récentes ont précisé les conséquences et les risques écologiques associés.

La position et l'intensité du bouchon vaseux

Depuis 40 ans, l'hydrodynamique des sédiments traduit une nette remontée de l'influence de la marée[27]. Plusieurs facteurs y prennent part et des conséquences néfastes en résultent.

Hausse du niveau marin

Entre 1940 et 2015, la hausse moyenne globale du niveau marin a été de l'ordre de 20 cm[28]. Pour l'estuaire de la Gironde, les études des plus hauts niveaux de marées hautes de vives eaux enregistrées aux marégraphes de l'embouchure de l'estuaire restituent cet ordre de grandeur[29]. Ainsi les évolutions climatiques globales et régionales ont eu des effets sur l'estuaire aval, traduit par **une «marinisation» notable au cours des trente dernières années**[30].

La tendance principale observée est **la plus grande ampleur de pénétration de la marée salée et dynamique.** Au 3ème siècle, Strabon notait la renverse de courant à hauteur de Sainte-Croix-du-Mont (45 km en amont de Bordeaux)[3]. Depuis, l'onde de marée a progressé vers l'amont et se situait entre Castets et La Réole, autour de Gironde-sur-Dropt (65 km en amont de Bordeaux) au cours du 20ème siècle. Depuis 30 ans, cette onde semble encore avoir progressé d'environ 5 km vers l'amont et dépasse désormais régulièrement La Réole (170 km en amont de l'embouchure). La même évolution récente a été observée sur la Dordogne.

Abaissement de la ligne d'eau en amont

Entre Bordeaux et Cadillac, **l'extraction de granulat pratiquée jusqu'en 1982 (fin de l'autorisation)[31] a entrainé un abaissement des niveaux du lit et de la ligne d'eau de la Garonne, de 1 à 2 m en général** avec quelques secteurs où le creusement est plus accentué de 3 à 4 m (pont Mitterrand, Quinsac, Langoiran, Rions) jusqu'à 4 à 6 m entre Cadillac et la limite de remontée maximale de la marée dynamique (La Réole)[32]. **Ces creusements,** laissant apparaître par endroit le substratum marneux[26], **ont très nettement favorisé la remontée de la marée** (salée et dynamique), accompagnée d'une augmentation du marnage[32] et de l'asymétrie de la marée en amont depuis 60 ans[33].

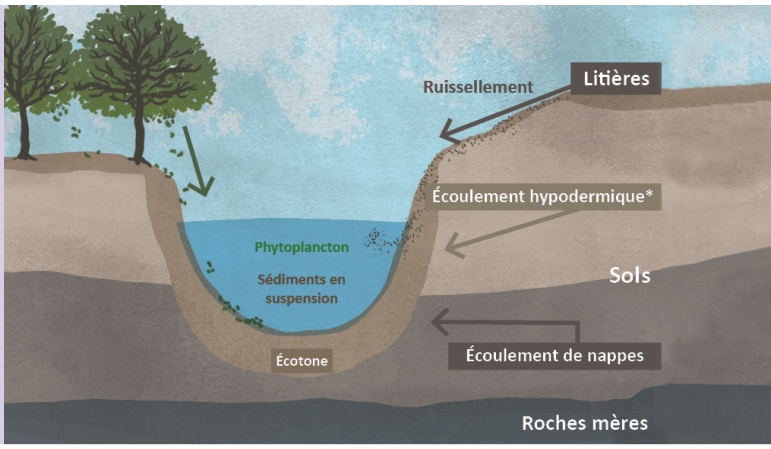
Cette évolution a été globalement semblable sur la Dordogne avec un abaissement de la ligne d'eau de 0 à 5 m entre Libourne et le Bec d'Ambès[20].

Cambes, berges fragilisées par les extractions de granulats *(Eric Veyssy)*

Baisse des débits avec intensification et allongement de l'étiage

Un fleuve et son estuaire, c'est d'abord de l'eau !

L'étude d'un fleuve se fait par le suivi des cycles hydrologiques d'étiage à étiage[3], d'octobre à septembre pour nos bassins régionaux. A partir d'octobre, **la reprise hydrologique est fonction de la pluviométrie.** Les précipitations océaniques ou méditerranéennes provoquent les premières crues et permettent la recharge des nappes alluviales qui alimenteront « en différé » les rivières par les écoulements à travers les sols : écoulement de nappes et écoulement hypodermique (à travers les sols).

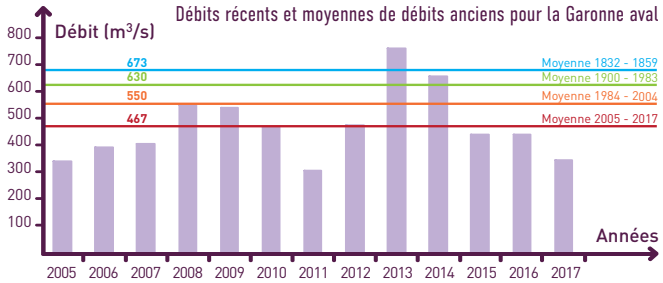


Apports d'eau et de sédiments vers les rivières[15] *(E. Veyssy, Sauvage Garage)*

La Garonne à Tonneins *(E. Veyssy)*

Les débits de la Garonne et de la Dordogne ont fortement évolué au cours du siècle passé. Le débit moyen annuel de la Garonne à La Réole était de 673 m³/s au milieu du 19ème siècle[5-6]. Avec la régression des glaciers et de leur apport estival, le débit moyen est descendu aux environs de 630 m³/s pour le 20ème siècle, puis 550 m³/s de 1984 à 2005 et 477 m³/s de 2006 à 2017. Le niveau des crues a également baissé, la valeur de la crue biennale à Argentat sur la Dordogne étant par exemple passé de 711 m³/s entre 1900 et 1952, à 381 m³/s entre 1953 et 2013[34]. Cette diminution notable des débits de crue est liée à l'effet de laminage par les grands ouvrages hydroélectriques, sur la Dordogne particulièrement.

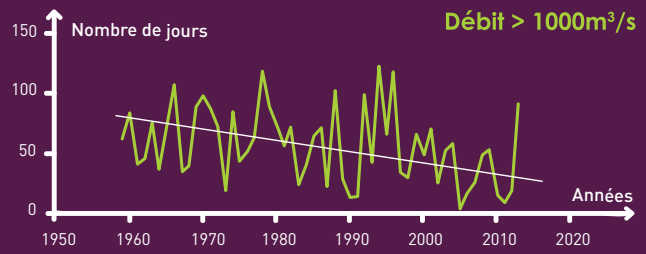
Ces évolutions peuvent être mises en parallèle avec les premiers effets déjà sensibles du changement climatique (régression des glaciers, augmentation de l'évapotranspiration, pluviométrie irrégulière, ...) et avec la hausse importante des stockages et des prélèvements intervenus au cours des décennies récentes. Ce sont principalement sur les débits d'étiage que les évolutions sont les plus marquantes, en période de remontée du bouchon vaseux en Garonne et Dordogne et lors de la période printanière de passage des poissons migrateurs.

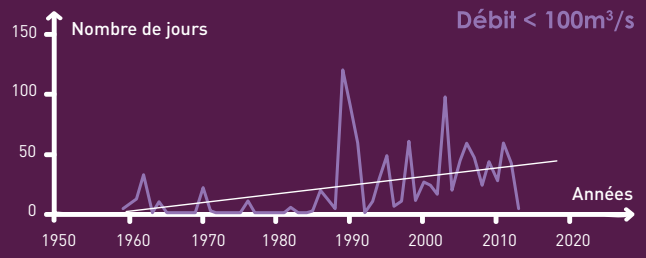


Le bassin de la Garonne présente le plus grand déficit hydrique de tous les bassins français[35-36] : - 20% depuis 1984 par rapport au 20ème siècle.

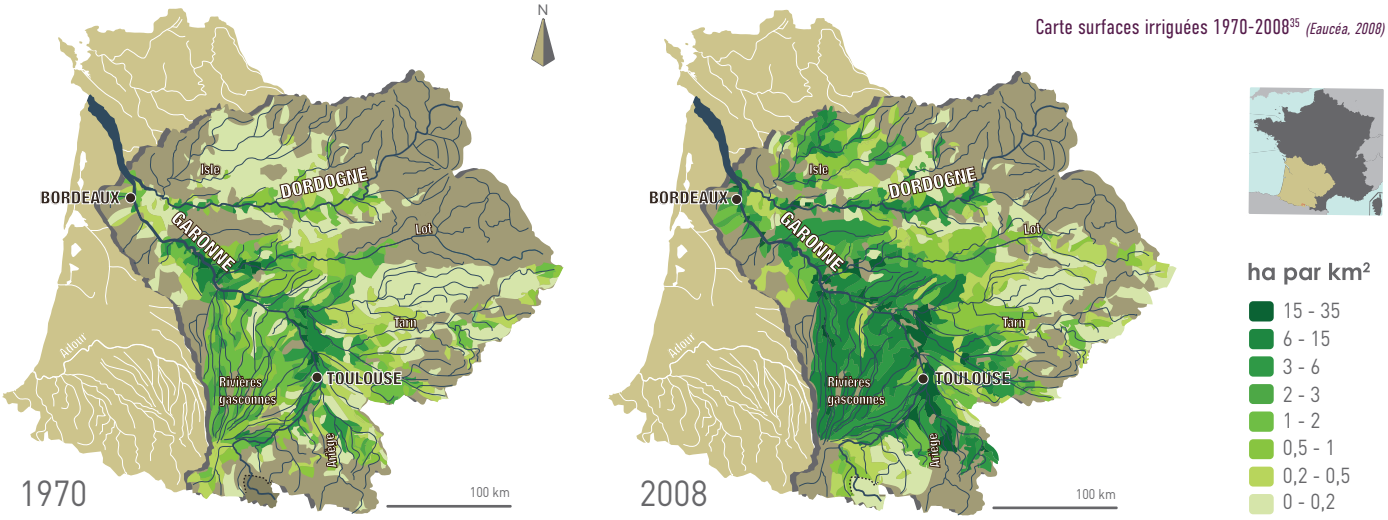
A l'échelle annuelle, les évolutions récentes se traduisent par un nombre réduit de crues et des étiages prolongés dans le temps et aux débits très réduits. Avant les années 1980, les étiages inférieurs à 100 m³/s en Garonne étaient exceptionnels. Depuis, presque chaque année, les débits passent en dessous de ce seuil entre 20 et 100 jours par an. Ce déficit hydrique observé depuis 40 ans, est dû à une conjonction de plusieurs facteurs : moindres précipitations[36], augmentation de l'évapotranspiration liée à la hausse des températures de l'air, évaporation dans les retenues[37] et l'accroissement des prélèvements en amont entre 1978 et 2008. Si le forçage climatique apparait prépondérant, les prélèvements estivaux affectent significativement les débits d'étiage.

