

Evaluation des Indicateurs de Changement Climatique et Analyse des Impacts dans le Périmètre du SAGE Estuaire de la Gironde et Milieux Associés



@smiddest

Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (SMIDDEST)

Responsables du stage : Valérie BRICHE- Ronan GAUDIN - Elodie MOULIN

Période du stage : 12/04/2021 – 31/08/2021

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage.

Tout d'abord j'adresse mes remerciements à mes maîtres de stage Valérie BRICHE, Ronan Gaudin et Elodie MOULIN pour le partage de leurs connaissances, leurs expériences et leurs corrections que chacun d'eux m'ont apportés.

Je remercie également l'ensemble l'équipe du pôle eau :

- Barbara LALEVE pour son soutien
- Loic GREGORUTTI pour le partage de ses savoirs de sigiste notamment
- Juliette GAILLARD pour son avis scientifique et ses conseils précieux en statistiques.

Je souhaite remercier aussi Sabine SCHMIDT (Directrice de Recherche CNRS à l'Université Bordeaux) et Aldo SOTTOLICHIO (Enseignant chercheur) pour le temps passé ensemble et le partage de leurs connaissances. J'adresse d'ailleurs mes remerciements à toutes les personnes qui, comme eux, m'ont fournies les données nécessaires à la réalisation de ce stage.

Je remercie également mes professeurs universitaires pour leurs enseignements qui m'ont permis de mettre mes connaissances à disposition du SMIDDEST. Et Noëlle BRU à qui je veux témoigner ma reconnaissance pour m'avoir donné de précieux conseils à plusieurs reprises.

Enfin, je tiens à remercier vivement Jean-Luc TROUVAT de m'avoir acceptée en tant que stagiaire et de m'avoir permis de réaliser ce stage très intéressant.

Avant-propos :

Le SMIDDEST :

Le Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (SMIDDEST) est un établissement public qui permet la préservation, la gestion et la coordination du territoire de l'Estuaire de la Gironde via l'association de plusieurs collectivités (Région, Départements, métropole communautés de communes). Les missions du SMIDDEST traitent de 4 domaines afin d'assurer une gestion de l'Estuaire en lien avec les problématiques actuelles tout en promouvant et développant le patrimoine culturel. Les principaux axes d'actions sont la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, la promotion et le développement de l'Estuaire et la gestion du Phare de Cordouan. (SMIDDEST, 2021).

Le SAGE :

C'est dans ce souci de préservation de l'environnement que le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) « Estuaire de la Gironde et milieux associés » a été mis en place. Un SAGE est un outil de planification qui fixe les objectifs généraux pour aboutir à la mise en valeur et la protection des milieux aquatiques dans un périmètre défini à l'échelle hydrographique. Il est composé d'un Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD) qui définit plus précisément les objectifs du document ainsi qu'un règlement, document opposable à l'administration et aux tiers, qui permet la réalisation des objectifs exprimés dans le PAGD. Le SAGE « Estuaire de la Gironde et milieux associés » recouvre un espace de 3 800 km² et englobe au total 185 communes réparties sur les départements de la Gironde et de la Charente-Maritime (Commission Locale de l'eau, 2013). Depuis 2008, l'Estuaire de la Gironde est reconnu comme un site pilote pour l'étude des impacts des changements globaux. La Commission Locale de l'Eau (CLE), organe délibérant, qui a pour objectif le suivi de l'état d'avancement du SAGE a d'ailleurs exprimé sa volonté de connaître et/ou d'évaluer l'impact du changement climatique sur ce territoire. Cette intention est traduite dans le SAGE comme un enjeu majeur (SMIDDEST, 2021).

Le projet :

Dans le but de visualiser le changement climatique et ses impacts sur l'estuaire de la Gironde, une équipe de scientifique, en collaboration avec des collectivités, a récolté et réuni des données selon 18 indicateurs. Le SMIDDEST collecte et actualise ces données annuellement afin de visualiser leur évolution. Le SMIDDEST, via la Commission Locale de l'Eau, joue donc un rôle déterminant en tant que médiateur : il organise et anime des réunions/débats regroupant un ensemble d'acteurs (techniques, scientifiques, collectivités) pour mettre en oeuvre des protocoles, discuter de la fonctionnalité de certaines mesures et des résultats. Le suivi du changement climatique est déterminant. Les 18 indicateurs recensés permettent l'étude de l'impact du changement climatique sur l'ensemble de la zone recouverte par le SAGE. Ce recensement associé à une analyse est déterminant afin de mettre en place une gestion engagée et ciblée pour limiter les impacts des changements globaux prédits dans les années à venir.

Table des matières

Remerciements	- 3 -
Avant-propos.....	- 4 -
Le SMIDDEST :	- 4 -
Le SAGE :	- 4 -
Le projet :	- 4 -
Table des matières	- 5 -
Tables des illustrations :	- 7 -
Introduction.....	- 8 -
Etat des lieux des connaissances de l'estuaire de la Gironde.....	- 9 -
Présentation générale :	- 9 -
Le changement climatique :	- 9 -
Augmentation de la température :	- 10 -
Marinisation :	- 10 -
Bouchon vaseux :	- 10 -
Evolution des débits :	- 10 -
Inondations, tempêtes et précipitations :	- 10 -
Disponibilité de la ressource en eau :	- 11 -
Biodiversité et fonctionnement écologique :	- 11 -
Les pollutions :	- 11 -
Les zones humides :	- 12 -
Développement des connaissances :	- 12 -
Matériels et méthodes	- 13 -
I. Contexte	- 13 -
II. Mise à jour des données	- 14 -
a. Indicateurs climatiques :	- 14 -
b. Indicateurs du fonctionnement hydro sédimentaire et de l'impact de la qualité de l'eau : ...	- 14 -
c. Autres Indicateurs :	- 15 -
III. Indicateurs non étudiés	- 15 -
IV. Analyse des données :	- 15 -
a. Etude des indicateurs de référence :	- 15 -
b. Analyse des tendances et des corrélations entre indicateurs :	- 15 -
c. Etude de la corrélation	- 16 -
d. Schéma récapitulatif du matériels et méthodes	- 17 -

Résultats et discussion :	- 17 -
I. Etude des indicateurs de référence	- 18 -
II. Analyse de la tendance et de la corrélation des indicateurs	- 20 -
a. Etude de la tendance générale:.....	- 20 -
a. Etude de la corrélation entre les indicateurs :	- 24 -
Conclusion	- 30 -
Références bibliographiques.....	- 31 -
Webographie.....	- 32 -
Annexes	- 33 -
Résumé.....	- 38 -
Abstract	- 38 -

Tables des illustrations :

Figure 1: Cartographie du périmètre et communes du SAGE "Estuaire de la Gironde et milieux associés" et des lieux où les données ont été récoltées.	- 13 -
Figure 2: Nuage de point de la température atmosphérique à Bordeaux en fonction des précipitations entre 1970 et 2020	- 18 -
Figure 3 : Nuage de points du débit de la Garonne en fonction des précipitations entre 1970 et 2020 -	18 -
Figure 4: Nuage de point du débit de la Garonne en fonction de la température atmosphérique à Bordeaux entre 1970 et 2020.....	- 18 -
Figure 5: Boîte à moustache de l'évolution de la température atmosphérique à Bordeaux (A), de la température de la Garonne (B), de la Dordogne (C), mais aussi des précipitations (D) et des tempêtes (E) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)	- 20 -
Figure 6: Boîtes à moustaches des inondations à Bordeaux(a), Pauillac(b), Libourne(c) et Saint-Laurent-Médoc selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)	- 20 -
Figure 7: Boîte à moustache de l'évolution de l'évapotranspiration (a), du nombre de jours caniculaires (b) et de nuits caniculaires (c) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020).....	- 22 -
Figure 8: Boîte à moustache de l'évolution des débits de la Dordogne (a), de la Garonne (b), de la Jalle-de-Ludon (c) et du niveau de la mer (d) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)	- 22 -
Figure 9: Cercle de corrélation des variables climatiques entre 1970 et 2020	- 24 -
Figure 10: Nuage de point des individus entre 1970 et 2020	- 24 -
Figure 11 : Cercle de corrélation des variables relatives au fonctionnement hydro sédimentaire et à l'impact de la qualité de l'eau entre 2005 et 2020.	- 26 -
Figure 12: Nuage de point des individus	- 26 -
Figure 13: Cercle de corrélation avec l'ensemble des variables entre 1970 et 2020.....	- 28 -
Figure 14: Nuage de point des individus entre 1970 et 2020	- 28 -
Tableau 1: tableau récapitulatif des tests de corrélation de Spearman	- 19 -
Tableau 2: Tableau de comparaison de moyenne et d'écart-types selon les périodes de référence. Et p-valeur obtenue grâce au test de comparaison de moyenne (nova). Signification des codes de la p-valeur : *** = $0 < P < 0.001$ (très significatif), ** = $0.001 < p < 0.01$	- 20 -
Tableau 3: Tableau de comparaison de moyenne et d'écart-types selon les périodes de référence. Et p-valeur obtenue grâce au test de comparaison de moyenne (nova). Signification des codes de la p-valeur : *** = $0 < P < 0.001$ (très significatif), ** = $0.001 < p < 0.01$ (significatif), * = $0.01 < p < 0.05$ (peu significatif), . = $0.05 < p < 0.1$ et rien n'est proche de 1 donc pas significatif.	- 22 -

Introduction

La notion de changement climatique est devenue familière pour le grand public. Nous le constatons chaque jour au travers des événements climatiques de plus en plus extrêmes, comme les tempêtes, les inondations, les forts étiages Tous ces événements affectent l'Homme mais aussi la faune et la flore qui se retrouvent menacés face aux modifications des écosystèmes. Dans l'objectif d'anticiper les évolutions du climat et leurs impacts sur la ressource en eau, de plus en plus d'organismes se réunissent et cherchent à développer la connaissance sur l'impact du changement climatique. En Adour-Garonne, les connaissances sur le changement climatique sont récentes et de plus en plus nombreuses. Beaucoup d'actions sont déjà engagées afin d'en limiter les effets (Agence de l'eau Adour-Garonne, 2018).

L'estuaire de la Gironde, confluence de la Dordogne et la Garonne, est l'un des plus grands d'Europe et s'étend sur une surface de 625 km² (Sautour B., Baron J., 2020). Au-delà de sa taille, il est reconnu pour la diversité des habitats naturels que l'on peut retrouver (prairies, estrans, vasières, zones rocheuses, marais estuariens, plages et dunes). Il se distingue aussi par sa faible industrialisation qui lui permet aujourd'hui d'accueillir de nombreuses espèces, migratrices ou sédentaires (bécassine, héron cendré, lamproie, anguille...). Parmi elles, certaines sont menacées comme la Cistude d'Europe (L'estuaire de la Gironde, 2021). Cependant la dégradation progressive de l'estuaire depuis quelques années a conduit à la mise en place d'un SAGE approuvé en 2013. (Commission Locale de l'eau, 2013).

Face à l'étendue du territoire, le grand bassin versant de l'estuaire de la Gironde a été divisé en 22 sous bassins (Agence de l'eau Adour Garonne, 2015). Dans l'estuaire de la Gironde l'eau douce captée sur le bassin versant se mélange avec l'eau salée apportée par la marée. Sa limite amont se situe là où cesse l'influence de la marée, et sa limite aval correspond à l'exutoire du fleuve. Une gestion concertée par bassin versant permet la prise en compte des différents usagers et vise à ce que les activités environnantes ne rompent pas l'équilibre écologique. Elle permet ainsi une meilleure gestion du territoire dans son ensemble.

Grâce à l'appui financier de l'Agence de l'eau Adour-Garonne, du Conseil Régional Nouvelle-Aquitaine ainsi que des Départements de Charente-Maritime et de Gironde, le SMIDDEST a mis au point une base de données permettant d'étudier le changement climatique composée de 18 indicateurs.

L'objectif du stage consiste à réaliser une mise à jour puis une synthèse des données à partir de ces indicateurs. Ces données sont récoltées par un ensemble de collectivités et d'établissements publics (tel que météo-France, le réseau MAGEST, ...). Le but est d'étudier l'évolution, les corrélations et l'impact de ces indicateurs au cours du temps. L'objectif général de cette étude est l'évaluation des indicateurs du changement climatique et l'analyse des impacts dans le périmètre du SAGE Estuaire de la Gironde et milieux associés.

Les nombreuses études déjà réalisées sur le sujet attestent des changements climatiques. L'augmentation de nombreux paramètres comme la température ou la diminution d'autres comme les débits sont bien connus. L'étude commune de ces indicateurs permet de comprendre l'impact des variables les unes sur les autres. On s'attend à observer différents niveaux de corrélations, mais la plupart des variables risquent d'être impactées par le changement climatique.

Etat des lieux des connaissances de l'estuaire de la Gironde

Présentation générale :

L'Agence de l'eau Adour Garonne a été créée suite à la Loi sur l'eau de 1964. Cet établissement public a la gestion de l'eau sur la circonscription administrative du bassin Adour-Garonne. Une synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Gironde est parue en 1994 avec le « Livre Blanc - Estuaire de la Gironde ». Les conclusions de cette synthèse montraient un « état plutôt satisfaisant » (Sautour B., Baron J., 2020) de l'estuaire de la Gironde.

Depuis et puisque l'estuaire est associé à de forts enjeux économiques et sociétaux, les études pour améliorer la connaissance sont de plus en plus nombreuses. Cet effort de connaissance de l'Estuaire est également marqué par l'élaboration du SAGE. Parmi ses 9 enjeux la prise en compte du changement climatique est prédominante. En effet, en 2008 le Ministère de l'écologie de l'énergie du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEDDAT) a reconnu l'Estuaire de la Gironde comme site pilote pour l'étude des impacts du changement climatique. (Commission locale de l'eau, 2013). Depuis une nouvelle version du « Livre Blanc » a été publiée en 2021, elle fait le point sur les nouvelles connaissances acquises. Les bilans sont majoritairement négatifs puisque « beaucoup des paramètres se dégradent » (Sautour B., Baron J., 2020). La difficulté de coordonner des actions sur un espace aussi vaste et aux enjeux parfois antagonistes, expliquent en partie cette dégradation. Cependant la conservation de cet écosystème est un enjeu fort, car il abrite de nombreuses espèces floristiques et faunistiques durant une ou plusieurs étapes de leur cycle de vie. Actuellement, c'est le SMIDDEST qui assure une concertation et un partage de connaissances de l'Estuaire de la Gironde. Mais d'autres structures comme Gesteau et le DRIAS qui sont financés par l'Union européenne et développés avec le soutien du gouvernement participent activement au développement de la connaissance. La mise u point de projets tels que LIFE Eau & Climat développé par L'Office national de l'eau ou la Trajectoires d'Adaptation au Changement Climatique des Territoires (TACCT) cherche à anticiper le changement climatique. Ils développent, respectivement des « stratégies de gestion de l'eau » (GEST'EAU, 2021) et réalisent des « projections climatiques pour l'adaptation de nos sociétés » (DRIAS, 2021 et Territoire et climat, mobilisons nos énergies, 2020).

Le changement climatique :

Le Changement climatique est défini comme « la variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques ne sont pas uniquement dus aux processus naturels » (Glossaire, 2013).

