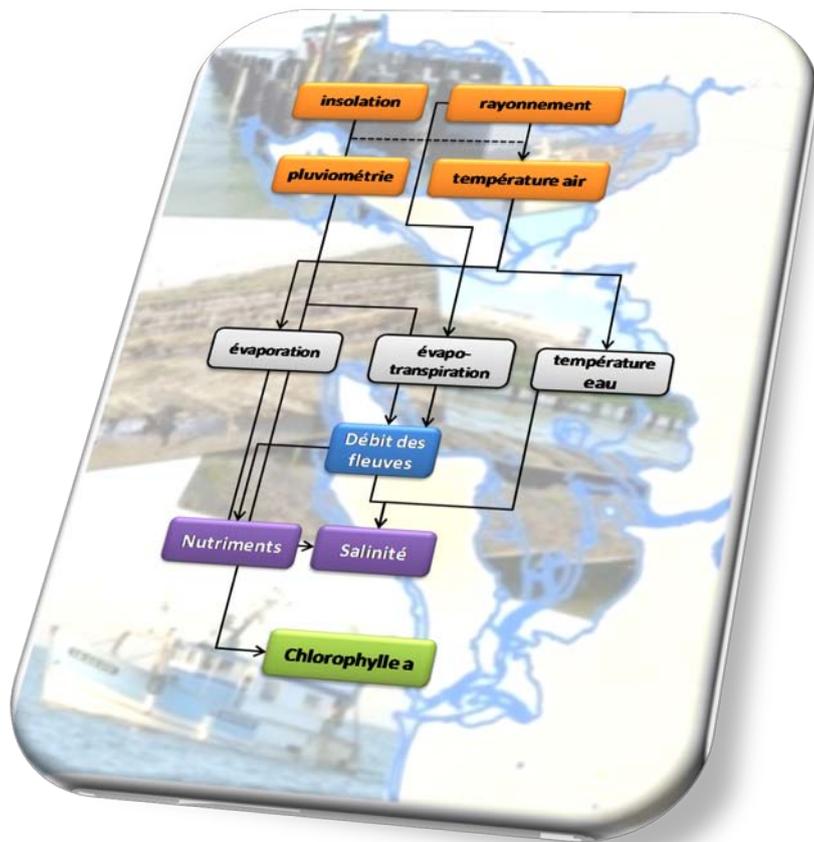


Patrick Soletchnik
Olivier Le Moine
Pierre Polsenaere

EVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT HYDROCLIMATIQUE DU BASSIN DE MARENNES-OLERON DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT GLOBAL



Numéro d'identification du rapport :	date de publication : juin 2017	
Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite :	nombre de pages : 50 p	
<input checked="" type="checkbox"/> Validé par : Christian Béchemin	bibliographie : oui / illustration(s) : oui	
Version du document :	langue du rapport : Français	
EVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT HYDROCLIMATIQUE DU BASSIN DE MARENNES-OLÉRON DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT GLOBAL		
Contrat n°	Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>	Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>
Auteurs principaux : Patrick Soletchnik, Olivier Le Moine et Pierre Polsenaere	Organisme/Direction/Service/laboratoire IFREMER/ODE/UL/LER-PC	
Contributeurs :	Organisme/Direction/Service, laboratoire IFREMER/ODE/UL/LER-PC	
Département de rattachement : ODE		
Projet : A051808 DEPCU - Durabilité de l'Ecosystèmes des Pertuis Charentais et de ses Usages		
<p>Résumé : Dans le contexte du changement global dont la cause anthropique est maintenant reconnue, cette étude dresse un bilan de l'évolution hydro-climatique des Pertuis Charentais (Bassin de Marennes-Oléron) depuis les quarante dernières années. Elle présente une comparaison de la situation hydro-climatique avant et après la « rupture thermique » des années 80-90, reconnue à l'échelle de l'hémisphère Nord et mise également en évidence dans les Pertuis entre 1983-1997. Les deux périodes comparées sont (1977-1991) d'une part et (2000-2015) d'autre part. Entre les deux, l'élévation des températures de l'eau de mer de 1,5°C en moyenne et 3°C en médiane, s'est accompagnée d'une élévation de la salinité (0,6 à 0,9) en lien avec un déficit d'apport des fleuves internes et externes aux Pertuis. L'augmentation de la salinité de 1,2 dans le nord du Bassin de Marennes-Oléron (site de Boyard) en juin, et de 1,5 durant avril-juin dans le sud du Bassin (site d'Auger), est en lien avec le déficit significatif des apports de la Gironde, principalement marqué durant cette saison. Ce déficit en eau douce a été estimé à 13% pour la Loire, et à 17-19% pour les autres fleuves étudiés : Charente, Adour et Dordogne. L'environnement hydro-climatique comparé entre les deux périodes étudiées a également changé sur le plan de la saisonnalité. On observe un réchauffement de la période hivernale ainsi qu'un décalage saisonnier. Le mois de juin a en effet « perdu » ses caractéristiques printanières des années 80 pour prendre des caractéristiques estivales au début du 21^{ème} siècle. Parmi les autres évènements hydro-climatiques marquants, on peut noter : (1) la diminution de la pluviométrie régionale et l'augmentation du rayonnement printanier (en lien avec ses nouvelles « caractéristiques estivales ») ; (2) la diminution du rayonnement en été, sans doute liée à l'augmentation de la pluviométrie durant cette saison ; (3) une diminution des débits des fleuves surtout en hiver et au printemps ; (4) une « salinisation » durant le printemps-été, conséquence directe de la diminution des apports ; (5) une concentration en nutriments, significativement plus élevées sur Auger au cours de la deuxième période de l'étude ; (6) une extension de la période de production phytoplanctonique en automne, hiver et début du printemps, avec une élévation des concentrations en chlorophylle <i>a</i> d'environ 45-50% sur les deux sites entre les périodes étudiées. Le « déficit » d'apport d'eau douce correspond à près de 10 milliards de m³. Quelles sont les conséquences écologiques et économiques d'une telle diminution des apports en eau douce et quelles mesures de gestion peuvent être prises ? Les usagers des Pertuis Charentais ont-ils un devoir, nécessité et urgence de répondre à ces questions d'actualité.</p>		
<p>Mot clés : hydrologie, hydro-climat, hydrodynamique, Bassin de Marennes Oléron, évolution, réchauffement climatique, apports, fleuves, température, salinité, nutriments, chlorophylle <i>a</i></p>		

EVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT HYDROCLIMATIQUE DU BASSIN DE
MARENNES-OLERON DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT GLOBAL

SOMMAIRE

I-INTRODUCTION	6
II-MATERIEL ET METHODES	9
III-RESULTATS.....	10
3.1-Météorologie	10
3.1.1. Température de l'air.....	10
3.1.2. Précipitations	11
3.1.3. Insolation et rayonnement.....	12
3.2-Hydrologie.....	13
3.2.1. Température de l'eau de mer.....	13
3.2.2. Salinité.....	14
3.2.3. Nutriments.....	15
3.2.4. Ressource trophique	17
3.3-Apport des fleuves en eau douce	18
3.3.1. Contribution des fleuves aux apports	18
3.3.2. Débits des fleuves	19
3.4-Synthèse des résultats.....	21
3.4.1. Analyse multivariée	21
3.4.2. Comparaison hydroclimatique.....	23
IV-DISCUSSION	25
4.1-Le réchauffement climatique	25
4.2-Evolution des autres paramètres météorologiques	26
4.3-Les apports des fleuves	26
4.4-Salinisation, nutriments et production primaire.....	28
V-CONCLUSION	30
REFERENCES	32
Liste des Figures, Tableaux et Annexes.....	36
ANNEXES.....	40

I-INTRODUCTION

Service écosystémique

Depuis quelques années, une nouvelle perception du littoral s'est progressivement imposée. Auparavant, l'écosystème estuarien était bien « exploité » par l'homme... Aujourd'hui, il est considéré comme « pourvoyeur » de services pour l'homme et la planète. Le « service écosystémique¹ » (Figure 1) est bien ce nouveau concept qui vise à regarder l'écosystème non plus comme une source de profits, mais comme une entité écologique à préserver (Granek et al. 2010). « La terre ne nous appartient pas, nous l'empruntons à nos enfants », écrivait de façon prémonitoire, il y a déjà quelques décennies, Antoine de Saint Exupéry. L'Homme n'est pas seulement usager de son environnement, il est aussi symbiote des écosystèmes dans lesquels il vit. Il hérite ainsi d'un devoir de gestion. Les hommes doivent s'entendre pour le partage des ressources et la préservation de la Vie.

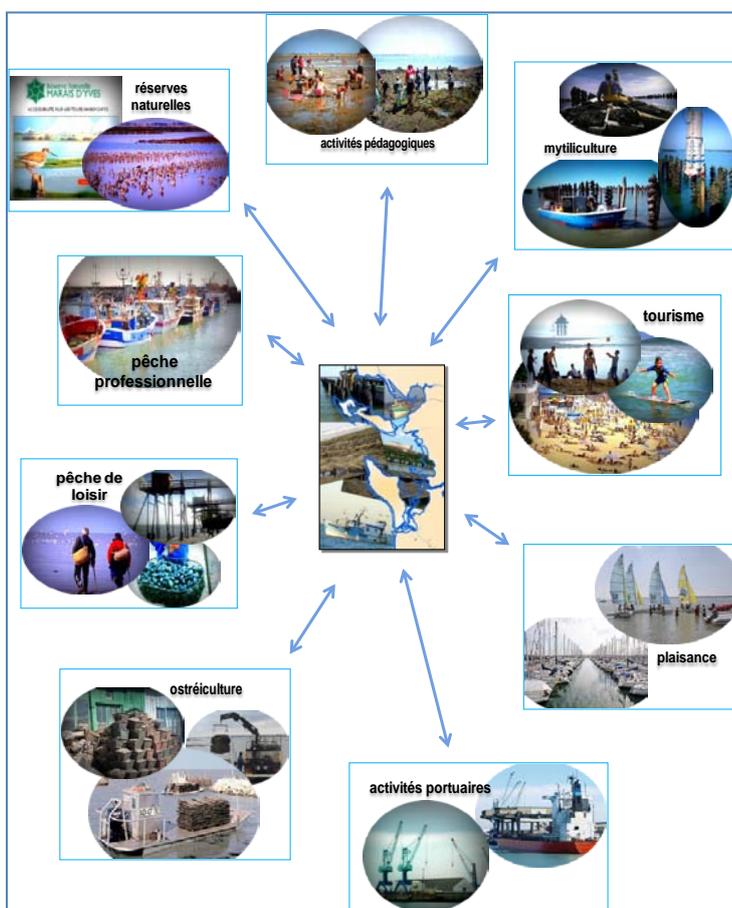


Figure 1. Quelques exemples de « services écosystémiques » en lien avec l'écosystème estuarien des Pertuis Charentais.

Le réchauffement climatique n'est pas une légende

Si longtemps, les sceptiques du réchauffement climatique ont tenté de faire valoir des hypothèses alternatives au « changement global », aujourd'hui les études démontrant le caractère anthropique de ce phénomène « extrêmement probable » sont nombreuses (Hugues 2000, Schröter et al. 2005 ; GIEC 2007, Bell et Collins 2008, Pachauri et al. 2015). Le réchauffement climatique concerne la planète entière (Ebbesmeyer et al. 1991) de l'hémisphère nord (Goberville et al. 2014) au Pacifique (Hare et al. 2000). Aujourd'hui, des changements « globaux » ont été observés dans l'ensemble des écosystèmes

¹ Défini comme les bienfaits que les hommes obtiennent des écosystèmes naturels.

terrestres et marins (Leakey et Lewin 1997, Visser et al. 1998, Brook et al. 2008, Luczak et al. 2011, Jaffré et al. 2013 d'après Chevillot 2016). Dès la fin des années 1990, des chercheurs évoquent l'impact du réchauffement climatique sur des écosystèmes sensibles tels que les lacs et les récifs coralliens (Carpenter et al. 1999, Mc Cook 1999 d'après Scheffer et Carpenter 2003) ou certaines pêcheries tels que les harengs en mer du nord (Steele 1998). A cette période, l'auteur évoque la difficulté de faire la distinction entre une évolution à moyen terme des écosystèmes et la réponse aux pressions anthropiques. Les années 2000 marquent l'essor de cette thématique de recherche avec une série d'études marquantes (Hughes 2000, Mc Carty 2001, Beaugrand et al. 2002, Walther et al. 2002 d'après Chevillot 2016, Parmesan and Yohe 2003, Parmesan 2006). Hugues (2000) dans une synthèse de travaux réalisés à la fin du 20^{ème} siècle confirme l'élévation significative des températures moyennes et un changement de « pattern » des précipitations. Dans ce contexte, l'évolution des écosystèmes n'est pas « linéaire » (Carpenter et Brock 2006). Le caractère anthropique du réchauffement climatique est confirmé (Steele 1998, Harley et al. 2006, Zhang et al. 2007, Chaalali et al. 2013a). Cette anthropisation, dont l'origine remonte au 19^{ème} siècle avec la nouvelle ère industrielle, bouleverse l'équilibre de la planète dans des proportions jamais vues depuis des millions d'années (Hoegh-Guldberg and John 2010). L'irréversibilité du déséquilibre de certains écosystèmes fait alors émerger la notion de « ruptures » (shifts) qui se produisent lorsque la capacité de résilience de ces écosystèmes est dépassée (Scheffer and Carpenter 2001, 2003).

Les écosystèmes marins côtiers et notamment les estuaires sont de plus en plus exploités par l'homme. Ils concentrent aujourd'hui près de 60% de la population et probablement 75% d'ici 2025 (Goodland 1995, Bianchi 2006 d'après Chevillot 2016). Ils sont contaminés (Budzinski et al. 1997, Matthiessen and Law 2002a d'après Chevillot 2016) et impactés dans leur biodiversité (Carlton 1989, Beaugrand et al. 2015 d'après Chevillot 2016). La grande vulnérabilité de ces écosystèmes littoraux face à ces changements résulte en grande partie de leur position à l'interface océan-continent (Hoegh-Guldberg et al. 2010, Hénocque and Denis 2001 d'après Chevillot 2016).

Les températures mesurées dans l'hémisphère nord à partir des années 1980 sont les plus fortes jamais enregistrées depuis deux siècles (Philippart et al. 2011). Des différences spatiales sont perçues à l'échelle de la façade atlantique (Goberville et al. 2010). Si entre 1906 et 2005, la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,74°C (GIEC 2007, Field et al. 2014), la température moyenne des eaux marines de surface a quant à elle augmenté de 0,23°C par décennie entre 1977 et 2007 dans l'Atlantique nord est (Goikoetxea et al. 2009). Hare et al. (2000) mettent en évidence des ruptures² au niveau des « écosystèmes marins » en 1977 et en 1998. En mer Baltique et en mer du nord, une rupture est mise en évidence à la fin des années 80 et notamment en 1987 (Alheit et al. 2005). Elle semble associée au basculement de l'indice climatique NAO (North Atlantic Oscillation) d'une valeur négative à positive.

Le réchauffement global impacte les services écosystémiques vitaux pour le bien être des hommes : en augmentant la vulnérabilité des écosystèmes, en provoquant des ruptures drastiques dans leur fonctionnement et en poussant ces écosystèmes à la limite de leur résilience (Schroter et al. 2005, Goberville et al. 2010, Doney et al. 2012).

Le réchauffement climatique agit sur le cycle de l'eau à l'échelle de la planète (Douville et al. 2012). Si globalement le volume des précipitations de par le monde n'a pas changé, la répartition de l'eau subit quant à elle des modifications spatiales (Milliman et al. 2008). Sur 137 fleuves, le tiers subit plus de 30% de variations de débits. Alors qu'aux hautes latitudes les apports augmentent, aux moyennes latitudes leur déficit peut atteindre 60% (Milliman et al. 2008). Les précipitations aussi subissent d'importants changements entre l'hémisphère nord où elles augmentent, et l'hémisphère sud où elles diminuent (Zhang et al. 2007). Ce résultat est confirmé par Philippart et al (2011) qui enregistre des apports d'eau douce plus importants depuis les années 80 dans la Baltique en lien avec le

² Une « rupture » correspondrait à une modification irréversible, sans situation de retour, qu'il s'agisse de la température ou de l'équilibre d'un écosystème. La précision (date) de ces ruptures varie avec la longueur des séries chronologiques (Legendre and Legendre 1998, Beaugrand et al. 2008 d'après Chevillot et al. 2016).

réchauffement climatique. Des modifications importantes ont lieu également sur le débit des fleuves dans le nord est de l'Europe liées à la diminution des précipitations neigeuses (Arnell 1999). A environ 150 km des Pertuis Charentais, l'un des plus grands estuaires européens la Gironde, a fait l'objet de nombreuses études (Goberville et al. 2010, Chaalali et al. 2013a,b, Chevillot 2016). En particulier, l'évolution hydro-climatique a été étudiée sur trois décennies (1985-2015). Entre la fin du 20^{ème} siècle (1985-2000) et le début du 21^{ème} siècle (2000-2015), le changement hydro-climatique s'est traduit par une élévation de la température et salinité de respectivement de +0,5°C et +1,8. Cette « marinisation » de l'estuaire évoquée par les auteurs, semble associée à une diminution des débits de la Gironde (-9% entre les deux périodes), alors que la tendance des précipitations reste stable (Chevillot 2016). Toutefois, l'évolution hydro-climatique de l'estuaire de la Gironde n'a pas été linéaire. Deux ruptures ont été mises en évidence entre 1975 et 2009 (Chaalali et al. 2013a). L'écosystème s'en est trouvé modifié du fait de l'adaptation physiologique des espèces *in situ*, et de modifications phénologiques³ (Chevillot 2016).

Dans les écosystèmes côtiers, les paramètres météorologiques tels que la température, l'insolation, les précipitations et apports, déterminent pour une grande part les conditions de température et de salinité de l'eau. Activités anthropiques et apports terrigènes régulent les apports de nutriments via les panaches des fleuves. Nutriments, lumière et température, contrôlent la succession des grandes familles phytoplanctoniques (diatomées et flagellés) sur la façade atlantique (Ragueneau 1994, Loyer 2001). Les rapports de Redfield (1963) permettent d'estimer l'équilibre entre nitrates, phosphates et silicates vis-à-vis de la capacité de production primaire des écosystèmes côtiers.

Le Bassin de Marennes Oléron (BMO), premier bassin ostréicole français est une zone estuarienne soumise aux pressions naturelles et anthropiques. Une première étude a décrit l'environnement hydrologique entre 1977 et 1998 sur 5 stations de mesures (Soletchnik et al. 1998). Aujourd'hui, les bases de données hydro-biologiques et hydrodynamiques des Pertuis Charentais se sont enrichies grâce aux réseaux Ifremer REPHY (Belin et Raphin 1990) et aussi grâce au développement d'outils d'investigation puissants que sont les modèles hydrodynamique Mars2D (Stanisière et al. 2006) et Mars3D (Lazure et al. 2009, Polsenaere et al. 2017). Travaillant à des résolutions de plus en plus fines, ces modèles permettent aujourd'hui de réaliser des études hydrodynamiques des pertuis à une résolution de 500 mètres (Polsenaere et al. 2015, 2017). Les modèles peuvent simuler la contribution des apports des fleuves en tous points des pertuis, et en particulier sur les sites de Boyard et Auger (Figure 2).

L'étude présentée fait suite aux travaux réalisés à la fin des années 90 (Soletchnik et al. 1998, Faury et al. 1999) et au début des années 2000 (Soletchnik 2002) sur l'évolution des conditions hydrologiques à la fin du 20^{ème} siècle dans le Bassin de Marennes-Oléron (1977-1995). Les auteurs montrent un réchauffement de la température de l'eau d'environ 1°C vers la fin des années 80. D'autres évolutions sont alors perçues comme la diminution de l'insolation et des décalages de saisonnalité pour les précipitations et les concentrations en chlorophylle *a* (Soletchnik 2002).