Nombre de jours de débits Garonne > 1000 m³/s et < 100 m³/s [33] *(Jalon Rojas, 2016)*





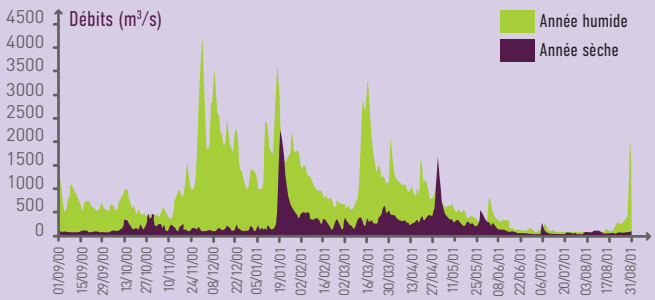
Carte surfaces irriguées 1970-2008[35] *(Eaucéa, 2008)*



Barrage de Chastang, Servières-le-Château, Dordogne *(2006 Epidor)*

« Soutien d'étiage » ?

En hiver (pluvieux), au printemps et en automne, **retenir en amont l'eau** issue de la fonte de neige ou de pluies, **amoindrit les débits de chasse du bouchon vaseux (au printemps et en automne notamment) et la recharge des nappes alluviales de la Garonne intermédiaire (Toulouse à Bordeaux) qui sont la base de l'écoulement de la saison sèche, c'est à dire le soutien naturel de l'étiage.** De plus, lors des étés caniculaires, 3 à 4% supplémentaires du volume sont **perdus par évaporation** sur les plans d'eau de retenue[37].
Les retenues semblent contribuer ainsi à accentuer la durée et la faiblesse de l'étiage naturel.[30-50]



Hydrogramme annuel comparé d'une année humide (1993-1994 en vert) et d'une année sèche (1989-1990 en violet)[15]

Stockage et prélèvements agricoles : entre 1970 et 2008, les surfaces irriguées ont été multipliées par 5[35]. L'irrigation représente un potentiel de prélèvements sur les rivières et les nappes d'environ 400 Mm³ en année sèche auquel peuvent être rajoutés environ 150 Mm³ de prélèvement dans les retenues collinaires[35]. Ce cumul correspond à 17 m³/s en moyenne annuelle, à 68 m³/s pendant les 3 mois d'été avec des pointes à 100 m³/s.

Stockage dans les grandes retenues hydroélectriques et modification du régime de débits : les grandes retenues hydroélectriques représentent un volume stocké très conséquent. **Sur la Dordogne il s'agit d'environ un milliard de m³.** Les eaux sont turbinées de préférence lors des périodes de plus forte demande d'énergie, principalement l'hiver. **La reconstitution des stocks a lieu pendant les crues, mais également en fin de printemps et en été où la demande énergétique est moins forte et en vue de relever le niveau d'eau des retenues pour permettre le déroulement des activités nautiques touristiques.**

> **« En amont, un bouchon vaseux plus longtemps présent, plus étendu et plus concentré »**

La conséquence des trois facteurs cumulés (hausse du niveau marin, abaissement de la ligne d'eau, baisse des débits) est une remontée supplémentaire[38] de l'ordre de 16 km du bouchon vaseux saisonnier « amont » (Ambès-Bordeaux-Langoiran-Cadillac) estimée en Garonne depuis 40 ans[33]. Les pêcheurs et riverains observent la même tendance en Dordogne (Bourg-Libourne-Castillon).

Stock sédimentaire temporaire et remontée en amont

La baisse des débits induit un moindre apport sédimentaire dans la « zone estuaire » : 1 Mt/an en moyenne depuis 20 ans[17] contre 2,5 Mt/an en moyenne à la fin du 20ème siècle[15]. Mais **la faiblesse et la rareté de ces crues limitent plus encore les expulsions vers l'océan.** Avec moins d'apports fluviaux et encore moins d'expulsions à l'océan, **le bilan sédimentaire de l'estuaire lors des années sèches est peu différent de celui des années moyennes ou humides.**

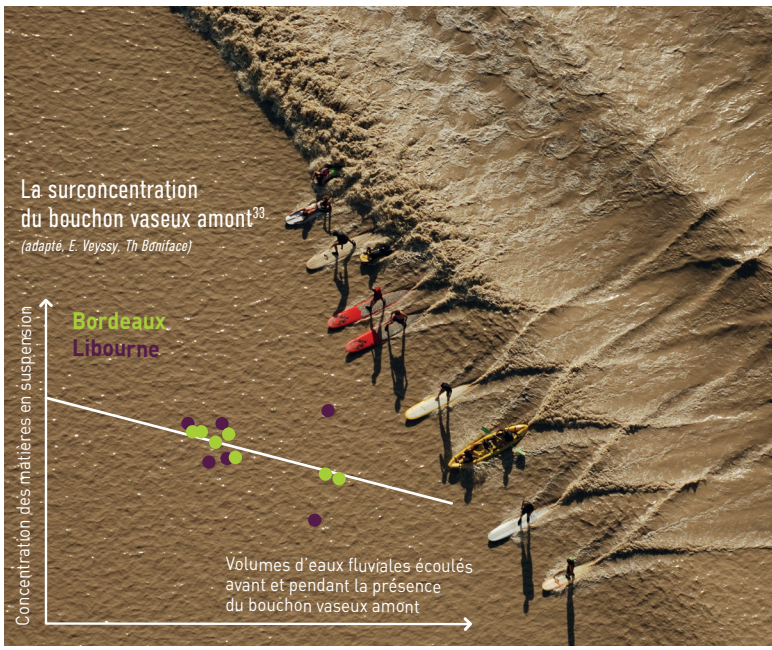
L'ordre des crues annuelles et l'alimentation du bouchon vaseux

Les crues amènent 90% des apports solides annuels à l'estuaire. **Les premières crues d'un cycle hydrologique transportent plus de sédiments fins, pour partie érodés sur les sols asséchés par l'été et par ailleurs accumulés dans les lits mineurs et majeurs des rivières pendant la saison sèche.** Les crues suivantes et les phases de décrues sont de moins en moins chargées de sédiments à débits équivalents[15].

En amont **la vase a remplacé les graviers** avec des conséquences en cascade. Dans l'estuaire fluvial (Garonne et Dordogne), les hauteurs « libérées » par les extractions de graviers ont été pour partie **comblées par des vases qui opposent aux courants un frottement plus faible** que les sables et les graviers. Cette moindre rugosité favorise la remontée supplémentaire des courants de flot. Moins fixées et plus mobilisables, **les vases sont remises en suspension, notamment par les courants de flots devenus plus intenses ces dernières années dans ces secteurs[38-39].** De plus, les phénomènes spécifiques de mascarets, plus nombreux et plus puissants avec la baisse des débits et le prolongement de l'étiage, génèrent une remise en suspension plus grande par la puissance dynamique de ce ressaut hydraulique agissant sur des fonds et des berges vaseux. Cette remise en suspension au début du flot, permet une remontée potentielle des sédiments sur près de 20 km.

Par ailleurs, lorsque les volumes d'eaux fluviales écoulés avant et pendant la présence du bouchon vaseux en amont s'affaiblissent, sa concentration augmente en Garonne (Bordeaux, Portets) comme en Dordogne (Libourne).[33]

Ainsi la plus grande pénétration de l'onde de marée et l'allongement de la durée des étiages contribuent à une augmentation de l'ampleur géographique et de la concentration du bouchon vaseux amont.[18-27]



Mascaret *(Lilian Marolleau - Smiddest)*

Le Grand Port Maritime de Bordeaux drague 9 Mm³/an de sédiments dans le chenal de navigation (130 km de long). Entre 2 et 10% des sédiments clapés reviennent dans le chenal de navigation[9]. Les dragages et les clapages en Garonne (excepté devant les appontements) se faisant hors période de présence du bouchon vaseux « amont », ils contribuent peu à son alimentation.

