

Analyse des forçages physiques et climatiques influant sur le transport des micropolluants dans l'estuaire de l'Adour

Stage effectué au sein du Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau sous l'encadrement scientifique de Monsieur Benoit Liquet.

Mars-Juillet 2017

Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'entreprise ou du laboratoire d'accueil.

Avant-propos

Depuis les années 2000, le littoral aquitain connaît une anthropisation importante liée à l'augmentation du nombre de résidents et au fort attrait touristique que représente cette région. Le littoral est donc soumis à une forte pression anthropique et subit des pollutions diverses. C'est dans ce contexte de changement global et d'anthropisation croissante des zones littorales que s'insère le projet Micropolit. Il a pour objectif de caractériser l'état et l'évolution de la qualité du littoral afin de préserver celle-ci voire de l'améliorer. Pour atteindre ces objectifs, le projet s'appuie sur une approche transdisciplinaire apportée par différentes structures locales (IPREM, ECOBIOP, LMAP, SIAME, LRHA)¹ travaillant ensemble, autour de thématiques communes. Il adopte également une approche par sites ateliers disposés le long du littoral sud-aquitain que sont la côte rocheuse du Pays Basque, la zone estuarienne de l'Adour et le Gouf de Capbreton, ces sites étant complémentaires en termes d'évaluation de la biodiversité et de la qualité.

Ce programme de recherche est organisé autour de plusieurs actions visant à répondre au mieux aux objectifs globaux du projet. Les trois premières actions sont destinées à coordonner le projet à long terme, à faire le bilan des connaissances sur la qualité chimique et biologique et d'approfondir ces dernières. Les deux suivantes consistent à mettre en place des systèmes d'observation ou de compléter les systèmes déjà existants et de modéliser et simuler la dispersion et l'évolution des polluants dans les sites ateliers. La dernière consiste à réduire les sources de pollution. Le stage effectué s'inscrit dans l'action 4 qui correspond à l'étude des processus de transport des micropolluants en zone estuarienne sous l'influence des forçages océano-météorologiques par modélisation statistique et numérique.

¹IPREM : Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux ; ECOBIOP : Unité mixte de recherche Ecologie Comportementale et Biologie des Populations de Poissons ; LMAP : Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau ; SIAME : Laboratoire des sciences pour l'ingénieur appliquées à la mécanique et au génie électrique ; LRHA : Laboratoire Ressources Halieutiques Aquitaine.

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement mon maitre de stage Mr Liquet, enseignant chercheur à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, pour son accueil et tout le temps qu'il m'a consacré. J'ai beaucoup appris à ces côtés, autant au niveau statistique que rédactionnel et ce, toujours dans la bonne humeur. Grâce à lui j'ai pu m'épanouir pleinement durant ce stage.

Je remercie également Mr Morichon, enseignant chercheur au sein du laboratoire SIAME (Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Electrique), Mr Sous, maitre de conférence à l'université de Toulon et Mr Mourguiart, étudiant en troisième année de licence et stagiaire de Mr Liquet. Tout au long du stage et lors des réunions, ces personnes m'ont fait de nombreuses remarques constructives permettant ainsi l'amélioration de mon travail.

Je tiens à remercier Mme Defontaine, doctorante au sein du SIAME, pour m'avoir transmis les jeux de données sur le débit et mon amie Mylène pour la relecture et la correction de mon rapport.

Table des matières

Introduction	1
Matériels et méthodes	3
Matériels	3
Houle	3
Vent	3
Débits	4
Méthodes	4
Analyse des séries temporelles	4
Analyse des événements extrêmes	6
Méthode des maxima annuels	6
Méthode à seuil	7
Création de l'application shiny	9
Résultats et Discussion	9
Houle	9
Vent	13
Débits	15
Conclusion	21
Références bibliographiques	22
Annexes	25

Liste des figures

1	Rose des houles et graphique bivarié de la hauteur de vague en fonction de leur période	9
2	Série temporelle des moyennes mensuelles de la hauteur significative pour la période 1949-2014	10
3	Indices saisonniers et monthplot de la hauteur des vagues pour le site d'Anglet .	11
4	Graphiques des périodes de retour calculées avec les deux méthodes pour le site d'Anglet	12
5	Rose des vents présentant l'occurrence des vents selon leur vitesse et leur direction sur le site d'Anglet pour la période 1949-2014	13
6	Série temporelle des moyennes mensuelles de la vitesse du vent pour le site d'Anglet	14
7	Indices saisonniers et monthplot de la vitesse du vent	14
8	Moyenne mensuelle des débits à l'embouchure de l'Adour pour la période 1970-2010 et analyse des résidus liés au modèle utilisé	15