Les changements sont complexes à anticiper car les variables évoluent simultanément (effet de serre, nuages ...). Dans le monde, les organismes référents sont : le programme mondial de recherche du climat (PMRC) et le groupe intergouvernemental des études sur le climat(GIEC). En 2000 différents scénarios ont été mis au point, les plus optimistes ont été écartés et les émissions actuelles sont au-delà des plus pessimistes [scénarios d'émission des gaz à effets de serres des rapports 2001 et 2007 du GIEC] (Le Treut H., 2013).Récemment le GIEC vient de publié son dernier rapport ou il est écrit que l'ensemble des régions du monde sont maintenant touchées par le changement climatique.Les impacts du changement climatique ne font que s'accroître et le climat est moins résilient que prévu. (GIEC 2021).

Augmentation de la température :

Le changement climatique est souvent associé à la modification de la température. Les prévisions pour 2050 ne sont pas optimistes : une augmentation de la température annuelle moyenne de l'air d'au moins +2°C est annoncée (Agence de l'eau Adour-Garonne 2018). De la même manière l'occurrence des jours caniculaires avec des températures record sont plus fréquentes alors que les températures des jours anormalement froids augmentent (Encyclopédie de l'environnement, 2021). Or la température a un impact sur de nombreuses variables, tels que le développement de la faune et de la flore ou encore sur l'oxygène dissous qui est essentiel pour le diagnostic de la qualité de l'eau mais aussi pour la survie des espèces faunistiques et floristiques aquatiques. A mesure que la température et la salinité de l'eau augmentent la solubilité de l'oxygène dissous diminue et donc son taux diminue.

Marinisation :

La hausse de salinité est entraînée par l'élévation du niveau de la mer (Pouvreau, 2018) Dans l'estuaire elle est en moyenne d'1 PSU (1 practical slinity unite = 1g de sel par 1Kg). L'élévation du niveau de la mer entraîne une amplification de la marée. Les variations saisonnières des conditions fluviales provoquent un déplacement du front de salinité qui dépasse 40 km. Il entraîne avec lui le déplacement le long de l'estuaire du maximum de turbidité sur une même distance (Van Manen B., Sottolichio A., 2018). On parle de marinisation. Cette dernière est donc associée à une réduction du débit des rivières et du ruissellement fluvial, provenant de la Garonne et de la Dordogne. Ce phénomène est amplifié par la demande croissante en irrigation qui, à son tour, a conduit à un déplacement vers l'amont de la zone maximum de turbidité (ZMT) (Chaali A. et al., 2013).

Bouchon vaseux :

Le transport des sédiments se déroule lors de forts débits fluviaux, le maximum de turbidité se déplace alors vers l'aval. Une asymétrie des marées est à l'origine d'un dépôt plus soutenu des sédiments. Cette masse de sédiments est ensuite maintenue par le gradient de densité entre les masses d'eau douce et d'eau salée distance (Van Manen B., Sottolichio A., 2018). Ce phénomène appelé « bouchon vaseux » est une des spécificités de l'estuaire de la Gironde (Scientifiques de l'université de Bordeaux, 2016). Une diminution du nombre de crues l'hiver et une augmentation des périodes d'étiage l'été conduit à un bouchon vaseux de plus en plus présent dans l'estuaire de la Gironde (Sautour B., Baron J., 2020). A terme cela pourrait conduire à une « hypoxie saisonnière sévère voire permanente dans l'estuaire » dans les prochaines décennies (Lajaunie-Salla K. et al, 2018).

Evolution des débits :

La baisse moyenne des débits, ces dernières années s'explique par le changement climatique mais aussi par les usages de l'eau dans le bassin-versant. Le débit dans l'estuaire est majoritairement issu de la Garonne (65%) et plus faiblement de la Dordogne (35%) (Jalón-Rojas I. et al, 2015)

Inondations, tempêtes et précipitations :

L'estuaire de la Gironde est soumis à différents paramètres physiques comme le vent, la marée, la surcote ou les débits qui contribuent lors d'évènements plus ou moins extrêmes à des inondations. Des modélisations ont montré que la zone inondable couvrirait « 320km², 27 000 habitants et 12000 habitants », sur l'ensemble de l'Estuaire de la Gironde (CEREMA, 2019). On estime que la fréquence et l'intensité de ses évènements a tendance à augmenter mais rien n'a été démontré à l'heure actuelle. Les inondations sont considérées comme des phénomènes extrêmes au même titre que les tempêtes. Ces dernières sont étudiées depuis les années 1980 mais aucune tendance particulière n'a été identifiée (Météo-France, 2021). Les précipitations quant à elles sont moins fréquentes mais leur intensité est plus importante. L'étude du cumul annuel montre une hausse des

précipitations dans le nord de l'Europe mais une baisse dans le sud (CEPRI,2021) l'évolution de ce paramètre dans les années à venir ne semble donc pas si évident.

Disponibilité de la ressource en eau :

Le Syndicat mixte d'étude et de gestion de la ressource en eau du département de la Gironde (SMEGREG) fournit 96% de l'eau potable par les nappes d'eau profonde (éocène et crétacé) mais ces dernières se rechargent continuellement. A long terme, si la demande ne cesse d'augmenter, la vitesse de recharge des nappes pourrait tendre à diminuer. Si depuis quelques années, la consommation unitaire par habitant au m³ diminue, la demande générale est à l'augmentation (démographie, agriculture, industrie). Les nappes les plus soumises aux changements climatiques sont les nappes de surfaces, qui en cas de canicule peuvent se tarir. En 2019, 50 % de masses d'eau superficielles sont en bon état écologique. Ce chiffre a progressé de 7 % en 6 ans, faisant d'Adour-Garonne le premier bassin de France Métropolitaine pour les masses d'eau en bon état (Comité de Bassin Adour-Garonne, 2019).

Biodiversité et fonctionnement écologique :

La Biodiversité et le fonctionnement écologique sont aussi affectés par les changements globaux. La température, les précipitations, le débit, les apports de nutriments impactent l'évolution des végétaux et des animaux (maturation sexuelle, relations trophiques ...). Globalement, on retrouve plusieurs espèces benthiques et notamment quelques espèces emblématiques (Esturgeon d'Europe) mais leur abondance est souvent faible. Les espèces allochtones, souvent invasives, ont tendance à déloger tous les groupes d'individus par leur prolifération rapide (Le Treut H., 2013). La majorité des espèces sont contractées : leur aire de répartition diminue car les gains sont inférieurs aux pertes. Entre 2005 et 2015, il y a eu une baisse brutale et significative du nombre d'espèces benthiques et pélagiques et de leur abondance. Les origines de ces modifications sont nombreuses : les contaminations organiques et métalliques, l'évolution de l'environnement (marinisation de l'estuaire, augmentation de la température de l'eau...) par des forçages anthropiques qui modulent la physico-chimie (Chaali A. et al., 2013).

Les pollutions :

Les pollutions dans l'estuaire sont nombreuses. L'Estuaire de la Gironde est marqué par la pollution métallique, notamment le cadmium, dans les huîtres girondines où il est présent à de fortes concentrations. Cependant, en sortant de la Gironde, il sera dilué dans l'Océan ouvert à des concentrations océaniques normales. Les polluants atmosphériques diminuent sur les dix dernières années, sauf pour l'ozone et les composés organiques volatils et semi-volatils. Les émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂ par habitant) en Nouvelle-Aquitaine sont supérieures à la moyenne française même si leur taux diminue depuis près de 20 ans. Enfin, Les pesticides sont présents dans l'air à des teneurs importantes, notamment à proximité des zones viticoles (Comité scientifique régional Acclimatera, Le Treut 2018).

Les micropolluants organiques et les hydrocarbures sont massivement représentés dans l'estuaire de la Gironde (stations d'épurations, les traitements agricoles pour les pesticides ...). Les concentrations sont faibles mais les polluants sont traçables et caractérisables (exemple : le fipronil dépasse régulièrement le PNEC (predicted no effect concentration) dans l'Estuaire de la Gironde). Les « effets cocktails » ou la bioamplification depuis les maillons les plus bas du réseau trophique existent. C'est le cas de certains polluants organiques, notamment les PCB (Polychlorobiphényle), et métalliques comme l'argent qui atteignant des niveaux de concentrations préoccupants dans les poissons (alose, anguille...).

Les zones humides :

Autour de l'estuaire de la Gironde « les zones humides rivulaires représentent une surface de 714 km², dont 400 km² de marais endigués. » (Sautour B., Baron J., 2020). Les zones humides sont modifiées par l'endiguement et le dessèchement, ce qui a causé une rupture avec l'estuaire de la Gironde. Leur étude dans le cadre du changement climatique est encore peu développée.

Développement des connaissances :

Les connaissances ne cessent de croître par la diversité des études et l'évolution de la technologie comme la modélisation numérique 3D et la télédétection spatiale. De plus, l'estuaire de la Gironde dispose depuis 2004 d'un réseau de surveillance de mesures à haute fréquence pour le suivi continu de la qualité de l'eau (Schmidt S., 2021). Ainsi, même si certains paramètres sont encore peu étudiés (bilans sédimentaire, variations morphologiques de l'estuaire), de plus en plus de données sont récoltées et exploitées pour améliorer la connaissance de la dynamique hydro-sédimentaire et de la qualité de l'eau dans l'estuaire de la Gironde.

Matériels et méthodes

I. Contexte

L'estuaire de la Gironde est situé au Sud-Ouest de la France. Il fait 75 km de long et peut atteindre 12 km de largeur. Le périmètre du SAGE « Estuaire de la Gironde et milieux associés » inclut le territoire de l'Estuaire mais également un certain nombre de cours d'eaux affluents. Il a une superficie de 3 800km² et comprend 185 communes réparties en Gironde (143) et en Charente-Maritime (42)

Le SMIDDEST a mis au point, en collaboration avec le bureau d'étude « Eaucéa », 18 indicateurs. L'étude de ces variables en fonction du temps permet de mettre en évidence les variations du changement climatique. Les données sont récoltées par des instituts de recherche universitaire, association, des collectivités Certaines données sont publiques et disponibles sur internet (débits, tempêtes). Cependant, pour la majorité il faut se rapprocher directement de l'organisme producteur des données et du bon interlocuteur pour les récupérer (eau potable, salinité, précipitations). C'est le rôle du pôle eau du SMIDDEST. Ce service porte le SAGE et regroupe différents chargés de mission et notamment l'animateur du SAGE. Le pôle eau compile et assure le suivi régulier de ces données.

Afin de comprendre au maximum les relations entre les variables, des communes non situées dans le périmètre du SAGE « Estuaire de la Gironde et milieux associés » sont sélectionnées. C'est le cas de la commune de Libourne, Bergerac et Tonneins (fig 1).

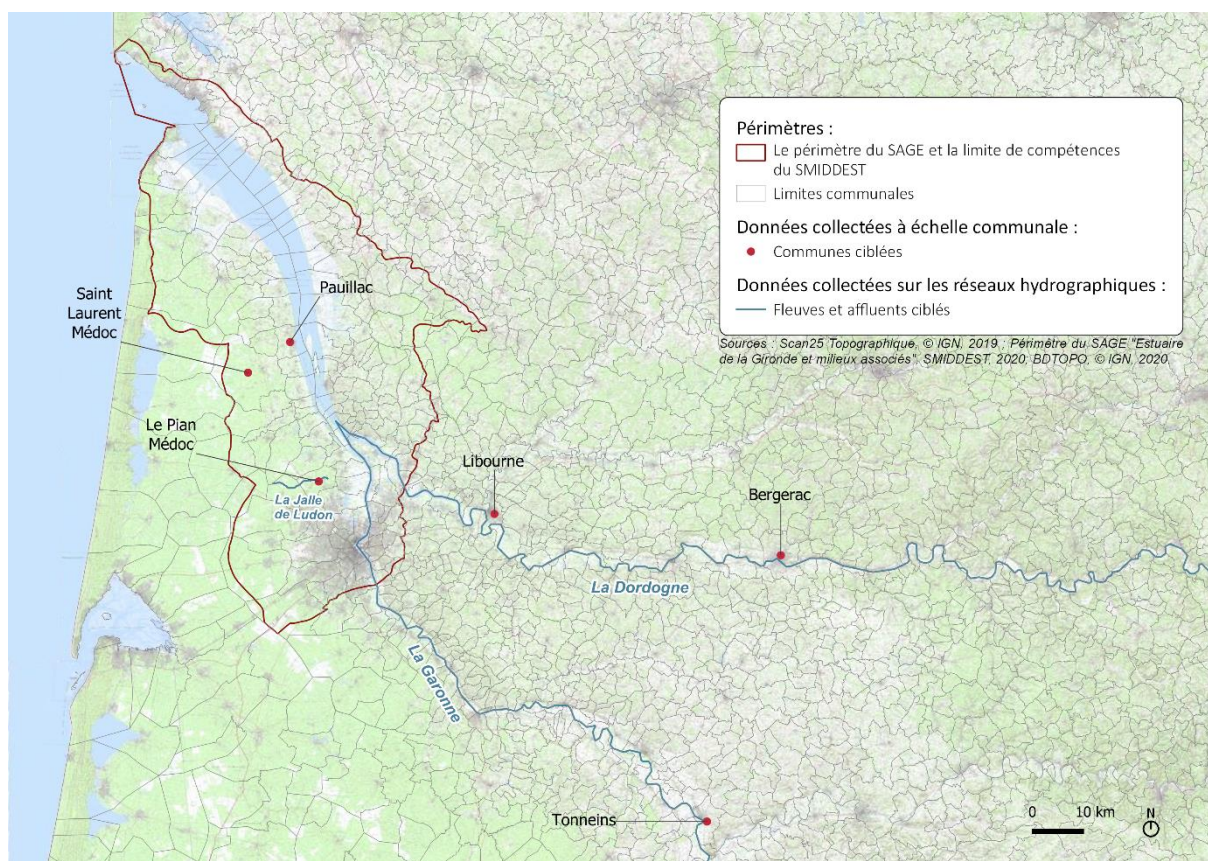


Figure 1: Cartographie du périmètre et communes du SAGE "Estuaire de la Gironde et milieux associés" et des lieux où les données ont été récoltées.