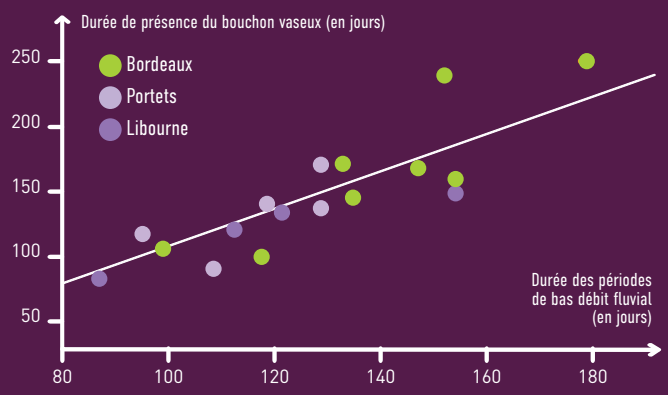
En amont, le stock mobile est renforcé par une succession d'années de faibles débits avec peu d'expulsions notoires vers l'océan et **une salinité occasionnellement non négligeable** (jusqu'à 4 g/l à Bordeaux en juillet 2006 et 5 g/l en juin 2017) favorisant la floculation des vases. **Cette stagnation du bouchon vaseux maintient et accroit l'envasement des berges** de la Garonne et de la Dordogne. L'envasement de la Dordogne aval est dû pour partie à la remontée de sédiments issus majoritairement du bassin de la Garonne remontant en étiage après un transit hivernal dans l'estuaire central.

Le bouchon vaseux « amont »

Les données de MAGEST à Libourne, Bordeaux et Portets (Cadillac) ont permis de préciser les débits d'installation et de chasse du bouchon vaseux amont.

Le bouchon vaseux « amont » (Bordeaux-Langoiran-Cadillac en Garonne et Bourg-Libourne-Castillon en Dordogne) qui était saisonnier (été-début d'automne) auparavant est persistant très longtemps dans l'année (6 à 8 mois) et remonte même sur des zones plus en amont encore et à des périodes critiques (printemps-été-automne) pour l'écosystème (passage des migrateurs notamment) et la pêche. Certaines années, une baisse précoce des débits provoque son installation dans l'estuaire fluvial dès le printemps et il y persiste jusqu'aux premières crues de l'hiver suivant.

INSTALLATION DU BOUCHON VASEUX AMONT	
Dordogne tidale (Libourne) : 80 – 100 m³/s	Garonne tidale (Bordeaux) : 200 - 300 m³/s
EXPULSION DU BOUCHON VASEUX AMONT	
Dordogne tidale (Libourne) : 120 - 220 m³/s	Garonne tidale (Bordeaux) : 350 - 610 m³/s



Stagnation annuelle du bouchon vaseux en fonction des débits[27] *(Jalon Rojas, 2016)*

La « qualité » du bouchon vaseux

Températures

Depuis 40 ans, Les températures des eaux relevées dans les réseaux SOMLIT puis MAGEST témoignent de l'impact du changement climatique et confirment l'élévation progressive de la température moyenne des eaux estuariennes. **Ainsi les températures moyennes des eaux estuariennes ont augmenté de 1,5 °C en moyenne annuelle, avec un réchauffement estival plus prononcé de 2,3°C[21].** Lors des périodes de grande chaleur, la température des eaux peut atteindre **des niveaux extrêmes : 29°C en juin 2017 à Cadillac, 29,3°C en août à Branne (Dordogne)** et probablement au-delà de 30°C pendant les canicules de 2003 et 2006.

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre
TEMPÉRATURE (en °C)	< 20	≥ 20 et 23	≥ 23 et 28	≥ 28

Température et écosystème *(IRSTEA)*

Oxygène

Au début des années 1980, les eaux estuariennes étaient considérées comme bien oxygénées[34-40]. L'oxygénation est en partie liée à la dynamique hydro-sédimentaire. En aval, à partir de Pauillac, les eaux estuariennes sont toujours bien oxygénées, quelle que soit la saison, avec des valeurs mensuelles moyennes comprises entre 7 et 11 mg/l. **En amont,** entre Pauillac et le bec d'Ambès et **dans l'estuaire fluvial,** les eaux présentent des valeurs mensuelles moyennes qui varient plus largement, **entre 3 et 14 mg/l dans la Garonne et entre 5 et 14 mg/l dans la Dordogne.**[21]

L'oxygène dans l'eau

L'oxygène dissous dans l'eau provient de l'oxygène atmosphérique. Les échanges entre l'air et l'eau s'équilibrent et la teneur de l'eau en oxygène dissous est dépendante de la température de l'eau, de la ventilation des eaux de surface, de la dynamique verticale des masses d'eaux et de l'activité bactérienne dans la colonne d'eau (elle-même dépendante de la quantité et de la qualité de matières organiques). L'oxygénation sera meilleure si la température est faible, le vent est fort, le renouvellement de l'eau important et l'activité bactérienne faible. A l'inverse, **les fortes températures associées à un faible renouvellement des eaux (et peu de vent) et à un grand stock de matières organiques, labiles* (facilement biodégradables) en particulier, provoquent une baisse de l'oxygénation des eaux.** Le risque est donc fort en été pendant les marées de mortes eaux.

Dans l'ensemble de la « zone estuaire », en hiver et avec des débits conséquents, l'oxygène ne pose aucun problème. Par contre, en été, **lorsque la température dépasse 25°C, que le débit des fleuves est faible** (<200 m^3/s pour la Garonne, 80 m^3/s pour la Dordogne), **et lors des jours successifs d'affaiblissement des coefficients de marée, l'oxygène chute dangereusement,** en particulier **dans la zone métropolitaine devant laquelle les masses d'eau peuvent faire jusqu'à 16 passages** (4 jours de marée de mortes eaux) se chargeant à chaque passage des effluents urbains. Les rejets de la métropole bordelaise équivalent alors par ce cumul à ceux d'une zone urbaine de plusieurs millions d'habitants. Après les traitements en stations d'épuration (optimisés depuis 30 ans), les eaux rejetées portent un reliquat de matières organiques associées à un cortège bactérien et ils sont moins dilués dans un volume amoindri par les faibles débits. Les résultats de MAGEST ont clairement identifié que **la conjonction de températures > 26°C, de débits < 100 m^3s^{-1}, de coefficients de marée < à 60 et des rejets urbains, entrainait un risque important d'hypoxie dans les eaux autour de Bordeaux[41-42],** où les valeurs les plus faibles ont été mesurées autour de la marée basse.[41-42]

2006 : Année extrême … parmi d'autres.

Depuis quelques années, des « percussions climatiques » ont plus ou moins impacté la « zone estuaire » : tempêtes de 1999 et 2010, canicule en 2003 et 2006, étiage printanier en 2017, … Chacun de ces évènements climatiques extrêmes a affecté l'écosystème de l'estuaire. Dans l'estuaire amont et plus particulièrement sur l'agglomération bordelaise, la baisse maximale des teneurs en oxygène, 1,2 mg/l à Bordeaux en juillet 2006 a provoqué une prise de conscience de la « menace » désormais annuelle de désoxygénation des eaux et d'une dégradation de plus en plus flagrante de l'écosystème estuarien.

Le bouchon vaseux : réacteur biogéochimique

Dans les eaux sombres du bouchon vaseux, les matières organiques qui y sont concentrées, sont dégradées et minéralisées par une intense activité bactérienne consommatrice d'oxygène[43]. Plus le bouchon vaseux est « épais », chaud et riche en matières organiques labiles naturelles ou urbaines, plus la teneur des eaux en oxygène décroit.

Pour la Garonne, c'est donc autour de Bordeaux que la minéralisation* et la chute d'oxygène induite sont maximales. Et son impact se propage sur une vingtaine de kilomètres en amont et en aval. A travers l'accroissement de la floculation, la remontée occasionnelle de la salinité fait baisser un peu plus l'oxygène.

Pour la Dordogne à Libourne, nettement moins peuplée (26 000 habitants) que Bordeaux, et plus éloignée de l'embouchure (120 km), les rejets ont moins de répercussions sur l'oxygénation.

Oxygène et écosystème *(IRSTEA)*

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
CONCENTRATION EN OXYGÈNE DISSOUS (en mg/L)	> 7	5 - 7	3 - 5	2 - 3	< 2

Lors des remises en suspension de la crème de vase désoxygénée[44] par les courants (de flots en particulier) ou occasionnellement lors des dragages et clapages en Garonne, les sédiments et leurs matières organiques associées passent de conditions anoxiques à un milieu oxygéné. Les 24 heures suivantes, **les bactéries minéralisent 5 fois plus rapidement et accroissent ainsi la sous-oxygénation**[44].

La Garonne respecte peu le SAGE estuaire

Le SAGE estuaire a fixé des objectifs de nombre maximal de jours consécutifs à moins de 5 mg/l (moyenne journalière) en oxygène dissous dans l'eau : **9 jours maximum consécutifs pour la Garonne aval** et **4 jours maximum consécutifs pour la Dordogne aval.**[21]
Entre 2004 et 2017, **pour la Garonne à Bordeaux, toutes les années,** excepté l'année humide de 2013, **ont connu des dépassements très importants** du nombre de jours à moins de 5 mg/l, **jusqu'à 38 jours en 2017 dont 16 jours consécutifs.** Pour la Dordogne à Libourne, ces objectifs ont été atteints chaque année.

Rôle du bouchon vaseux dans la dynamique des polluants

Les argiles et les matières organiques du bouchon vaseux sont accompagnées de divers polluants venus des bassins versants amont et estuariens, et des zones urbaines et industrielles des bords de Garonne, de Dordogne et de Gironde. La hausse des températures de l'eau et l'hypoxie* associée sont des facteurs aggravant les effets nocifs des polluants **avec l'accroissement du rythme ventilatoire des organismes aquatiques et par la même occasion une plus grande bioaccumulation potentielle et un risque accru de toxicité du milieu et d'effets cocktails** (par leur nature, certains de ces composés peuvent accroitre leur toxicité en interaction avec les autres composants du milieu ou d'autres polluants).