9	Indices saisonniers et monthplot des débits de l'Adour	16
10	Moyenne mensuelle des débits de l'Adour au niveau du pont Saint-Esprit et de la Nive pour la période 1970-2010.	17
11	Analyse des résidus pour les modèles multiplicatifs des débits de l'Adour au pont Saint-Esprit et de la Nive	17
12	Indices saisonniers et monthplot des débits de la Nive	18
13	Graphique des périodes de retour calculées pour le débit de l'Adour à l'embouchure. L'intervalle de confiance représenté est à 70 pourcents.	19
14	Graphique des périodes de retour calculées pour le débit de l'Adour au pont Saint-Esprit et la Nive	20

Liste des tableaux

1	Périodes de retour des hauteurs de vagues calculées avec la méthode à seuil	12
2	Périodes de retour des hauteurs de vagues calculées avec la méthode des maxima annuels	12
3	AIC des différents modèles pour l'Adour au pont Saint-Esprit et la Nive	16
4	Périodes de retour de crues pour l'Adour à l'embouchure	19
5	Périodes de retour de crues pour l'Adour au pont Saint-Esprit	20
6	Périodes de retour de crues pour la Nive	20

Introduction

L'Adour est un fleuve du sud-ouest de la France qui prend sa source dans le massif Pyrénéen du pic du Midi de Bigorre et qui se jette dans l'océan Atlantique au niveau de Bayonne, 308 kilomètres plus loin. Il est le cours d'eau principal de son bassin versant qui s'étend sur 4 départements : le Gers, les Hautes-Pyrénées, les Landes et les Pyrénées Atlantiques avec une superficie totale de 16 880 km² (Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux Adour Garonne 2010-2015, 2010). Son réseau hydrographique est très dense, avec comme principaux affluents la Midouze, les gaves de Pau et d'Oloron et la Nive.

De nombreuses activités anthropiques pouvant altérer la qualité de l'eau se sont développées sur ce bassin versant (Brunet and Astin 1999; Arleny et al. 2007). On recense une activité agricole importante sur l'ensemble de celui-ci et une activité industrielle non négligeable localisée dans les communes de Bayonne et d'Anglet. Au niveau agricole, les cultures de maïs et de céréales sont prédominantes dans les vallées tandis que l'élevage s'effectue préférentiellement en altitude. De nombreux auteurs ont déjà prouvé que les activités agricoles étaient une source de pollution diffuse pour les milieux aquatiques avec les produits phytosanitaires et l'utilisation excessive d'engrais (Dorioz and Ferhi 1994; Carpenter et al. 1998; Schulz 2004). Au niveau industriel, le bassin de l'Adour compte quelques usines agroalimentaires, métallurgiques et mécaniques. La nature des rejets de ces usines va dépendre de la branche d'activité de celles-ci. L'activité agroalimentaire rejette principalement des matières en suspension, de l'azote réduit et du phosphore tandis que les effluents des activités métallurgiques et mécaniques seront caractérisés par des substances toxiques inhibitrices et des métaux (Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau Adour Aval, 2015).

En plus des deux activités citées précédemment, l'usage quotidien de l'eau par les habitants du bassin versant contribue à la pollution des milieux aquatiques. La population globale du bassin est d'environ 1 070 000 habitants (M. Monperrus et al. 2005), ce qui correspond à une densité moyenne de 63.38 habitants/km². Même si cette densité est nettement inférieure à la densité moyenne nationale (France métropolitaine : 115,8 habitants/km²), l'Adour n'est pas épargné pour autant. En effet, ce fleuve ou ses affluents traversent des communes densément peuplées telles que les communes de Pau, d'Anglet et de Bayonne. Bien que les eaux usées de ces communes et des communes du bassin versant soient traitées par des stations d'épuration avant d'être rejetées dans les rivières, elles contiennent toujours de nombreuses substances exogènes en faible quantité que l'on appelle « micropolluant » (Luo et al. 2014). Ce terme désigne toutes substances contaminantes sous forme de trace dans l'environnement (concentration : de quelques ng/l à quelques µg/l) qui peuvent avoir une toxicité chronique ou aiguë sur les organismes (Schwarzenbach et al. 2006). Les familles de micropolluants les plus abondantes dans les milieux aquatiques sont les micropolluants organiques (Hydrocarbures, pesticides, ...), les métaux et métalloïdes (Plomb, cadmium, ...), les hormones (naturelles ou synthétiques) et les produits pharmaceutiques et perturbateurs endocriniens (antidépresseurs, bêta-bloquant, ...).