II. Mise à jour des données

a. Indicateurs climatiques :

Les indicateurs sont répartis dans différentes catégories, certains indicateurs sont relatifs au climat : Premièrement, la température atmosphérique globale à Bordeaux. Les données sont disponibles sur le site de Météo-France dans l'intervalle de temps 1911 à 2019. Ce sont des données journalières de la température atmosphérique en degrés Celsius à Bordeaux. Dans cette même catégorie, on retrouve la température des eaux. Cet indicateur recense les températures de la Dordogne et de la Garonne entre 1971 et 2020. Les données sont des moyennes annuelles fournies par l'Agence de l'eau Adour-Garonne en degrés Celsius. Ensuite il y a les précipitations et les tempêtes. Dans le cas des précipitations, le SMIDDEST possède déjà des données de 1911 à 2019 fournies par Météo-France. Les précipitations journalières à Bordeaux sont exprimées en mm. L'indicateur tempêtes représente le nombre de tempêtes par an sur le littoral aquitain entre 1899 et 2020. Les données sont disponibles publiquement sur le site de l'observatoire de la Côte Aquitaine. Enfin, le dernier indicateur de cette catégorie est les inondations dans l'estuaire. Celles-ci sont souvent accompagnées d'autres phénomènes comme les ruissellements, les glissements et les chocs mécaniques liés à l'action des vagues. L'ensemble de ces événements sont répertoriés sur le site internet Géorisque où les arrêtés CATNAT sont répertoriés entre 1980 et 2020. Dans le cadre du travail de stage, les inondations sont recensées dans différentes localités : un point après la confluence des embranchements à Libourne, un dans chaque embranchement de l'estuaire : la Garonne à Tonneins et la Dordogne à Bergerac ; et un point au niveau d'un affluent de la Garonne, la Jalle de Ludon au Pian-Médoc (fig 1).

b. Indicateurs du fonctionnement hydro sédimentaire et de l'impact de la qualité de l'eau :

Dans une seconde catégorie on retrouve les indicateurs liés au fonctionnement hydro sédimentaire et à l'impact de la qualité de l'eau. Le premier indicateur est le niveau de l'océan. Dans le périmètre du SAGE, le port de Port-Bloc situé au Verdon-sur-Mer est le point de référence, mais les données récoltées sont récentes et ne fournissent pas suffisamment de valeurs pour réaliser une analyse. Les données du port de Brest sont plus anciennes et les variations entre Port-Bloc et Brest sont identiques. Brest est donc considéré comme référence dans ce rapport. Les données sont mesurées par le SONEL qui récupère ces données grâce au marégraphe de Brest. Elles sont ensuite publiées en libre accès sur leur site internet. La hauteur du niveau de l'océan est mesurée tous les jours est exprimée en centimètre. Les autres indicateurs sont l'hydrologie de la Garonne et de la Dordogne ainsi que l'hydrologie des petits cours d'eau. Les données sont directement téléchargeables sur la base de donnée « Banque Hydro ». Ce sont des débits journaliers exprimés en mètre par seconde. Les données sont récoltées au niveau de plusieurs localités : La Jalle de Ludon au Pian-Médoc, un affluent de la Garonne ainsi que dans chaque embranchement de l'estuaire : la Garonne à Tonneins et la Dordogne à Bergerac.

Ensuite il y a les variables de la salinité et du positionnement du bouchon vaseux dans l'estuaire. Les indicateurs sont : la salinité de l'estuaire, la turbidité et l'oxygène dissous. Ces trois variables sont mesurées quotidiennement à travers 8 sites dans le périmètre du SAGE. Dans ce rapport les données récoltées sont la turbidité et l'oxygène dissous pour Bordeaux, Libourne et Pauillac ainsi que la salinité pour Pauillac et Bordeaux. Pour cela des sondes multiparamètres de type SAMBA ou WiMo/Wimo ++ sont utilisées. Les données sont récoltées par le réseau MAGEST (réseau de surveillance de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Gironde). Les sondes mesurent en continu et fournissent des données journalières. Ces données ont été récupérées auprès de Sabine SCHMIDT

(Directrice de Recherche CNRS à l'Université Bordeaux UMR CNRS 5805 et responsable du réseau MAGEST). Ce suivi étant récent, les données pour ces trois indicateurs vont de 2005 à 2020.

c. Autres Indicateurs :

Deux indicateurs supplémentaires sont aussi étudiés dans le contexte du changement climatique. Les effets sanitaires sur la population (les canicules), correspondent au nombre de jours et de nuits caniculaires par an entre 1911 et 2020. Ces données sont calculées par Météo-France. Enfin, l'évapotranspiration à Bordeaux, est exprimée en millimètre de hauteur d'eau entre 1970 et 2018. Cela correspond à la quantité d'eau transféré vers l'atmosphère par l'évaporation des sols et la transpiration des plantes. Ces données ont été achetées sur Météo-France.

III. Indicateurs non étudiés

Les 18 indicateurs n'ont pas été traités lors de ce stage par manque de données malgré les démarches entreprises pour les récupérer. Il s'agit de: l'évolution des dates de semis et de vendanges au court du temps, les consommations individuelles d'eau au court du temps et des données relatives à l'avifaune. Enfin les données sur l'évolution des communautés de poissons est le dernier indicateur non étudié. Les données concernant les captures de poissons entre 2005 et 2018, elles ont été obtenues tardivement auprès de Mario Lepage (Ingénieur de Recherche en Ecologie Estuarienne chez INRAE). Mais la mise en forme des données demande trop de temps et ne permet pas d'inclure ces données.

IV. Analyse des données :

a. Etude des indicateurs de référence :

Dans ce rapport, les variables de référence sont la pluviométrie, le débit et la température atmosphérique. Effectivement, ces variables sont parmi les plus étudiées, et directement corrélées au changement climatique. Dans le cas de la température, il existe de nombreuses preuves que les émissions des gaz à effet de serre d'origine anthropique sont à l'origine de l'élévation rapide de la température moyenne. La pluviométrie est un paramètre important à étudier par ses occurrences et ses phénomènes de plus en plus extrêmes qui impactent directement les populations. Enfin, les débits ont diminué et affecte directement la question de la disponibilité de l'eau.

Ces trois variables servent donc d'indicateurs de forçage, elles vont permettre de mettre en évidence les corrélations entre variable et donc d'identifier les impacts du changement climatique. Pour pouvoir utiliser ces variables en tant que telles il faut au préalable regarder si elles sont indépendantes. C'est-à-dire si un évènement d'une variable n'influe pas sur la probabilité de l'autre variable

Deux variables A et B sont indépendantes $\Leftrightarrow \mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(A) \cdot \mathbb{P}(B)$

Pour cela, il faut dans un premier temps réaliser un nuage de point d'une variable en fonction de l'autre. Il faut ensuite regarder la répartition des points. Si le nuage de point est hétérogène alors les variables sont indépendantes. Sinon je complète l'analyse avec un test statistique pour connaître le niveau de corrélation de type « spearman » entre les deux variables.

b. Analyse des tendances et des corrélations entre indicateurs :

Pour la suite de l'analyse les valeurs sont comprises entre 1970 et 2020

Une analyse univariée simple par indicateur permet de visualiser l'évolution d'un même indicateur en fonction du temps. Pour cela deux périodes de référence sont définies à partir des

indicateurs suivant: les précipitations à Bordeaux, le débit de la Garonne et la température atmosphérique. Etant donné que la majorité des données récupérées sont disponibles entre 1970 et 2020, les périodes de référence sont définies sur cet intervalle de temps.

Les données climatiques sont généralement comparées à une donnée de référence. Il s'agit d'une valeur moyenne sur un certain nombre d'années. Pour l'étude des données climatique, Météo-France calcul « la normale » il s'agit d'une valeur moyenne sur 30 ans données. Tous les 10 ans la normale est de mise à jour. Pour les données relatives aux débits, la valeur moyenne est appelée le « module », d'après l'Office Français de la Biodiversité (OFB) 18 ans de valeurs suffisent pour obtenir une valeur précise (OFB, 2021).

Ainsi entre 1970 et 2020, il y a 50 ans de données. L'évolution des indicateurs de référence en fonction du temps ne permet pas de mettre en évidence une année ou une période commune aux trois variables qui marquerait une variation. De ce fait les deux périodes de références seront de 25 ans : 1970-1995 et 1996-2020 pour plus d'homogénéité. Cependant certains indicateurs ne possèdent pas de données suffisamment anciennes pour réaliser cette analyse. C'est le cas de la turbidité, de l'oxygène dissous et de la salinité. Les graphiques sont réalisés sur le logiciel Rstudio. Ensuite la significativité des résultats est vérifié par un test statistique de comparaison de moyenne de types Anova.

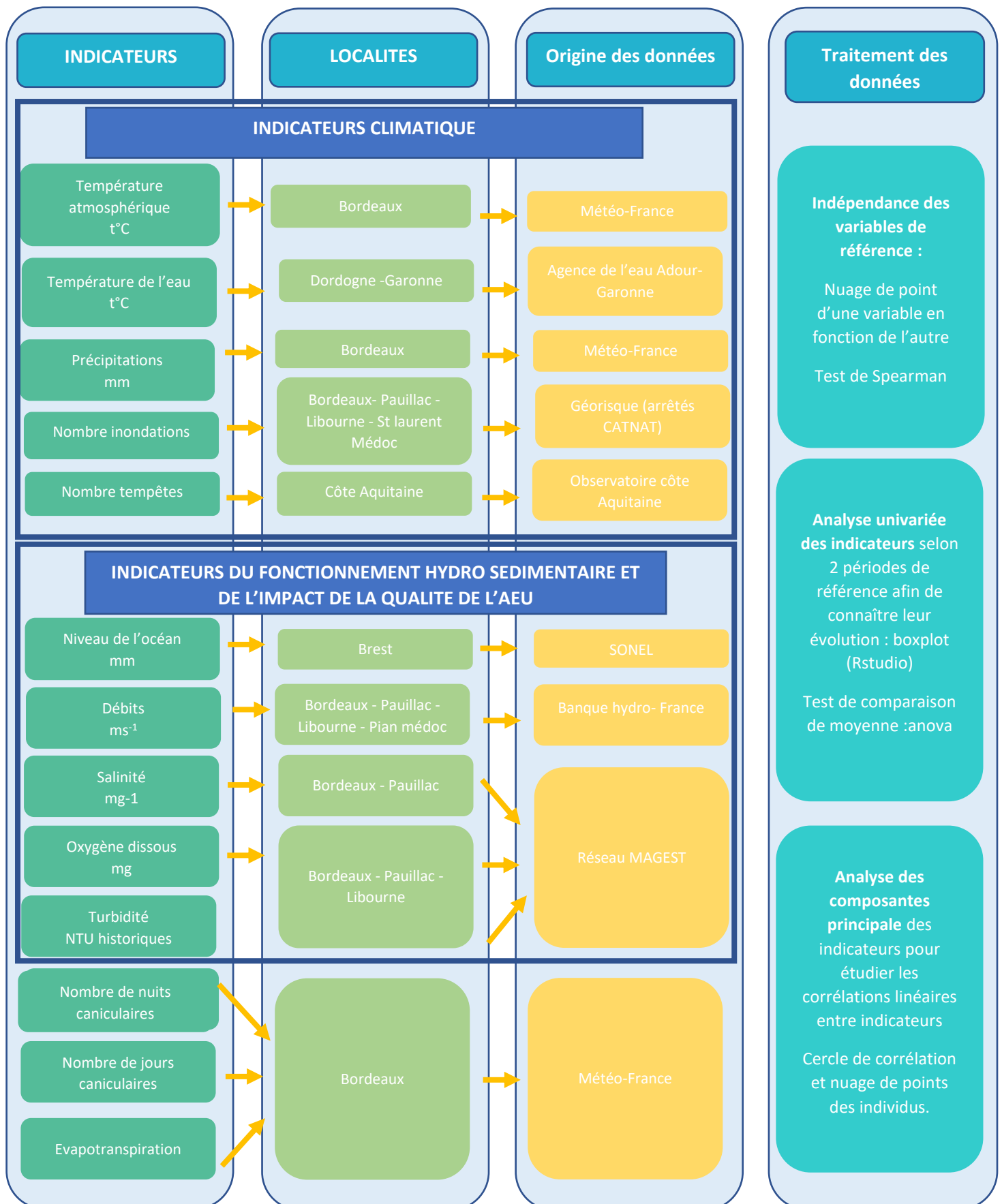
c. Etude de la corrélation

L'analyse en composante principale (ACP) est une analyse statistique multivariée qui permet l'analyse d'un jeu de données comprenant des variables quantitatives. Elle montre les liaisons linéaires entre les variables. Elle permet d'identifier les degrés de corrélation et la variance des indicateurs les uns par rapport aux autres. Dans ces études, plusieurs ACP sont réalisées sur Rstudio.

Une première ACP est réalisée avec les indicateurs relatifs au climat (température atmosphérique, température de l'eau, précipitations, tempêtes et inondations). Dans un second temps, l'analyse est effectuée avec les indicateurs du fonctionnement hydro sédimentaires et d'impact de la qualité de l'eau. Enfin une ACP est générée avec l'ensemble du jeu de données.

Pour chacune des analyses deux graphiques sont générés : un premier qui est un cercle de corrélation et qui permet d'identifier les niveau de corrélation entre les variables. Le deuxième graphique est un nuage de point des individus. Ici, ce sont les années. Ce deuxième graphique permet d'identifier les années extrêmes et la répartition des années en fonction de l'évolution des paramètres.

d. Schéma récapitulatif du matériels et méthodes



Résultats et discussion :

I. Etude des indicateurs de référence

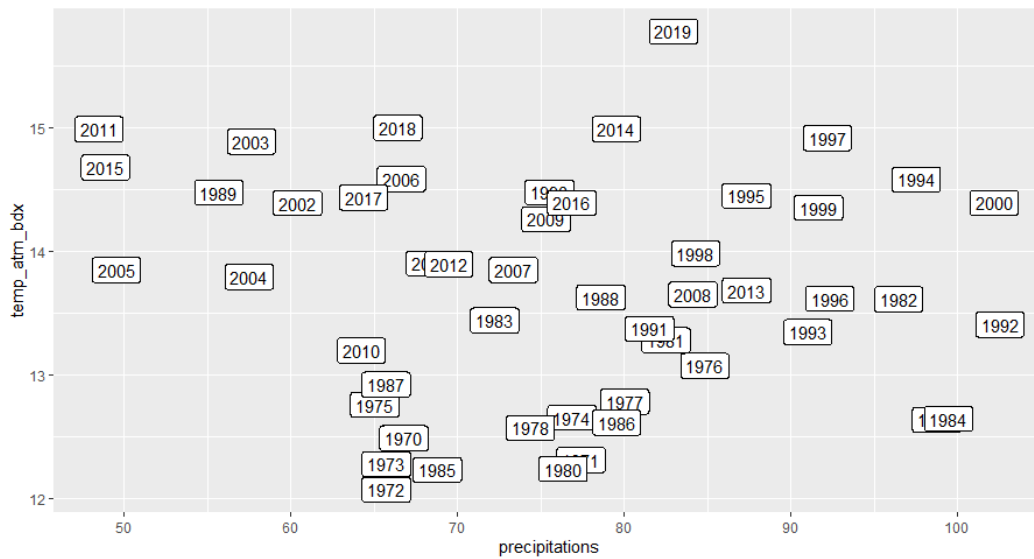


Figure 2 Nuage de point de la température atmosphérique à Bordeaux en fonction des précipitations entre 1970 et 2020

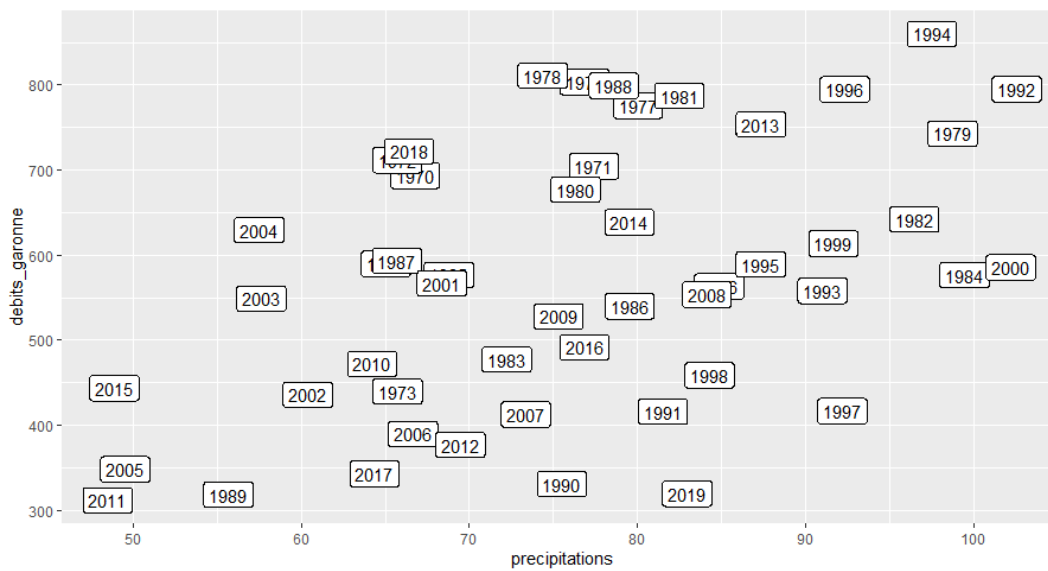


Figure 3 : Nuage de points du débit de la Garonne en fonction des précipitations entre 1970 et 2020