Quinze ans plus tard les questions posées auxquelles tente de répondre cette étude sont (i) comment le contexte hydro-climatique des Pertuis Charentais a-t-il évolué ? (ii) Les évolutions pointées du doigt dans la précédente étude sont-elles confirmées ? (iii) Y a-t-il eu d'autres changements ? (iiii) Que nous apporte la modélisation hydrodynamique (Mars3D) sur la compréhension du fonctionnement hydrologique de l'écosystème estuarien de Marennes-Oléron ?

³ Permettant aux espèces d'occuper le milieu dans des conditions les plus proches possibles de celles d'avant le changement.

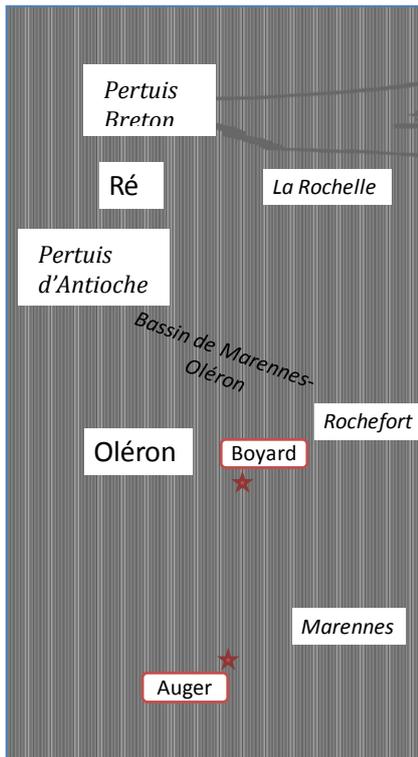


Figure 2. Stations hydrologiques de Boyard et Auger dans le Bassin de Marennes-Oléron.

II-MATERIEL ET METHODES

Réseaux de mesures hydro-climatiques

Depuis les années 70, les recherches sur l'huître en particulier (zootechnie, écophysiologie, modélisation, ...) ont conduit à mettre en place un réseau de surveillance hydrologique (réseau Razlec, température, salinité, chlorophylle a) sur cinq stations du BMO (Auger, Barat, Chapus, La Mouclière et Boyard ; Héral et al. 1977, Faury et al. 1999). Par la suite le développement des réseaux de surveillance nationaux de l'Ifremer (réseau REPHY ; Belin et Raffin, 1990) ont permis de pérenniser le suivi hydrologique sur deux stations : Auger, dans le pertuis de Maumusson et Boyard (à l'est d'Oléron, au large de l'embouchure de la Charente) (données depuis 1977). L'étude présentée ici utilise les séries historiques des stations de Boyard et d'Auger. Les séries de données issues des bases Razlec et Rephy sont comparées mois par mois, et la cohérence entre les séries (test de Kruskal-Wallis) autorise à fusionner les séries entre elles pour une analyse entre 1977 et 2015 (*Annexe 1*). Les variables météorologiques : température de l'air ($^{\circ}\text{C}$), précipitations (mm jour^{-1}), insolation (heures jour^{-1}) et rayonnement (joules cm^{-2}) sont des données Météo-France de la station de la Rochelle. La température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$), la salinité et la chlorophylle a ($\mu\text{g L}^{-1}$, proxy de la ressource trophique) et les nutriments ($\mu\text{mol L}^{-1}$) proviennent des bases Razlec et Rephy. Les contributions des fleuves aux apports en eau douce sont issues des simulations hydrodynamiques du modèle Mars3D (Béchemin et al. 2014, Polsenaere et al. 2017). Les mesures de débits sont issues des bases de données du site www.hydro.eaufrance.fr. La reconstitution des séries historiques de débits de 1977 à 2015 a été possible pour quatre fleuves : Loire, Charente, Dordogne et Adour. Les débits sont donnés ou reconstitués à partir de modèles d'interpolation (www.hydro.eaufrance.fr, Le Moine 2013). Si l'Adour contribue peu aux apports dans les Pertuis Charentais, la contribution des fleuves externes comme la Loire, la Dordogne est plus significative⁴ (Travers et al. 2016). Les autres fleuves internes comme le Lay

⁴ L'étude de saisonnalité des fleuves à partir des séries historiques longues (1977-2015) n'est pas réalisée pour les fleuves dont les débits sont faibles (Lay, Sèvre) ou non reconstitués (Garonne). L'Adour, bien que contribuant peu aux apports dans les Pertuis Charentais, est prise en compte pour élargir le panel des fleuves étudiés vers le sud de la façade atlantique.

et la Sèvre au nord ou encore externe comme la Garonne au sud pouvant aussi influencer les Pertuis Charentais sous certaines conditions hydrodynamiques n'ont pas été pris en compte dans l'étude historique (séries non reconstituées depuis 1977).

Stratégie d'étude et analyse

La température de l'eau de mer s'élevant rapidement entre 82-84 et 96-98 sur le site d'étude, la stratégie d'analyse consiste à comparer une série d'une quinzaine d'années « avant » (1977-1991) et « après » (2000-2015) cette période (Figure 3). Ces deux séries sont comparées pour chaque descripteur, mois par mois. Un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est appliqué afin de rendre compte des différences significatives (ou non) entre les séries comparées. Afin d'en extraire la tendance (1977-2015), le modèle Census II additif de décomposition des séries chronologiques en tendance, saisonnalité et résidus est utilisé (Statgraphic centurion XVI ; Shiskin 1957 d'après Bethoux et al. 1980). La première étude couvrait une période comprise entre 1977 et 1995 (soit 18 ans ; Soletchnik et al. 1998). Elle s'étend aujourd'hui jusqu'à 2015 et représente donc 38 années de mesures.

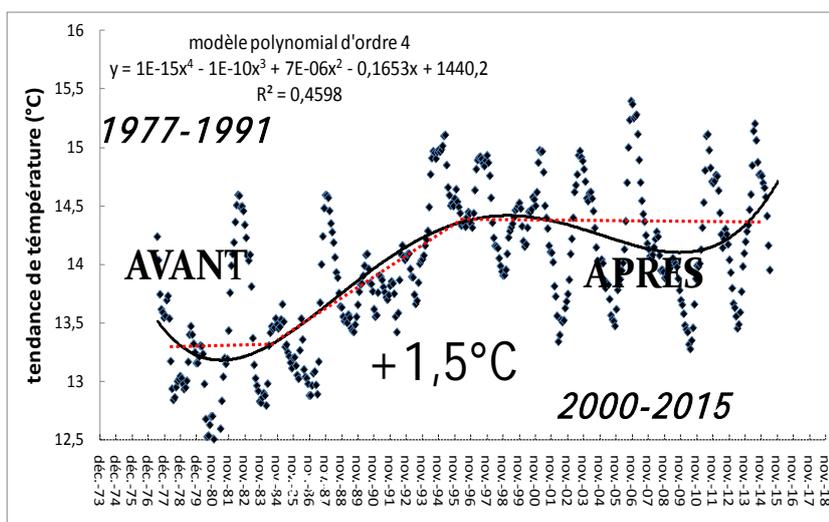


Figure 3. Evolution de la tendance de la température de l'eau dans le Bassin de Marennes-Oléron entre 1977 et 2015, en accord avec l'identification d'une période de réchauffement climatique «accélééré» durant les années 80-90. Ce résultat est à l'origine de la méthodologie d'analyse développée dans cette étude.

III-RESULTATS

3.1-METEOROLOGIE

3.1.1. TEMPERATURE DE L'AIR

Les températures de l'air comparées entre les deux périodes (1977-1991) et (2000-2015) montrent un réchauffement significatif 8 mois de l'année sur 12 (Figure 4). La médiane de la température de l'air passe de 12,7°C en (1977-1991) à 13,5°C en (2000-2015). L'élévation de la température de l'air est de + 0,8°C à l'échelle de l'année entre ces deux périodes. Si les quatre saisons sont concernées par le réchauffement, celui-ci est plus marqué pendant les saisons de « transition » que sont le printemps (avril-juin) et l'automne (octobre et novembre). L'été semble être la période la moins sensible au réchauffement. Ainsi, si durant les trois mois d'été, les écarts de température ne dépassent pas 0,3 °C (août), ils atteignent 0,8-0,9°C en octobre-novembre et 1,2-1,8°C en mai et juin (Annexe 2).

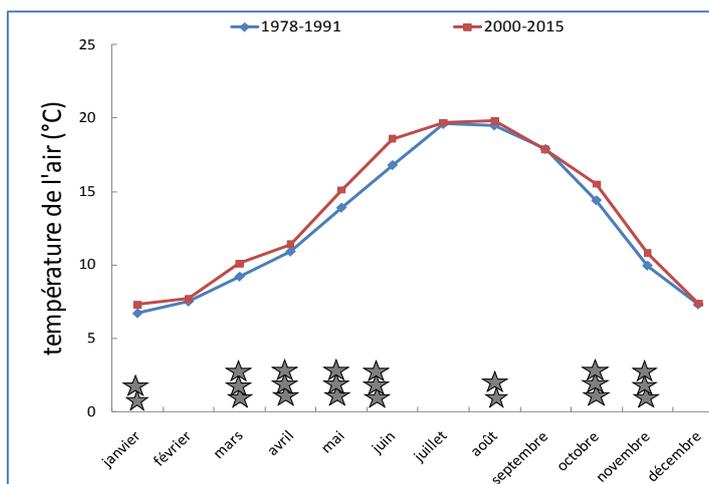


Figure 4. Températures de l'air (médianes mensuelles) comparées entre deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 dans le bassin de Marennes-Oléron (station de Boyard). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 10830 (d'après données Météo-France).

La tendance de température fait apparaître des « cycles » pluriannuels. Une moyenne mobile réalisée à partir de la courbe de tendance met en évidence deux « ruptures » dans la série, en 1989 et 2000 (Figure 5).

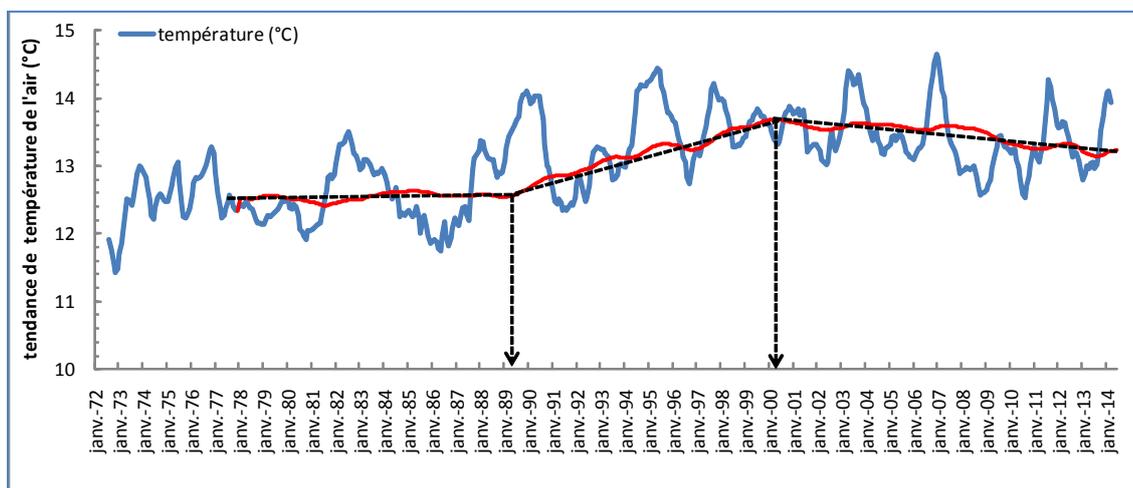


Figure 5. Evolution de la tendance de température de l'air (méthode Sensus II, courbe bleue) ; puis lissage de cette tendance par moyenne mobile (courbe rouge). Données : Météo France, Bout-Blanc, La Rochelle, 1972-2014. Les flèches noires indiquent les années 1989 et 2000 de rupture de pente de la médiane.

Entre les deux périodes d'étude, l'élévation de la température de l'air est d'environ 0,8°C. Elle est surtout marquée au printemps (mai, 1,2°C et juin, 1,8°C), dans une moindre mesure en automne (octobre, 1,1°C et novembre, 0,9°C), hiver (mars, 0,9°C) et très peu en été. Des « ruptures » apparaissent en 1989 (début d'une période d'élévation de température), et en 2000 (fin de la période d'élévation).

3.1.2. PRECIPITATIONS

Les précipitations hebdomadaires sont cumulées pour chaque saison et chaque année des deux périodes d'étude (~170 mesures pour chaque période) (Figure 6 ; Annexe 2). Les différences de précipitations sont significatives au seuil de 5% au printemps, été et automne. La comparaison entre les deux périodes (avant et après réchauffement climatique) montre que localement (Charente-Maritime/La Rochelle), il tombe aujourd'hui moins de pluie au printemps, et plus en été et en automne. En termes de bilan annuel il n'y a pas d'écart significatif de précipitation.

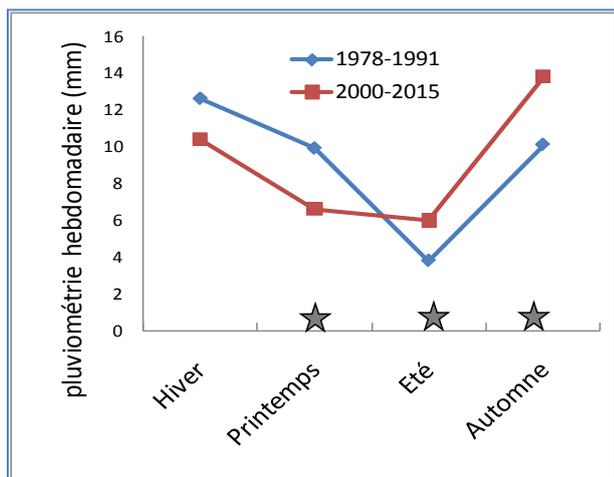


Figure 6. Médianes saisonnières de précipitations comparées entre les périodes 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des données hebdomadaires des quatre saisons de l'année) (d'après données Météo-France). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 11‰ (***) (d'après données Météo-France).

En Charente-Maritime (station de La Rochelle), le volume annuel des précipitations n'a pas changé de façon significative entre les années 80-90 et début du 21^{ème} siècle. Par contre, il pleut un peu moins au printemps, et plus en été et en automne.

3.1.3. INSOLATION ET RAYONNEMENT

L'insolation (heures/jour) diminue entre les deux périodes étudiées en particulier durant le deuxième semestre de l'année (Figure 7). La baisse d'insolation la plus marquée a lieu en été et en novembre. Elle est de -2 et -1,5 heures en juillet et août (Annexe 2). Elle est également de -1 et -2 heures en octobre et novembre respectivement. Sur le bilan annuel, la baisse d'insolation, de -0,5 heures par jour entre les deux périodes représente environ une semaine de soleil en moins par an (Annexe 2). La différence représente 11% d'insolation en moins.

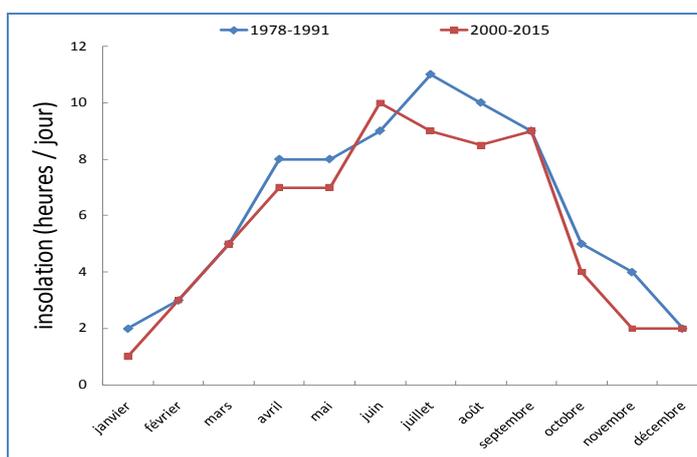


Figure 7. Insolations mensuelles comparées (médianes) entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 (station Météo-France bout blanc La Rochelle). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 9946) (d'après données Météo-France).

Le rayonnement augmente de 56, 80, 102, 190 et 91 joules/cm² en février, mars, mai, juin et septembre respectivement. En novembre, une baisse de 101 joules/cm² est significative entre les deux périodes (Figure 8 ; Annexe 2). A l'échelle de l'année, l'augmentation du rayonnement est de 38 joules/cm² (significatif au seuil de 5%).

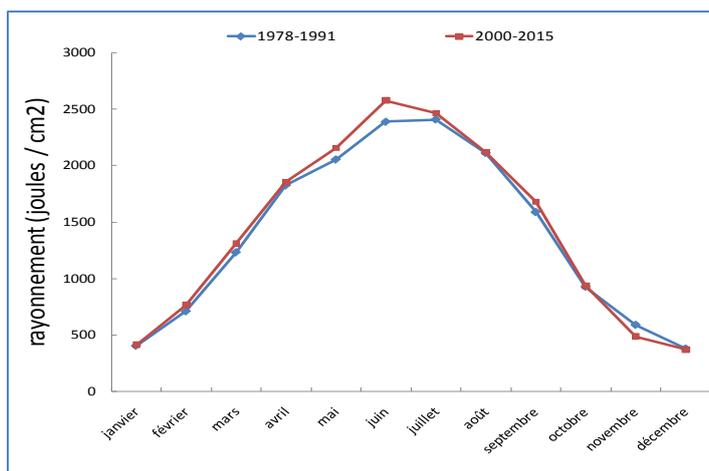


Figure 8. Rayonnements mensuels comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 (station Météo-France bout blanc La Rochelle). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 9496) (d'après données Météo-France).

A l'échelle de l'année, l'insolation a diminué de 0,5 heures entre les deux périodes du fait d'une diminution significative en été (juillet-août) et automne (octobre-novembre). L'augmentation du rayonnement est faiblement significative à l'échelle de l'année. Le printemps, et en particulier les mois de mai et juin sont ceux qui connaissent la plus forte augmentation de rayonnement (+102 et +190 joules/cm²).

3.2-HYDROLOGIE

3.2.1. TEMPERATURE DE L'EAU DE MER

Cycles saisonniers comparés (périodes et saisons)

Durant les deux mois de juin et août, l'élévation de température de l'eau est comprise entre +0,6 et +1,3°C sur les deux sites de l'étude (Auger et Boyard) (Figure 9). Des différences de température sont significatives en février, avril et mai sur Boyard, mais pas sur Auger. C'est toujours au cours de la période 2000-2015 que la température de l'eau est la plus chaude. A l'échelle de l'année, le réchauffement sur Boyard est de +1,5°C en moyenne et +2,7°C en médiane. Sur Auger, les différences sont respectivement de +1,2°C pour la moyenne et +1,5°C pour la médiane (Annexe 2). L'élévation de 2,7°C de la médiane, sur le site de Boyard montre bien combien de plus en plus souvent les températures mesurées sont élevées.