Les micropolluants sont devenus une préoccupation majeure à partir des années 2000 (Garrigues 2015). Durant cette période, on s'est aperçu que de nombreux contaminants présents dans les rivières n'étaient pas forcément réglementés (les produits pharmaceutiques, les détergents, les désinfectants, ...). En France, cette prise de conscience a entraîné la mise en place de programmes

de surveillance avec l'INERIS² et l'ONEMA.³ Les connaissances sur les micropolluants restent tout de même modestes de par la difficulté à détecter certains composés présents en concentrations infimes (ng/l), de la multiplicité des substances et de la variabilité des contaminations. C'est dans ce cadre que le projet MICROPOLIT s'insère. Il a pour objectif de caractériser l'état et l'évolution de la qualité du littoral aquitain afin de la préserver voire de l'améliorer. Pour atteindre ces objectifs, des efforts sont concentrés sur la détection des micropolluants, leur toxicité et leur devenir en milieu estuarien. Ce projet s'intéresse à l'estuaire de l'Adour car il représente la zone de transition entre le bassin versant, d'où provient la majorité des micropolluants (Conil and Le Guern 2013), et le littoral.

Dans l'estuaire, la dynamique des micropolluants est complexe. Selon leurs caractéristiques chimiques, ils sont soumis à différents changements physico-chimiques comme les floculations, les précipitations et les adsorptions-désorptions (Schwarzenbach et al. 2006). De plus, cet écosystème est une zone fortement biogène qui soumet également les micropolluants à un ensemble de phénomènes biologiques comme la biodégradation, l'assimilation et la biotransformation (Duran et al. 2008; Conil and Le Guern 2013). Turner et al. (1999) et Hatje et al. (2003) ont montré que les micropolluants organiques et les métaux ont tendance à s'adsorber aux matières en suspension (MES) suivant le gradient de salinité. Il est donc primordial de comprendre la dynamique des MES dans le cadre d'une étude sur les micropolluants. A son embouchure, l'Adour forme un panache contenant les matières en suspension et se dispersant le long du littoral en fonction des débits, des courants littoraux et du vent (Petus et al. 2014). Une part significative de ce panache contribue alors directement ou indirectement aux pollutions du littoral (Chiffoleau et al. 2001).

Le but de ce travail est de faire une synthèse descriptive sur les forçages physiques et climatiques du panache de l'Adour que sont la houle, le vent et le débit. Cette synthèse vise à estimer les paramètres initiaux d'un modèle hydrodynamique du panache de l'Adour qui servira à mieux comprendre le transport des micropolluants dans cet estuaire. L'objectif second de ce travail réside dans la création d'une application shiny interactive résumant l'ensemble du travail. La réalisation de ce travail s'effectuera en deux étapes. Dans un premier temps, les séries chronologiques sur ces trois forçages seront étudiées dans le but d'en extraire la tendance et la saisonnalité. Dans un deuxième temps, les événements de crues et de tempêtes seront étudiés par des analyses de valeurs extrêmes pour avoir une idée de la périodicité de ces événements afin de les prendre en compte dans le modèle hydrodynamique.

Une forte saisonnalité est attendue pour ces trois forçages. En effet, d'après Charles et al. (2012), les hauteurs de vagues sont plus importantes l'hiver que l'été. Alvarez et al. (2014) ont également mis en évidence une saisonnalité du vent avec un changement de vitesse au cours de l'année. Enfin, une augmentation des débits liée à une augmentation des précipitations durant l'hiver est observée (Bouwer, Vermaat, and Aerts 2006). Pour les analyses des extrêmes, des travaux sur les tempêtes ont déjà été effectués dans la région (Lerma et al. 2015). Ils ont trouvé pour la côte Basque des hauteurs de vagues comprises entre 10 et 12 mètres pour une période de retour de 100 ans. Nous nous attendons donc à trouver des résultats dans le même ordre de grandeur. Pour les crues, aucune étude n'a été réalisée sur l'Adour, nous comparerons donc les résultats obtenus aux crues historiques.