> Métaux

L'Argent, le Cadmium et le Nickel sont les métaux les plus problématiques dans la « zone estuaire »[45]. Même si les flux de Cadmium, pollution historique et majeure de l'estuaire, ont diminué, sa présence reste problématique malgré les efforts réalisés pour atténuer la source principale sur le Lot[46]. Dans l'estuaire aval, les fortes salinités (> à 15 g/l) rendent le Cadmium et l'Argent bio-disponibles pour les filtreurs. Ainsi, leurs teneurs dans les huitres sont les plus élevées des zones littorales françaises. L'argent affecte aussi les anguilles et les crevettes. **Les concentrations estivales de ces trois métaux aggravent les effets de l'hypoxie***[47].

Des métaux lourds aux provenances multiples

Les crues amènent plus de 60% des flux de métaux dans l'estuaire[39]. Mais au niveau de **la métropole bordelaise,** les bassins versants locaux (Jalle, Peugue, Eau Bourde, ...) et les rejets des 7 stations d'épuration ont des **apports non négligeables.** Pour des débits de Garonne faibles (<200 m³/s), ces apports augmentent les flux en Garonne de 300% pour l'argent, 80% pour le Zinc, 45% pour le Cuivre et le Plomb, 5% pour le Cadmium.

> PCB*, pesticides et médicaments

Pour les PCB, bien que les valeurs mesurées dans la colonne d'eau et dans les sédiments de l'estuaire soient faibles, **les valeurs relevées dans les poissons sont les plus élevées des estuaires français**[45]. La concentration en PCB, est de plus en plus importante en montant dans la chaine trophique. Les absorptions se font probablement lors des remises en suspensions des sédiments. Les PCB passent alors dans la phase dissoute et sont consommés par le plancton[46].

En provenance des bassins amont, on observe la prédominance des **pesticides issus de la culture du maïs** (métalochlore et métabolites). L'autre molécule majeure mise en évidence est le **fipronil**, utilisée et rejetée en milieu urbain[45]. Les **molécules médicamenteuses** sont majoritairement **issues des bassins amont** pour certaines comme la caféine et le primidone (barbiturique) **et des rejets de stations d'épuration métropolitaines** pour d'autres, notamment le losartan (anti-hypertension) ou l'abacavir (anti VIH). Les apports amont à l'estuaire sont globalement dus à 70% par la Garonne et 30% pour la Dordogne et l'Isle avec des parts variables selon les molécules[45].

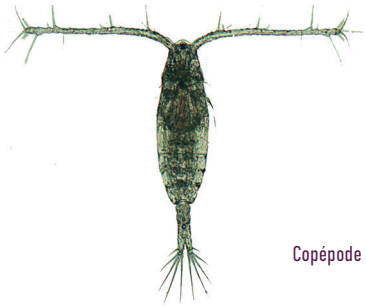
(Eric Veyssy)

Les conséquences sur l'écosystème

L'écosystème estuarien a connu deux transitions abruptes autour de 1987 et de 2001 nettement ressenties par les communautés de zooplancton et de poissons de l'estuaire de la Gironde[48]. Ces ruptures biologiques sont liées à des changements hydro-climatiques régionaux relativement abrupts : baisse des débits et hausse des températures. Depuis 30 ans, la biodiversité estuarienne s'est nettement fragilisée.

Le zooplancton

Les abondances et la diversité sont relativement faibles dans la « zone estuaire ». Quatre espèces natives composent la communauté zooplanctonique autochtone de l'estuaire : des copépodes (Eurytemora affinis et Acartia bifilosa) et des mysidacés (Neomysis integer et Mesopodosis slabberi). Une espèce de copépode exotique introduite dans les années 1980 (Acartia tonsa), s'est développée jusqu'à atteindre aujourd'hui des biomasses équivalentes à celle de l'espèce dominante Eurytemora affinis[30-48]. Leurs répartitions spatiales ont également évolué, avec **depuis 30 ans, une remontée des organismes planctoniques vers l'amont en réponse au réchauffement des eaux estuariennes et à la marinisation du système.** Ces deux tendances ont favorisé l'expansion de l'espèce exotique Acartia tonsa[24], qui jusque-là restait confinée à un espace réduit autour des eaux réchauffées des rejets de la centrale nucléaire de Braud et Saint Louis.



Copépode

Le bouchon vaseux, zone d'amplification des risques éco-toxicologiques.

En étiage, lorsque la salinité remonte jusqu'au bouchon vaseux amont, elle favorise la bioaccumulation du Cadmium dans les copépodes. Ce phénomène de biodisponibilité accrue en étiage se vérifie également pour les PCB et les autres micropolluants métalliques et organiques. La Garonne estuarienne avec son bouchon vaseux additionnel est alors une zone de vulnérabilité accrue[41-45-46-47].

La crevette blanche

Les femelles des crevettes blanches migrent en été vers l'amont pour pondre. Les larves naissantes sont très sensibles à l'hypoxie et meurent en dessous de 3 mg/l d'O_2. Ces dernières années, **la baisse des stocks est possiblement due aux problèmes d'hypoxie du bouchon vaseux amont[41].** On observe par ailleurs des déformations des carapaces en lien probable avec **les micropolluants dont les effets sont accrus au sein du bouchon vaseux amont[49].**

Les poissons migrateurs en danger

L'estuaire est une zone de passage obligatoire pour les migrateurs, de nourricerie pour les poissons marins et d'eau douce. C'est **un couloir de migration et d'adaptation physiologique progressive le long du gradient de salinité.**

Selon les pêcheurs, quelques lâchers brutaux de barrage ont dégradé des frayères de migrateurs et lors des années de grandes sécheresse (2003, 2006, ...), **les étiages très sévères en ont exondé*** en Garonne comme en Dordogne, les **rendant inaccessibles** pour les poissons. **Le premier effet du bouchon vaseux sur les poissons est l'abrasion des branchies.** Ce phénomène les affecte même pour des concentrations de quelques dizaines de mg/l. **Les conséquences sont d'autant plus fortes que les concentrations s'élèvent à plus d'1 g/l. Cet effet s'accentue lorsque les eaux sont chaudes et moins oxygénées en raison de la plus forte ventilation, faisant passer par les branchies encore plus de particules argileuses abrasives.**

De plus, la **baisse d'oxygénation des eaux met directement en danger plusieurs espèces.** Parmi les migrateurs, certaines espèces sont intrinsèquement plus sensibles aux baisses d'oxygène que d'autres. **Les saumons y sont probablement les plus sensibles,** mais ils dévalent au printemps,

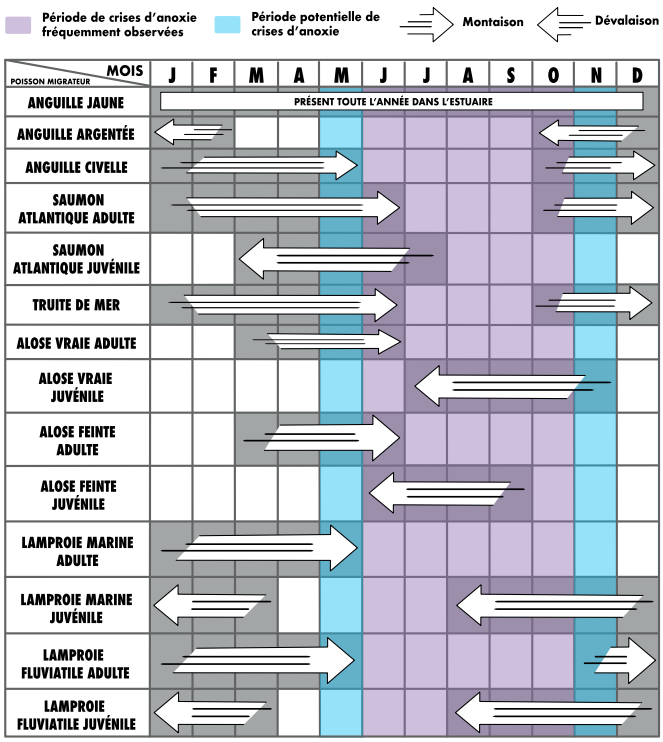
Le gobie, régulateur menacé !

Dans l'estuaire, deux espèces de gobies sont autochtones et strictement inféodées à la « zone estuaire » avec dans les deux cas l'extraordinaire capacité d'adaptation à des salinités variables : le gobie « buhote » se répartit de l'océan à Bordeaux et le gobie « tacheté » de Mortagne jusqu'à Golfech. Méconnus, ces poissons « fourrage » de l'estuaire sont sensibles à l'hypoxie potentielle. Même s'ils sont capables de résister sans problème apparent aux premiers paliers de baisse d'oxygène, ils montrent des signes de perte d'équilibre à des niveaux d'oxygène dissous de 3 mg/l et ils succombent en deçà d'un seuil de 2 mg/l.

Gobie buhote

période pendant laquelle le risque est moindre. Même s'ils sont un peu plus résistants, **les esturgeons (dont on attend les premiers retours) pourraient être perturbés lors de leur dévalaison** située entre septembre et décembre. Septembre, voire octobre étant une période délicate, ils pourraient être contraints à retarder leur migration vers l'océan. Les lamproies sont moins sensibles aux baisses de teneurs en oxygène dans les eaux.