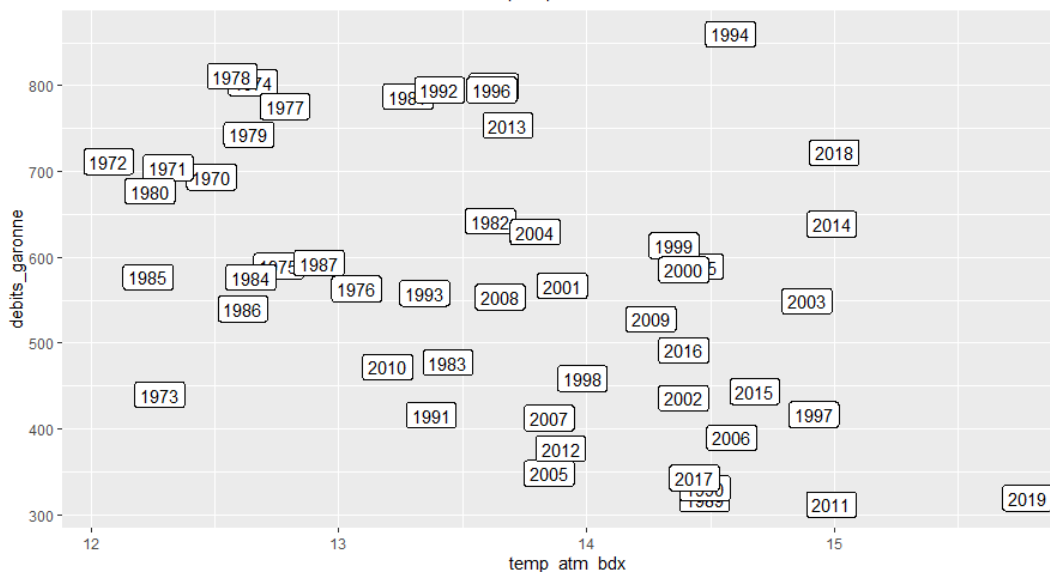


Figure 4 Nuage de point du débit de la Garonne en fonction de la température atmosphérique à Bordeaux entre 1970 et 2020

Les figures 2,3 et 4 illustrent l'évolution du débit, des précipitations et de la température, l'un en fonction de l'autre. Les variables sont des moyennes annuelles exprimées respectivement en ms^{-1} , mm et $^{\circ}\text{C}$. Dans la Figure1, les points sont répartis de manière hétérogène, il n'y a pas de tendance particulière donc la température et les précipitations sont indépendantes. Dans les Figures 3 et 4 même si la répartition des points sur le graphique est assez hétérogène il semble y avoir une tendance à l'augmentation pour la figure 3 et à la diminution pour la figure 4.

Tableau 1: tableau récapitulatif des tests de corrélation de Spearman

Variables	p-value	rho
température\$précipitations	0.5068	-0,09608643
débits\$précipitations	0.002267	0.4220408
température\$débits	0.001487	-0,437503

Le tableau 2 permet de confirmer ou de réfuter ces observations. Dans le cas où le niveau alpha est fixé à 0.05%, la température possède une p-value bien supérieur à 0.05, donc ces deux variables ne sont pas corrélées. Pour la relation entre les débits et les précipitations, tout comme pour la température et les débits ; la p-value est inférieur à 0.05. Les variables sont corrélées entre elles. La valeur du rho permet d'affirmer que les débits et les précipitations sont significativement corrélés positivement tandis que la température et le débit le sont négativement. Lorsque les précipitations augmentent le débit va augmenter. Et quand la température augmente, les débits diminuent.

II. Analyse de la tendance et de la corrélation des indicateurs

a. Etude de la tendance générale:

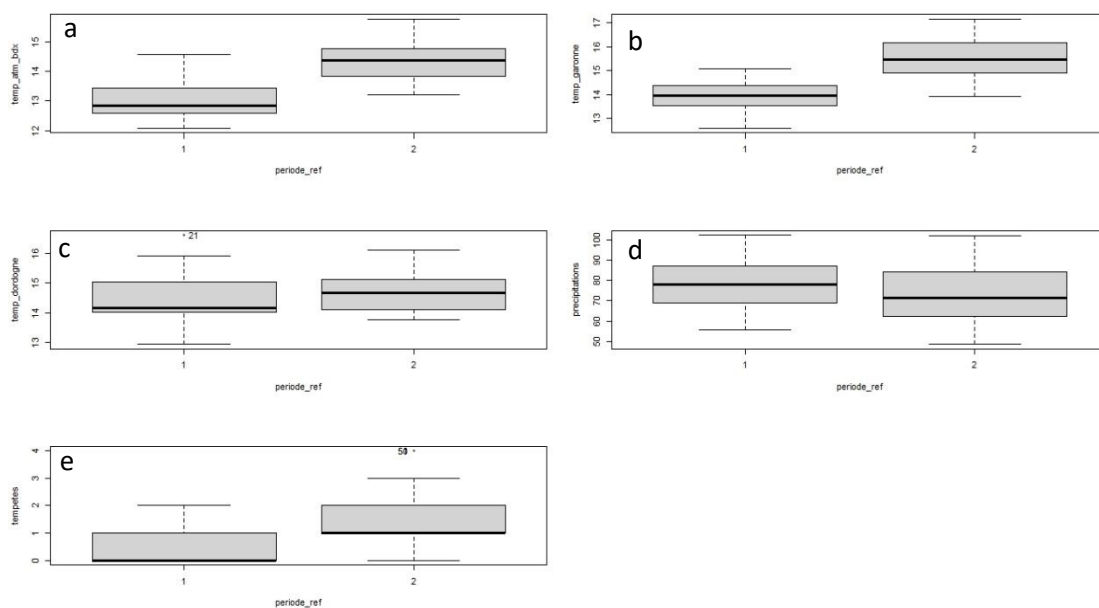


Figure 5: Boîte à moustache de l'évolution de la température atmosphérique à Bordeaux (A), de la température de la Garonne (B), de la Dordogne (C), mais aussi des précipitations (D) et des tempêtes (E) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)

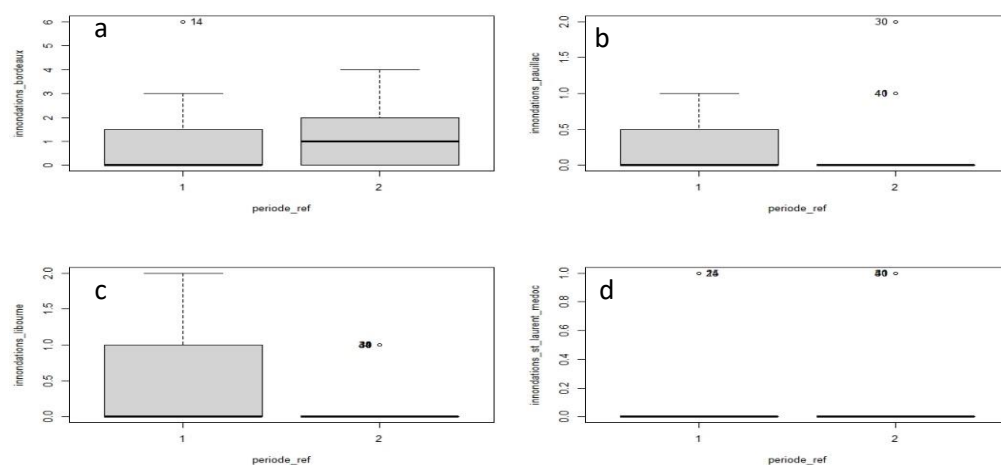


Figure 6: Boîtes à moustaches des inondations à Bordeaux(a), Pauillac(b), Libourne(c) et Saint-Laurent-Médoc selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)

Tableau 2: Tableau de comparaison de moyenne et d'écart-types selon les périodes de référence. Et p-valeur obtenue grâce au test de comparaison de moyenne (nova). Signification des codes de la p-valeur : *** = $0 < P < 0.001$ (très significatif), ** = $0.001 < p < 0$

Variable	Période 1		Période 2		p_value
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	
precipitations	79.46442	12.47727	72.66076	15.03657	***
temp_atm_bdx	13.08967	0.7572426	14.31088	0.5968279	***
temp_garonne	13.92377	0.6798437	15.52253	0.8289588	***
temp_dordogne	14.45726	0.8967939	14.66126	0.6845186	
tempetes	0.5384615	0.7060181	1.3600000	1.1860298	**
innondations_bordeaux	0.9375	1.652019	1.1600	1.280625	
innondations_pauillac	0.25	0.4472136	0.16	0.4725816	
innondations_st_laurent_medoc	0.125	0.3415650	0.120	0.3316625	
innondations_libourne	0.4375	0.6291529	0.2400	0.4358899	

Les graphiques précédents sont des boîtes à moustaches, elles représentent l'évolution des variables (en ordonnées) en fonction des périodes de références 1 (1970-1995) et 2 (1996-2020). Aux extrémités de la boîte à moustache on retrouve les valeurs maximum et minimum. La ligne noire représente la médiane et de part et d'autre on trouve le 1^{er} et le 3^{ème} quartile.

Plusieurs tendances apparaissent : les indicateurs de température atmosphérique (Fig 5.a) et de l'eau Fig 5.b et c) sont en augmentation dans la deuxième période de référence. Cela est cohérent avec les connaissances actuelles où l'augmentation de la température est considérée comme l'un des premiers reflets des changements climatiques. D'après le tableau 1, ces résultats sont très significativement différents entre les deux périodes de références pour la température atmosphérique, et pour la température de la Garonne. Alors que pour la température de la Dordogne il y a effectivement une différence mais qui n'est pas significative. Le nombre de tempêtes (Fig 5.e) est plus important entre 1996 et 2020, cependant l'augmentation est faible. La moyenne entre les deux périodes de référence n'augmente que d'une seule tempête par an environ. Ce résultat ne permet pas d'affirmer que le nombre de tempêtes augmentent avec le changement climatique. Aucune tendance n'a pu être établie avec certitude cependant cette différence est significative (tab 1)

Ensuite, les précipitations (Fig 5.d) sont en diminution avec une baisse moyenne de 10mm par an. L'étude des précipitations prévoit une baisse brutale des précipitations. Ce graphique ne prend en compte que les moyennes des précipitations annuelles et non l'intensité et la fréquence des phénomènes. Mais ce résultat très significatif confirme cette tendance à la diminution. Enfin pour les inondations (Fig 6), il ne semble pas y avoir de tendance particulière. Hormis pour Bordeaux où elles sont très légèrement plus élevées (en moyenne 1 de plus par an). Il s'agit d'ailleurs du seul site où il y a une différence significative entre les deux périodes de références. Des valeurs extrêmes écrasent les graphiques b, c et d de la figure 5. La plupart de ces valeurs sont dans la deuxième période de référence, c'est-à-dire qu'il y eu des années extrêmes avec un plus grand nombre d'inondations entre 1995 et 2020. De la même manière que pour les précipitations, ces graphiques illustrent uniquement la fréquence des événements. De plus, les origines des inondations dans les sites sont variables puisque Pauillac, Bordeaux et Libourne peuvent être soumis aux précipitations et à la submersion marine (à des intensités différentes) alors que Saint-Laurent-Médoc n'est inondé qu'en cas de fortes précipitations ou de débordements de cours d'eau.

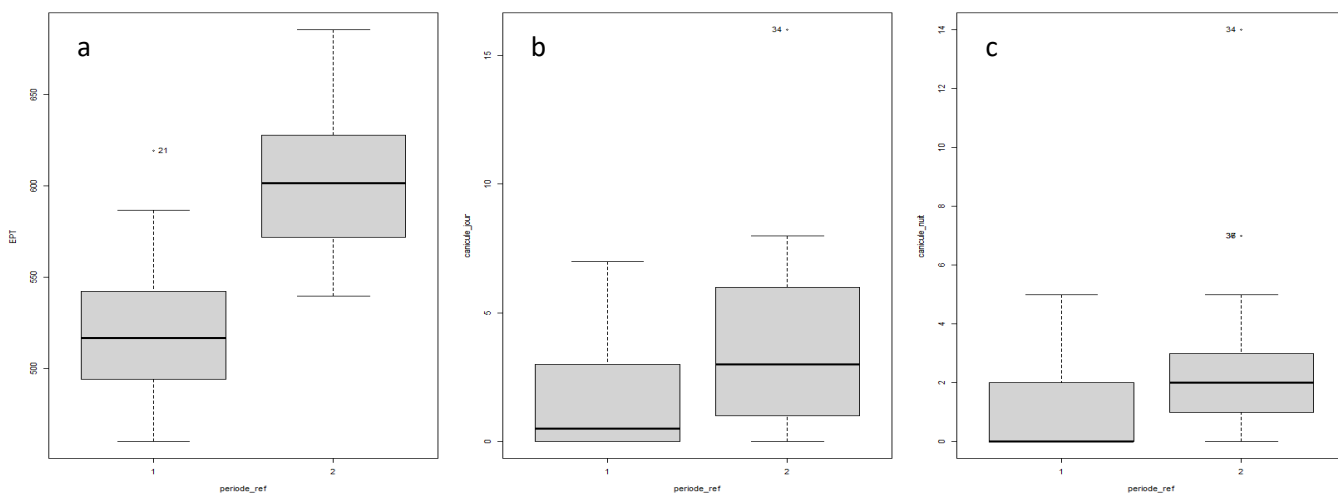


Figure 7: Boîte à moustache de l'évolution de l'évapotranspiration (a), du nombre de jours caniculaires (b) et de nuits caniculaires (c) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)

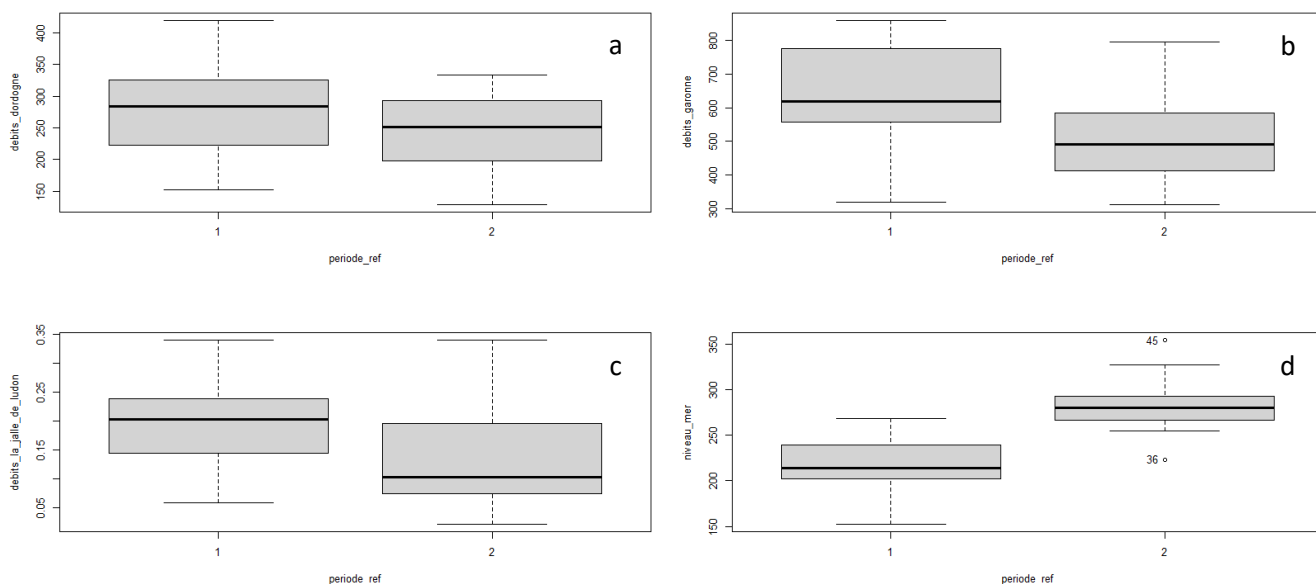


Figure 8: Boîte à moustache de l'évolution des débits de la Dordogne (a), de la Garonne (b), de la Jalle-de-Ludon (c) et du niveau de la océan (d) selon les périodes de références (1970-1995) et 2 (1996-2020)

Tableau 3: Tableau de comparaison de moyenne et d'écart-types selon les périodes de référence. Et p-valeur obtenue grâce au test de comparaison de moyenne (nova). Signification des codes de la p-valeur : *** = $0 < P < 0.001$ (très significatif), ** = $0.001 < p < 0.01$ (significatif), * = $0.01 < p < 0.05$ (peu significatif), . = $0.05 < p < 0.1$ et rien c'est proche de 1 donc pas significatif.