²Institut national de l'environnement industriel et des risques

³Office national de l'eau et des milieux aquatiques

Matériels et méthodes

Matériels

Houle

Les données étudiées sont issues d'un modèle "Wind Wave Model II" modifié. C'est un modèle spectral de vague (Bertin et al. 2015) qui est forcé par des données de vents du NCEP (National Centers for Environmental Prediction) fournies par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Le fait que ce modèle soit basé sur les vents NCEP permet d'obtenir des données plus grossières mais plus stables dans le temps. Il a calculé 33 variables dont la plupart sont des variables descriptives des vagues pour cinq sites de la baie de Gascogne : Anglet, Bermeo, Capbreton, Biscarosse et Saint Jean-de-luz et ce, à différentes profondeurs (50 mètres pour Anglet, 15 et 100 mètres pour tous les autres sites). Ce sont des données allant du 1er janvier 1949 jusqu'au 31 décembre 2014 avec un pas de temps de 3 heures. Dans le cas de notre étude, seul le site impacté par le panache de l'Adour nous intéresse (Anglet). Ce site est situé à 3.30 miles de la côte. Les variables d'intérêt sont:

- la hauteur significative des vagues (en mètre) qui représente la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée de 30 minutes,
- la direction des vagues (en degrés),
- la période des vagues (en seconde) qui correspond à la période entre deux vagues successives.

Vent

En plus des résultats du modèle spectral, les données de vents qui ont permis de forcer celui-ci ont pu être récupérées. Ces données sont dans le même format que les données de houle fournies par le modèle (données par site, même pas de temps/ période). Elles sont composées de deux variables qui sont les composantes zonale et méridienne du vent. A partir de ces deux composantes, la vitesse en kilomètre/heure et la direction en degrés ont pu être calculés grâce aux formules suivantes⁴ :

$$Vitesse = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$Direction = \frac{180}{\pi} \times atan2(u, v) + 180,$$

où u est la composante zonale et v la composante méridienne. $atan2$ est la fonction arctangente à deux arguments qui renvoie un angle en radians.

⁴Formules de <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/154552-vent>

Débits

Trois débits ont été étudiés : le débit de l'Adour à l'embouchure, au pont Saint-Esprit et le débit de la Nive. Les données ont été récupérées sur la banque nationale des données hydrométriques (www.hydro.eaufrance.fr). Cette banque de données regroupe des mesures quotidiennes de débit (en m^3/s) sur plus de 5000 stations en France. N'ayant pas de stations de mesure sur l'Adour au niveau de Bayonne, le débit de celui-ci a dû être reconstitué en faisant la somme de tous ces affluents et en négligeant l'apport pluviométrique des bassins versants drainés en aval des stations. Le débit de l'Adour au pont Saint-Esprit est donc la somme des débits quotidiens mesurés sur les stations de l'Adour à Saint-Vincent-de-Paul, du Luy à Saint-Pandelon, du Gave de Pau à Bérenx, du Gave d'Oloron à Escos et de la Bidouze à Aicirits. Le débit de l'Adour à l'embouchure quant à lui, sera la somme du débit de l'Adour au pont Saint-Esprit et du débit de la Nive. Cette opération de reconstitution n'a pas été nécessaire pour le débit de la Nive de par la présence d'une station de mesure sur celle-ci (située à Cambo-les-Bains). En prenant compte de toutes les stations et de leurs différentes dates de mise en fonctionnement, les données quotidiennes de débits commencent le 1er janvier 1970 et se terminent le 31 décembre 2010 pour les trois débits qui nous intéressent.