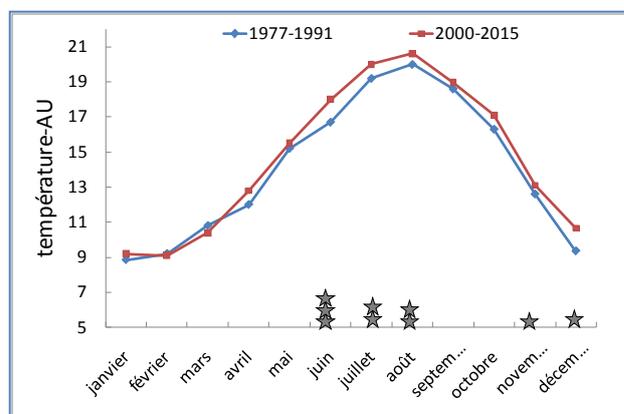
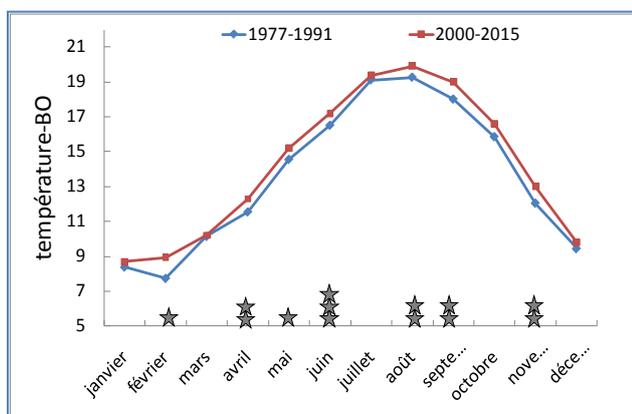


Figure 9. Cycles des températures de l'eau comparées entre deux périodes 1978-1991 et 2000-2015 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (À partir des mesures : N = 1328)

Analyse de la tendance (station de Boyard)

La tendance des médianes de température entre 1977 et 2015 suit une progression polycyclique (Figure 10). Un ajustement selon un modèle polynomial d'ordre 4 permet d'identifier 3 périodes : (i) antérieure à 1985 durant laquelle la température moyenne est d'environ 13,3°C ; (ii) entre 1986 et 1993 avec une élévation de la température (moyenne à 13,7°C), et (iii) entre 1994 et 2014 au cours de laquelle la température moyenne est d'environ 14,3°C (Figure 10). La différence est de 1°C entre la première et la dernière période. Cette élévation déjà perçue dans le BMO en 1998 (Soletchnik, 2002) est ici confirmée à l'échelle des Pertuis.

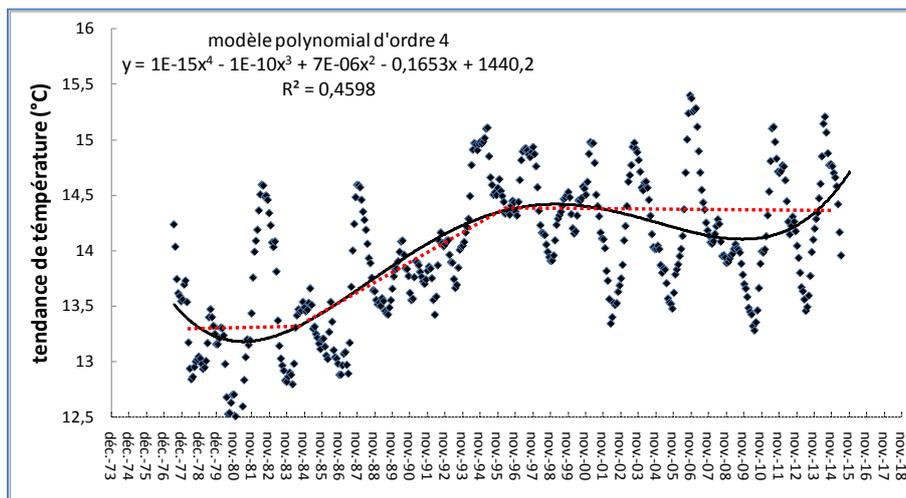


Figure 10. Tendances des températures de l'eau de mer sur Boyard. Station de Boyard dans le BMO entre 1977 et 2015.

Entre les deux périodes d'étude 1977-1991 et 2000-2015, l'élévation moyenne de la température de l'eau est de +1,2°C sur Auger et +1,5°C sur Boyard. Celle de la température médiane est de +1,5°C et +2,7°C respectivement sur les deux stations. L'augmentation de température de l'eau est plus sensible dans le nord du BMO que dans le sud. En effet, alors que dans les années 80, la température sur Auger est d'1°C supérieure à celle de Boyard, ce n'est plus le cas au début du 21^{ème} siècle. Ce sont essentiellement les mois de juin et d'été qui sont concernés par le réchauffement sur Auger, alors que sur Boyard, février, avril et mai sont également impactés par le réchauffement. Sur Boyard, entre les deux périodes, la médiane augmente plus vite que la moyenne, montrant ainsi combien la fréquence des températures élevées augmente sur ce site (Annexe 3). Par ailleurs, l'élévation la plus forte (~1°C) a eu lieu entre les années 82-84 et 96-98. Il n'y a pas de changement de saisonnalité de température dans le BMO entre 1977 et 2015.

3.2.2. SALINITE

Cycles saisonniers comparés (périodes et saisons) dans le nord (Boyard) et le sud (Auger) du BMO

La salinité médiane montre des différences significatives durant les mois de juin, juillet et août sur le site de Boyard (Figure 11, gauche). L'augmentation de salinité annuelle est de + 0,6 entre 1978-1991 et 2000-2015 (Annexe 4). Elle est de +1,2 en juin et de +0,7 en juillet et août. Bien qu'en décembre, l'écart de salinité soit de -0,95 entre les deux périodes, la différence des deux médianes n'est pas significative. Sur Auger, la « salinisation » est significative dès les mois d'avril et mai alors qu'elle ne l'est pas sur le site de Boyard (Figure 11). L'émergence d'une salinité plus élevée durant le mois de juin, sur Boyard, et en particulier durant la période de réchauffement de la température de l'eau de mer, est présentée en suivant l'indice de saisonnalité durant 5 périodes successives (Annexe 5).

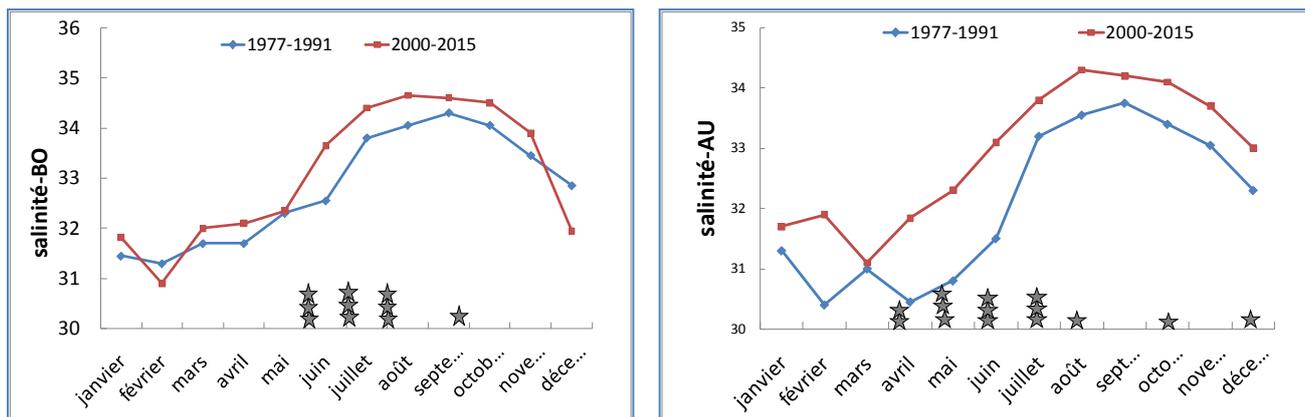


Figure 11. Cycle de salinité comparé entre deux les périodes 1978-1991 et 2000-2015 dans le BMO à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***)

Entre deux périodes successives : 1977-2001 d'une part et 2002-2014 d'autre part, les médianes respectives de 32,3 (1977-2001) et 33,0 (2002-2014) indiquent une « salinisation » de l'écosystème du BMO. L'analyse mois par mois des valeurs de salinité entre les deux périodes (1977-1991 et 2000-2015) confirment bien une salinisation surtout de juin à août sur Boyard (avec le maximum au mois de juin : +1,2), et d'avril à juillet sur Auger. A l'échelle de l'année, l'augmentation de salinité est respectivement de +0,6 et +0,9 sur ces deux sites.

3.2.3. NUTRIMENTS

Cycles saisonniers comparés (périodes et saisons) dans le nord (Boyard) et le sud (Auger) BMO

Les nitrates (Figure 12), et dans une moindre mesure, les phosphates (Figure 13) présentent des concentrations en décembre et janvier, significativement plus fortes (de + 30% à + 100%) durant la deuxième période étudiée (Annexe 6).

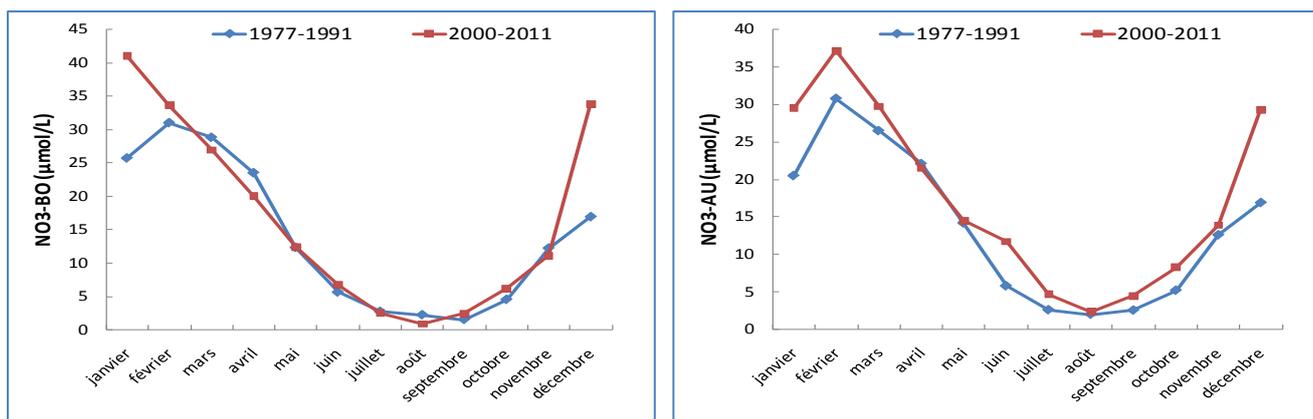


Figure 12. Cycles des nitrates (NO_3^-) comparés entre deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***)

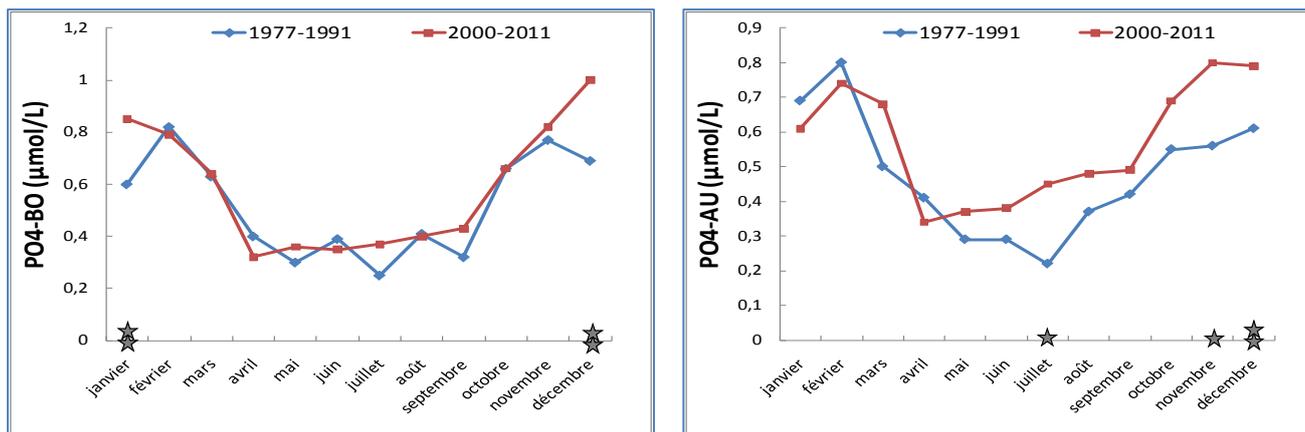


Figure 13. Cycles des phosphates (PO_4^{3-}) comparés entre deux périodes (1977-1991) et (2000-2011) dans le bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .

Sous nos latitudes, les concentrations saisonnières des silicates, sont clairement associées à la succession des classes phytoplanctoniques. Ainsi les concentrations mesurées sur Boyard montrent bien la période de fin d'hiver et de printemps au cours de laquelle les silicates diminuent (de 15-20 à $\sim 4 \mu\text{mol/L}$) en lien avec le développement des blooms de diatomées (Figure 14). Durant l'été, les dinoflagellés succèdent aux diatomées. La régénération de la silice a lieu à partir des frustules des diatomées mortes, permettant ainsi une élévation progressive de la concentration en silice durant l'été, l'automne et le début d'hiver (Figure 14). Alors que le cycle des silicates semble avoir peu évolué sur Boyard, entre les deux périodes d'étude, il n'en est pas de même sur Auger. Sur cette station, en juin-juillet, en particulier, les concentrations en silicates ne chutent plus aussi bas depuis le début du 21^{ème} siècle.

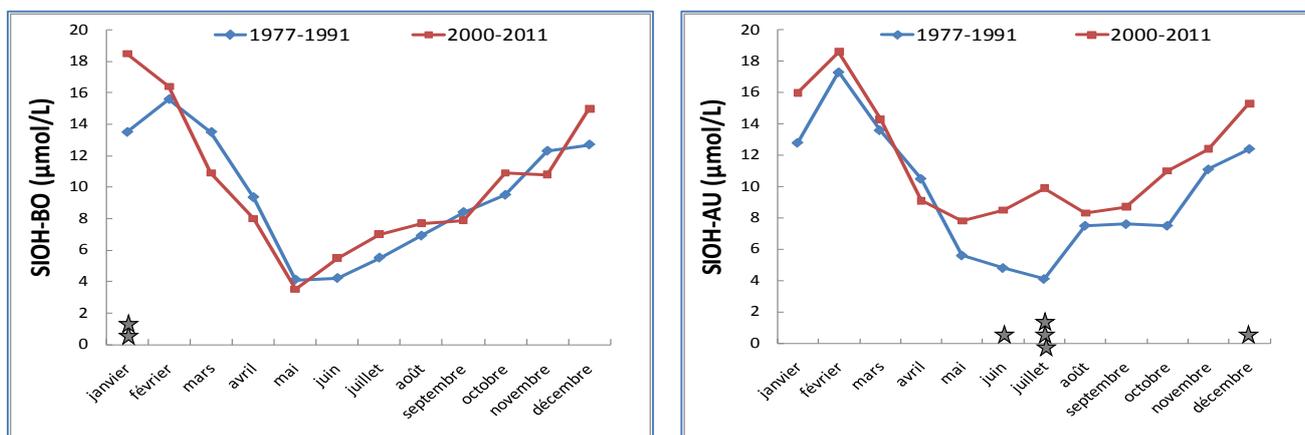


Figure 14. Cycles des silicates (SiOH) comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .

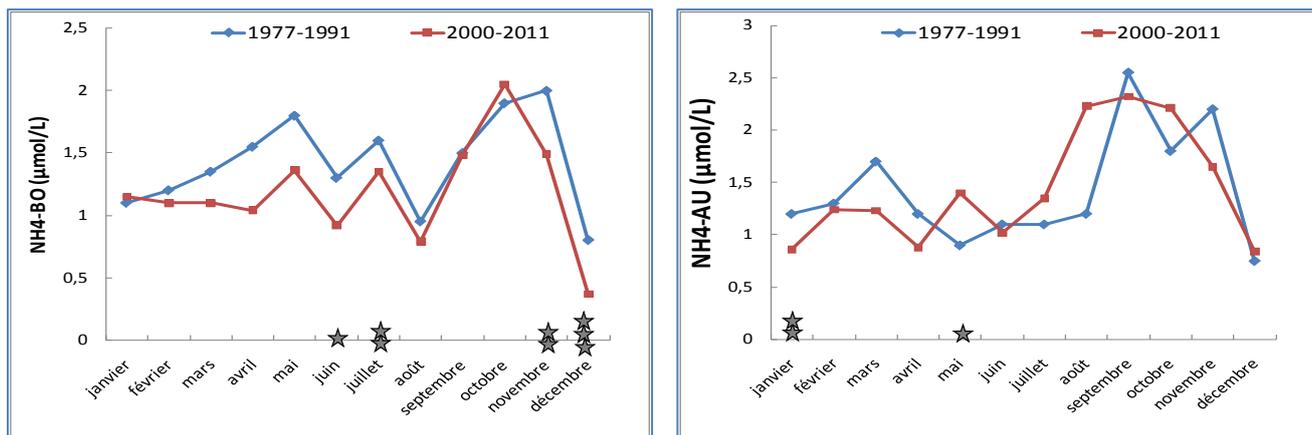


Figure 15. Cycles de l'ammonium (NH_4^+) comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***)

La corrélation entre apports et sels nutritifs est variable selon les sels nutritifs. Ainsi, les corrélations sont-elles significatives pour les nitrates (0,88-0,92), pour les silicates (0,57-0,60), en « limite » de significativité pour les phosphates (0,41-0,44) et non significatives pour l'azote ammoniacal. Depuis le début du 21^{ème} siècle, les nitrates et les phosphates sont plus concentrés dans l'eau au mois de décembre et janvier, (début du lessivage des bassins versant par les pluies de fin d'automne et début d'hiver). Au cours de la 2^{ème} période de l'étude (début du 21^{ème} siècle), le site d'Auger se distingue par un cycle d'utilisation des phosphates et des silicates dans l'eau de mer, différent de ce qu'il était dans les années 80 et à ce qu'il est sur le site de Boyard. Cette différence dans le cycle d'utilisation des nutriments sur les deux sites se traduit, à l'échelle de l'année, par des concentrations en nutriments significativement plus élevées sur Auger au cours de la deuxième période de l'étude, alors que ce n'est pas le cas sur le site de Boyard.

3.2.4. RESSOURCE TROPHIQUE

Cycles saisonniers comparés (périodes et saisons)

A l'échelle de l'année, la chlorophylle *a* augmente de +44% et +48% sur les deux stations d'Auger et de Boyard, entre 1977-1991 et 2000-2015 (Annexe 6). Les différences sont surtout marquées de janvier à avril (hiver et début de printemps) et de septembre à décembre (fin d'été et automne) (Figure 16). Les concentrations sont plus élevées 8 à 9 mois sur 12 depuis le début du 21^{ème} siècle par rapport aux années 80. C'est durant la période de l'année la plus chaude (de mai à août) que les différences ne sont pas significatives (Annexe 6). Le mois de mai est le seul mois de l'année pendant laquelle les concentrations sont en baisse (différence non significative toutefois) (Figure 16).