Calendrier de migrations des poissons à travers l'estuaire *(IRSTEA, T. Boniface)*



Depuis 1996 et plus encore depuis 2003, la chute des stocks d'alose a été synchrone avec la remontée du bouchon vaseux, alliée à des **chutes récurrentes des teneurs en oxygène. Les aloses (alose vraie et alose feinte) sont des espèces très sensibles aux chutes des teneurs en oxygène.** Les juvéniles se développent en eau douce durant deux à quatre mois avant de dévaler et rejoindre l'océan aux alentours d'août et septembre. Les températures optimales lors de ce stade sont comprises entre 15 et 27°C[50]. Ils sont très sensibles aux **températures plus hautes** et aux baisses d'oxygénation, pouvant mettre en jeu leur survie. Les seuils minimaux en oxygène pour garantir une probabilité de survie importante se situent à 3,8 et 2,2 mg/l à 25 et 20°C respectivement[50]. Or, **l'avalaison des alosons se déroule durant la période la plus critique pour l'oxygénation des eaux, avec un pic de dévalaison au mois d'août, où la température moyenne est la plus forte et a connu la plus forte hausse lors des 30 dernières années. La présence de contaminants,** libres dans l'eau, adsorbés sur les particules ou stockés dans les sédiments, et la présence de silures glanes sur les frayères, constituent **un risque aggravant** pour les alosons.

L'effondrement des populations de poissons migrateurs s'est accompagné d'une augmentation de l'abondance des juvéniles de poissons marins liée au processus de marinisation de l'estuaire de la Gironde[48]. Dans le même temps, quelques espèces marines observées occasionnellement auparavant ont totalement disparu (la raie pastenague pour exemple).

L'écosystème de l'estuaire de la Gironde a connu une évolution non linéaire ces trente dernières années avec deux ruptures nettes. La première, à la fin des années 1980, a été synchrone avec une augmentation nette des températures de surface de l'océan Atlantique Nord[51]. La seconde au début des années 2000, correspond à des modifications des circulations atmosphériques, induisant une diminution et une modification des répartitions saisonnières des précipitations sur le bassin versant et par voie de conséquence, une baisse des débits fluviaux[48]. Il existe des effets de seuil dans les réponses physiologiques des organismes aux contraintes environnementales et anthropiques. Le risque d'atteinte de ces seuils augmente au sein du bouchon vaseux, qui accentue les risques de désoxygénation et de concentration de polluants, d'autant plus si la température des eaux est élevée.

Les pêcheurs professionnels d'estuaire en grande précarité

Comme sur tous les fleuves, **les pêcheurs** sont les sentinelles et les témoins dépendant des équilibres écologiques du système fluvial. Depuis 40 ans, **ils subissent la diminution des stocks de poissons notamment des migrateurs.** Les dégradations du milieu estuarien sont en cause. **La remontée et la stagnation du bouchon vaseux dans les zones amont (Garonne et Dordogne estuariennes) saisonnièrement accompagnées par des baisses d'oxygénation et des effets cumulés des polluants, sont un élément notoire.** Ces baisses de stocks ont précarisé les pêcheurs. **La production de la filière pêche a été divisée par cinq et le nombre de pêcheurs par trois depuis 1978.** Et de plus en plus de pêcheurs ont recours à une autre activité professionnelle. L'activité de pêche professionnelle de la « zone estuaire » reste néanmoins un élément économique, patrimonial et culturel structurant, de la vie sociale en bord d'estuaire[41]. Mais pour combien de temps encore ?

Bateau de pêche *(Sabine Becquey)*

Le « Bouchon vaseux » face aux perspectives climatiques et sociétales

(Eric Veyssy)

Les évolutions climatiques et sociétales ont déjà et auront des conséquences notables sur les apports hydro-sédimentaires, leur dynamique et leurs impacts écologiques dans la zone estuaire. Ces conséquences seront plus ou moins marquées selon l'ampleur du réchauffement climatique, les comportements sociétaux et les choix d'aménagements et de gestion.

Les éléments « naturels » : projections

Projections de températures sur le bassin versant

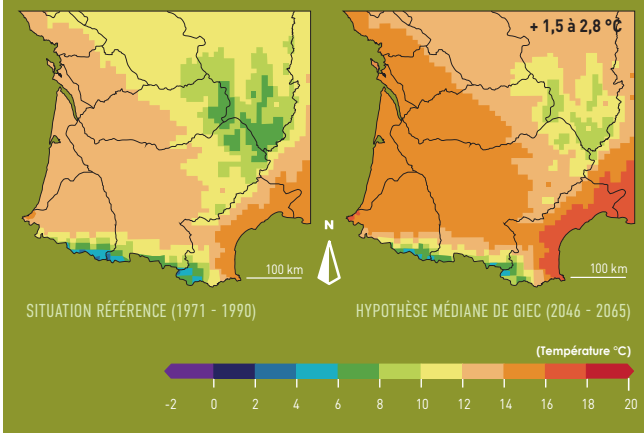
Au niveau global, le réchauffement climatique est sans équivoque. Depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis au moins deux siècles. **Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2017 constituent probablement la période de 35 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1400 ans. Les 5 années les plus chaudes sont dans l'ordre 2016, 2014, 2017, 2011, 2015 précédant 2003,** 1994, **2006,** 2002, 2000, 1997, 1990[28].

Avec des mailles géographiques plus précises (8 km), les modèles climatiques régionaux indiquent que sur le bassin de la Garonne et de la Dordogne, **les températures pourraient augmenter de 1,5 à 2,8°C d'ici 2050**, selon les scenarii climatiques. Cette tendance serait **plus marquée en été, sur la vallée de la Garonne et les Pyrénées** en particulier qui subiraient ce réchauffement un peu plus fortement que le Massif Central. Lors des grandes canicules, les extrêmes pourraient culminer à près de 50°C[52].

Les hausses de température vont accentuer l'évaporation et l'évapotranspiration* : + 10 à 30 % d'ici 2050[36]. Les températures des eaux seront logiquement plus élevées en lien direct avec la hausse des températures de l'air et l'augmentation du temps de résidence des eaux sur le continuum fluvial, augmentation due à d'éventuelles retenues supplémentaires et aux **remplissages précoces des réservoirs pour compenser les moindres apports des fontes des neiges et garantir les niveaux d'eau pour les usages touristiques.**

A la fin du 21ème siècle, l'augmentation de la température à la surface du globe serait plus élevée de 1,5 °C à 4°C[28] selon les émissions de gaz à effet de serre et les réponses de la « machine climatique terrestre ». Les climats régionaux continueront de présenter une variabilité interannuelle à décennale. Pour le bassin de l'estuaire de la Gironde, les hausses de températures, à l'horizon 2100, vont de 1 à 4°C[22].

Évolution de la température moyenne quotidienne sur l'année dans le sud-ouest
(source AEAG d'après www.drias-climat.fr)

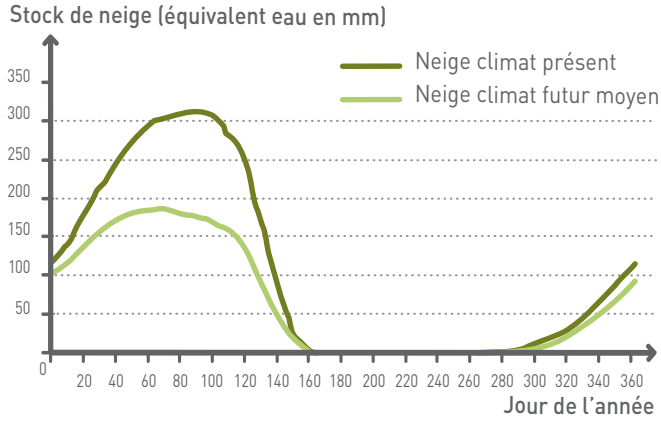


Les végétaux répondront à ces conditions plus sèches et plus variables en réduisant leurs pertes d'eaux (changement de végétation et adaptation progressive) atténuant un peu les effets de la hausse des températures.

Projections de précipitations

Les glaciers pyrénéens ont perdu 85% de leur surface depuis 1850[53] et la moyenne montagne a perdu 10 à 15 jours d'enneigement entre 1971 et 2008[54]. La **fonte plus précoce et plus rapide du manteau neigeux** diminue les possibilités de soutien d'étiage naturel à partir de la montagne.

Stocks de neige à 2000 m d'altitude en climat présent (1975-2005 en vert foncé) et en climats futurs (moyenne des modèles pour 2015-2045 en vert clair)[51]



Les modèles climatiques sont plus incertains pour les précipitations que pour les températures. Les approximations obligatoires qu'ils nécessitent (reliefs, échelles des mailles...) les rendent plus incertains localement. **Les modèles régionaux indiquent une diminution des précipitations neigeuses de 35 à 60% à l'horizon 2050[36] et des pluies efficaces de 0 à 15% à l'horizon 2050[36], donc moins d'écoulement et d'infiltration[51].**

Les variations de la température de surface de l'océan Atlantique Nord (Oscillation atlantique multi-décennale*) impactent les débits, notamment de printemps, en particulier pour les rivières pyrénéennes. Elle suit des cycles de 30 ans environ et devrait être plus favorable entre 2030 et 2060. Dans cette période, elle atténuerait les baisses de pluviométrie et de débits, même si son impact resterait néanmoins moindre que la tendance au réchauffement[55-56].

Par ailleurs, même plus rare, il est possible que les précipitations soient **plus intenses (risques de crues méditerranéennes, notamment sur le bassin du Tarn)[36]**, ce qui pourrait accroitre l'érosion et les transports des polluants vers l'aval.