Méthodes

Analyse des séries temporelles

L'analyse des séries temporelles a pour but d'extraire la tendance qui représente l'évolution à long terme des trois forçages étudiés et de voir si ces forçages présentent des variations saisonnières. Tout d'abord, l'absence de données manquantes a été vérifiée et les données quotidiennes (débit) ou avec un pas de temps de 3 heures (houle et vent) ont été agrégées en moyenne mensuelle afin de réduire la taille de ces jeux de données tout en conservant une possible saisonnalité. Deux modèles déterministes ont été utilisés pour décrire les séries temporelles : le modèle additif et le modèle multiplicatif. Pour le modèle additif, la variable X_t issue d'une série temporelle X s'écrit :

$$X_t = Z_t + S_t + \epsilon_t ,$$

où Z_t représente la tendance, S_t la saisonnalité et ϵ_t les composantes aléatoires indépendantes et identiquement distribuées ("erreurs au modèle"). Pour le modèle multiplicatif, cette variable s'écrit :

$$X_t = Z_t \times S_t \times \epsilon_t .$$

Ces modèles vont nous permettre de décomposer les séries temporelles.

Cas du modèle additif

Avec la fonction `ma(..., order=12)` du package **forecast**, on applique une moyenne mobile d'ordre 12 correspondant aux 12 mois de l'année. Lorsqu'elle est appliquée, cette moyenne mobile (notée M_p) annule la saisonnalité et diminue la variance du bruit. On obtient donc :

$$X_t^* = M_p(X_t).$$

Pour estimer la saisonnalité, il faut soustraire la série de départ avec la série transformée X_t^* pour obtenir la série corrigée de la tendance \check{S} . Soit :

$$\check{S} = X_t - X_t^*.$$

Ensuite, on estime les coefficient saisonniers \dot{c}_j (avec j représentant les mois). Pour obtenir ce coefficient pour un mois, on fait la moyenne de toutes valeurs corrigées de la tendance (\check{S}_t) que l'on a pour ce mois. Soit :

$$\dot{c}_j = \text{moyenne } \check{S}_t \text{ sur le mois } j, \text{ avec } j = 1, \dots, 12$$

Pour affiner la méthode, chaque coefficient estimé est retranché par la moyenne des coefficients (\dot{c}_j) afin que la condition de nullité de la moyenne des coefficients sur la période soit respectée (Lagnoux 2012). Soit les estimateurs des P coefficients saisonniers :

$$\hat{c}_j = \dot{c}_j - \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \dot{c}_j, \quad j = 1, \dots, P.$$

Une fois les coefficients saisonniers estimés, la série corrigée des valeurs saisonnières est obtenue en soustrayant l'estimation du saisonnier à la série de départ X_t . Soit :

$$X_{CVS,t} = X_t - \check{S}_t \quad t = 1, \dots, T$$

avec $\check{S}_t = \hat{c}_j$, $t \equiv j[P]$.

Une fois cette étape réalisée, une méthode de régression linéaire est appliquée à la tendance (fonction `lm()` sous R) de la série corrigée des valeurs saisonnières $X_{CVS,t}$. Pour finir, une seconde itération de la procédure est réalisée pour stabiliser le modèle.

Cas du modèle multiplicatif

Pour ce modèle, la procédure est presque identique avec toujours un choix de moyenne mobile d'ordre 12. Les différences sont les suivantes :

- A l'étape 2 : $\check{S}_t = \frac{X_t}{X_t^*}$.
- Les P coefficients saisonniers et les estimations \dot{c}'_j sont estimés de la même manière que pour le modèle additif. Cependant la condition de nullité est remplacée par la contrainte de constante en moyenne (Lagnoux 2012).
- A l'étape 3, la série corrigée des valeurs saisonnières s'exprime par :

$$X_{CVS,t} = \frac{X_t}{\check{S}_t}.$$

Une fois les composantes estimées du modèle, l'analyse des résidus permet un contrôle de la pertinence de celui-ci. Ils sont définis par :

$$\epsilon'_t = X_t - \check{Z}_t - \check{S}_t$$

pour le modèle additif,

$$\epsilon'_t = \frac{X_t}{\check{Z}_t \times \check{S}_t}$$

pour le modèle multiplicatif.

Si le modèle est correct, il ne doit pas y avoir de trace de saisonnalité dans les résidus. Pour le vérifier, le corrélogramme des résidus (fonction `acf()` sous R) est tracé, c'est le graphe d'un estimateur de la fonction d'autocorrélation. Il est utilisé pour vérifier l'absence de saisonnalité dans les résidus en vue d'une série temporelle stationnaire (ni tendance, ni saisonnalité). Si tel est le cas, le corrélogramme présente uniquement des valeurs de faible amplitude indiquant une faible corrélation entre les erreurs. A l'inverse, s'il y a des pics régulièrement espacés, c'est que la saisonnalité n'a pas été correctement éliminée de la série. Dans le cas de l'hypothèse des erreurs gaussiennes, l'histogramme des résidus peut être tracé en effectuant également un test de normalité de Jarque-Bera (fonction `jarque.bera.test()` sous R) et un qq-plot des résidus pour vérifier qu'ils sont distribués de façon homogène (`qqplot()` sous R). Le critère d'information AIC proposé par Akaike (Akaike 1987) est utilisé pour choisir le modèle statistique le mieux adapté pour nos séries temporelles.