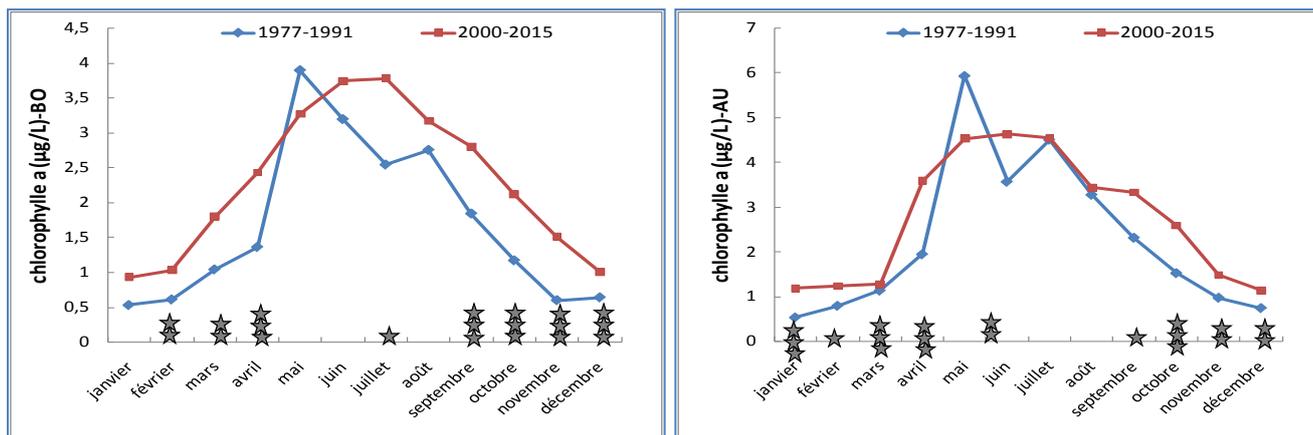


Figure 16. Cycle de la chlorophylle *a* comparé entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 dans le Bassin de Marennes-Oléron aux stations de Boyard (gauche) et d'Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***)

Entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle, l'augmentation de chlorophylle *a* est surtout importante en hiver et en automne. A l'échelle de l'année, entre 1977-1991 et 2000-2015, la chlorophylle *a* passe de 1,48 à 2,20 µg L⁻¹ sur Boyard, et de 1,78 à 2,57 µg L⁻¹ sur Auger, correspondant à une augmentation respective de 48% et 44%. C'est essentiellement en automne et en hiver que les concentrations de chlorophylle *a* ont le plus augmenté. L'efflorescence principale du mois de mai, durant les années 80, a laissé place à une période plus large de présence de phytoplancton dans les Pertuis Charentais.

3.3-APPORT DES FLEUVES EN EAU DOUCE

3.3.1. CONTRIBUTION DES FLEUVES AUX APPORTS

L'étude de la contribution des fleuves aux apports sur le site de Boyard est réalisée à partir des données de simulation hydrodynamique de l'année 2014, prise comme exemple pour la deuxième période de l'étude. Les contributions relatives et saisonnières des fleuves sont comprises entre 1% (Lay en hiver) et 40% (Charente en hiver) (Tableau 1 ; Figure 17). Sur ce site, l'apport des fleuves externes (Loire, Garonne, Dordogne) est de 52-53% en hiver et en été, et de 68% en automne. Quantitativement les apports d'hiver, printemps, été et automne représentent respectivement 48%, 25%, 11% et 16% de l'ensemble des apports sur ce site (en 2014). Selon la saison, la Charente contribue entre 20 et 40% des apports.

Tableau 1. Contribution relative des fleuves aux apports sur Boyard pour les quatre saisons de l'année 2014.

saison	Charente	Dordogne	Garonne	Lay	Loire	Sèvre
hiver	39,8	18,7	32,0	0,9	2,8	1,1
printemps	35,0	13,3	23,6	3,3	14,7	5,1
été	25,3	9,2	17,5	4,3	26,9	11,5
automne	19,5	18,6	33,8	3,0	15,1	6,4

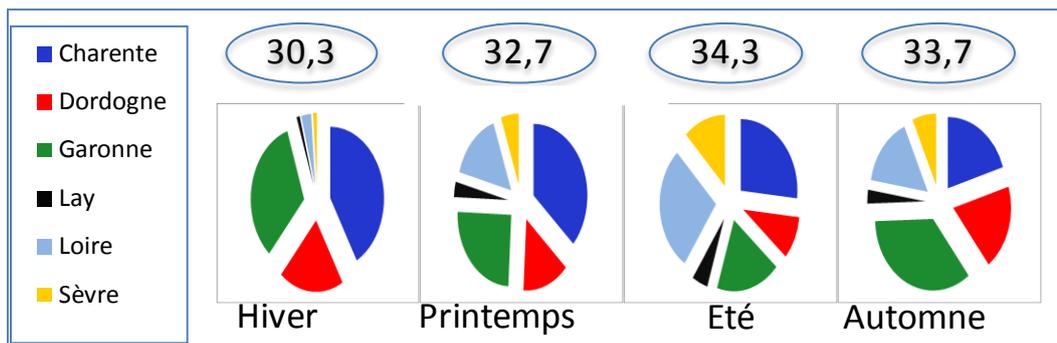


Figure 17. Contribution relative des fleuves aux apports sur Boyard pour les quatre saisons de l'année 2014 et salinité moyenne saisonnière.

3.3.2. DEBITS DES FLEUVES

Les débits journaliers des fleuves Loire, Charente, Adour et Dordogne sont comparés mois par mois, pour les deux périodes de l'étude : (1977-1991) et (2000-2015) (*Annexe 6*) (*Figure 18*). Des baisses significatives de débits apparaissent presque tous les mois de l'année pour les quatre fleuves (*Figure 18*, gauche). La diminution de débits entre les deux périodes de l'étude, est surtout importante en hiver et au printemps (*Figure 18*, droite). Elles représentent 13,3%, 18%, 18,7% et 17,5% respectivement pour les quatre fleuves : Loire, Charente, Dordogne et Adour (*Tableau 2*). Les déficits en apports sont surtout conséquents pour la Loire, puis pour la Garonne et l'Adour, et dans une moindre mesure la Charente (*Figure 19*).

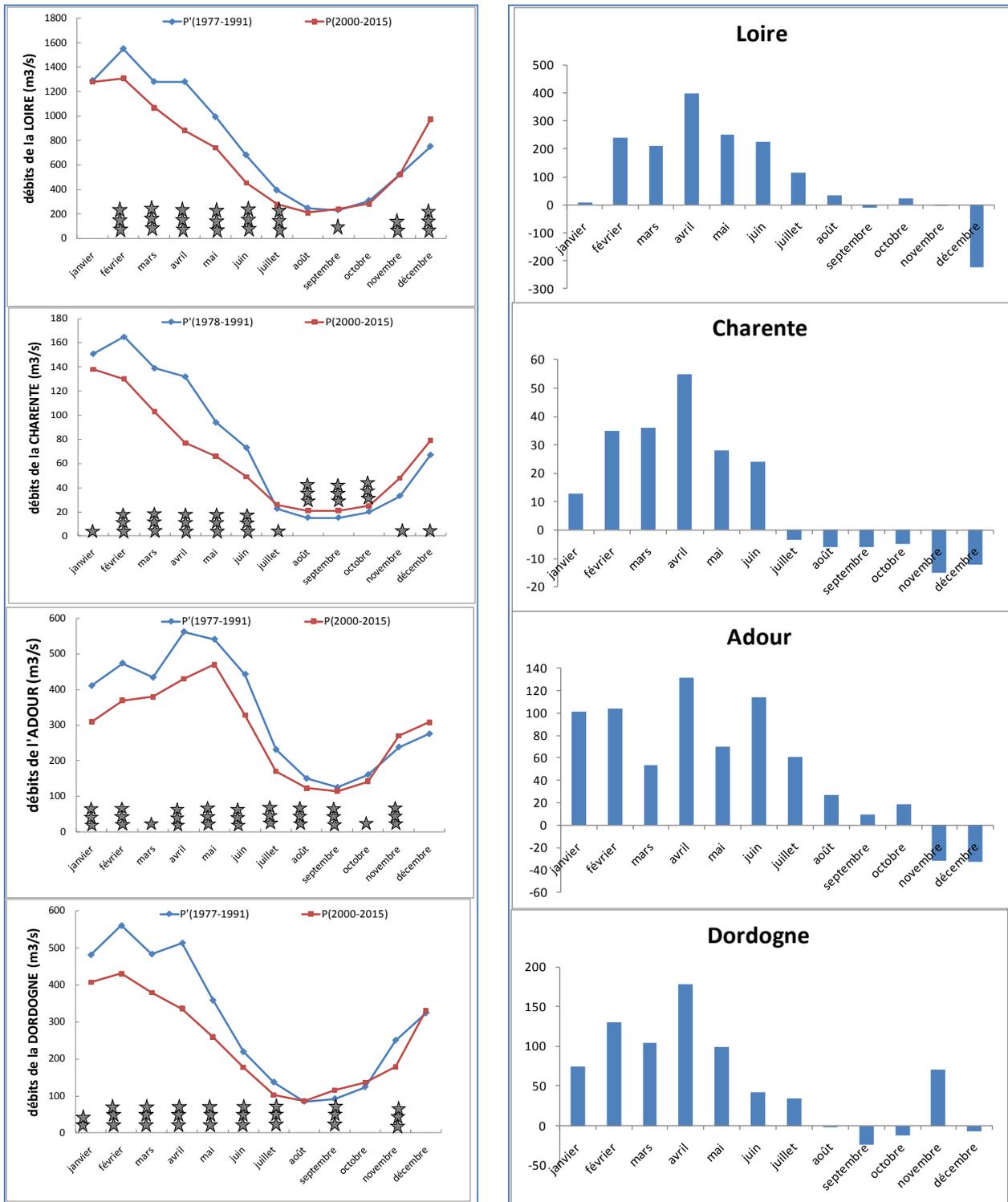


Figure 18. Débits saisonniers (médianes mensuelles) de la Loire, Charente et Adour (à partir des débits journaliers). Comparaison entre les deux périodes 1978-1991 et 2000-2015. Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (Gauche). Écart des médianes mensuelles entre les deux périodes (droite).

Fleuves	Débits des fleuves (m ³ s ⁻¹)	Perte en apport (10 ⁹ m ³)	Perte en apport (%)
Loire	200-1600	3,29	13,3
Charente	20-170	0,40	18
Dordogne	100-550	1,61	18,7
Adour	100-550	1,72	17,5

Tableau 2. Diminution des débits de quatre fleuves côtiers de la façade Atlantique française entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle.

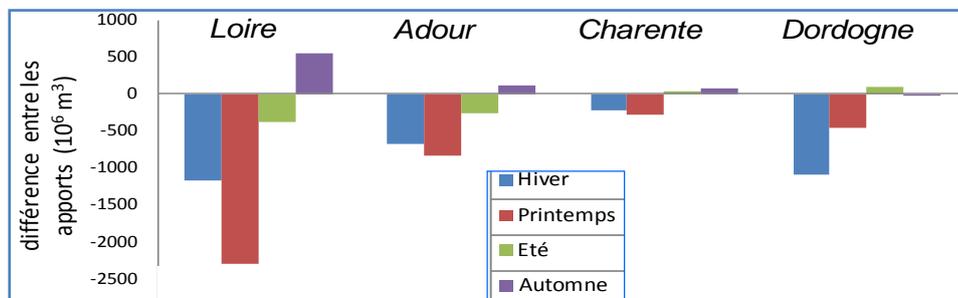


Figure 19. Différences d'apports des fleuves entre (1977-1991) et (2000-2015).

Les principaux fleuves de façade atlantique impactant les Pertuis Charentais présentent une baisse significative de débits entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle, principalement durant l'hiver et le printemps. Ces diminutions de débits (à l'échelle de l'année), de 13,3%, 18,0%, 18,7 et 17,5% respectivement pour les fleuves : Loire, Charente, Dordogne et Adour, correspondent à des diminutions d'apports annuels en eau douce d'environ - 3,29 milliards de m³ pour la Loire, -0,37 milliard pour la Charente, - 1,61 milliard pour la Dordogne et - 1,63 milliard pour l'Adour.

Les récentes études hydrodynamiques permettent aujourd'hui de simuler la contribution spatio-temporelle des fleuves aux apports dans les Pertuis Charentais. La contribution en apports des fleuves externes aux Pertuis (Loire, Garonne et Dordogne) sur le site de Boyard représente (selon la saison) entre 52% et 68% des apports, celle des fleuves internes représentant entre 32% et 48%. Les apports ont d'abord lieu en hiver (50%), au printemps (25%) et le dernier quart se répartit entre l'été et l'automne (respectivement 10% et 15%). Selon la saison, la Charente contribue à 20-40% des apports d'eau douce.

3.4-SYNTHESE DES RESULTATS

3.4.1. ANALYSE MULTIVARIEE

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) est réalisée à partir des médianes mensuelles des variables : salinité, température (temp), chlorophylle a (chl.a), débits de la Loire, Charente et Dordogne (Figure 20). Les apports, variables nitrates (NO₃), phosphates (PO₄), silicates (SIOH) et azote ammoniacale (NH₄) sont projetés sur les axes de l'ACP et ne contribuent pas à la constitution de ces axes (Figure 21). Les « individus » étudiés sont des « période-mois ». Les deux périodes sont P1 (1977-1991) et P2 (2000-2015). Les mois sont les douze mois de l'année, de janvier (01) à décembre (12). L'axe 1 (température, salinité, fleuves) regroupe 85% de la variabilité et l'axe 2 (chlorophylle a), 12% (Tableau 3). Le cycle « années 80 » est représenté en rouge ; celui du début du 21^{ème} siècle en bleu. Les vecteurs représentent l'évolution mois par mois entre les deux périodes étudiées (Figure 20). « Globalement », les débits diminuent, sauf en décembre où le sens du vecteur est inversé (vers la droite). Le décalage « vers la gauche » (sens des vecteurs) s'effectue vers une salinité et température plus élevés pour le cycle « 20^{ème} siècle », par rapport au cycle « 21^{ème} siècle ». Ce sont les mois de février, mars, avril et juin qui sont les plus marqués par cette tendance. Juin (cycle 2) prend des caractéristiques estivales (en température et salinité) à partir du 21^{ème} siècle. Un décalage saisonnier de certains mois de l'année illustre le phénomène de « contraction » du « cycle 21^{ème} » versus le « cycle 20^{ème} ». Ainsi, les mois de février et mai du cycle 21^{ème} ont bien les caractéristiques environnementales respectives des mois de mars et juin du cycle 20^{ème} (précocité des caractéristiques environnementales) (Figure 20). Le

mois de septembre (cycle 21^{ème}), quand à lui, conserve les caractéristiques d'un mois d'août du cycle 20^{ème}. L'évolution de la chlorophylle a est lisible par la verticalité des vecteurs (cycle 20^{ème} vers cycle 21^{ème}), orientés le long d'un gradient positif de chlorophylle a (vers le haut), pour l'été et l'automne, et le long d'un gradient négatif de chlorophylle a au mois de mai (vers le bas) (Figure 20). Les apports en nutriments (NO₃, SiOH et PO₄) sont positivement corrélés aux apports en eau douce des fleuves (Loire, Charente et Dordogne) (Tableau 4). L'azote ammoniacal ne l'est pas. L'origine terrigène des nutriments est plus ou moins marquée. Ainsi les coefficients de corrélation avec les apports des fleuves sont compris entre 0,88-0,92 pour les nitrates, 0,57-0,60 pour les silicates et 0,39-0,44 pour les phosphates (Tableau 4). La production de chlorophylle a est corrélée positivement à la température (effet saison) et négativement aux nutriments. Sur l'axe 2 de l'ACP, ce sont vraiment les silicates et les phosphates qui sont opposés à la variable chlorophylle a (et non les nitrates), traduisant ainsi les effets de limitation saisonnière de ces deux nutriments, alors que l'azote est uniquement limitant en été (Tableau 7).

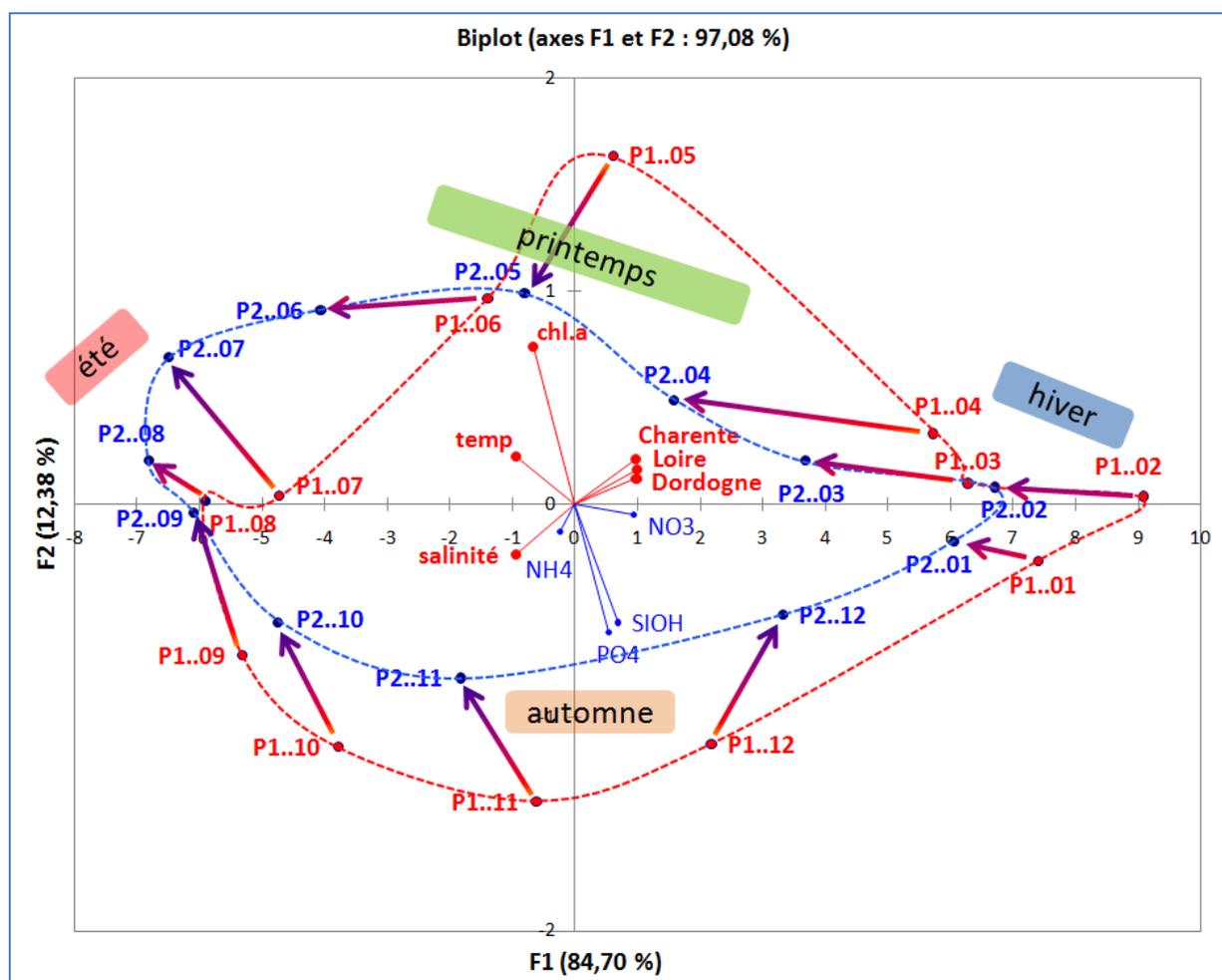


Figure 20. Analyse en composante principale ; projection des variables et des individus [période-mois ; période = P1 : 1977-1991 et P2 : 2000-2015 & mois de janvier (01) à décembre (12)] sur les axes de l'ACP. L'axe 1 (température, salinité, fleuves, NO₃ et SiOH) regroupe 85% de la variabilité ; l'axe 2 (chlorophylle a et phosphates), 12% de la variabilité. Le cycle « années 80 » est représenté en rouge ; celui « début du 21^{ème} siècle » en bleu. Les flèches indiquent le sens de l'évolution de chaque mois, d'une période à une autre.

		F1	F2	F3
variables	salinité	0,895	0,055	0,028
constitutives	temp	0,897	0,052	0,023
de l'ACP	chl.a	0,440	0,549	0,003
	Loire	0,968	0,027	0,001
	Charente	0,923	0,045	0,022
	Dordogne	0,959	0,015	0,008
variables non	NO3	0,915	0,002	0,011
constitutives	PO4	0,344	0,431	0,026
de l'ACP	SIOH	0,521	0,341	0,008
	NH4	0,236	0,067	0,353

Tableau 3. Cosinus carré des variables ; Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand.