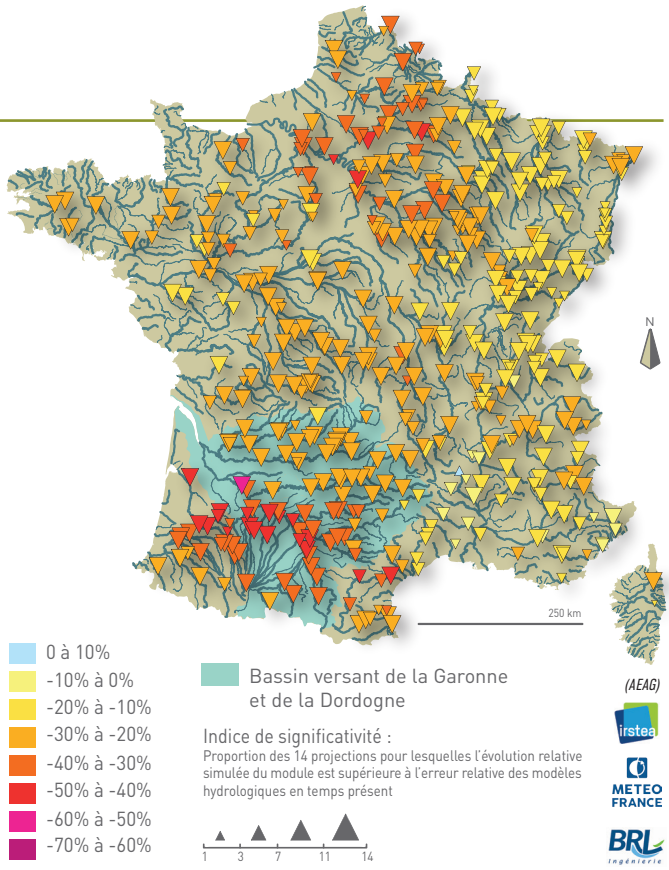
Le réchauffement climatique, c'est aussi et avant tout l'augmentation de la variabilité... et des incertitudes[46].

Les modifications des cycles régionaux de l'eau en réponse au réchauffement au cours du 21ème siècle ne seront pas uniformes. **Les modèles indiquent que le contraste de précipitations entre régions humides et régions sèches ainsi qu'entre saisons humides et saisons sèches augmenterait,** bien qu'il puisse exister des exceptions régionales[28]. Pour l'hydrologie des fleuves de zones tempérées, comme la Garonne et la Dordogne, variable par nature, leurs irrégularités seront accentuées. **Les projections de précipitations régionales étant trop contrastées voire contradictoires, les projections de débits** sont basées sur les projections de température plus consensuelles entre modèles avec comme paramètre majeur l'évolution de l'évapotranspiration.

Projections de crues et d'étiages potentiels

Les débits régionaux subiraient une baisse de 10 à 40 %[57] selon les zones, les modèles et les scenarii d'émissions de gaz à effet de serre[54]. Les apports d'eaux de fonte des neiges seront réduits, ayant une répercussion sur les débits printaniers en baisse probablement très nette. Les bassins pyrénéens seraient ainsi plus affectés que les bassins du Massif Central. La dynamique des écoulements sera fortement modifiée en période de basses eaux : **les étiages seront plus précoces, plus sévères et plus longs[51]** avec des reprises hydrologiques automnales plus tardives.

(Eric Veyssy)



Évolutions relatives possibles des débits moyens annuels entre 1961-90 et 2046-65[57]

Conséquences sur la qualité des eaux estuariennes

Le nombre de jours avec un débit inférieur à 100 m^3/s dans la Garonne aval tendrait à augmenter ce qui entraînera **une plus grande stagnation d'eaux plus chaudes, limitant leur ré-oxygénation en période d'étiage.** Ce phénomène pourrait être accentué par l'augmentation de la pression anthropique avec l'augmentation du volume d'eaux usées rejetées liées à la hausse de population, et de la proportion des eaux retenues ou pompées en amont pour l'électricité et l'irrigation. Les effluents seront moins dilués et le risque d'effets cocktail augmenterait.

Ces étiages précoces et prolongés augmenteront la fréquence et l'intensité des mascarets contribuant à l'épaississement et à la remontée du bouchon vaseux.

Les éléments « naturels » aval : niveau marin, tempêtes

Le niveau moyen mondial des mers continuera à s'élever au cours du 21ème siècle et il est très probable que cette élévation se produira à un rythme plus rapide que celui observé entre 1971 et 2010, en raison du réchauffement accru de l'océan et de l'augmentation de perte de masse des glaciers et des nappes glaciaires. Il s'élèverait ainsi de 15 à 30 cm à l'horizon 2050 et de 30 cm à 1 m en 2100[28]. **La marinisation de l'estuaire et la remontée du bouchon vaseux pourraient s'intensifier.**

Les gros coups de vents et les tempêtes remodèlent la bathymétrie de l'estuaire aval qui détermine les voies d'expulsion du bouchon vaseux vers l'océan. Leurs incidences pourraient s'accentuer et progresser vers l'amont avec quelques centimètres de niveau marin littoral en plus. Les huit tempêtes successives de moyenne intensité de 2014 en ont apporté un indice avec, entre autres, la disparition définitive de l'ilôt de Trompeloup et de la quasi-totalité de la partie émergé du banc de Plassac.

Les éléments anthropiques : projections

La première des évolutions en cours est l'**augmentation globale de la population** sur le bassin versant et particulièrement dans **les zones urbaines de Toulouse, d'Agen et de Bordeaux pour la Garonne et de Libourne pour la Dordogne.** Cette augmentation accentue les demandes potentielles en eau. Les occupations et utilisations des espaces seront liés à des choix sociétaux.

Occupation des sols sur les bassins versants

Les choix et évolutions dans l'occupation des sols **détermineront le potentiel d'érosion et la perméabilité des sols.** Le transfert sédimentaire vers l'aval en dépend pour partie. Dans les zones vulnérables à l'érosion, la nudité des sols en hiver accroit les transferts de sédiments et de pesticides vers l'estuaire. Le respect ou non de la bande de 5 mètres végétalisée le long des cours d'eau et des fossés permettra de réduire les polluants et de mieux retenir les terres.
Par ailleurs, l'augmentation de population s'accompagnera de l'accroissement des zones imperméabilisées. Un accroissement du ruissellement par temps de pluie et du transfert de micropolluants urbains en découlera.

Retenues et prélèvements d'eau : agriculture, eau potable, industries

La baisse des pluies efficaces et des débits d'été pourrait être compensée par des stockages supplémentaires dans les barrages existants et les retenues collinaires, voire la construction de nouvelles retenues. **La hausse de l'évapotranspiration pourrait, elle, être compensée par des prélèvements supplémentaires.** En conséquence de cette **double compensation** éventuelle, **les débits seraient affectés et diminués un peu plus encore. Court-on le risque d'un emballement** qu'ont connu d'autres bassins ayant eux aussi été confrontés à des évolutions climatiques marquées associées à des demandes agro-industrielles importantes : moins d'eau, plus de retenues et de prélèvements, plus d'évaporation, moins d'eau en aval, pollutions plus concentrées, etc… ?[37-58-59-60]

L'augmentation de la population sur le bassin versant de l'estuaire (+ 0,9% par an aujourd'hui) est estimée à 1,5 million de personnes à l'horizon 2050[61], en grande partie dans les deux grandes métropoles Bordeaux et Toulouse. Si les consommations individuelles et collectives ne continuent pas à baisser significativement, elle induira une légère hausse des consommations en eau potable et donc des prélèvements entre Agen et Toulouse, notamment. A cela, s'ajoutera une augmentation des volumes des effluents urbains.

L'énergie hydroélectrique n'étant pas strictement destinée à sa région de production, la demande en électricité sera dépendante de l'évolution de la population nationale, des choix nationaux de production et des comportements des consommateurs. Si les consommations augmentent, les besoins en eau pour les centrales hydro-électriques seront supérieurs et les barrages seront remplis plus tôt pour compenser une plus faible fonte des neiges et maintenir les niveaux de loisir. Cela générerait une baisse supplémentaire des débits aval au printemps par rétention et en été par évaporation.

Les prélèvements et les **consommations industrielles** évolueront selon les demandes socio-économiques. Au-delà des volumes prélevés relativement modestes, l'enjeu porte surtout sur le traitement des effluents modestes dont la dilution moindre accroitra les impacts potentiels.

Ces facteurs cumulés représentent des risques de diminution des débits et en conséquence de stagnation, remontée et détérioration de la qualité du bouchon vaseux avec plus de pollutions potentielles dans des volumes d'eau réduits et réchauffés.

Entretiens et aménagements dans la zone estuaire

A court terme (2018-2028), le nouveau plan de dragage du Grand Port Maritime de Bordeaux devrait amoindrir les impacts des dragages d'entretien du chenal de navigation sur l'écosystème avec des décalages de dépôts et le respect de la « fenêtre biologique » printanière du 15 mai au 15 juillet (interruption des clapages* pendant deux mois en aval). A plus long terme (2050), l'évolution du trafic portuaire et sa répartition spatiale relative entre Le Verdon et Bassens détermineront les dragages et leurs impacts.

Les faits marquants influant sur le bouchon vaseux et son impact biologique aujourd'hui et demain peuvent être résumés par quelques tendances fortes qui risquent de s'accentuer dans les années et décennies à venir : affaiblissement des débits fluviaux, hausse de la température, hausse des pressions anthropiques diverses avec pour résultante un bouchon vaseux « additionnel » amont persistant prenant une part significative sur la dégradation générale de l'écosystème estuarien, qui depuis plus de 30 ans est marqué par un état de très grande fragilité. Les projections laissent craindre des atteintes aggravées à ses capacités biologiques.

(Eric Veyssy)

Comment freiner les processus et s'adapter ?

(Asa Photos - SMIDDEST)

Malgré ce constat et ces perspectives d'amplification de certains éléments majeurs d'influence et de perturbation, la gestion des bassins versants et de l'estuaire devra tendre, « les yeux ouverts », vers de nouveaux équilibres hydro-sédimentaires et biologiques, rompus par les évolutions hydro-climatiques et biologiques des 40 dernières années. Au niveau du bassin versant global, l'atteinte de ces objectifs passera par un mode de gestion et des prises de décisions concertées à partir d'une approche globale du bassin hydrographique.