	Période 1		Période 2		p_value
niveau_océan	216.1600	31.12164	281.5652	26.27620	***
debits_garonne	629.7401	150.7760	507.5939	134.4309	**
debits_dordogne	279.6457	68.86536	246.4224	57.15922	.
debits_la_jalle_de_ludon	0.1921846	0.07137459	0.1362411	0.08530150	*
canicule_nuit	0.8461538	1.317340	2.5200000	3.110734	*
canicule_jour	1.653846	2.189837	3.800000	3.570714	*
EPT	524.2692	38.56294	600.7458	35.34507	***

Les graphiques précédents sont des boîtes à moustaches, elles représentent l'évolution des variables (en ordonnées) en fonction des périodes de références 1 (1970-1995) et 2 (1996-2020). Pour beaucoup de variables, la tendance est à l'augmentation entre 1996 et 2020. C'est le cas du niveau de l'océan (Fig 8.d), cette augmentation linéaire est bien référencée grâce aux marégraphes. La moyenne de jour (Fig 7.b) et de nuit (Fig 7.c) était proche de zéro entre 1970 et 1995. Entre 1996 et 2020 la moyenne se situe autour de 2. Le changement climatique favorise les phénomènes extrêmes et les températures extrêmes visent à être plus nombreuses et plus fréquentes. Ces événements favorisent l'évapotranspiration qui est également en augmentation, passant en moyenne de 515mm à 600mm. Ces résultats sont cohérents avec les graphiques précédents (Fig 5 et 6).

Les débits de la Dordogne (Fig 8.a), de la Garonne (Fig 8.b) et de la Jalle de Ludon (Fig 8.c) diminuent entre 1996 et 2020 par rapport à 1970-1995. Les débits et les écarts de débits sont très différents pour chaque localité entre les deux périodes de référence. Le débit de la Dordogne est passé en moyenne de 280 m.s^{-1} à 250 m.s^{-1} et celui de la Garonne de 605 m.s^{-1} à 480 m.s^{-1} . Enfin celui de la Jalle de Ludon est beaucoup plus réduit : alors qu'il était de 0.20 m.s^{-1} entre 1970 et 1995, il a diminué de moitié entre 1996 et 2020. Les trois cours d'eau sont affectés différemment par les conditions climatiques, la Jalle de Ludon qui est un affluent va être plus rapidement asséché par la température que la Garonne ou la Dordogne.

Hormis pour les débits de la Dordogne, tous ces résultats sont significativement différents entre la 1^{ère} et la 2^{ème} période de référence (tab2), ce qui confirme les résultats obtenus graphiquement.

a. Etude de la corrélation entre les indicateurs :

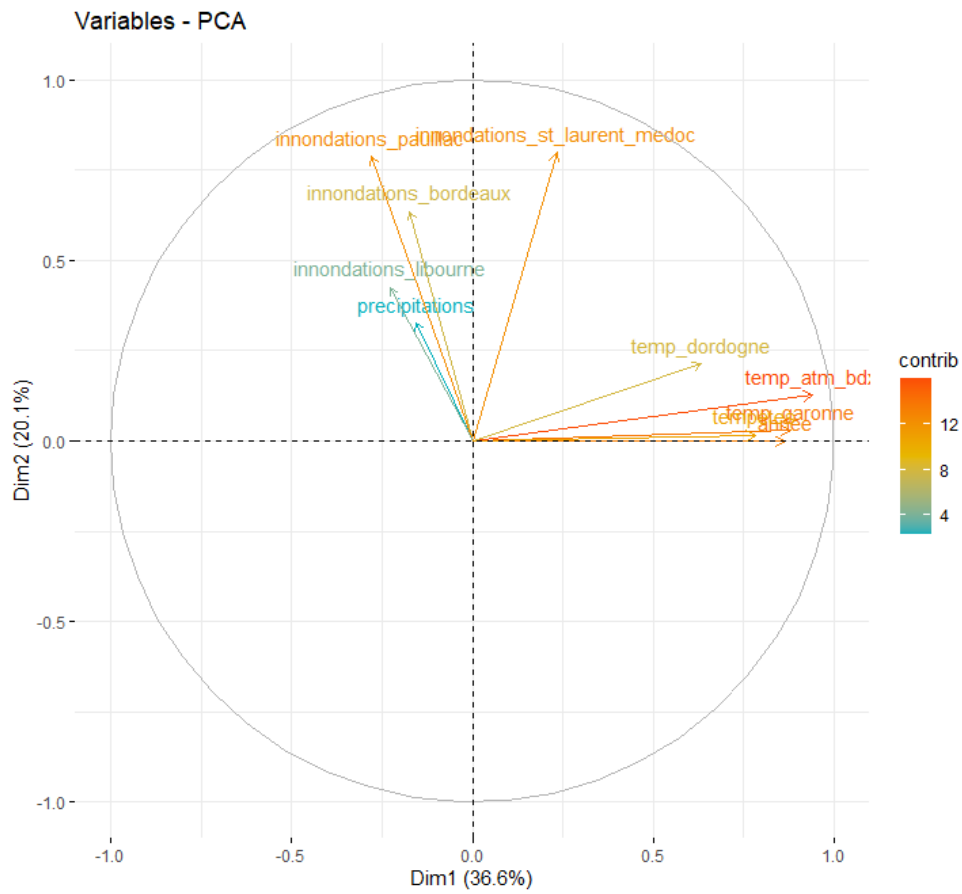


Figure 9: Cercle de corrélation des variables climatiques entre 1970 et 2020

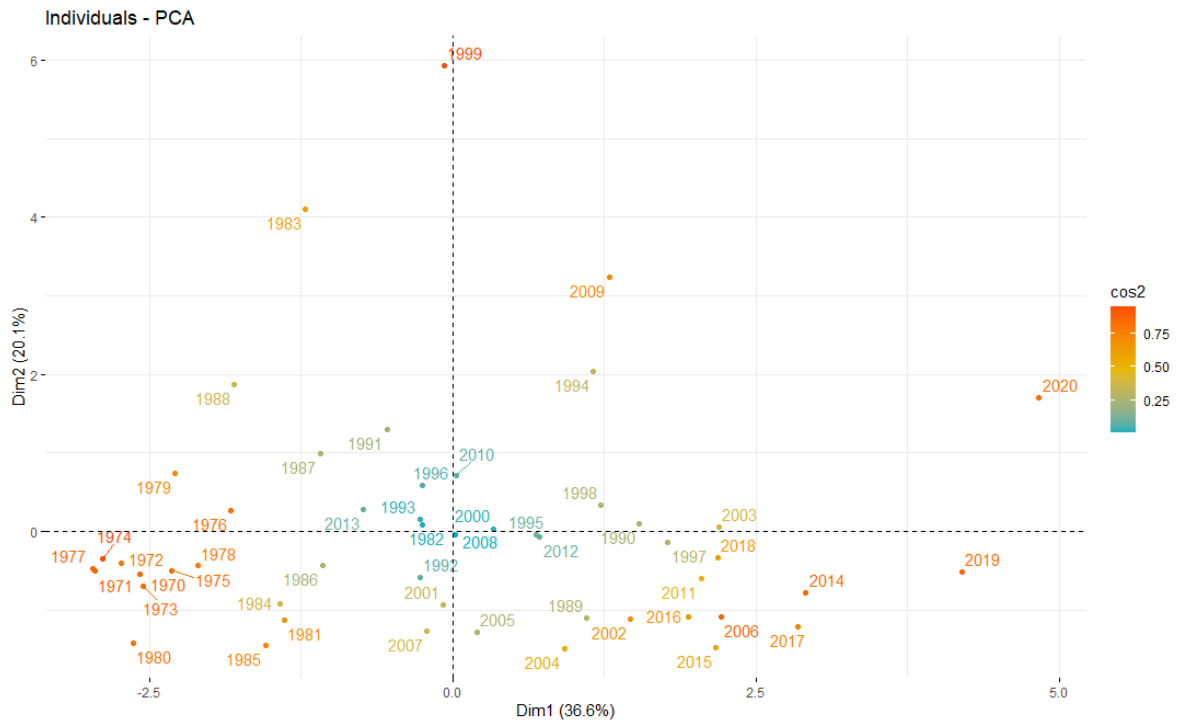


Figure 10: Nuage de point des individus entre 1970 et 2020

Indicateurs climatiques :

La figure 9 est un cercle de corrélation avec les variables relatives au climat. Chaque dimension (axe) est défini par la contribution des variables qui les compose. Dans ce cas, la dimension 1 est largement expliquée par la variable de la température atmosphérique à Bordeaux. La seconde dimension (axe 2) est défini par les inondations à Pauillac et à Saint-Laurent-Médoc (Annexe 3).

La température atmosphérique (variable de forçage), la température de l'eau et les tempêtes sont très corrélées entre elles car elles sont quasiment superposées dans le graphique (Fig 9). Ces variables sont également très corrélées à la variable « année », c'est-à-dire qu'elles augmentent linéairement par rapport au temps (années). Autrement dit, les températures sont plus chaudes et les tempêtes plus nombreuses.

De plus, les inondations dans l'estuaire sont très corrélées aux précipitations. Les inondations à Saint-Laurent-Médoc sont plus faiblement corrélées. L'ensemble de ces variables ne sont pas corrélées aux températures et aux tempêtes. Ces résultats confirment les premières observations : les inondations ne semblent pas suivre de tendance particulière au cours du temps. Les précipitations ne semblent pas non plus être corrélées aux températures et au temps. Ce qui confirme les résultats obtenues au début du rapport. Cette observation est peut-être dû au fait que les précipitations soient exprimées en moyenne annuelle : les variations de précipitations dues à la température sont observable à une échelle de temps mensuelle. Globalement la variable de forçage « précipitations » semble voir un impact sur les inondations.

Sur la figure 10 les années sont, dans l'ensemble, réparties chronologiquement de la droite vers la gauche. La dimension 1 (horizontale) est principalement représentée par la température, on peut donc identifier les années les plus chaudes. Ce sont globalement les années plus récentes. La dimension 2 (verticale), est représentée par inondations. Les années situées vers le haut de l'axe sont celles où il y a eu des inondations : c'est le cas en 1999. Au centre du graphique, les années 2000 sont des années représentatives de la période 1970-2020.

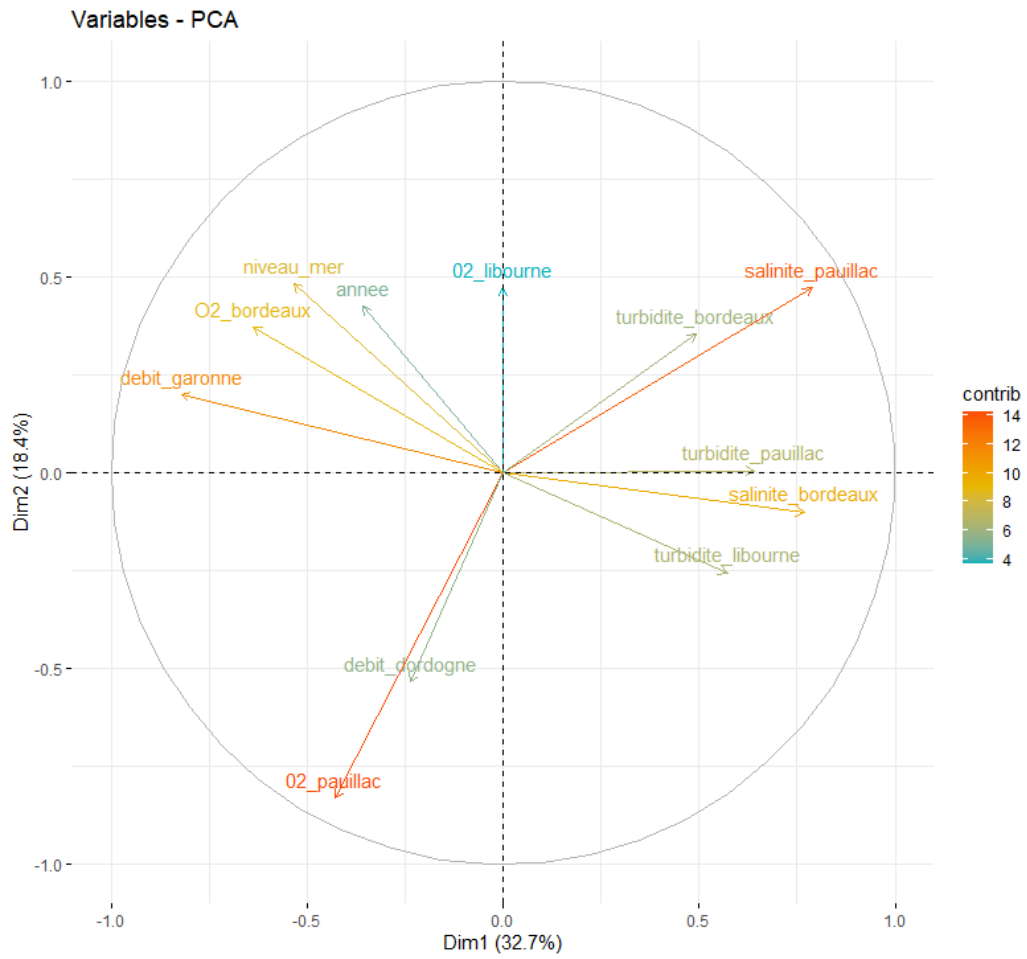


Figure 11 : Cercle de corrélation des variables relatives au fonctionnement hydro sédimentaire et à l'impact de la qualité de l'eau entre 2005 et 2020.