Variables	salinité	temp	chl.a	Loire	Charente	Dordogne	NO3	PO4	SIOH	NH4
salinité	1									
TEMP_eau	0,84	1								
chl.a	0,46	0,77	1							
Loire	-0,96	-0,89	-0,54	1						
Charente	-0,93	-0,84	-0,49	0,99	1					
Dordogne	-0,93	-0,89	-0,56	0,98	0,97	1				
NO3	-0,88	-0,92	-0,64	0,92	0,88	0,88	1			
PO4	-0,36	-0,70	-0,77	0,44	0,39	0,41	0,65	1		
SIOH	-0,49	-0,78	-0,86	0,60	0,57	0,57	0,79	0,87	1	
NH4	0,30	0,25	0,05	-0,25	-0,24	-0,19	-0,36	-0,18	-0,23	1

Tableau 4. Matrice de corrélation des variables de l'ACP.

A l'échelle du bassin de Marennes Oléron, une analyse en composantes principales (ACP) de deux cycles saisonniers (périodes 1977-1991 et 2000-2015), montre bien l'effet du réchauffement climatique sur l'hydrobiologie. Il se traduit d'abord par une élévation de la température de l'eau de mer et une salinisation. L'hiver (février, mars) et le printemps (avril et juin) sont les deux saisons les plus marquées par cette tendance. L'évolution est telle que certains mois de l'année ont permuté leurs caractéristiques hydrologiques entre la fin du 20^{ème} siècle et le début du 21^{ème} siècle. Ainsi les mois de février, mai et septembre (21^{ème} siècle) ont pris les caractéristiques des mois de mars, juin et août (20^{ème} siècle) respectivement.

3.4.2. COMPARAISON HYDROCLIMATIQUE

Le Tableau 5 et la Figure 21 résument les principaux résultats sur la comparaison de l'hydro-climat du nord du BMO entre les périodes (1977-1991) et (2000-2015). La température de l'air a augmenté durant les saisons de transition (printemps et automne). L'insolation a diminué en été et sur le mois d'automne. Le rayonnement a surtout augmenté au printemps et principalement en juin. La température de l'eau a augmenté tout au long de l'année, mais en particulier en juin. Les sels nutritifs corrélés aux apports : nitrates, phosphates et silicates ont augmenté durant les mois de décembre et janvier. La Libération d'azote ammoniacale est plus faible sur Boyard en juin-juillet et novembre-décembre. La chlorophylle *a* a augmenté durant les saisons de transition (printemps et automne). Les quatre grands fleuves étudiés : Loire, Charente, Dordogne et Adour ont vu leurs débits diminuer en hiver, mais surtout au printemps, et parfois aussi un peu en été.

mois	janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
température air	.+2		.+3	.+3	.+3	.+3		.+2		.+3	.+3	
précipitations												
insolation							.-3	.-3		.-1	.-3	
rayonnement		.+1	.+1		.+2	.+3			.+1		.-1	
température eau		.+1		.+2	.+1	.+3		.+2	.+2		.+2	
salinité						.-3	.-3	.-3		.+1		
nitrate	.+3											.+3
phosphates	.+2											.+2
silicates	.+2											
azote ammoniacale						.-1	.-2				.-2	.-3
chlorophylle a		.+2	.+2	.+3			.+1		.+3	.+3	.+3	.+3
débit Loire		.-3	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3		.-1		.-2	.+3
débit Charente	.-1	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3	.-1	.+3	.+3	.+3	.+1	.+1
débit Adour	.-3	.-3	.-1	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3	.-1	.+3	
débit Dordogne	.+2	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3	.-3		.-3		.+3	

Tableau 5. Comparaison des conditions hydro-climatiques sur le site de Boyard entre (1977-1991) et (2000-2015). Les écarts significatifs sont représentés par les chiffres : 1, 2 et 3 selon le niveau de significativité (5%, 1% et 1‰). Les signes (-, +), ainsi que la couleur, indiquent le sens de l'écart entre les deux périodes (1977-1991) et (2000-2015).

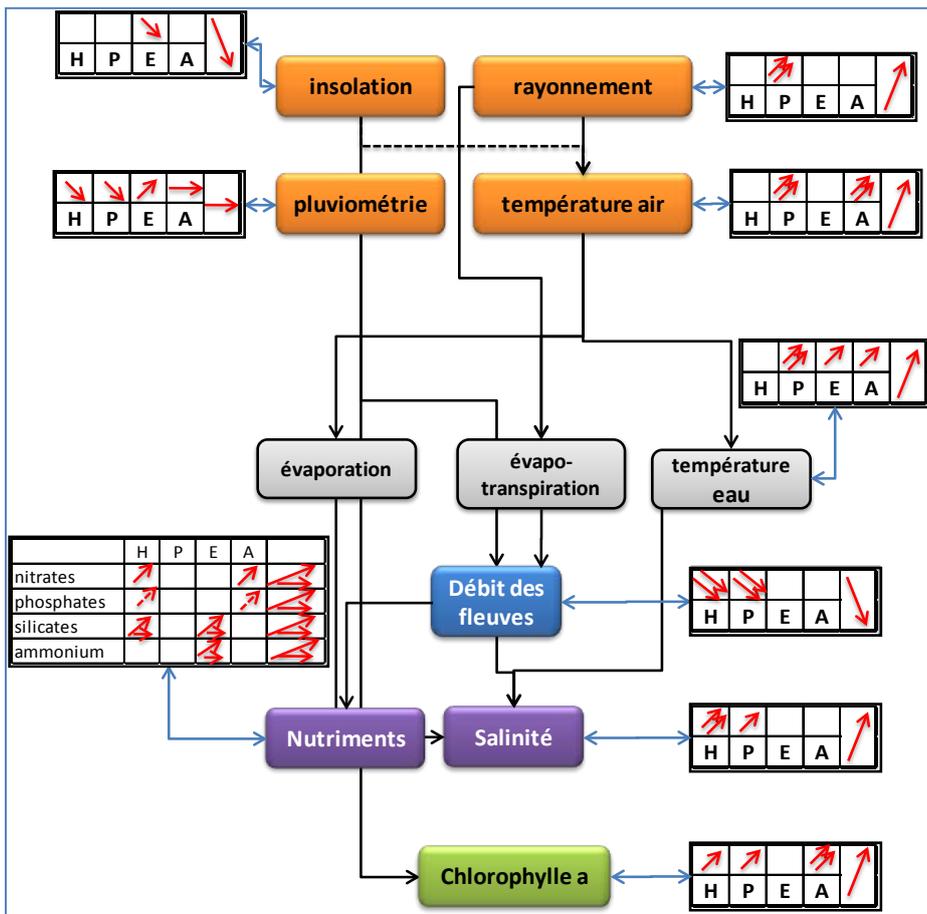


Figure 21. Schéma conceptuel d'évolution des principales variables hydro-climatiques étudiées dans cette étude. Les flèches rouges indiquent le sens significatif de l'évolution de la variable entre les deux périodes (avant et après la période d'élévation rapide de la température de l'eau de mer entre 1983 et 1997 dans le BMO).

4.1-LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

L'indice climatique NAO (North Atlantic Oscillation), dominant en Europe du nord, aurait changé à la fin des années 80 (1987-1989) d'une phase négative à une phase positive (Alheit et al. 2005). Une des conséquences directes de cette « rupture » est l'élévation des températures de surface avec des effets physiques et biologiques sur les écosystèmes de la mer Baltique et mer du Nord (Arnell 1999, Alheit et al. 2005). Grenne et Pershing (2007) expliqueraient ce changement climatique par une anomalie atmosphérique majeure (baisse de pression atmosphérique et émergence d'un nouveau régime cyclonique) mis en évidence en 1987 dans le Centre Arctique et qui aurait eu des conséquences directe sur les trajectoires des courants marins, et donc sur le climat de l'Europe du Nord. A l'échelle de notre étude (1977-2015), une forte élévation de la température de l'eau de mer a eu lieu entre 1983 et 1997 dans le Bassin de Marennes-Oléron. Elle fut de 3°C pour la médiane, et de 1,5°C pour la moyenne. En 1998, une première analyse de la base hydrologique régionale (base Razlec), sur cinq stations du bassin de Marennes-Oléron, montrait une élévation de la température de l'eau de mer de près de 2°C entre 1977 et 1995 (Soletchnik et al. 1998 ; Soletchnik 2001). Dans l'estuaire de la Gironde, situé à quelques dizaines de km seulement du sud des Pertuis Charentais, deux ruptures ont été perçues en 1987 et 2000 (série historique : 1978-2009 ; Chaalali et al. 2013a). Dans cette étude, l'élévation de la température de l'air (valeur médiane) est seulement de 0,8°C alors que la hausse de la température de l'eau de mer est beaucoup plus forte. Le fait que les mesures de température de l'eau soient effectuées de jour pourrait expliquer cette différence. A l'échelle régionale (La Rochelle), la température de l'air reste voisine de 12,5°C entre 1950 et 1980, puis augmente de plus de 1°C en 20 ans (d'après données MétéoFrance). A l'échelle de la France, entre 1900 et 2014, Météo-France a montré que les écarts de températures annuels sont tous positifs à partir de 1988 (Figure 22). La tendance (courbe orangée) augmente régulièrement entre 1984-85 et 2005. Le début de la période de réchauffement (milieu des années 1980) correspond bien au « décrochage » thermique (accélération du réchauffement) montré dans cette étude. Ces résultats confirment, à l'échelle de la France, une évolution de température significative durant les 15 dernières années du 20^{ème} siècle. Ce réchauffement induit un décalage d'environ un mois dans le cycle thermique comparé entre les deux périodes, jusqu'au pic de température de l'été (Figure 20). Ce résultat est en accord avec Parmesan et Yole (2003) qui montrent que le printemps « gagne » 2,3 jours à chaque décade.

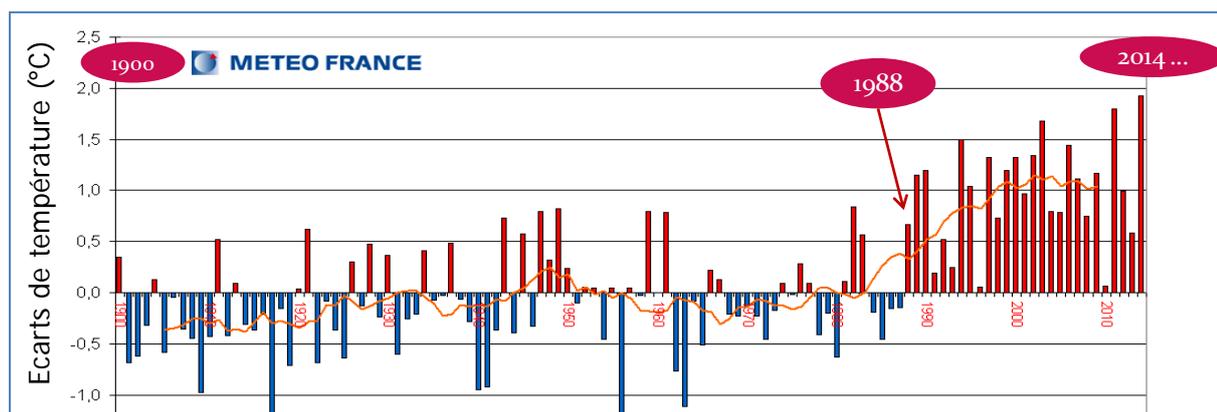


Figure 22. Ecart des médianes annuelles de température de l'air (à l'échelle de la France) avec la médiane interannuelle (1900-2014) (d'après METEO-France).

4.2-EVOLUTION DES AUTRES PARAMETRES METEOROLOGIQUES

Durant le même demi-siècle, la tendance de l'insolation passe de 198 heures à 176 heures, correspondant à une perte de 11% (Soletchnik et al. 1998, Soletchnik 2002). Ce résultat est confirmé par cette étude. L'évolution de l'insolation (perte de 11% entre les deux périodes d'étude) perçue dès la fin du 20^{ème} siècle (Soletchnik et al. 1998) perdure quinze ans plus tard. C'est bien au mois de juin également que dans les Pyrénées Orientales l'évapotranspiration⁵ a augmenté de façon significative (Maton et al. 2011). Dans les limites de notre étude régionale (Météo France/La Rochelle), le volume des précipitations n'a pas changé entre les années 80-90 et début du 21^{ème} siècle. Par contre, la saisonnalité de répartition des précipitations a évolué vers plus de pluie en été et en automne et moins de pluie au printemps. Dans une étude conduite sur le secteur des Pyrénées Orientales, entre 1970 et 2008, les précipitations ont également diminué au printemps (juin) mais également en automne (novembre) (Maton et al. 2011). L'ACP montre bien que le changement global à l'échelle régionale impacte de façon plus marquée la fin d'hiver et le printemps. D'autres auteurs parlent également de changements saisonniers (Callaway et al. 2012). A l'échelle de la planète, le volume des précipitations n'a pas changé, mais leur répartition géographique a évolué (Milliman et al. 2008). Alors que dans le nord de l'Europe, Philippart et al. (2011) évoquent une augmentation des précipitations, il semble qu'aux latitudes de la façade atlantique française, les précipitations aient effectivement diminué sur les bassins versants des grands fleuves (Goberville et al. 2010, Chaalali et al. 2013a, b).

4.3-LES APPORTS DES FLEUVES

Sur la zone littorale, les apports des fleuves résultent des précipitations sur leur(s) bassin(s) versant(s), diminuées (i) de l'évapotranspiration, (ii) du stockage dans les nappes et (iii) de la consommation (somme des prélèvements anthropiques) (Figure 23). En 2014, les fleuves externes (Loire, Garonne, Dordogne) apportent plus d'eau douce (~50 à 70%) que les fleuves internes (Charente, Sèvre Niortaise et Lay). La Charente, dans le nord du bassin de Marennes Oléron ne représente que 20 à 40% des apports. Ce résultat est essentiel. Il permet de comprendre que les fleuves externes représentent un vrai risque d'apports toxiques. Cela est d'autant plus vrai que certaines substances anthropiques, tels les métaux lourds présentent une forte « rémanence ». L'exemple de la contamination des Pertuis Charentais pendant des décennies par le cadmium de l'usine métallurgique de Decazeville (Aveyron) est un exemple historique de contamination⁶ par le panache des fleuves externes aux pertuis (Boutier et al. 2000, Strady 2010). Cela est sans doute moins vrai pour d'autres apports anthropiques, tels les pesticides qui perdent de leur toxicité (dilution, dégradation) dans les panaches des grands fleuves. Les 10.000 km² du bassin versant de la Charente pèsent peu face aux quelques 200.000 km² de ceux de la Loire, Dordogne et Garonne.

L'étude des débits de la Loire, de la Charente, de la Dordogne et de l'Adour et (entre les deux périodes d'étude) montre une baisse significative de leurs débits, principalement durant l'hiver et le printemps. Malgré cela, les apports en nutriments, d'origine anthropique pour une bonne part, ont augmenté durant la deuxième période de l'étude. Ce résultat laisse à penser que les flux de nutriment ont augmenté au cours du 21^{ème} siècle. Une étude, réalisée sur 925 fleuves majeurs entre 1948 et 2004, montre que leurs débits sont en baisse depuis 50 ans. A nos latitudes tempérées, sur la façade atlantique (45-47° de latitude nord), les débits des grands fleuves ont effectivement bien tendance à baisser (Ducharne et al. 2003, Chevillot 2016). Les diminutions de débits mesurés dans cette étude sont comprises entre 13 et 19 %. Elles sont bien en accord avec la prévision d'une baisse de 40 % de débits des fleuves français à l'horizon des années 2050-2060, dans le bassin Adour Garonne en particulier (Ducharne et al. 2003). Elles correspondent à des déficits d'apports annuels, de 0,40 milliard de m³ pour la Charente et de 1,6 à 3,3 milliards pour les autres fleuves. Ces résultats semblent cohérents avec la

⁵ L'évapotranspiration (ETP) est définie comme l'ensemble des pertes par transformation de l'eau en vapeur ; l'évaporation (phénomène physique) et la transpiration de la couverture végétale (phénomène biologique) (Schoeller 1962).

⁶ Il s'agit d'une contamination (depuis la fin du 19^{ème} siècle) par des rejets de cadmium dans le Riou Mort, affluent du Lot, lui-même affluent de la Garonne et de la Gironde.

revue mondiale sur l'effet du réchauffement climatique sur les débits de 137 grands fleuves (Milliman et al. 2008). Ces auteurs montrent que des variations de débits sont observées aux « moyennes latitudes » et que les déficits en apports augmentent considérablement sur le pourtour méditerranéen.

A précipitations annuelles constantes, le déficit en apports, mesuré entre les deux périodes peut être dû à une augmentation de l'évapotranspiration et/ou à une augmentation des prélèvements anthropiques (consommation). Dans l'estuaire de la Gironde, les auteurs imputent la baisse des débits à la diminution des précipitations et à l'augmentation des prélèvements de l'agriculture (Chevillot 2016). L'évolution des usages agricoles serait à analyser au niveau des bassins versants de la Charente et de la Loire (en particulier). Si dans le cas de notre étude, les précipitations à la station de MétéoFrance de la Rochelle semblent « stables » au fil des années, l'information est seulement « indicative ». Elle ne peut en aucun cas être généralisée aux quelques 200.000 km² de bassins versants qui drainent l'eau douce dans les Pertuis Charentais. Dans les pertuis, on peut penser que le déficit en apports peut être dû à une diminution des précipitations (eau et neige) au niveau des BV de la Gironde. Les bassins versants de la Loire et de la Charente ne sont pas concernés par la fonte des neiges. Le fait que le fleuve le plus septentrional (la Loire) présente un déficit de l'ordre de 13% alors qu'il atteint 18-19% pour les autres fleuves situés plus au sud de la façade atlantique, conforte cette hypothèse. Par ailleurs, l'évapotranspiration n'est pas évoquée dans la thèse de Chevillot (2016), alors que le réchauffement climatique agit sur l'augmentation de l'évapotranspiration (Maton et al. 2011). Dans une analyse de la période 1970-2008, sur le secteur des Pyrénées Orientales, les auteurs constatent une augmentation de l'évapotranspiration en février, mars et juin. Elle aurait progressé de + 7,1 mm par an entre 1982 et 1997 (Jung et al. 2010). Le fait que ces mois correspondent bien aux mois de l'année où les déficits en apports sont les plus marqués (avec les mois d'avril et mai également) conforte l'hypothèse d'une contribution significative de l'évapotranspiration (et donc du réchauffement climatique) à la diminution des apports des fleuves de la façade atlantique. Cette hypothèse est également cohérente avec l'augmentation du rayonnement entre les deux périodes (P2-P1) durant les mois de mai et juin (+100 à 200 joules/cm²) sachant que celui-ci est directement corrélé à l'évapotranspiration (Riou 1980).