Débits et nappes d'accompagnement

L'objectif devrait être de maintenir des débits aptes à la continuité de la capacité biologique de l'estuaire : au printemps, laisser s'écouler des débits évitant l'installation précoce (>100 m³/s pour la Dordogne et >300 m³/s pour la Garonne) **du bouchon vaseux amont et en automne favoriser son expulsion vers l'estuaire aval** (>220 m³/s pour la Dordogne et >610 m³/s pour la Garonne). Pour cela, il serait nécessaire de préserver et restaurer les nappes et de **réduire les stockages, notamment de printemps, et les prélèvements en adaptant les pratiques culturales, énergétiques et touristiques à la ressource en baisse.**

Sur l'ensemble des territoires des bassins versants, en zones urbaines et rurales, la capacité d'infiltration des eaux de pluies et de fonte de neiges doit être maintenue ou restaurée pour constituer les nappes souterraines d'accompagnement et limiter l'évapotranspiration et l'érosion des sols. Ces nappes permettent de stocker des volumes d'eau à température relativement constante et faible (12°C) et s'écoulant vers les rivières. L'occupation, l'organisation des espaces, les pratiques agro-environnementale, les choix des plantes cultivées devront avoir en perspective de s'adapter aux effets du réchauffement et de réduire les apports sédimentaires et de favoriser les infiltrations des précipitations et des écoulements. La **remise en connexion de zones humides, bras morts, lits majeurs** favorisera l'alimentation des nappes et aura un très grand intérêt écologique en tant que zones de frayères et de nourricerie.

Pour atteindre des débits de chasse du bouchon vaseux amont vers l'estuaire aval et l'océan ou à minima maintenir des débits supérieurs aux conditions d'installation précoce du bouchon vaseux amont, la gestion des écoulements devrait ainsi se faire autour de quelques axes :

- **Tendre vers des rythmes naturels des débits fluviaux,** en respectant leur répartition dans l'année et la qualité des eaux transportées,
- **Plafonner et réduire les stockages d'hiver et de printemps** pour maintenir des débits capables de réalimenter des nappes alluviales qui constituent une part de l'écoulement d'étiage en aval,
- Redonner de la « liberté » aux cours d'eau pour **augmenter les surfaces d'échange avec les nappes d'accompagnement.**

Exemples à suivre ou à amplifier ?

Selon le SAGE Vallée de la Garonne, les surfaces irriguées ont diminué de 30% sur leur territoire en moyenne entre 2000 et 2010. Les orientations du SDAGE Adour-Garonne et du Plan de Gestion d'Etiage Garonne-Ariège ont contribué à cette baisse. L'évaluation systématique des prélèvements permet de mieux estimer leur volume et de suivre leurs évolutions.

A Londres, un **collecteur** rassemble les effluents de toutes les stations d'épuration et les **rejette dans la Tamise très en aval de l'agglomération** londonienne.

Le Plan de Gestion des Etiages Garonne-Ariège et le SDAGE Adour-Garonne recommandent des économies d'eau.

En Gironde, les **actions de sensibilisation** aux économies d'eau (SAGE Nappes Profondes de Gironde) menées depuis 15 ans, **ont permis de réduire significativement le risque sur la ressource en eaux souterraines.**

La production d'électricité avec des stations de **pompage-turbinage** permet de réduire l'impact sur les débits avals. L'exemple de la centrale de Montezic (Truyère, bassin du Lot) pourrait être multiplié.

Réduire les rejets polluants : agricoles, urbains, industriels

Les mêmes polluants dans un volume réduit et avec une température plus élevée auront un impact plus marqué. **En amont, il est donc fondamental de maîtriser les utilisations, les dispersions et la circulation dans les fleuves et les rivières des effluents agricoles, industriels et urbains.** Dans la « zone estuaire », la **métropole bordelaise** reste le point le plus sensible. Pour minimiser les impacts des rejets urbains plus volumineux, il sera nécessaire de mieux décanter les rejets pluviaux urbains d'été et de **traiter mieux les eaux usées urbaines** sur le plan des polluants chimiques (pendant la période à risques, de mai à octobre) et d'envisager de **décaler les rejets plus en aval** (Ambès) pour **limiter leur stagnation au niveau du bouchon vaseux amont estival**[44].

Adaptation à une ressource moindre : tous concernés

Les besoins en eau satisfont des besoins essentiels au niveau de vie et au confort souhaités. Mais une partie des **consommations directes ou indirectes** d'eau est évitable par des comportements individuels et collectifs plus économes en eau domestique et en électricité et des usages raisonnés. De même, les risques accrus de dégradation de qualité et d'effets cocktail au niveau du bouchon vaseux peuvent être amortis par des **usages raisonnés des produits dangereux :** pesticides en ville (dispositif 0 pesticides) et par les particuliers, traitement de façade (diuron). Ces nouvelles orientations supposent une approche globale de la **gouvernance au niveau du bassin versant de l'estuaire et des interactions régulières entre les décideurs, les acteurs socio-économiques et les citoyens**, avec notamment une concertation autour des objectifs du SDAGE, voire sa révision avec quelques axes d'actions potentielles pour limiter les nuisances en aval.

Bibliographie majeure citée

BIBLIOGRAPHIE

1. Londeix L. & Tastet J.-P. (1997). L'Aquitaine sortie des eaux. Cartes d'évolution de la ligne de rivage, depuis 100 millions d'années. Cap Sciences éd., 17 p.
2. Klingebiel A. et Tastet JP, 1995, «Histoire géologique de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde», actes du 3ème colloque du conservatoire de l'estuaire de la Gironde
3. Strabon, 3ème siècle, Géographie, IV, 2,1
4. René P., 2014, Le suivi des glaciers dans les Pyrénées françaises, Revue La Météorologie n°85, p27-34.
5. Pardé M., 1935, le régime de la Garonne, Le Régime de la Garonne. In: Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, tome 6, fascicule 2-3, 1935. pp. 105-262.
6. Baumgarten, 1848, Notice sur la portion de la Garonne en aval de l'embouchure du Lot, Ann. des Ponts et Chaussées, pp. 1-157.
7. Glangeaud L., 1938. - Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde. Buil. Soc. Géol. France, (5), 8, p. 599-631.
8. Allen P., 1972. Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse. Université de Bordeaux.
9. Artélia, 2016 – Elaboration du Plan de Gestion des Sédiments de Dragage » rapport d'état des lieux – fiche thématique n°1 « hydro-sédimentaire – bouchon vaseux – oxygène dissous ». SMIDDEST-GPMB.
10. Jalón-Rojas et al., 2015. Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions
11. Latouche C., 1971 Les argiles des bassins alluvionnaires aquitains et des dépendances océaniques : contribution à l'étude d'un environnement, Thèse d'état, Université Bordeaux 1
12. Jouanneau J-M. et Latouche C., 1981. The Gironde Estuary. Contributions to sedimentology n°10, 115 pp.
13. Castaing 1981, Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. Mémoires de l'Institut de Géologie du bassin Aquitaine. 530 pp.
14. Etcheber 1986, Biogéochimie de la Garonne en milieu estuarien, mémoire IGBA
15. Veyssy E., 1998, « Transferts de matières organiques des bassins versants aux estuaires de la Gironde et de l'Adour », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1,
16. Vörösmarty C.J et al., 1997. "The potential impact of neo-Castorization on sedimend transport by the global network of rivers" IAHS Publ., vol.245, pages 261-273, 1997.
17. Coynel A. et al., 2018. Evolution des flux de MES (1994-2016) et de cadmium (1999-2016) dans le système Riou-Mort-Lot-Garonne, rapport contrat AEAG, 24 p.
18. Doxaran D. et al., 2009. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (The Gironde, France) : observations from field and MODIC satellite data. Estuarine, Coastal and Shelf Science 81 (2009) 321-332.
19. Sottolichio A., 1999, Modélisation de la dynamique des structures turbides (bouchon vaseux et crème de vase) dans l'estuaire de la Gironde Thése Université Bordeaux 1
20. Sottolichio A. et Castaing P., 1999. Synthèse de la dynamique saisonnière des structures turbides dans l'estuaire de la Gironde. C.R. Acad. Sc. Paris, Sciences de la terre et des planètes. 1999, 329, 795-800.
21. Schmidt S. (2011-2017), Etcheber H. (2005-2010) ; Rapports scientifiques annuels du réseau MAGEST.
22. Doxaran D., 2002. Télédétection et modélisation numérique des flux sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse. Université de Bordeaux.
23. Benaouda A., 2008. Dynamique saisonnière des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Gironde : modélisation opérationnelle de la réponse aux forçages hydrodynamiques. Thèse, Université Bordeaux I.
24. Saari et al. 2010. The particulate 7Be/210Pbxs and 234Th/210Pbxs activity ratios as tracers for tidal-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): Implications for the budget of particle-associated contaminants
25. Port Autonome de Bordeaux, 1883, Étude de la sédimentation dans le système Bassins à flots-Ecluses, 1883
26. Schmidt, S., et al., 2016. Le réseau MAGEST : bilan de 10 ans de suivi haute-fréquence de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde. In F. G. Schmitt & A. Lefevre (Eds.), Mesures haute résolution dans l'environnement marin côtier. Presses du CNRS.
27. Jalón-Rojas et al., 2018. To What Extent Multidecadal Changes in Morphology and Fluvial Discharge Impact Tide in a Convergent (Turbid) Tidal River.
28. GIEC, 2014 et 2018, changement climatique, rapport de synthèse
29. Eaucéa, 2009, Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde, Phase 2 : prospectives, priorités et indicateurs
30. Chaalali A., 2013, Évolution à long terme de l'écosystème estuarien de la Gironde, Thése de doctorat, Université Bordeaux 1
31. Videau JP, 2007, Pilleurs de Garonne, édition La Découvrance
32. Castaing P. et al., 2006 Evolution hydrosédimentaire du système Garonne-Gironde au cours du dernier siècle. Exploitation des données d'archives. Rapport AEAG, 49 pages.
33. Jalón-Rojas I., 2016. Évaluation des changements hydro-sédimentaires de l'estuaire de la Gironde en lien a vec les pressions sur le milieu. Thèse. Université de Bordeaux.
34. Eaucéa, 2015. Etude des debits morphogènes sur la rivière Dordogne, EPIDOR-EPTB Dordogne. 126 p.
35. Eaucéa, 2008, Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde, Phase 1 : analyse des enjeux liés à l'eau
36. Agence de l'Eau Adour Garonne, 2014, Eau et Changements climatiques en Adour-Garonne. Les enjeux pour la ressource, les usages et les milieux
37. Agence Française de la Biodiversité, 2017, Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique
38. Sottolichio A. et al 2014, Évolution hydro-sédimentaire récente de l'estuaire de la Gironde. Apport d'un modèle de transport, 13ème Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Dunkerque
39. Jalón-Rojas et al., 2018. To What Extent Multidecadal Changes in Morphology and Fluvial Discharge Impact Tide in a Convergent (Turbid) Tidal River
40. Philipps I., 1980 « Qualité des eaux dans l'estuaire de la Gironde. Répartition et comportement des sels minéraux dissous : azote, phosphore et silice ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1
41. Etcheber H., 2015 Rapports Etiage, ETude Intégrée de l'effet des Apports amont et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne – Axe 1
42. Schmidt et al., 2017. Assessing and managing the risks of hypoxia in transitional waters: a case study in the tidal Garonne River (South-West France)
43. Abril G., et al., 1999. Oxic/anoxic oscillations and organic carbon mineralization in an estuarine maximum turbidity zone (The Gironde, France), Limnology and Oceanography, 44, 1304-1315.
44. Lanoux A. « Caractérisation et rôle respectif des apports organiques amont et locaux sur l'oxygénation des eaux de la Garonne estuarienne » Thèse de doctorat, sous la direction d'Henri Etcheber, Bordeaux, Université Bordeaux 1, France, 2013.
45. Budzinsky H.., 2015 Rapports Etiage, ETude Intégrée de l'effet des Apports amont et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne – Axe 2
46. Blanc G., 2015 Rapports Etiage, ETude Intégrée de l'effet des Apports amont et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne – Axe 3
47. Baudrimont M., 2015 Rapports Etiage, ETude Intégrée de l'effet des Apports amont et locaux sur le fonctionnement de la Garonne Estuarienne – Axe 4
48. Chevillot X., 2016, Réponses fonctionnelles des écosystèmes estuariens dans le contexte du changement global. Le cas du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde.
49. Levsque B., 2018 Thèse en cours - Analyse des réponses des crevettes estuariennes (Palaemon longirostris et Palaemon macrodactylus) aux stress environnementaux au travers de biomarqueurs génétiques, biochimiques et morphologiques
50. Jatteau Ph., Fraty R. (2012) Etude de la tolérance à l'hypoxie des juvéniles de grandes aloses (Alosa alosa). IRSTEA.
51. Agence de l'Eau Adour Garonne, 2013, Garonne 2050, Étude prospective sur les besoins et les ressources en eau à l'échelle du bassin de la Garonne
52. Bador et al, 2017 Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate, Environnemental research letters
53. Moraine Association, 2016, Les glaciers des Pyrénées françaises – Cycle glaciaire 2015-16, 26p.
54. Sauquet E., 2009, Imagine 2030, climat et aménagement de la Garonne, quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ?
55. Boé J. et Habets F., 2014 Multi-decadal river flow variations in France, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 691–708, 2014
56. Sgubin G, et al. 2017, Abrupt cooling over the North Atlantic in modern climate models, Nature Communication
57. MEDDE, 2015, Explore 2070, eau et changement climatique
58. Van Loon A. et al, 2016 Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 3631–3650, 2016
59. Habets F. et al, 2014 Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 4207–4222, 2014
60. Dayon G., 2015 Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies, Thèse de doctorat, université de Toulouse
61. Agence de l'Eau Adour Garonne, 2018, « changements climatiques : quels impacts en Adour Garonne » film 4 minutes