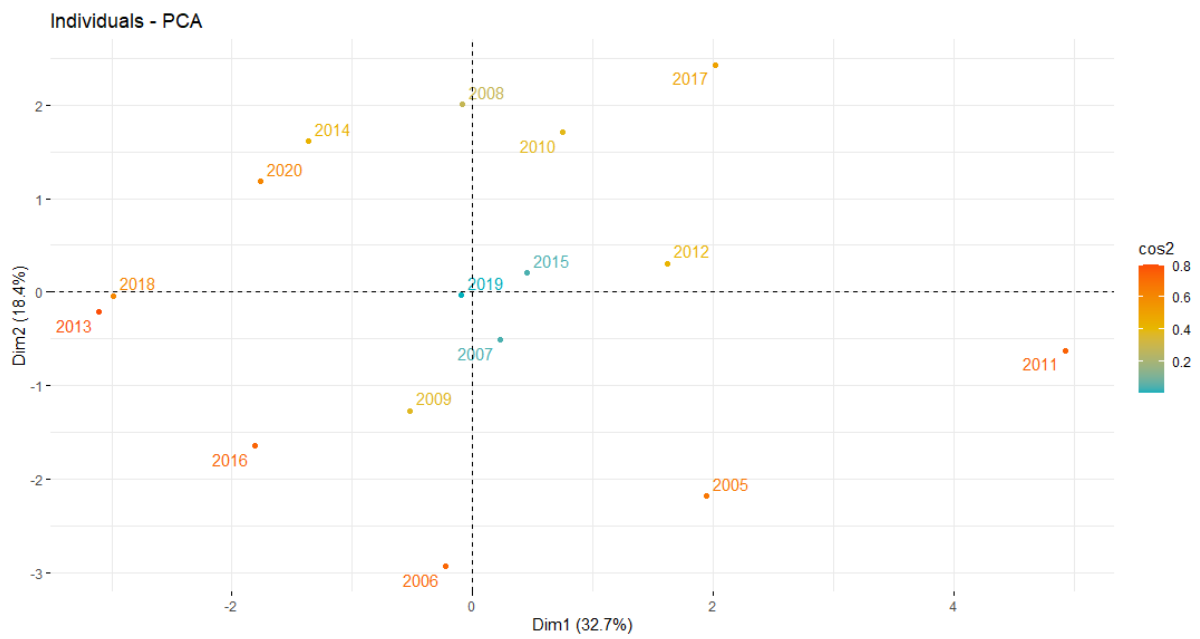


Figure 12: Nuage de point des individus

Indicateurs du fonctionnement hydro sédimentaire et de l'impact sur la qualité de l'eau :

La figure 11 est un cercle de corrélation, elle regroupe les variables expliquant le fonctionnement hydro sédimentaire et les impacts de la qualité de l'eau. Les variables fortement corrélées à la dimension 1 (axe horizontale) sont la salinité à Pauillac et à Bordeaux. Oxygène dissous à Pauillac très anticorrélé à la dimension 2 (axe vertical)(Annexe 4). On peut donc interpréter les dimensions 1 et 2 respectivement comme le taux de salinité et d'oxygène dissous.

Pour l'étude des variables, différents sites sont représentés quand les données sont disponibles. Ainsi on retrouve des données à :

- Bordeaux, le débit et l'oxygène dissous sont très corrélés. La salinité est très anti-corrélée à ces derniers. La salinité est faiblement corrélée à la salinité.
- Pauillac, la turbidité et la salinité sont très corrélés. Ceux-ci sont anti-corrélés à l'oxygène dissous.
- Libourne : le débit est très anti-corrélé à la turbidité. Ces derniers sont non corrélés à l'oxygène dissous.

Les corrélations entre les variables ne sont pas identiques suivant les sites. Cela s'explique par la position des sites dans l'estuaire. Pauillac est le site le plus exposé à l'océan. La salinité est importante et la différence de masse entre les eaux douces et les eaux salées augmente la turbidité et quantité d'oxygène disponible est fortement réduit. A Bordeaux, l'intrusion des eaux salées est moins importantes, ce qui explique que la turbidité et la salinité soient moins corrélées mais cela induit tout de même une baisse de l'oxygène dissous. Ce dernier est très corrélé au débit, puisque lorsqu'il est important, la turbidité diminue car les sédiments sont remis en suspension. C'est également ce qu'il se passe à Libourne où le débit évolue à l'inverse de la turbidité.

L'évolution du débit, considéré comme une variable de forçage dans cette étude, semble donc affecté directement le fonctionnement hydro sédimentaire et la qualité de l'eau dans l'estuaire de la Gironde.

Le graphique suivant (Figure 12) est un nuage de point des individus, il ne montre pas de tendance particulière au cours des années. 2019, situé au centre du graphique semble être une année représentative de la période 2005-2020.

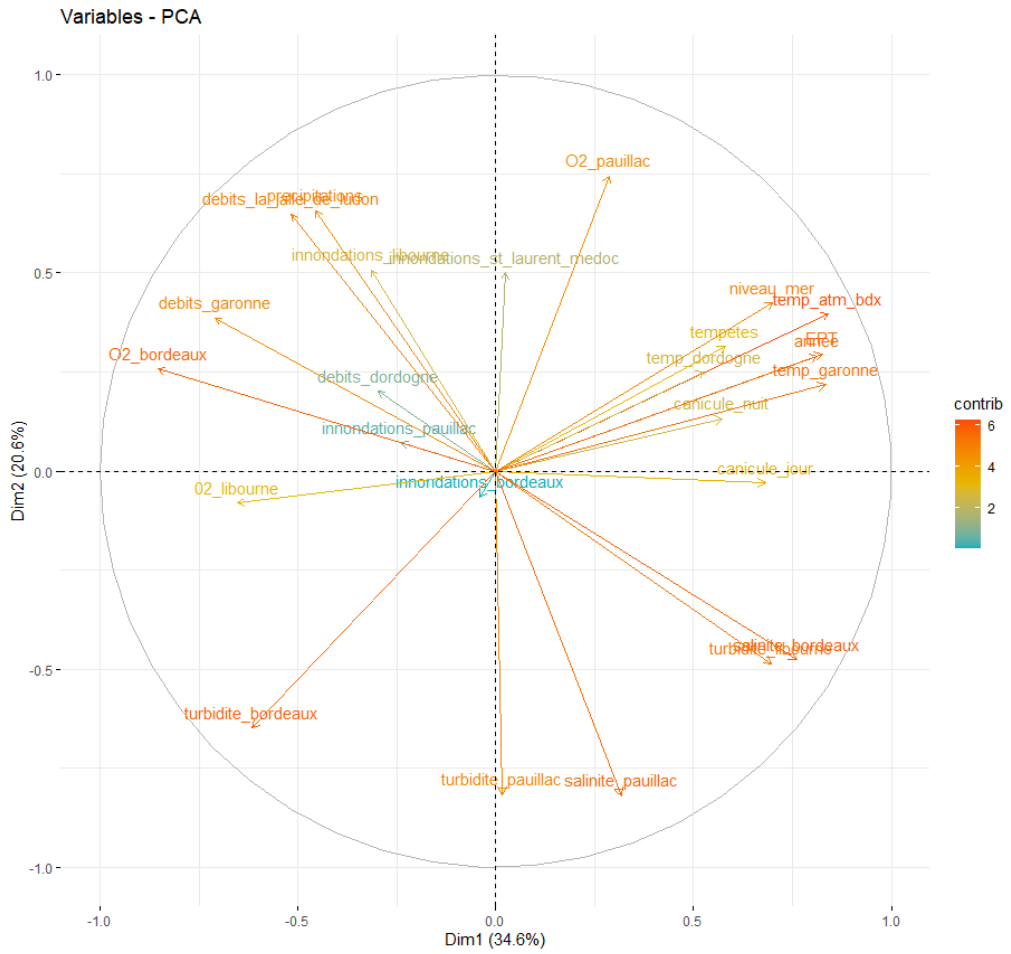


Figure 13: Cercle de corrélation avec l'ensemble des variables entre 1970 et 2020

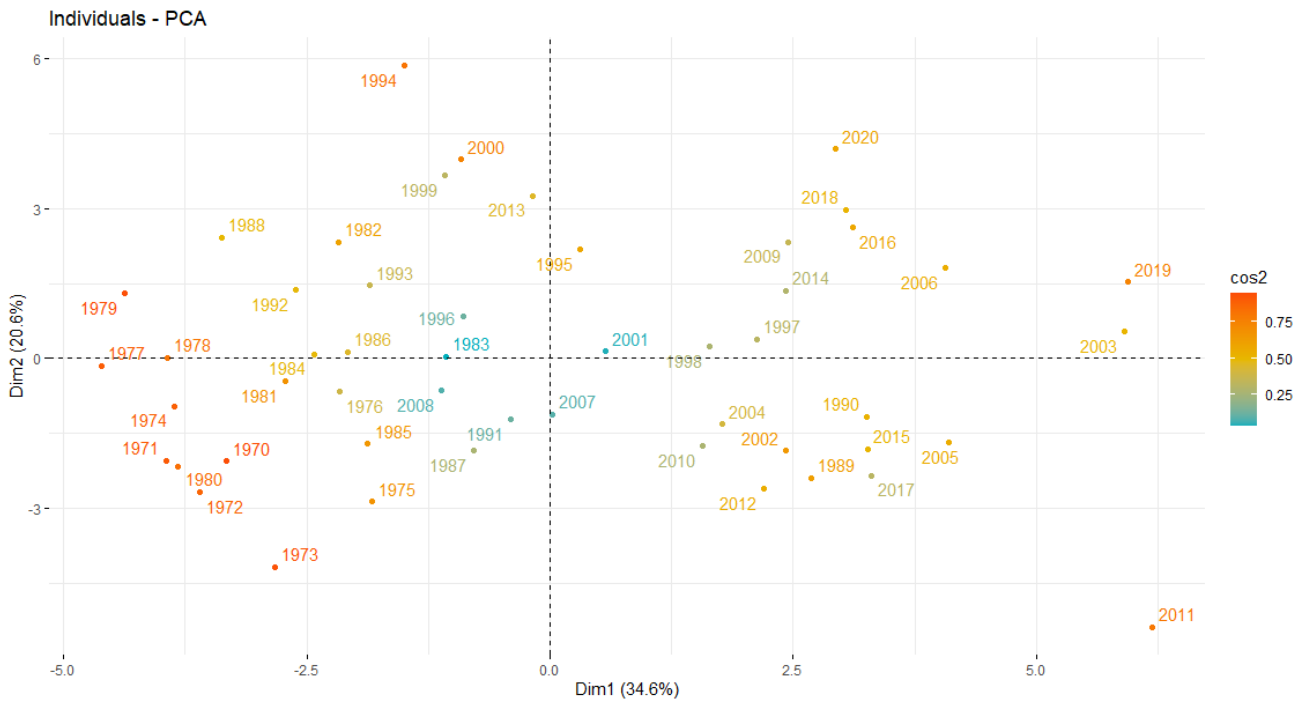


Figure 14: Nuage de point des individus entre 1970 et 2020

L'ensemble des indicateurs sélectionnés pour l'étude du changement climatique :

La graphique 13 est un cercle de corrélation, il permet d'étudier le degré de corrélation linéaire de l'ensemble des variables. Dans un premier temps, on se concentre sur les dimensions 1 et 2 (Annexe 5). La première interprète la température atmosphérique et celle de la Garonne qui sont très corrélées. Mais aussi la concentration d'oxygène dissous, anti-corrélée à l'axe. La seconde dimension est corrélée à l'oxygène dissous à Pauillac et anti-corrélée à la salinité et la turbidité de Pauillac.

Plusieurs variables sont corrélées entre elles et forment des groupes. Le premier ensemble de variables regroupe : les températures (de l'eau et de l'atmosphère), les tempêtes, l'évapotranspiration, le niveau de l'océan et les jours et nuits caniculaires, sont très corrélées aux années et entre elles. Ce sont les variables qui augmentent avec le temps.

Dans un second groupe, on retrouve des variables pour la majorité peu corrélées au premier. Ce sont des indicateurs de débits, d'oxygène dissous, de précipitations et les inondations.

Enfin la turbidité et la salinité sont isolées des autres variables vers le bas du graphique. Elles forment le dernier groupe moins homogène que les deux premiers.

Les variables proches du cercle apportent une grande contribution, elles sont en rouge sur le graphique. C'est le cas de la température atmosphérique à Bordeaux. Les inondations sont des variables qui ont une faible contribution, puisqu'elles sont proches du centre (en bleu). Comme identifié précédemment, les corrélations entre les différents sites ne sont pas complètement identiques. La dynamique et la morphologie de l'estuaire implique que chaque site n'est pas soumis aux mêmes variations. Ainsi l'évolution des variables les unes en fonction des autres va différer pour chaque localité.

Les variables de forçages (températures, précipitation et débits), sont fortement corrélées à de nombreuses autres variables et leur contribution est importante. On peut considérer que la modification de celles entraîne des variations de l'ensemble des indicateurs recensés. Cela induit une modification du climat, du fonctionnement sédimentaire et impact la qualité de l'eau.

Le nuage de points (Figure 14) représente la répartition des individus, ici ce sont des années. Les individus sont représentés par des coordonnées par rapport aux dimensions 1 (horizontale) et 2 (verticale). Chaque dimension est représentée par des variables. Dans ce cas, il y a beaucoup de variables qui apportent une contribution similaire (Annexe 5), il n'y a donc pas une variable qui ne représente chaque axe mais c'est un mélange de différents indicateurs. La dimension 1 est principalement représentée par les indicateurs de la température atmosphérique, de la Garonne et par l'évapotranspiration. Ainsi sur la droite du graphique, on retrouve les années où la température atmosphérique, l'évapotranspiration et la température de la Garonne sont élevés. Certaines années extrêmes confirment ces résultats, comme 2003 tout à droite connu pour être une année très chaude. De manière générale, on observe une tendance chronologique. Les variables qui représentent la seconde dimension (verticale) sont moins explicites. Il s'agit des indicateurs relatifs à Pauillac : la salinité, la turbidité et l'oxygène dissous.

Conclusion

Les estuaires sont des écosystèmes complexes où les variables co-évoluent simultanément. Il est parfois complexe d'identifier les origines de ces variations. L'étude des indicateurs du changement climatique montre que pour la quasi-totalité des variables il y a une tendance à l'augmentation ou à la diminution. Certaines variations sont plus alarmantes comme l'augmentation de la température qui a en moyenne augmenté de plus de 1°C ces 25 dernières années. Toutefois l'impact anthropique par la fragmentation de l'habitat par exemple, amplifie et accélère ces variations.

La comparaison des mêmes variables sur différentes localités au sein de l'Estuaire de la Gironde met en évidence la complexité de l'Estuaire. Pauillac est plus soumise à la marinisation et donc à l'augmentation de la salinité et est exposé à une turbidité élevée tout au long de l'année. Libourne et Bordeaux sont situées plus en amont de l'estuaire et sont moins exposées, toutefois la réduction des débits entraîne un bouchon vaseux de plus en plus présent dans la Dordogne et la Garonne. Malgré ça, les variables restent très corrélées, c'est-à-dire qu'elles suivent les mêmes tendances à des intensités différentes.