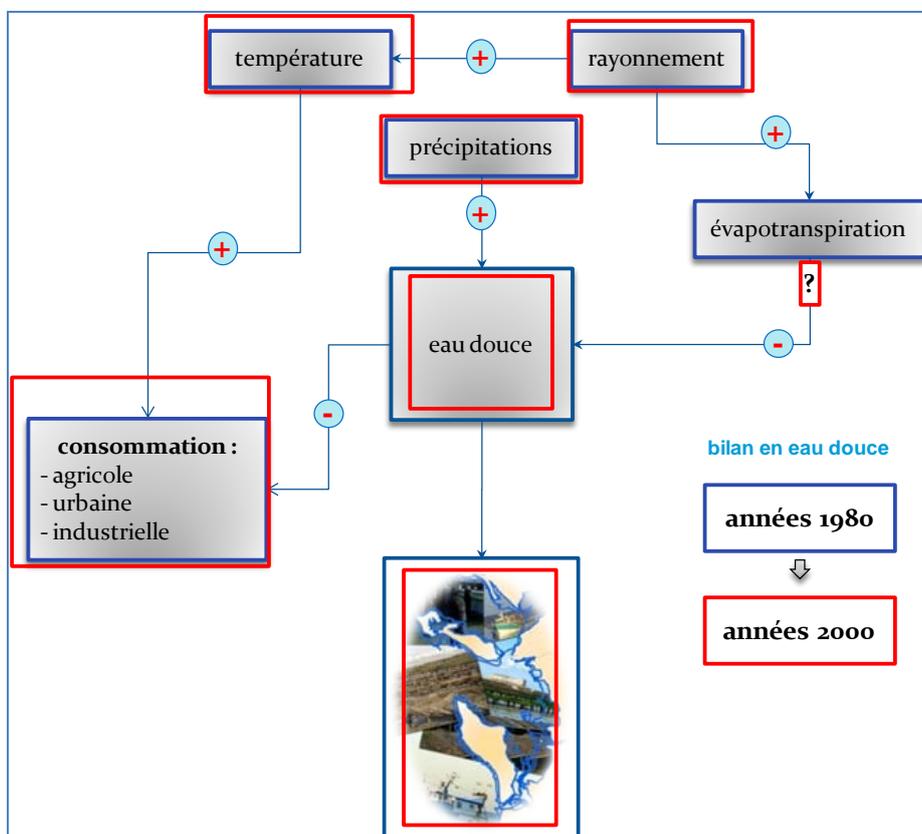


Figure 23. Schéma conceptuel : Bilan de l'eau douce parvenant dans les Pertuis Charentais entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle.

4.4-SALINISATION, NUTRIMENTS ET PRODUCTION PRIMAIRE

La diminution des apports des principaux fleuves dans les Pertuis Charentais est très certainement responsable de la « salinisation » du BMO. Le processus est appelé « marinisation » dans l'estuaire de la Gironde (Chevillot 2016). Alors que l'élévation de température était visible dès 1998 dans le BMO (cinq stations hydrologiques analysées), la salinisation n'était pas encore perçue à cette époque (Soletchnik et al. 1998). Le processus de « salinisation » marquée entre juin et août au nord du BMO (Boyard), et entre avril et juillet dans le sud du BMO (Auger), révèle l'impact contrasté et décalé du panache de la Gironde selon les sites. Ainsi faut-il 1 à 1,5 mois au panache de Gironde pour parcourir la distance entre le Pertuis de Maumusson (sud du BMO) et le site de Boyard (Nord du BMO) (Le Moine, com. pers.). Durant le printemps, c'est bien le déficit des apports de Gironde qui se ferait d'abord sentir sur Auger dès le mois d'avril (- 38 ml d' H₂O L⁻¹), puis sur Boyard à partir du mois de juin (- 38 ml d' H₂O L⁻¹).

Les concentrations de nitrates, phosphates et silicates sont supérieures durant la deuxième période de l'étude, principalement en décembre et en janvier, malgré la diminution significative des apports quantitatifs en eau douce. Les corrélations d'environ 90%, 58% et 42%, pour les nitrates, silicates et phosphates, avec les débits des fleuves, sont cohérents avec l'écart de concentration entre les deux périodes étudiées : +70%, + 26% et + 26% (respectivement pour les nitrates, silicates et phosphates). Ce résultat laisse à penser que ce sont bien les flux de nutriments associés aux apports quantitatifs en eau douce qui auraient augmenté durant le deuxième cycle de l'étude. Au cours de la 2^{ème} période de l'étude (début du 21^{ème} siècle), le site d'Auger se distingue par un cycle d'utilisation des phosphates et des silicates dans l'eau de mer, non conforme à ce qu'il était dans les années 80, et à ce qu'il est sur le site de Boyard. Ce site est bien celui où la concentration en chlorophylle *a* (proxy de production primaire) est supérieure, en juin-juillet (médianes à 4,5 µg/L au début du 21^{ème} siècle) à ce qu'il était dans les années 80. Ces mois d'été sont marqués par la plus forte « salinisation » (+1,1 au mois de juin). L'étude des rapports entre les nutriments va permettre de proposer des hypothèses pour tenter d'expliquer une telle divergence (ou interaction) entre les deux périodes et les deux sites étudiés. Au niveau des écosystèmes estuariens, les premières stratifications hyalines, dès la fin de l'hiver permettent les blooms de diatomées, suivis plus tard dans la saison, par des efflorescences de dinoflagellés, moins exigeantes en silice (Loyer, 2001). Les rapports en sels nutritifs (N/P ; Si/P ; Si/N) définissant des seuils « limitant » pour la production primaire sont présentés *Tableau 6* (d'après Raguenaud 1994). Ainsi, la limitation en silice (Si/N < 1 ou Si/P < 3) semble bien dominer toute l'année, sauf en été, période pendant laquelle la silice est recyclée à partir des diatomées mortes, et pour les deux périodes étudiées (août-sept en 1977-1991 et juil-sept en 2000-2015) (*Tableau 7*). La limitation en azote (N/P < 10 ou N/Si < 1) a lieu de façon « complémentaire » durant les mois d'été pendant lesquels la silice n'est pas limitante (août-sept) en 1977-1991, et sur une période un peu plus large pour la période 2000-2015 : à partir du mois de juin et également au cours du mois de décembre. Cette évolution va bien dans le sens de la « caractérisation estivale » prise par le mois de juin durant la deuxième période de l'étude. Elle est également cohérente avec l'élargissement de la période de production primaire dans notre région, en lien avec le réchauffement climatique. Enfin, le résultat le plus surprenant de cette évolution entre les deux périodes d'étude, concerne le phosphore ; limitant durant l'hiver et le printemps au cours de la première période d'étude (1977-1991), il ne le serait plus au cours de la deuxième période de l'étude. Une augmentation des flux entrants de phosphates (et/ou) un changement significatif dans les processus de production primaire en lien avec le changement global sont les deux hypothèses formulées pour expliquer un tel changement. A l'échelle de l'année, les concentrations en phosphates sur Auger sont d'environ +25% au début du 21^{ème} siècle (par rapport aux années 80) alors qu'il n'existe pas de différence significative sur Boyard. Comme les contributions des fleuves sont très semblables sur ces deux secteurs du BMO (Le Moine, com. pers.), la différence entre les deux stations proviendrait d'une influence anthropique plus marquée sur Auger que sur Boyard. La différence n'existe d'ailleurs pas en hiver ; elle apparaît au printemps et en été, peut-être en lien avec la pression démographique (croissante) sur le littoral des Pertuis-Charentais à cette période (deuxième hypothèse). A l'inverse des nitrates et des phosphates dont les apports sont bien terrigènes, la production d'azote ammoniacal dans le BMO n'est pas corrélée aux apports. Elle résulte de la dégradation de la matière organique, produite essentiellement durant le printemps et l'été. Pour cette

raison, l'ammonium augmente durant la fin de l'été et le début de l'automne (Figure 15). La baisse significative, à l'échelle de l'année de la concentration en azote ammoniacale sur le site de Boyard, pourrait également refléter la diminution significative de matière organique (fèces et pseudofèces) produite par une biomasse d'huîtres en élevage, de plus en plus faible au début du 21^{ème} siècle (Geairon et al. comme pers, rapport en cours).

Tableau 6. Valeurs- seuil des ratios entre les nutriments de la colonne d'eau [silice (Si), azote total (N) et phosphates (P)] conduisant à une limitation en silice, azote ou phosphates (d'après Ragueneau, 1994).

limitation par			
azote total (N)	phosphates (P)	silicates (Si)	
N/P<10	N/P>30	Healey &Hendzel (1979), Healey (1979, 1985), Goldman et al., (1979) Suttle & Harrison (1988)	
Si/N>1	Si/N<20	Parson et al (1961); Furnas (1978); Brzezinski (1985) ; Levasseur et Therriault (1987)	
	Si/P>16	Si/P<3	Harrison et al. (1977)

Tableau 7. Périodes pendant lesquelles certains nutriments de la colonne d'eau seraient en concentration trop faible pour satisfaire les besoin de la production laire durant les deux périodes comparées : 1977-1991 d'une part et 2000-2011 d'autre part (d'après les rapports de Ragueneau, 1994 ; Tableau 6).

mois	1977-1991				2000-2015			
	Si/N	Si/P	N/P	N/Si	Si/N	Si/P	N/P	N/Si
janv	0,56	16,38	29,15	1,78	0,41	10,79	26,29	2,44
fév	0,47	19,00	40,50	2,13	0,43	8,82	20,57	2,33
mars	0,44	20,98	47,33	2,26	0,40	6,65	16,62	2,50
avril	0,41	15,78	38,65	2,45	0,33	9,60	29,07	3,03
mai	0,50	15,04	30,03	2,00	0,45	6,38	14,12	2,21
juin	0,68	14,32	20,98	1,46	0,65	5,35	8,27	1,55
juil	0,87	9,29	10,69	1,15	1,49	7,77	5,20	0,67
août	1,57	11,54	7,33	0,64	1,63	6,48	3,97	0,61
sept	1,66	10,80	6,51	0,60	1,24	7,45	5,99	0,80
oct	0,95	11,70	12,30	1,05	0,60	7,77	12,87	1,66
nov	0,66	15,41	23,34	1,51	0,46	5,19	11,31	2,18
déc	0,60	19,27	31,85	1,65	0,42	3,78	9,01	2,38

limitation par le :	
silicium :	Si/N < 1 ou Si/P < 3
phosphore :	N/P > 30 ou Si/P > 16
azote :	N/P < 10 ou N/Si < 1

Entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle, l'augmentation de chlorophylle a est significative entre février-avril et septembre-décembre. A l'échelle de l'année, la chlorophylle a moyenne passe de 1,48 à 2,20 $\mu\text{g/L}$, correspondant à une augmentation d'environ +50%. Hugues (2000), trouve des réponses contradictoires sur l'évolution du phytoplancton entre 1948 et 1995, selon le degré de latitude dans l'hémisphère Nord. Ainsi la biomasse phytoplanctonique serait-elle plutôt en décroissance au delà du 48°N et en augmentation, avec allongement de saisonnalité, entre le 52° et 58°N (Hugues 2000). Ce résultat concorde avec nos observations faites dans la zone des 45-47° de latitude Nord. Dans les années 80, deux pics de chlorophylle a sont présents en mai et en août dans le Pertuis d'Antioche (diatomées puis dinophycées). L'évolution de la saisonnalité de chlorophylle a dans le BMO montre un élargissement de la saison de production de phytoplancton, au mois de mars en particulier, et un lissage de la saisonnalité de présence de chlorophylle a dans le BMO entre les années 80 et les années 2000 (Soletchnik et al. 1998, Soletchnik et al. 2002). C'est surtout au printemps et en automne que la

chlorophylle a augmente de façon très significative. Tout se passe comme si le réchauffement climatique, l'augmentation du rayonnement en hiver, permettait aujourd'hui une production primaire phytoplanctonique durant l'hiver, autrefois impossible. Les changements hydrodynamiques, en lien avec la diminution des débits hivernaux et printaniers peuvent également intervenir comme facteur dans cette évolution (Ragueneau 1994). Peut-être aussi, cette augmentation des concentrations de chlorophylle a , dans la colonne d'eau traduit-elle une plus grande disponibilité en lien avec une diminution de la pression de prédations par les filtreurs depuis quelques années⁷. Ainsi les stocks d'huîtres en élevage, de près de 100.000 tonnes dans les années 80-90, seraient aujourd'hui réduits à seulement 35.000 tonnes (Le Moine, Geairon, com. pers. évaluation 2012 ; d'après Soletchnik et al. 2014). En mer du Nord et mer Baltique, il a été observé également une augmentation de l'abondance phytoplanctonique ainsi qu'une extension de la période d'abondance du phytoplancton (Alheit et al. 2005). Ces résultats sont également cohérents avec ceux de la Gironde où la diminution des apports a eu comme effet d'augmenter la salinité, de réduire la turbidité, entraînant de fait une diminution d'abondance des diatomées (espèces adaptées aux milieux turbides) au bénéfice des dinoflagellés (Chaalali et al. 2013a). Si ces évolutions en milieux côtier sont cohérentes d'une zone géographique à une autre, il est toutefois important de noter, qu'à l'échelle des océans, le phytoplancton est plutôt en réduction de biomasse (Boyce et al. 2010).

V-CONCLUSION

L'hydro-climat du Bassin de Marennes Oléron (BMO) est étudié à partir de deux stations « historiques » au sud (Auger) et au nord (Boyard) et en comparant deux périodes avant (1978-1991) et après (2000-2015) une période de forte élévation de température de l'eau entre les années 82-84 et 96-98. Entre les deux périodes, le réchauffement climatique se traduit par une élévation de la température de l'eau de 1,5°C en moyenne et 3°C en médiane. Il n'y a pas de changement de saisonnalité de température entre 1977 et 2015. Une saisonnalité positive en salinité est apparue dans le BMO au mois de juin. Au nord, la valeur maximale de « salinisation » est atteinte en juin (+1,2). Au sud, l'élévation de salinité, encore plus forte (+1,35 et +1,60 pour les mois d'avril-juin), révèle la « marinisation » en cours de la Gironde et la diminution des apports printaniers liés à la fonte des neiges. A l'échelle de l'année, la salinité a augmenté de +0,6 à +0,9 selon le site. Les nutriments (nitrates, silicates et phosphates) sont corrélés aux apports des fleuves. La diminution des concentrations de silicates entre janvier et mai, et de nitrates entre janvier et août, révèle le schéma « classique » d'assimilation des sels nutritifs dissous en lien avec la succession des grandes familles phytoplanctoniques : les diatomées d'abord, aux frustules en silice, puis les dinoflagellés. Les rapports (Si/P/N) des nutriments dans la colonne d'eau contrôlent la photosynthèse et la production primaire. Les phosphates, « limitant » la production primaire dans les années 80-90, ne le sont plus au 21^{ème} siècle. Alors que les débits des grands fleuves ont diminué de 13% à 19% entre les deux périodes de l'étude (principalement en hiver et au printemps), le site d'Auger se distingue par un cycle d'utilisation des phosphates et des silicates non conforme à ce qu'il était dans les années 80 et à ce qu'il est, ces dernières années, sur le site de Boyard. Aujourd'hui les nutriments de la colonne d'eau sont significativement plus élevés sur Auger. Cette variabilité inter-sites révèle une évolution spatiale contrastée à l'échelle du bassin de Marennes-Oléron. Par ailleurs, et en réponse probable à la non limitation du phosphate (mais pas seulement), la production primaire a significativement augmenté durant les mois d'automne et d'hiver. Ainsi la chlorophylle a est passée de 1,48 à 2,20 $\mu\text{g/L}$ sur Boyard (+ 48 %), et de 1,78 à 2,57 $\mu\text{g/L}$ sur Auger (+ 44 %), entre les deux périodes d'étude. Une analyse multivariée est réalisée à partir des résultats d'hydrobiologie et des débits des fleuves, à l'échelle du mois, pour chacune des deux périodes étudiée. Elle montre que l'effet du réchauffement climatique sur le fonctionnement hydrologique du BMO, concerne d'abord l'hiver (février, mars) et le printemps (avril

⁷ Multiplication des épizooties ; Une épizootie à herpes virus (OsHV-1) touche le naissain d'huîtres creuses depuis 2008 ; une bactérie pathogène : *Vibrio aestuarianus* induit des mortalités d'huîtres adultes depuis 2012 ; l'hiver 2014, marque le début d'une épizootie sans précédent sur les moules (*Mytilus edulis*) des Pertuis Charentais (Polsenaere et al. 2017).

et juin). L'évolution est telle que certains mois de la première période d'étude (années 80) ont pris, au cours de la deuxième période, les caractéristiques d'un mois différent, suivant ou précédant. Ainsi les mois de février, mai et septembre (21^{ème} siècle) ont respectivement pris les caractéristiques des mois de mars, juin et août des années 80-90. En 2014, les fleuves externes aux Pertuis Charentais (Loire, Garonne et Dordogne) représentent, (selon la saison) entre 52 et 68% des apports. Les apports ont lieu en hiver (50%), au printemps (25%) et le dernier quart se répartit entre l'été et l'automne (respectivement 10% et 15%). Selon la saison, la Charente contribue entre 20 et 40% des apports d'eau douce. Les principaux fleuves de la façade atlantique présentent une baisse significative de débits entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle, principalement durant l'hiver et le printemps. Ces diminutions des débits (à l'échelle de l'année) représentent près de 10 milliards de m³ de déficit en eau douce chaque année au niveau des écosystèmes littoraux. Les conséquences écologique et économique d'une telle évolution à l'échelle des Pertuis Charentais demanderaient à être documentées. Mettre en place une gestion adaptée à ces risques est un véritable enjeu auquel le monde, et la France en particulier est confrontée aujourd'hui (Renard 2006).