(Eric Veyssy)

RÉSUMÉ

A l'exutoire des bassins fluviaux de la Garonne et de la Dordogne, le bouchon vaseux est un phénomène naturel lié à la dynamique estuarienne spécifique. Sa position, son étendue et sa qualité, variables au cours de l'année, connaissent une évolution nette depuis 40 ans, concomitante avec une dégradation des conditions écologiques de l'estuaire. Depuis 2004, le suivi « haute fréquence » Magest éclaire sur ces tendances et sur leurs causes : affaiblissement des débits fluviaux, hausse de la température, pressions anthropiques accrues. Les projections climatiques et sociétales indiquent des risques d'aggravations des pressions environnementales et anthropiques, pouvant porter gravement atteinte aux capacités biologiques de la « zone estuaire », à travers la position et la dynamique du bouchon vaseux. Malgré ce constat et ces perspectives, de nouvelles relations entre l'estuaire et son bassin versant sont en cours de développement pour tendre vers de nouveaux équilibres hydro-sédimentaires et biologiques.

Le Département de la Gironde est situé à la confluence de la Garonne et de la Dordogne. Il **est donc soumis aux activités des territoires amont et à leurs impacts sur la qualité et la quantité d'eau dans les fleuves.**

Dans ce contexte géographique, il m'apparait important de faire connaître à tous les habitants du bassin versant, **la dégradation de la qualité de notre estuaire.** Cette dégradation est **notamment constatée par la remontée du bouchon vaseux de l'estuaire, de plus en plus en amont sur chacun des fleuves.**

Le Département participe et accompagne la mise en œuvre des **actions prévues dans le schéma d'aménagement et de gestion de l'eau de l'estuaire de la Gironde pour préserver les milieux.** L'interdépendance des territoires est telle que chaque acteur a un rôle à jouer dans les prélèvements et la consommation des eaux de rivières ou de nappes alluviales, afin de **laisser un débit suffisant d'entrée d'eau douce dans l'estuaire.**

En effet, **les connaissances accumulées grâce au réseau d'observation de la qualité des eaux MAGEST,** auquel participe le Département de la Gironde, démontrent bien que **le positionnement du bouchon vaseux est fortement dépendant de l'apport d'eau douce.**
Ainsi, le Département de la Gironde reste mobilisé pour la connaissance et la préservation de la ressource en eau, tant en termes de qualité que de quantité.

Jean-Luc Gleyze
président du Conseil
Départemental de la Gironde

INFORMER

L'environnement sociétal et climatique sera évolutif dans les années à venir avec des variabilités et des vitesses d'évolution accrues. S'adapter suppose l'anticipation éclairée et un ajustement aux connaissances évolutives et ouvertes. Les débats et les informations vers le grand public et les plus jeunes pourront être éclairés par des actions de sciences participatives de grande ampleur à l'échelle du bassin versant, telles que le réseau scientifique, pédagogique, culturel et informatif Classes Eco-Fleuves* l'avait initié.

Un film et une plaquette synthétiques sont également disponibles

Édité par le Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (SMIDDEST), 12 rue Saint-Simon, 33390 Blaye
Rédaction : Eric Veyssy, Terre & Océan, médiation culturelle des sciences et de l'histoire des environnements
Maquette et mise en pages : Marie Mignano
Crédits photos de couverture : Terre & Océan, Terre & Océan, Michel Le Collen
Imprimé par Castet Imprimerie – 6 bis quai Paludate à Bordeaux
Date d'édition : mars 2019

REMERCIEMENTS

(entretiens, relectures, corrections, informations, documentations, réflexions) :

Gestionnaires : Clément Bernard (SMIDDEST), Jérôme Baron (SMIDDEST), Olivier Guerri (EPIDOR), François Maurel (EDF), Anne Marie Goncalves (EDF), Laurent René (AEAG), Eric Lebat (AEAG), Alain Féral (PAB retraité), Pascal Chisné (CACG), Aline Chaumel (SMEAG), Bernard Leroy (SMEAG), Melina Lamouroux (AEAG), Julien Mas (GPMB), Alain Fort (GPMB), Mathias Daubas (AEAG), Dominique Tesseyre (AEAG), Françoise Goulard (AEAG), Christine Leymajoux (CD82), Lise Mas (IMA), Pierre Bourgogne (BM retraité), Elodie Bouchon (BM), Nathalie Briche (CD33), Eric Lavie (RNA), Cécile Noyer (ETPB Lot), Bruno De Grissac (Smegreg).

Scientifiques : Hélène Budzinsky (chimiste), Magalie Baudrimont (écotoxicologue), Aldo Sottolichio (sédimentologue), David Doxaran (sédimentologue), Mario Lepage (biologiste), Françoise Daverat (biologiste), Benoit Sautour (biologiste), Henri Etcheber (géochimiste), Alexandra Coynel (géochimiste), Gérard Blanc (géochimiste), Eric Sauquet (climatologue), Eric Martin (climatologue), Serge Planton (climatologue), Artelia, Jean Paul Parisot (physicien), Florence Habets (climatologue), Vanessa Lauronce (biologiste), Philippe Bertrand (géochimiste), Sabine Schmidt (géochimiste), Isabel Jalon-Rojas (sédimentologue), Olivier Kah (endocrinologue).

Pêcheurs : Jacqueline Rabic, Ludovic Le Carrour, Philippe Vignac