L'étude de la corrélation des variables permet d'identifier les variables qui apportent une forte contribution. On retrouve donc les variables de forçage telles que la température, les débits et les précipitations. D'autres variables se distinguent aussi comme l'évapotranspiration ou l'oxygène dissous à Pauillac. Les inondations apportent une faible contribution dans les dimensions étudiées. L'étude de celles-ci ne permet pas d'identifier une corrélation avec le changement climatique. Cependant les phénomènes récents (janvier 2021) laissent penser qu'il y a un réel impact du changement climatique sur les inondations. Dans ce cas les inondations sont exprimées en nombre par an, donc le débit, les vents ... ne sont pas pris en compte. Cette perte d'information explique en partie que les résultats ne soient pas concluants.

Afin de comparer l'ensemble des indicateurs, un jeu de données homogène est nécessaire. Pour cela tous les indicateurs doivent être exprimés dans une même échelle de temps. Les variables sont donc exprimées en année. Les variations saisonnières sont donc impossibles à étudier. De plus, si le niveau de la mer est mesuré depuis une centaine d'années, certains paramètres comme la turbidité et la salinité suscitent un intérêt récent. Ces données sont disponibles depuis 2005, 15 ans de données est discutable statistiquement. Pour générer les graphiques le logiciel Rstudio doit donc réaliser des imputations, ces valeurs manquantes sont donc un biais dans l'analyse des données. Ceci est illustré par les annexes 1 et 2. Pour les variables mesurées avec des sondes, certaines données sont manquantes car ces dernières peuvent tomber en panne et donc impliquer des données manquantes. Cependant, les technologies de plus en plus compétentes permettront à terme de ne plus faire face à ce problème.

L'étude annuelle des indicateurs a déjà permis de mettre en évidence une forte corrélation entre le changement climatique les variables de forçages. L'augmentation de la température de l'eau est très corrélée aux autres variables climatiques qui visent à augmenter. Les débits fluviaux et les précipitations sont aussi légèrement corrélés entre eux mais aussi aux variables du fonctionnement hydro sédimentaires. La marinisation de l'estuaire et la baisse des débits provoquent une importante turbidité dans l'estuaire de la Gironde. A terme les risques d'hypoxie sont préoccupants. Tous ces paramètres étant modifiés, ils affectent les niches écologiques et provoquent une baisse de biodiversité. Avec une prise de conscience collective, et en modifiant nos habitudes, il est possible de réduire l'impact anthropique et de freiner les effets du changement climatique.

Références bibliographiques

Agence de l'eau Adour-Garonne, 2015. Garonne 2050, Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne. 68 pages

Agence de l'eau Adour-Garonne, 2018. Plan d'adaptation au changement climatique du bassin Adour-Garonne. 64 pages

CHAALALI Aurélie, CHEVILLOT Xavier, BEAUGRAND Grégory , DAVID Valérie , LUCZAK Christophe , BOËT Philippe , SOTTOLICHIO Aldo , SAUTOUR Benoît, 2013. Changes in the distribution of copepods in the Gironde estuary: A warming and marination consequence? Estuarine, Coastal and Shelf Science, Science Direct. Volume 134, Pages 150-161.

Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 2019. Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat. Connaissances, 58 pages.

Comité de Bassin Adour-Garonne, 2019. Schéma directeur d'aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Adour-Garonne 2022-2027, Etat des lieux. 168 Pages

Comité scientifique régional Acclimaterra, Hervé le Treut, 2018. Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine, pour agir dans les territoires. Editions Région Nouvelle-Aquitaine. 488 Pages

Commission Locale de l'Eau du SAGE Estuaire de la Gironde et milieux associés, 2013. SAGE Estuaire de la Gironde et milieux associés : PAGD et Règlement. 144 Pages

JALON-ROJAS Isabel, CASTELLE Bruno, 2021. Climate Control of Multidecadal Variability in River Discharge and Precipitation in Western Europe. Water, Volume 13, Pages 257.

JALON-ROJAS I. , SCHMIDT S. , SOTTOLICHIO A. 2015 Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions, Hydrology and Earth System Sciences Volume 19, Pages 2805-2819.

LAJAUNIE-SALLA Katixa, SOTTOLICHIO Aldo, SCHMIDT Sabine, LITRICO Xavier, BINET Guillaume, ABRIL Gwenaël, 2018. Future intensification of summer hypoxia in the tidal Garonne River (SW France) simulated by a coupled hydro sedimentary-biogeochemical model, Environmental Science and Pollution Research, Volume: 25, Pages 31957 - 31970.

LANOUX Aurélie, ETCHEBER Henri, SCHMIDT Sabine, SOTTOLICHIO Aldo, CHABAUD Gerard, RICHARDA Marion, ABRIL Gwenaël, 2013. Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France). Environmental Science: Processes & Impacts, Volume 15, Page 585.

PLANTON S. 2013. Glossaire, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.

POUVREAU Nicolas, 2008. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France: outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.

SAUTOUR Benoît, BARON Jérôme, 2020. L'estuaire de la Gironde un écosystème altéré ? Entre dynamique et pressions anthropiques. 201 Pages

SCHMIDT Sabine, 2021. Rapport scientifiques 2020, Réseau d'observation automatisé pour la surveillance de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde. Université de La Rochelle, 474 Pages.

SCHMIDT Sabine, DIALLO Iris, DERRIENNIC Hervé, MENDES Fabrice, 2021. Rapport technique sur le fonctionnement du réseau en 2020.

Scientifiques de l'université de Bordeaux, 2016. Bouchon vaseux du système estuarien Garonne-Dordogne-Gironde, Synthèse des connaissances. 36 pages

VAN MAANEN Barend, SOTTOLICHIO Aldo, 2018, Hydro- and sediment dynamics in the Gironde estuary (France): Sensitivity to seasonal variations in river inflow and sea level rise. Continental Shelf Research, Volume 165, Pages 37 -50.

Webographie

CEPRI : Centre Européen de Prévention du Risque Inondation, Site consulté le 25/08/2021

[Adaptation au changement climatique - Bienvenue sur le site du CEPRI](#)

DRIAS, Les futurs du climat, Site consulté le 25/08/2021.

[DRIAS, Les futurs du climat - Accueil \(drias-climat.fr\)](#)

Encyclopédie de l'environnement, Site consulté le 25/08/2021.

<https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/evenements-meteorologiques-extremes-changement-climatique/>

GEST'EAU La communauté des acteurs de gestion intégrée de l'eau Site consulté le 25/08/2021.

[Projet Life Eau&Climat | Gest'eau \(gesteau.fr\)](#)

L'estuaire de la Gironde, 2021. Site consulté le 25/08/2021.

[Estuaire Gironde # Accueil \(estuaire-gironde.fr\)](#)

Météo-France : Site consulté le 25/08/2021.

[Réchauffement climatique et tempêtes - Météo-France \(meteofrance.fr\)](#)

OFB : Office Français pour la Biodiversité. Site consulté le 25/08/2021.

[PATBiodiv | Plate-forme d'Appui Technique pour la BIODIVERSITÉ \(ofb.fr\)](#)

SMIDDEST :Syndicat Mixte pour le Développement durable de l'estuaire de la Gironde, 2021 SMIDDEST. Site consulté le 25/08/2021.

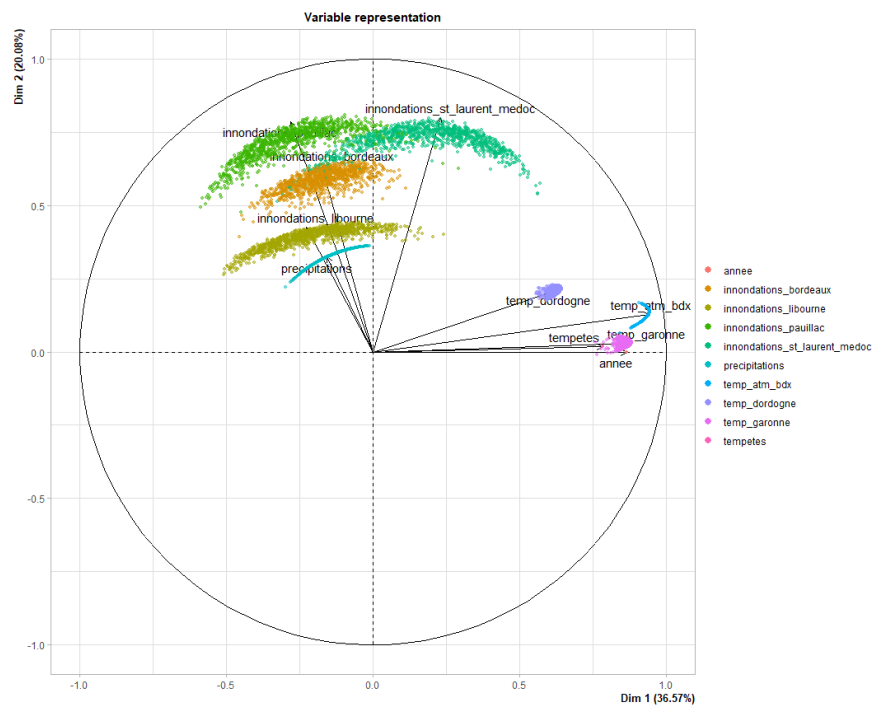
<https://www.smiddest.fr/>

Territoire et climat, mobilisons nos énergies, 2020. Site consulté le 25/08/2021.

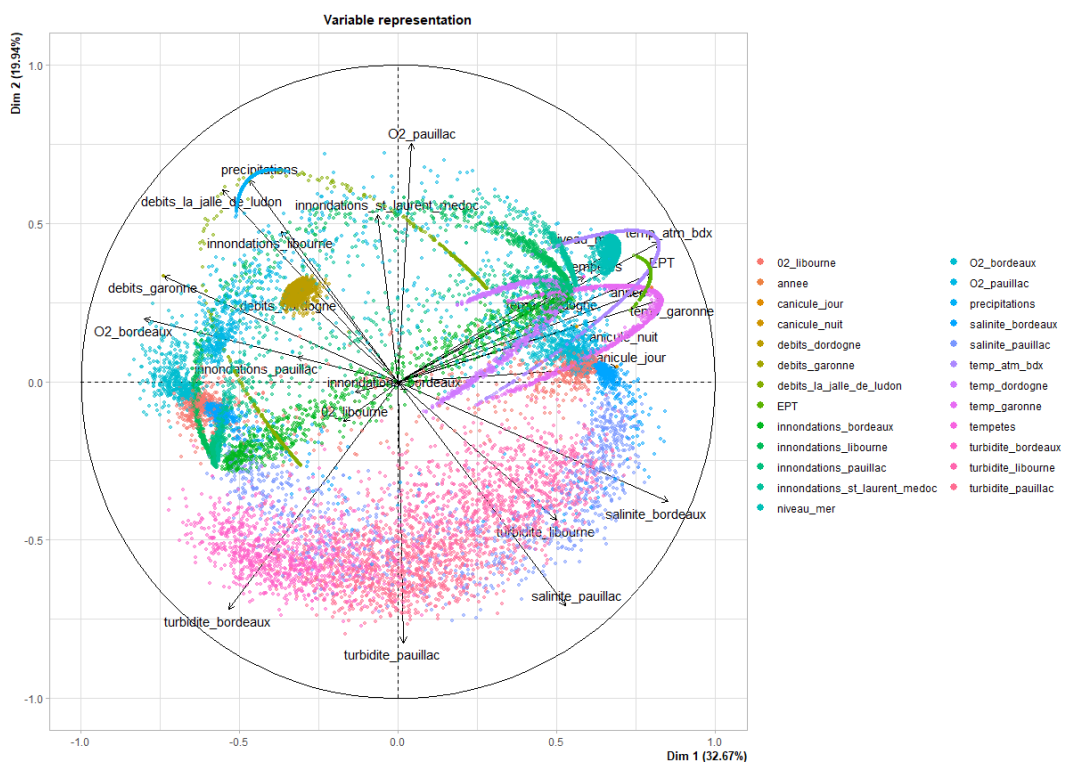
<https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/adaptation-au-changement-climatique-focus-sur-la-demarche-tacct>

Annexes

Annexe 1 : Cercle de corrélation permettant de visualiser l'incertitude de prédiction des valeurs manquantes grâce à l'imputation multiple pour les variables relatives au climat entre 1970 et 2020.



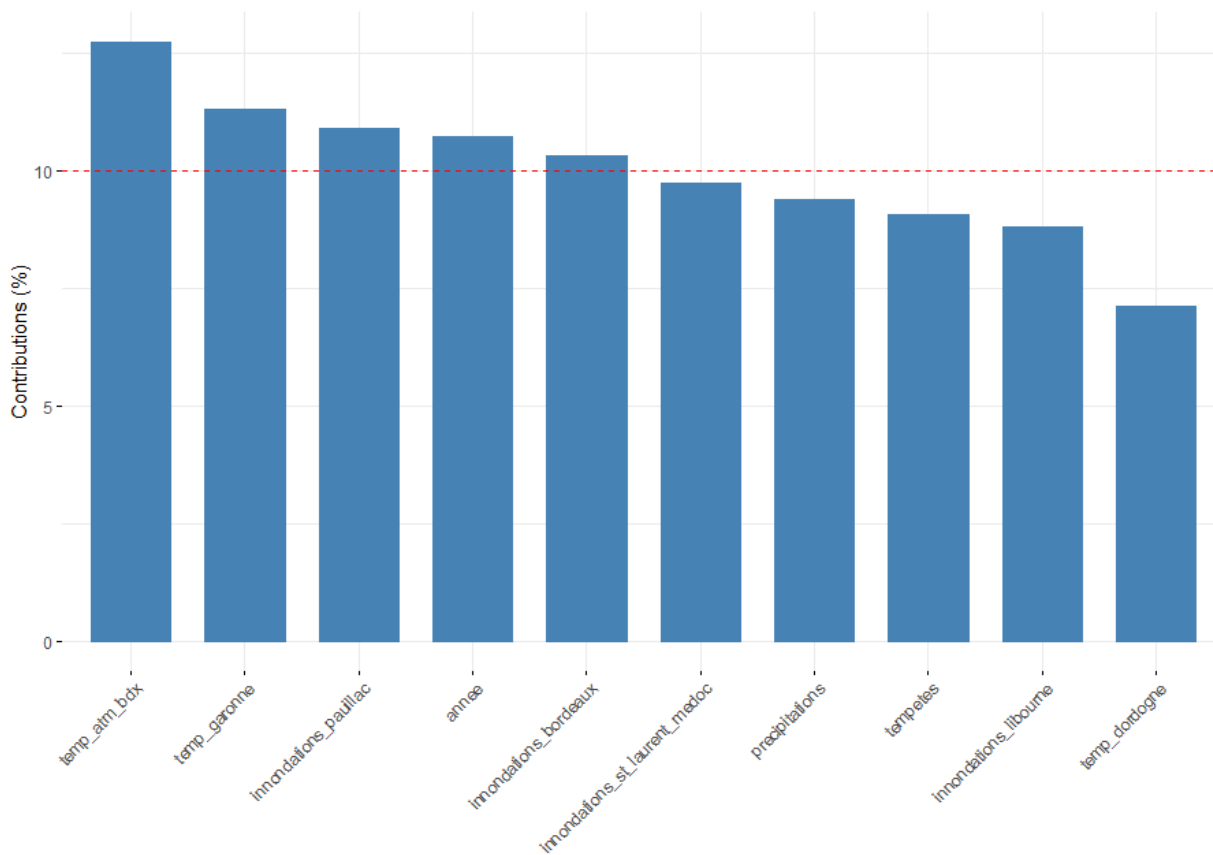
Annexe 2 : Cercle de corrélation permettant de visualiser l'incertitude de prédiction des valeurs manquantes grâce à l'imputation multiple pour l'ensemble des variables entre 1970 et 2020.