REFERENCES

- Alheit J, Mollmann C, Dutz J, Kornilovs G, Loewe P, Mohrholz V, Wasmund N, 2005. Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES J. Mar. Sci.* 62, 1205-1215.
- Arnell N W, 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Chang.* 9, 5-23.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378098000156>)
- Bechemin C, Soletchnik P, Polsenaere P, Le Moine O, Pernet F, Protat M, Fuhrmann M, Quere C, Goullitquer S, Corporeau C, Renault T, Lapegue S, Travers M.A, Morga B, Garriques M, Garcia C, Haffner P, Dubreuil C, Fauray N, Baillon L, Baud J.P, 2014. Surmortalités de la moule bleue *Mytilus edulis* dans les Pertuis Charentais (mars 2014). <http://archimer.ifremer.fr/doc/00229/34022/>
- Belin C & Raffin B, 1990. REPHY (Réseau de suivi du phytoplancton) : Inventaire cartographique des points de prélèvements. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00174/28523/>
- Bell & Collins, 2008 Adaptation, extinction and global change, *Evolutionary applications* 1, 3-16.
- Béthoux N, Etienne M, Ibanez F, Rapaire J.L, 1980. Spécificités hydrologiques des zones littorales. Analyse chronologique par la méthode Census II et estimation des échanges océan atmosphère appliquées à la baie de Villefranche-sur-Mer. *Ann. Inst. Océanogr. Paris* 56, 82-95.
- Boutier B, Chiffolleau J. M, Gonzalez J.L, Lazure P, Auger D, Truquet I, 2000. Influence of the Gironde Estuary outputs on cadmium concentrations in the coastal waters: Consequences on the Marennes-Oléron bay (France). *Oceanologica Acta* 23, 745-758.
- Boyce D. G, Lewis M. R, et al. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591-596.
- Callaway, R, Shinn A. P, Grenfell S. E, Bron J. E, Burnell G, Cook E. J, Crumlish M, Culloty S, Davidson K, Ellis R. P, Flynn K. J, Fox C, Green D. M, Hays G. C, Hughes A. D, Johnston E, Lowe C. D, Lupatsch I, Malham S, Mendzil A. F, Nickell T, Pickerell T, Rowley A. F, Stanley M. S, Tocher D. R, Turnbull J. F, Webb G, Wootton E. and Shields R. J, 2012. Review of climate change impacts on marine aquaculture in the UK and Ireland. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 22, 389-421.
- Carpenter S R & Brock W A, 2006. Rising variance: a leading indicator of ecological transition. *Ecology letters* 9, 308-315.
- Chaalali A, Beaugrand G, Boët P et al., 2013a . Climate-Caused Abrupt Shifts in a European Macrotidal Estuary, *Estuaries and Coasts* 36, 1193-1205.
- Chaalali A, Chevillot X, Beaugrand G, David V, Luczak C, Boët P, Sottolichio, Sautour B, 2013b. Changes in the distribution of copepods in the Gironde estuary: A warming and marinisation consequence ? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 134, 150-161.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771412004544>
- Chevillot X, 2016. Réponses fonctionnelles des écosystèmes estuariens dans le contexte du changement global : cas du réseau trophique de l'estuaire de la Gironde ; Thèse de doctorat en Ecologie évolutive, fonctionnelle et des communautés.
- Chevillot X, Pierre M. et al., 2016. Abrupt shifts in the Gironde fish community: an indicator of ecological changes in an estuarine ecosystem. *MEPS* 549, 137-151.
- Doney S.C, Ruckelshaus M, Duffy J.E, Barry J.P, Chan F, English C.A, Galindo H.M, Grebmeier J.M, Hollowed A.B, Knowlton N, Polovina J, Rabalais N.N, Sydeman W.J, Talley L.D, 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4:11-37.
- Douville H, Ribes A, Decharme B, Alkama R & Sheffield J, 2012. Anthropogenic influence of multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nature Climate Change* 3, 59-62

- Ducharne A, Théry S, Viennot P, Ledoux E, Gomez E, Déqué M, 2003. Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *Vertigo la revue électronique en sciences de l'environnement*. <http://vertigo.revues.org/3845>
- Ebbesmeyer C.C, Cayan D.R, McLain D.R, Nichols F.H, Peterson D.H, Redmond K.T, 1991. 1976 step in the Pacific climate: forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-1984. In: *Seventh Annual Pacific Climate (PACLIM) Workshop*, 10-13 April 1990, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, CA, p. 115-126.
- Faury N, Razet D, Soletchnik P, Gouletquer P, Ratiskol J, Garnier J, 1999. Hydrologie du bassin de Marennes- Oléron. Analyse de la base de données "RAZLEC" 1977- 1995. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6379/>
- Field C.B, Barros V.R, Dokken D.J, Mach K.J, Mastrandrea M.D, Bilir T.E, & Girma B, 2014. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- GIEC 2007. Bilan des changements climatiques: Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (Equipe de rédaction principale : Pachauri R.K., Resinger A.) GIEC. Genève, Suisse. 103 pp.
- Goberville E, Beaugrand G, Sautour B, Treguer P, 2010. Climate-driven changes in coastal marine systems of western europe. *Marine Ecology Progress Series* 408, 129-147.
- Goberville E, Beaugrand G, Edwards M, 2014. Synchronous response of marine plankton ecosystems to climate in the northeast atlantic and the north sea. *J Mar Syst* 129,189-202.
- Goikoetxea N, Borja A, Fontán A, González M, Valencia V, 2009. Trends and anomalies in sea-surface temperature observed over the last 60 years within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 29, 1060–1069.
- Granek E.F, Polasky S, Kappel C.V, Reed D.J, Stoms D.M, Koch E.W, Aswani S, 2010. Ecosystem services as a common language for coastal ecosystem-based management. *Conservation Biology* 24, 207-216.
- Grenne C.H, & Pershing A.J, 2007. Climate Drives Sea Change. *Science* 315, 1084-1085.
- Guildford S.J, & Hecky R.E, 2000. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship?. *Limnology and Oceanography* 45, 1213-1223.
- Harley C D, Randall H, Hultgren K M, Miner B.G, Sorte C.J, Thornber C.S, Williams S.L, 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters* 9, 228-241.
- Hare S, Nathan R, Mantua J, 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography* 47, 103-145. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661100000331>
- Héral M, Berthome J.P, Razet D, Garnier J, 1977. La sécheresse de l'été 1976 dans le bassin ostréicole de Marennes-Oléron : aspects hydrobiologiques. CIEM Conseil International pour l'Exploration de la mer. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2994/>
- Hoegh-Guldberg O & John F.B, 2010. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science* 328, 1523-1528.
- Hughes L, 2000. Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution* 15, 56-61.
- Jung M, Reichstein M et al. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951-954.
- Lazure P, Garnier V, Dumas F, Herry C, Chifflet M, 2009. Development of a hydrodynamic model of the Bay of Biscay. Validation of hydrology. *Continental Shelf Research* 29, 985-997. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/11079/>

- Le Moine O, 2013. Bassins versants et débits des principaux fleuves des pertuis charentais. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00120/23094/>
- Loyer S, 2001. Modélisation de la production phytoplanctonique dans la zone côtière atlantique enrichie par les apports fluviaux. PhD Thesis, Université Paris VI. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/3798/>
- Maton L, Rinaudo J, Caballero Y, 2011. Le changement climatique dans les Pyrénées-Orientales: impacts sur l'agriculture et stratégies d'adaptation. In Workshop preparatory paper, VULCAIN research project, BRGM. <http://agire.brgm.fr/VULCAIN.htm#Doc>. Accessed (Vol. 3).
- Milliman J.D, Farnsworth K, Jones P, Xu K, Smith L, 2008. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global and planetary change* 62:187-194
- Pachauri R.K, Meyer L, Plattner G.K, Stocker T, 2015. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Parmesan C. & Yohe G, 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature* 421, 37-42.
- Parmesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37, 637-669.
- Philippart C.J.M, Anadón R, Danovaro R, Dippner J.W, Drinkwater K.F, Hawkins S.J, Oguz T, O'Sullivan G, Reid P.C, 2011. Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400, 52-69. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022098111000712>
- Polsenaere P, Soletchnik P, Le Moine O, Robert S, Gohin F, Stanisiere J.Y, Dumas F, Bechemin C, 2015. Relationships between winter environmental variations and the blue mussel mortality event observed in the Pertuis Charentais (French Atlantic coastal zone). ASLO Aquatic Sciences Meeting, 22-27 February 2015, Granada, Spain.
- Polsenaere P, Soletchnik P, Le Moine O, Gohin F, Robert S, Pepin J-F, Stanisiere J-Y, Dumas F, Bechemin C, Gouletquer P 2017. Potential environmental drivers of a regional blue mussel mass mortality event (winter of 2014, Breton Sound, France). *Journal of Sea Research*, 123, 39-50 <http://doi.org/10.1016/j.seares.2017.03.005>
- Ragueneau O, 1994. La dynamique du phytoplancton en écosystèmes côtiers macrotidaux: couplage avec l'hydrodynamique et le cycle biogéochimique du silicium (Doctoral dissertation).
- Redfield A. C, 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. *The sea*, 26-77.
- Renard B, 2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. 2006, Thèse docteur de l'INP Grenoble.
- Riou, C, 1980. Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.* 17, 129-137.
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413, 591-596.
- Scheffer M & Carpenter S.R, 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: Linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution* 18, 648-656.
- Schröter D, Cramer W et al., 2005. Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science* 310, 1333-1337.
- Soletchnik P, Faury N, Razet D, Gouletquer P, 1998. Hydrobiology of the Marennes-Oleron bay. Seasonal indices and analysis of trends from 1978 to 1995. *Hydrobiologia* 386, 131-146.

- Soletchnik P, 2001. Impact du changement climatique sur un écosystème estuarien : le Bassin de Marennes Oléron / Impact of the climatic change on an estuarian ecosystem : the Marennes Oléron Bay. Lettre pigb-pmrc France 12, 37-41. Open Access version: <http://archimer.ifremer.fr/doc/00090/20101/>
- Soletchnik P, 2002. Evolution à moyen terme d'un écosystème estuarien : le bassin de Marennes-Oléron. Journées du Département Ressources Aquacoles. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/3381/>
- Soletchnik P, Polsenaere P, Le Moine O, Guesdon S, Bechemin C, 2014. Relations entre apports terrigènes et conchyliculture dans les Pertuis Charentais. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00248/35964/>
- Stanisiere J.Y, Dumas F, Plus M, Maurer D, Robert S, 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2353/>
- Steele J.H, 1998. Regime shift in marine ecosystems. J. Ecol. Appl. 8, S33- S36.
- Strady E, 2010. Mécanismes biogéochimiques de la contamination des huîtres *Crassostrea gigas* en Cadmium en baie de Marennes Oléron. Thèse, University of Bordeaux, 293pp.
- Travers M.A, Pepin J.F, Soletchnik P, Guesdon S, Le Moine O, 2016. Mortalités de moules bleues dans les Pertuis Charentais: description et facteurs liés MORBLEU. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00324/43539/>
- Zhang, X, Zwiers F.W et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. Nature 448, 461-465.

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET ANNEXES

Figures

- Figure 1. Quelques exemples de « services écosystémiques » en lien avec l'écosystème estuarien des Pertuis Charentais. 6
- Figure 2. Stations hydrologiques de Boyard et Auger dans le Bassin de Marennes-Oléron. 9
- Figure 3. Evolution de la tendance de la température de l'eau dans le Bassin de Marennes-Oléron entre 1977 et 2015, en accord avec l'identification d'une période de réchauffement climatique « accéléré » durant les années 80-90. Ce résultat est à l'origine de la méthodologie d'analyse développée dans cette étude. 10
- Figure 4. Températures de l'air (médianes mensuelles) comparées entre deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 dans le bassin de Marennes-Oléron (station de Boyard). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 10830 (d'après données Météo-France). 11
- Figure 5. Evolution de la tendance de température de l'air (méthode Sensus II, courbe bleue) ; puis lissage de cette tendance par moyenne mobile (courbe rouge). Données : Météo France, Bout-Blanc, La Rochelle, 1972-2014. Les flèches noires indiquent les années 1989 et 2000 de rupture de pente de la médiane. 11
- Figure 6. Médianes saisonnières de précipitations comparées entre les périodes 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des données hebdomadaires des quatre saisons de l'année) (d'après données Météo-France). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 11‰ (***) (d'après données Météo-France). 12
- Figure 7. Insolation mensuelles comparées (médianes) entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 (station Météo-France bout blanc La Rochelle). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 9946) (d'après données Météo-France). 12
- Figure 8. Rayonnements mensuels comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 (station Météo-France bout blanc La Rochelle). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (à partir des mesures : N = 9496) (d'après données Météo-France). 13
- Figure 9. Cycles des températures de l'eau comparées entre deux périodes 1978-1991 et 2000-2015 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (À partir des mesures : N = 1328) 13
- Figure 10. Tendances des températures de l'eau de mer sur Boyard. Station de Boyard dans le BMO entre 1977 et 2015. 14
- Figure 11. Cycle de salinité comparé entre deux les périodes 1978-1991 et 2000-2015 dans le BMO à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) 15
- Figure 12. Cycles des nitrates (NO_3^-) comparés entre deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) 15

<i>Figure 13. Cycles des phosphates (PO_4^{3-}) comparés entre deux périodes (1977-1991) et (2000-2011) dans le bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .</i>	16
<i>Figure 14. Cycles des silicates ($SiOH$) comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .</i>	16
<i>Figure 15. Cycles de l'ammonium (NH_4^+) comparés entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2011 dans le Bassin de Marennes-Oléron à Boyard (gauche) et Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .</i>	17
<i>Figure 16. Cycle de la chlorophylle a comparé entre les deux périodes 1977-1991 et 2000-2015 dans le Bassin de Marennes-Oléron aux stations de Boyard (gauche) et d'Auger (droite). Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) .</i>	18
<i>Figure 17. Contribution relative des fleuves aux apports sur Boyard pour les quatre saisons de l'année 2014 et salinité moyenne saisonnière .</i>	19
<i>Figure 18. Débits saisonniers (médianes mensuelles) de la Loire, Charente et Adour (à partir des débits journaliers). Comparaison entre les deux périodes 1978-1991 et 2000-2015. Les étoiles (*) indiquent des différences significatives entre les médianes, au seuil de 5% (*), 1% (**) ou 1‰ (***) (Gauche). Écart des médianes mensuelles entre les deux périodes (droite) .</i>	20
<i>Figure 19. Différences d'apports des fleuves entre (1977-1991) et (2000-2015) .</i>	21
<i>Figure 20. Analyse en composante principales ; projection des variables et des individus [période-mois ; période = P1 : 1977-1991 et P2 : 2000-2015 & mois de janvier (01) à décembre (12)] sur les axes de l'ACP. L'axe 1 (température, salinité, fleuves, NO_3 et $SiOH$) regroupe 85% de la variabilité ; l'axe 2 (chlorophylle a et phosphates), 12% de la variabilité. Le cycle « années 80 » est représenté en rouge ; celui « début du 21^{ème} siècle » en bleu. Les flèches indiquent le sens de l'évolution de chaque mois, d'une période à une autre .</i>	22
<i>Figure 21. Schéma conceptuel d'évolution des principales variables hydro-climatiques étudiées dans cette étude. Les flèches rouges indiquent le sens significatif de l'évolution de la variable entre les deux périodes (avant et après la période d'élévation rapide de la température de l'eau de mer entre 1983 et 1997 dans le BMO) .</i>	24
<i>Figure 22. Ecart des médianes annuelles de température de l'air (à l'échelle de la France) avec la médiane interannuelle (1900-2014) (d'après METEO-France) .</i>	25
<i>Figure 23. Schéma conceptuel : Bilan de l'eau douce parvenant dans les Pertuis Charentais entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle .</i>	27

Tableaux

<i>Tableau 1. Contribution relative des fleuves aux apports sur Boyard pour les quatre saisons de l'année 2014.</i>	18
<i>Tableau 2. Diminution des débits de quatre fleuves côtiers de la façade Atlantique française entre les années 80 et le début du 21^{ème} siècle.</i>	21
<i>Tableau 3. Cosinus carré des variables ; Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand.</i>	23
<i>Tableau 4. Matrice de corrélation des variables de l'ACP.</i>	23
<i>Tableau 5. Comparaison des conditions hydro-climatiques sur le site de Boyard entre (1977-1991) et (2000-2015). Les écarts significatifs sont représentés par les chiffres : 1, 2 et 3 selon le niveau de significativité (5%, 1% et 1‰). Les signes (-, +), ainsi que la couleur, indiquent le sens de l'écart entre les deux périodes (1977-1991) et (2000-2015).</i>	24
<i>Tableau 6. Valeurs- seuil des ratios entre les nutriments de la colonne d'eau [silice (Si), azote total (N) et phosphates (P)] conduisant à une limitation en silice, azote ou phosphates (d'après Ragueneau, 1994).</i> ... 29	
<i>Tableau 7. Périodes pendant lesquelles certains nutriments de la colonne d'eau seraient en concentration trop faible pour satisfaire les besoins de la production I^{aire} durant les deux périodes comparées : 1977-1991 d'une part et 2000-2011 d'autre part (d'après les rapports de Ragueneau, 1994 ; Tableau 6).</i>	29

Annexes

<i>Annexe 1. Constitution d'une série historique à partir des bases RAZLEC et REPHY sur la station de BOYARD.....</i>	<i>40</i>
<i>Annexe 2. Tableaux des médianes mensuelles (ou saisonnières) de la température de l'air, des précipitations, de l'insolation, du rayonnement et de la température de l'eau de mer.</i>	<i>41</i>
<i>Annexe 3. Comparaison entre médianes et moyennes de température.....</i>	<i>43</i>
<i>Annexe 4. Tableau des médianes mensuelles de la salinité comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.</i>	<i>44</i>
<i>Annexe 5. Evolution de la saisonnalité de la salinité.....</i>	<i>45</i>
<i>Annexe 6. Tableaux des médianes mensuelles des nitrates, phosphates, silicates, ammonium, chlorophylle a et débit des fleuves.</i>	<i>46</i>

ANNEXES

Annexe 1. Constitution d'une série historique à partir des bases RAZLEC et REPHY sur la station de BOYARD

La base hydrologique « Razlec » (1977-2010) et celle du Rephy (1992-2015) se recouvrent sur la période 1992-2010. La stratégie d'étudier la série hydroclimatique la plus longue possible sur le site de Boyard passait donc par la fusion des deux bases de données.

Médianes mensuelles de salinités comparées entre les périodes : 1977-1990 et 2000-2010 (test de Kruskal-Wallis) à partir des moyennes mensuelles (comparaison Razlec et Rephy entre 2000 et 2010).

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif N	médianes	
			Razlec/Rephy	Razlec
Janv	0,38	36/34	32,4	31,82
Fév	0,087	36/30	31,8	30,95
Mars	0,727	39/34	32,3	32
Avril	0,91	42/42	32,2	32,2
Mai	0,016	42/50	33,25	32,4
Juin	0,145	40/67	33,35	33,7
Juillet	0,361	44/62	34,35	34,4
Août	0,258	42/46	34,65	34,75
Sept	0,210	44/53	34,65	34,7
Oct	0,526	42/34	34,6	34,7
Nov	0,70	40/36	34,2	33,95
Déc	0,80	32/30	33,05	32,9
Janv-déc	0,233	479/518	33,4	33,56

Methodologie : Le test de comparaison est réalisé sur la période de chevauchement des deux bases ; soit sur la période 2000-2010. Seul le mois de mai montre une différence significative (seuil de 5%) entre les deux bases de données. Le fait de voir si peu de différences entre les résultats issus des deux bases autorise à les fusionner pour les analyses.

Annexe 2. Tableaux des médianes mensuelles (ou saisonnières) de la température de l'air, des précipitations, de l'insolation, du rayonnement et de la température de l'eau de mer.

Médianes mensuelles de température de l'air comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des données brutes ; d'après données Météo-France).

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2015
Janv	0,0014	930	6,7	7,3
Fev	0,066	847	7,5	7,7
Mars	0	930	9,2	10,1
Avril	0	900	10,9	11,4
Mai	0	930	13,9	15,1
Juin	0	900	16,8	18,6
Juillet	0,23	930	19,6	19,7
Aout	0,0025	930	19,5	19,8
Sept	0,62	870	17,9	17,85
Oct	0	898	14,4	15,5
Nov	0,00015	866	9,95	10,8
Déc	0,33	899	7,3	7,4
Janv-déc	0	10830	12,7	13,5

Médianes saisonnières de précipitations comparées entre les périodes : 1977-1991 et 2000-2015 (test de Kruskal-Wallis) (cumul hebdomadaire des précipitations durant chacune des saisons de l'année ; d'après données Météo-France).

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	Médianes (mm/mois)		Ecart entre médianes (mm/mois)	Ecart entre médianes (%)
			1977-1990	2000-2015		
Hiver	0,11	389	12,6	10,4	-2,2	-17,5
Printemps	0,039	390	9,9	6,6	-3,3	-33,3
Eté	0,033	387	3,8	6,0	+2,2	+57,9
Automne	0,049	407	10,1	13,8	+3,7	+36,6
Année	0,64	1573	7,8	8,4	+0,6	+7,7

~ 12 sommes hebdomadaires de précipitations par saison et année pour chacune des années de la période considérée.

Médianes mensuelles de l'insolation (heures/jour) comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des données brutes ; d'après données Météo-France).

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1978-1991	2000-2015
Janv	0,21	803	2	1
Fév	0,46	733	3	3
Mars	0,85	803	5	5
Avril	0,10	780	8	7
Mai	0,54	806	8	7
Juin	0,21	777	9	10
Juillet	0,0005	805	11	9
Août	0,00032	783	10	8,5
Sept	0,40	765	9	9
Oct	0,017	806	5	4
Nov	0	780	4	2
Déc	0,19	805	2	2
Janv-déc	0	9446	6	5,5

Médianes mensuelles du rayonnement comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des données brutes ; d'après données Météo-France).