Annexe 3 : Contributions des variables selon les dimensions pour l'ACP comprenant les données du climat.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
annee	20.4432983	9.996683e-05	1.023911826	11.6592659	2.00048303
temp_atm_bdx	24.2185604	8.046615e-01	0.184061704	0.4476765	1.11172912
temp_garonne	21.1073164	4.131037e-02	2.065086279	2.6745947	0.09571126
temp_dordogne	10.9681370	2.265178e+00	4.087428989	31.6158375	36.49203237
precipitations	0.6709902	5.283805e+00	37.168089185	10.2957889	18.11102885
tempetes	16.7509903	1.362126e-02	2.132977580	1.2363854	8.87816526
inondations_bordeaux	0.8214556	2.005542e+01	20.734307911	9.3197060	0.57376592
inondations_pauillac	2.1284828	3.080503e+01	5.408393540	3.1450405	0.71841210
inondations_libourne	1.4124610	9.031080e+00	27.192931411	29.3914688	18.22528651
inondations_st_laurent_medoc	1.4783080	3.169979e+01	0.002811574	0.2142358	13.79338558

Contribution of variables to Dim-1-2-3

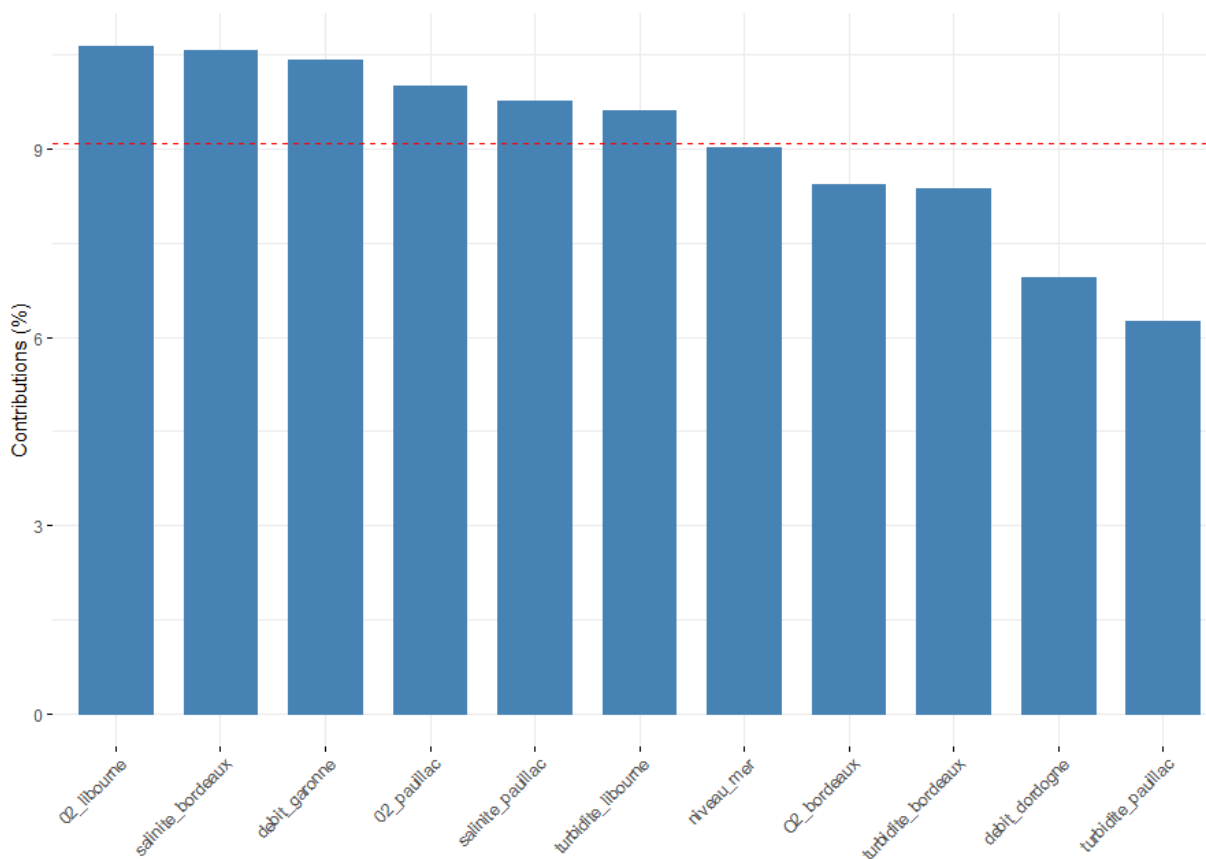


Annexe 4 : Contributions des variables selon les dimensions pour l'ACP comprenant les données de débits, de turbidité, d'oxygène dissous et le niveau de l'océan.

DEBITS

salinite_bordeaux	16.08161088	2.84832516	8.0845253	10.18325495	2.2596128
salinite_pauillac	18.60131775	4.63974799	0.4042574	3.35056437	5.5164382
turbidite_bordeaux	5.39689599	14.00957822	0.3813673	20.03951099	9.0474880
turbidite_pauillac	10.21390246	0.01735485	1.8729546	11.24839567	20.5240594
turbidite_libourne	8.79796540	6.23888966	21.9180174	0.02024267	4.0138997
O2_bordeaux	10.13770136	9.52543126	1.5099319	10.96798420	14.6478576
O2_pauillac	6.56042152	25.82741529	2.4782774	3.01546305	6.7432828
O2_libourne	0.01046782	10.96583026	40.9874957	0.18794609	0.1072859
debit_garonne	17.45141078	3.66793901	9.6674803	0.05314039	0.0211333
debit_dordogne	1.58187016	17.40955631	9.8909146	0.85682064	30.9535614
niveau_mer	5.16643588	4.84993199	2.8047781	40.07667698	6.1653808

Contribution of variables to Dim-1-2-3-4

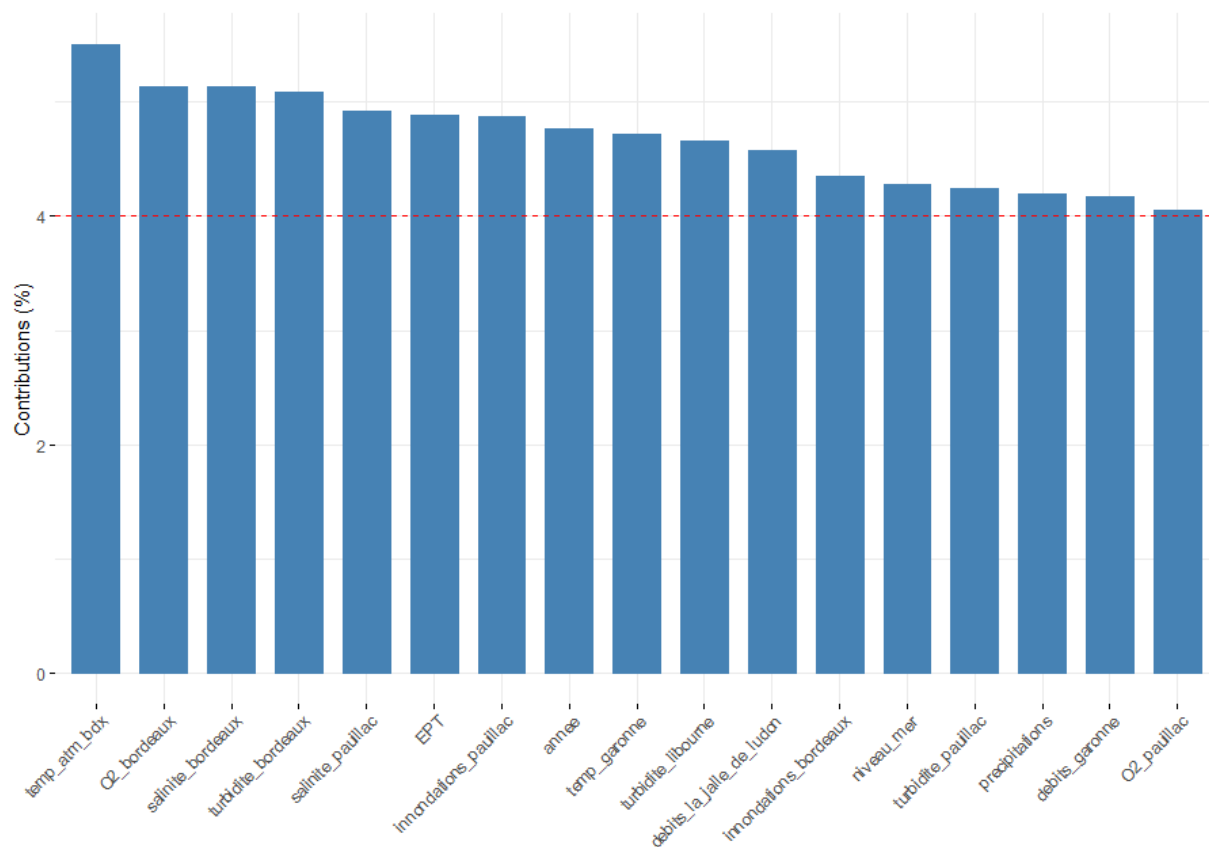


Annexe 5 : Contributions des variables selon les dimensions pour l'ACP comprenant l'ensemble des données.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
annee	7.645225820	1.63648491	1.997400e-01	3.074989e+00	1.732243884
temp_atm_bdx	8.170483966	3.05655137	5.643804e-02	9.909736e-01	0.007262555
temp_garonne	8.029985376	0.92145454	4.348835e-03	9.695717e-01	0.333845250
temp_dordogne	3.210889252	1.21577665	4.039775e-02	1.485347e+00	2.200976339
precipitations	2.409734614	8.40962240	9.148680e-01	3.021335e+00	3.656271267
tempetes	3.885154057	1.92234805	2.390797e+00	1.563749e+01	2.831085365
inondations_bordeaux	0.019002974	0.08451798	3.501942e+01	2.170363e-01	0.003845018
inondations_pauillac	0.664881946	0.09899433	3.642499e+01	1.185463e+00	0.129903226
inondations_libourne	1.152562666	4.99882999	6.264426e-01	1.525862e+00	0.625051781
inondations_st_laurent_medoc	0.006859761	4.88095770	1.807082e+01	5.064467e+00	0.515959773
niveau_mer	5.660295432	3.51144781	1.407668e-01	5.681354e+00	6.583319795
debits_garonne	5.827464258	2.89240558	1.735793e-01	1.332102e+00	8.216103447
debits_dordogne	1.024602157	0.79039957	1.403527e-01	2.985551e+00	33.751638858
debits_la_jalle_de_ludon	3.085251801	8.17334421	1.656264e+00	1.623045e-03	2.854932875
salinite_bordeaux	6.691378357	4.40774876	1.277005e-01	1.852330e-01	4.931732008
salinite_pauillac	1.166346672	13.04701202	1.246132e-01	4.301406e+00	0.689840887
turbidite_bordeaux	4.384105418	8.15296883	6.860343e-02	2.134614e-01	0.194851966
turbidite_pauillac	0.003255916	12.94434803	4.232011e-02	7.952412e-02	0.278183913
turbidite_libourne	5.624889874	4.58898616	5.318962e-01	1.926176e+00	4.725958397
O2_bordeaux	8.436970858	1.28735425	6.414667e-01	7.721525e-04	0.005408460
O2_pauillac	0.944653965	10.78235339	1.471170e-02	6.294843e+00	1.011593071
O2_libourne	4.920150287	0.12846302	2.205849e+00	7.183542e+00	16.009943263
canicule_nuit	3.794084641	0.34212132	3.959577e-04	2.416381e+01	0.925626838
canicule_jour	5.370597827	0.01854144	3.504454e-01	1.215571e+01	7.230674881
EPT	7.871172104	1.70696767	3.277482e-02	3.223592e-01	0.553746881

nnn

Contribution of variables to Dim-1-2-3



Annexe 6 : Organisation et déroulement du stage :

Tâches réalisées / Date:	AVRIL				MAI				JUN				JUILLET				AOÛT			
	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5		
Bibliographie																				
Elaboration de la méthode de travail																				
Pécolle des données manquantes																				
Mise en forme des données																				
Analyses statistiques																				
Rédaction du rapport																				

Durant le stage, des réunions étaient organisées une fois par semaine avec mes maîtres de stage afin de suivre l'avancée de stage et de faire un point sur les possibles interrogation. De plus, une fois par mois, une réunion bilan avait lieu avec le directeur de la structure.

Au cours du stage, j'ai eu l'occasion de participer à plusieurs réunions :

- Réunion réunissant le comité technique (scientifique) pour discuter du plan de gestion des sédiments (suivis de la bioaccumulation sur les biocénoses et dynamique des vasières)
- Web séminaire : « Life Natur' Adapt » : conférence sur la conservation de la biodiversité et changement climatique, un changement de paradigme.
- Séminaire sur le plan de gestion des sédiments (Effet de l'immersion sur les habitats et espèces et suivis de la fonction de nourricerie et frayère)
- COTECH MAGEST
- ...

Mots clés

Changement climatique
Estuaire de la Gironde
Indicateurs
Impacts
Corrélations

Résumé

Dans le contexte actuel la question du changement climatique est plus que préoccupante. Les objectifs généraux du stage sont de recenser et d'analyser les données liées aux indicateurs du changement climatique. Mais aussi d'étudier les tendances générales des indicateurs sur l'estuaire de la Gironde et les milieux associés. Et enfin d'évaluer la corrélation entre les ces indicateurs pour identifier les liens entre les variables. L'estuaire de la Gironde est bien documenté, les tendances générales dans le contexte de changement climatique sont identifiées. La plupart des paramètres évoluent à la baisse ou à l'augmentation. Une augmentation rapide de la température est déjà bien marquée lors des dernières décennies. L'augmentation du niveau de l'océan induit une marinisation progressive de l'Estuaire de la Gironde. Cette dernière cumulée à la baisse des débits provoque une turbidité. Des épisodes marqués d'hypoxie dans l'estuaire pourrait être très dommageable pour la biodiversité. Le changement climatique affecte les écosystèmes à tous les niveaux, beaucoup de paramètres connaissent de fortes variations pour tendre vers des phénomènes de plus en plus extrêmes, et des habitats qui ne sont plus adaptés aux espèces qui y résidents.

Abstract

Changement climatique
Estuaire de la Gironde
Indicateurs
Impacts
Correlations

In this current situation, the issue of climate change is more than worrying. The main objectives of the internship are to identify and analyse data related to climate change indicators. And to study the general trends of the climate change indicators on the Gironde estuary and associated landscape. And finally, to study the correlation between these indicators, to identify the links between the variables. The Gironde estuary is well documented, and the general trends in the context of climate change are identified. Most parameters are moving down or up. A rapid increase of the temperature is already evident in the last decades. The increase of the level of the ocean induces a gradual marinization of the Estuary. The decrease in flows and marinization contribute to the increase in turbidity in the gironde estuary. Episodes of hypoxia (hypoxie merci google trad) in the estuary could be very damaging for the biodiversity. Climate change affects ecosystems at all levels, many parameters are subject to significant variations to move towards more and more extreme phenomena, and habitats that are no adapted to the species that live there.