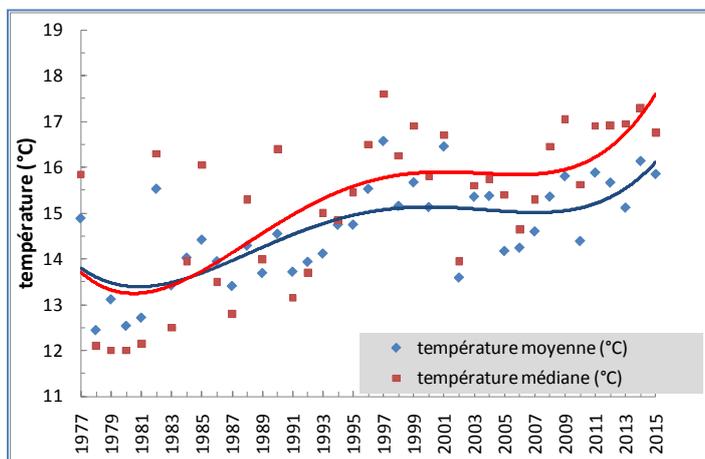
mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1978-1991	2000-2015
Janv	0,54	806	405	414
Fév	0,023	734	710	766
Mars	0,019	806	1232	1312
Avril	0,50	780	1825	1854
Mai	0,0070	806	2054	2158
Juin	0	780	2388	2578
Juillet	0,25	806	2409	2464
Août	0,41	806	2112	2120
Sept	0,015	780	1589	1680
Oct	0,90	806	928	937
Nov	0,013	780	590	489
Déc	0,72	806	380	372
Janv-déc	0,038	9496	1194	1232

Médianes mensuelles de températures de l'eau de mer comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis ; à partir des mesures) sur Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2015
BOYARD				
Janv	0,77	85	8,4	8,7
Fév	0,049	82	7,85	8,95
Mars	0,92	89	10,4	10,4
Avril	0,0054	101	11,6	12,3
Mai	0,012	117	14,5	15,2
Juin	0,0000	143	16,5	17,2
Juillet	0,23	133	19,0	19,38
Août	0,0003	112	19,2	19,9
Sept	0,0024	118	18	19
Oct	0,150	90	16	16,6
Nov	0,014	92	12,1	13
Déc	0,072	89	9,1	9,8
Janv-déc	0	1244	13,5	16,5
AUGER				
Janv	0,11	79	8,85	9,21
Fév	0,14	78	9,2	9,1
Mars	0,10	77	10,8	10,4
Avril	0,064	91	12	12,8
Mai	0,76	111	15,2	15,5
Juin	0,000	132	16,7	18
Juillet	0,0010	124	19,2	20
Août	0,0027	99	20	20,6
Sept	0,20	109	18,6	18,97
Oct	0,098	83	16,3	17,1
Nov	0,016	86	12,6	13,1
Déc	0,016	83	9,35	10,67
Janv-déc	0	1152	14,5	15,4

Annexe 3. Comparaison entre médianes et moyennes de température

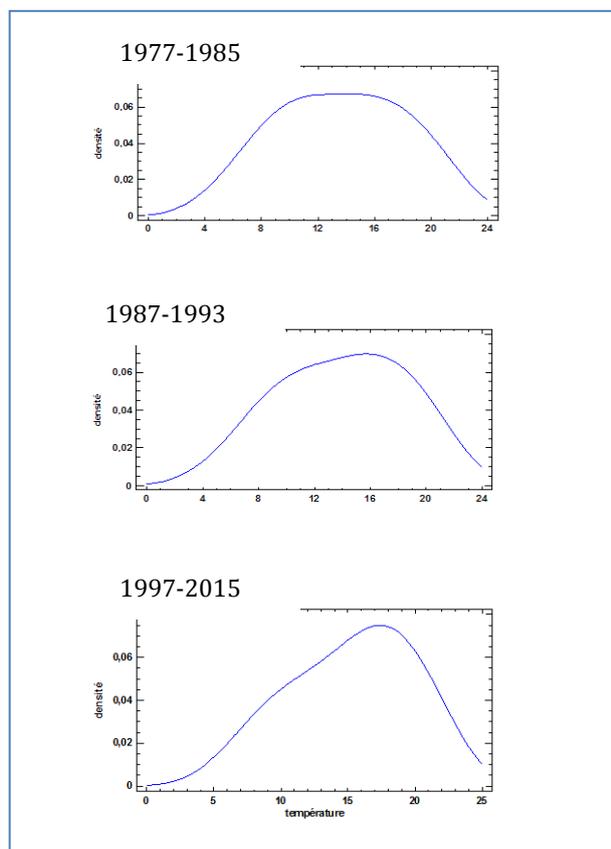
Un modèle polynomial d'ordre 4, ajusté sur les médianes⁸ et les moyennes⁹ de températures de l'eau de mer, diverge à partir de la fin des années 80. Ce résultat traduit la plus forte occurrence des températures élevées qui rendent progressivement la distribution des températures asymétriques, en déplaçant mode et médiane vers des valeurs de température plus élevées (figure ci-dessous)



Evolution des médianes et moyennes de températures annuelles de l'eau de mer entre 1977 et 2015.

De plus en plus d'asymétrie (-0,38 ; -1,48 ; -4,2) apparaît entre les trois périodes : 1977-1985 (avant réchauffement) ; 1987-1993 (pendant la période de réchauffement) et 1997-2015 (figure ci-dessous).

Distribution des densités de température selon trois périodes : avant (1977-1985), pendant (1987-1993) et après le réchauffement de la masse d'eau dans le nord du bassin de Marennes-Oléron.



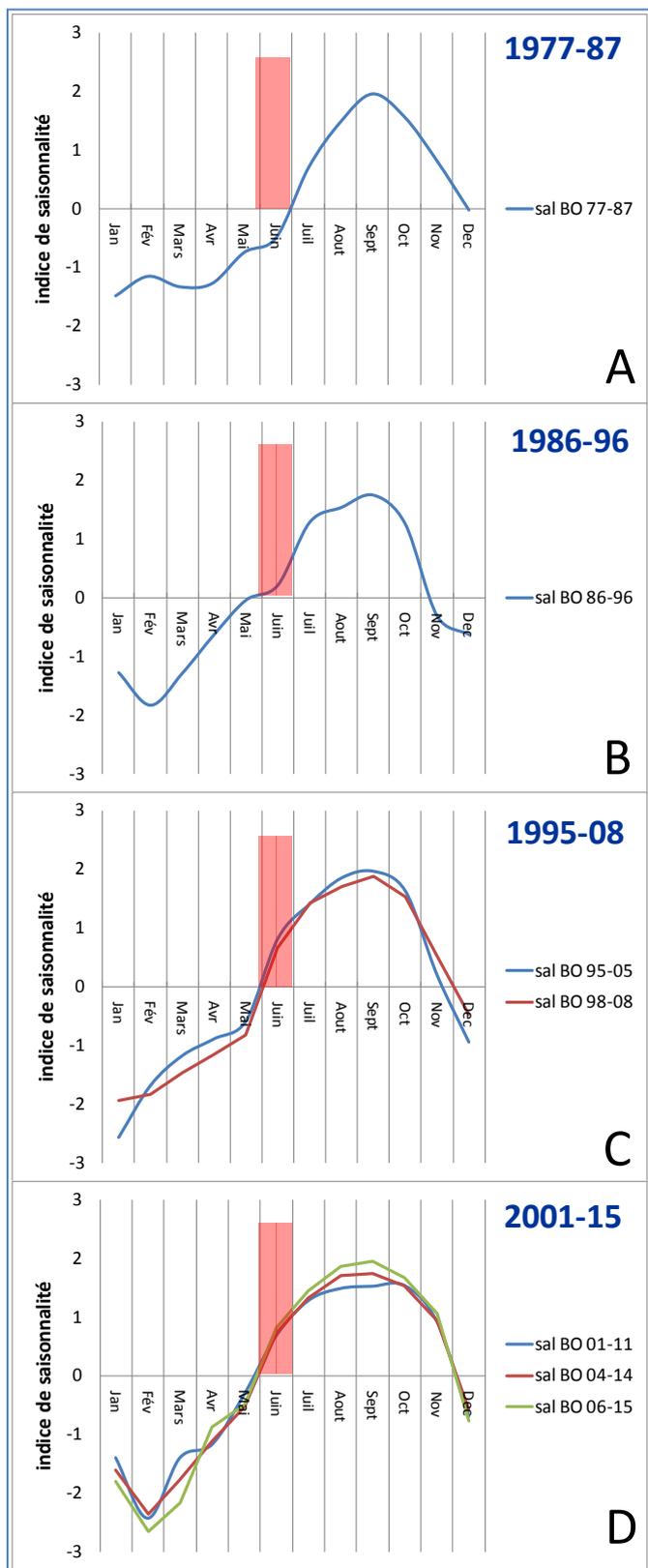
⁸ $y = 3E-05x^4 - 0,2425x^3 + 725,94x^2 - 965856x + 5E+08 / R^2 = 0,5019$

⁹ $y = 2E-05x^4 - 0,1771x^3 + 530,14x^2 - 705409x + 4E+08 / R^2 = 0,4867$

Annexe 4. Tableau des médianes mensuelles de la salinité comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2015
BOYARD				
Janv	0,92	78	31,45	31,82
Fév	0,88	82	31,15	30,9
Mars	0,33	90	31,6	32
Avril	0,24	101	31,8	32,1
Mai	0,77	117	32,3	32,35
Juin	< 0,001	121	32,45	33,65
Juillet	< 0,001	117	33,7	34,4
Août	< 0,001	104	33,95	34,65
Sept	0,06	104	34,25	34,6
Oct	0,0096	87	34	34,5
Nov	0,10	89	33,5	33,9
Déc	0,10	86	32,9	31,95
Janv-déc	< 0,001	1176	32,9	33,5
AUGER				
Janv	0,14	79	31,3	31,7
Fév	0,068	78	30,4	31,85
Mars	0,83	78	31,0	31,1
Avril	0,0049	94	30,45	31,8
Mai	0,0001	120	30,8	32,3
Juin	0	139	31,5	33,1
Juillet	0,0002	128	33,2	33,8
Août	0,021	105	33,55	34,3
Sept	0,24	117	33,75	34,2
Oct	0,013	83	33,4	34,1
Nov	0,13	86	33,05	33,7
Déc	0,017	83	32,3	33
Janv-déc	0	1190	32,4	33,3

Annexe 5. Evolution de la saisonnalité de la salinité



Evolution de la saisonnalité de salinité de l'eau de mer entre 1977 et 2015 dans le Pertuis d'Antioche (station de Boyard).

Durant la période de réchauffement de la masse d'eau littorale (1986-1993), une période de saisonnalité positive de la salinité se met en place au mois de juin. Cette évolution de saisonnalité de salinité conduit ainsi à augmenter, à fois la période de saisonnalité positive (entre juin et novembre), mais également l'amplitude de saisonnalité avec en particulier un mois de février plus typé en saisonnalité négative entre 2000-2015 qu'en 1977-1987.

Annexe 6. Tableaux des médianes mensuelles des nitrates, phosphates, silicates, ammonium, chlorophylle *a* et débit des fleuves.

Médianes mensuelles de nitrates (NO₃) comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2011
BOYARD				
Janv	0,00002	69	25,7	41
Fév	0,65	79	31	33,6
Mars	0,74	84	28,8	26,9
Avril	0,66	90	23,5	20
Mai	0,92	79	12,3	12,4
Juin	0,72	94	5,6	6,7
Juillet	0,38	87	2,7	2,5
Août	0,09	84	2,2	0,9
Sept	0,04	85	1,5	2,44
Oct	0,66	83	4,5	6,2
Nov	0,74	82	12,2	11,1
Déc	0,0000	75	16,9	33,8
Janv-déc	0,06	991	11,4	12,4
AUGER				
Janv	0,0018	72	20,5	29,5
Fév	0,19	75	30,8	37,1
Mars	0,015	73	26,5	29,7
Avril	0,40	82	22,1	21,5
Mai	0,30	81	14,2	14,5
Juin	0,0065	83	5,8	11,7
Juillet	0,069	78	2,6	4,7
Août	0,75	77	2	2,37
Sept	0,0034	78	2,55	4,47
Oct	0,29	77	5,2	8,3
Nov	0,26	71	12,6	13,9
Déc	0,0000	69	16,9	29,30
Janv-déc	0,0000	916	10,5	15,6

Médianes mensuelles des phosphates (PO₄) comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2011
BOYARD				
Janv	0,007	69	0,6	0,85
Fév	0,75	79	0,82	0,79
Mars	0,45	83	0,63	0,64
Avril	0,74	90	0,40	0,32
Mai	0,75	79	0,30	0,36
Juin	0,53	94	0,39	0,35
Juillet	0,44	87	0,25	0,37
Août	0,76	85	0,41	0,40
Sept	0,38	85	0,32	0,43
Oct	0,60	83	0,66	0,66
Nov	0,25	82	0,77	0,82
Déc	0,0042	75	0,69	1,00
Janv-déc	0,069	991	0,55	0,56
AUGER				
Janv	0,37	76	0,69	0,61

Fév	0,96	79	0,80	0,74
Mars	0,19	70	0,5	0,68
Avril	0,90	81	0,41	0,34
Mai	0,87	80	0,29	0,37
Juin	0,34	83	0,29	0,38
Juillet	0,012	78	0,22	0,45
Août	0,77	77	0,37	0,48
Sept	0,32	78	0,42	0,49
Oct	0,37	77	0,55	0,69
Nov	0,048	74	0,56	0,8
Déc	0,0066	74	0,61	0,79
Janv-déc	0,00022	927	0,46	0,58

Médianes mensuelles des silicates (SIOH) comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2011
BOYARD				
Janv	0,0015	69	13,5	18,5
Fev	0,65	79	15,6	16,4
Mars	0,17	84	13,5	10,9
Avril	0,49	90	9,35	8,0
Mai	0,93	80	4,1	3,5
Juin	0,98	94	4,2	5,5
Juillet	0,060	87	5,5	7,0
Aout	0,61	89	6,9	7,7
Sept	0,52	86	8,4	7,9
Oct	0,67	83	9,5	10,9
Nov	0,075	80	12,3	10,8
Déc	0,52	75	12,7	15
Janv-déc	0,15	996	10	9,04
AUGER				
Janv	0,099	76	12,8	16,0
Fev	0,78	79	17,3	18,6
Mars	0,58	72	13,6	14,3
Avril	0,059	82	10,5	9,1
Mai	0,85	81	5,6	7,8
Juin	0,017	82	4,8	8,5
Juillet	0,0003	78	4,1	9,9
Aout	0,14	81	7,5	8,3
Sept	0,07	78	7,6	8,7
Oct	0,57	77	7,5	11
Nov	0,44	74	11,1	12,4
Déc	0,044	74	12,4	15,3
Janv-déc	0,0001	934	9	11,6

Médianes mensuelles de l'ammonium (NH₄⁺) comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) à partir des mesures à Boyard et Auger.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2011
BOYARD				
Janv	0,48	76	1,1	1,15
Fév	0,59	80	1,2	1,1
Mars	0,58	86	1,35	1,10
Avril	0,19	94	1,55	1,04
Mai	0,32	89	1,8	1,36
Juin	0,035	94	1,3	0,92

Juillet	0,0094	87	1,6	1,35
Août	0,37	96	0,95	0,79
Sept	0,68	94	1,5	1,48
Oct	0,73	88	1,9	2,05
Nov	0,0034	89	2	1,49
Déc	0,0002	80	0,8	0,37
Janv-déc	0,0004	1053	1,3	1,18
AUGER				
Janv	0,008	82	1,2	0,86
Fév	0,84	85	1,3	1,24
Mars	0,055	74	1,7	1,23
Avril	0,41	86	1,2	0,88
Mai	0,041	86	0,9	1,4
Juin	0,80	84	1,1	1,02
Juillet	0,41	80	1,1	1,35
Août	0,22	83	1,2	2,23
Sept	0,93	88	2,55	2,32
Oct	0,31	80	1,8	2,21
Nov	0,18	85	2,2	1,65
Déc	0,89	83	0,75	0,84
Janv-déc	0,88	996	1,2	1,35

Médianes mensuelles de chlorophylle a comparées entre les périodes : 1979-1990 et 2001-2015 (test de Kruskal-Wallis) (à partir des mesures discrètes). La valeur entre parenthèses indique le nombre de mesures.

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes	
			1977-1991	2000-2011
BOYARD				
Janv	0,101	73	0,53	0,93
Fév	0,003	78	0,61	1,035
Mars	0,009	82	1,04	1,8
Avril	0,0001	89	1,36	2,43
Mai	0,703	100	3,89	3,27
Juin	0,422	99	3,19	3,74
Juillet	0,049	92	2,54	3,78
Août	0,067	86	2,75	3,17
Sept	0,0003	88	1,84	2,8
Oct	0,0005	68	1,17	2,12
Nov	0	76	0,60	1,51
Déc	0	71	0,64	1,01
Janv-déc	0	1001	1,48	2,20
AUGER				
Janv	0,0001	115	0,54	1,19
Fév	0,045	117	0,8	1,24
Mars	0,0007	114	1,14	1,28
Avril	0	128	1,95	3,59
Mai	0,12	139	5,93	4,53
Juin	0,0059	133	3,57	4,63
Juillet	0,65	127	4,51	4,54
Août	0,44	115	3,28	3,44
Sept	0,015	123	2,32	3,33
Oct	0,0000	106	1,53	2,59
Nov	0,0023	112	0,98	1,49
Déc	0,0052	105	0,75	1,14
Janv-déc	0	1434	1,78	2,57

Médianes des débits des fleuves (Loire, Charente, Adour et Dordogne) comparées entre (1979-1990) et (2001-2015) (test de Kruskal-Wallis, débits journaliers).

mois	Probabilité (test K.W.)	Effectif n	médianes		
			1977-1991	2000-2015	Ecart entre les deux périodes
LOIRE					
Janv	0,76	992	1290	1280	10
Fév.	<0,001	897	1550	1310	240
Mars	<0,001	992	1280	1070	210
Avril	0	960	1280	883	397
Mai	<0,001	992	920	740	180
Juin	<0,001	960	680	454	226
Juillet	<0,001	992	392	277	115
Août	0,112	979	246	211	35
Sept	0,015	930	230	240	-10
Oct	0,48	961	307	284	23
Nov	0,004	930	520	521	-1
Déc	<0,001	956	750	974	-224
Janv-déc	<0,001	11541	655	611	44
CHARENTE					
Janv.	0,022	930	151	138	13
Fév.	<0,001	840	165	130	35
Mars	<0,001	930	139	103	36
Avril	0	897	132	77	55
Mai	<0,001	899	94	66	28
Juin	<0,001	856	73	49	24
Juillet	0,035	837	22,5	26	-3,5
Août	0	837	15	21	-6
Sept	0	810	15	21	-6
Oct.	<0,001	837	20	25	-5
Nov.	0,027	810	33	48	-15
Déc.	0,022	829	67	79	-12
Janv.-déc	0,040	10312	66	54	12
ADOUR					
Janv	<0,001	980	410	309	101
Fév.	<0,001	901	473	369	104
Mars	0,018	992	433	379	54
Avril	0	960	561	430	131
Mai	0	992	540	470	70
Juin	0	960	442	328	114
Juillet	0	992	231	170	61
Août	<0,001	961	150	123	27
Sept	<0,001	930	125	115	10
Oct	0,013	961	161	142	19
Nov	<0,001	930	238	270	-32
Déc	0,29	961	275	308	-33
Janv-déc	<0,001	11520	320	272	48
DORDOGNE					
Janv	0,0067	992	481	407	74
Fév.	0	897	560	430	130
Mars	0	992	483	379	104
Avril	0	954	513	335	178
Mai	0	992	358	259	99
Juin	0	960	219	177	42
Juillet	0	961	137	103	34
Août	0,54	961	85	86	-1
Sept	0	930	92	116	-24
Oct	0,19	961	124	136	-12
Nov	0,0002	930	250	179	71
Déc	0,30	956	324	331	-7
Janv-déc	0	11486	261	234	27