Analyse des événements extrêmes

Dans cette étude, l'analyse des événements extrêmes a été effectuée pour la houle (tempête) et pour le débit (crue). C'est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Deux méthodes ont été appliquées : la méthode des maxima annuels qui s'appuie sur les événements les plus forts de chaque année et la méthode à seuil qui s'appuie sur des événements qui dépassent un certain seuil. Selon Coles (2001), la deuxième méthode est plus appropriée lorsque l'on a plusieurs événements extrêmes par an. En ne prenant qu'un événement par an, la méthode des maxima annuels perd de l'information. Les données de tempêtes ont été analysées avec les deux méthodes pour pouvoir les comparer entre elles tandis que les données de débit ont été seulement analysées avec la méthode des maxima annuels car celle-ci est la plus utilisée dans la littérature quand il s'agit d'étudier les crues (Gumbel 1941; Coles et al. 2001; Beirlant et al. 2006).

Méthode des maxima annuels

1. Modèle théorique :

E.-J. Gumbel (1941) postule que la loi de Gumbel, est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, cette loi doit ainsi être capable de décrire les séries de maxima annuels. Cette loi s'écrit :

$$G(z) = \exp[-\exp(-(\frac{z - \mu}{\sigma}))],$$

avec μ le paramètre de position, σ le paramètre d'échelle. Pour l'analyse des crues, les débits quotidiens maximums de chaque année ont été sélectionnés pour les trois sites étudiés (Adour à l'embouchure, au pont Saint-Esprit et la Nive). Cela représente 40 maxima annuels pour chaque site. Ensuite, une loi de Gumbel a été ajustée à ces maxima annuels. Pour l'analyse des tempêtes,

l'ajustement de la loi de Gumbel s'est effectuée sur les hauteurs significatives maximales des vagues pour chaque année (66 au total).

2. Estimation des paramètres de la loi de Gumbel :

Les paramètres de la loi de Gumbel ont été estimés à l'aide de la fonction `gum.fit()` du package `ismev` qui s'appuie sur la méthode du maximum de vraisemblance. L'ajustement de la loi de Gumbel aux données est vérifié par un test de Kolmogorov-Smirnov (`ks.test()`).

3. Calcul des niveaux et périodes de retour :

Il est généralement plus pratique d'interpréter les modèles de valeurs extrêmes en termes de quantiles autrement appelés niveaux de retour plutôt que par les estimateurs de la loi de Gumbel (Coles et al. 2001). Un niveau de retour ou quantile est défini par :

$$z_p = \mu - \sigma \times \log(y_p),$$

avec $y_p = -\log(1 - p)$, où p est la probabilité que l'événement donné se réalise au cours d'une année donnée. La période de retour attachée à cet événement est définie comme l'inverse de cette probabilité : $T = 1/p$. La période de retour est définie comme la durée moyenne entre 2 événements de même ampleur. Ce n'est qu'une autre façon d'exprimer la probabilité d'un événement à un moment donné. Malgré son nom, elle ne fait référence à aucune notion de régularité ou de périodicité. La fonction `rl.plot()` du package `ismev` permet de récupérer les intervalles de confiance calculés par la méthode delta (Coles et al. 2001) pour un niveau de retour donné et de tracer un "return level plot". C'est un graphique très utile pour l'interprétation qui représente les niveaux de retour en fonction de leur période de retour avec une échelle logarithmique.

Méthode à seuil

1. Modèle théorique :

L'approche utilisée pour analyser les événements de tempêtes est la méthode à seuil. Fondée sur la théorie des valeurs extrêmes et autrement connue sous le nom de « Peakover-threshold method », elle est basée sur les travaux de Pickland (1975), Davison(2003) et Smith (1989). Cette méthode récente sert à modéliser des queues de distribution. Elle consiste à sélectionner un échantillon de pics indépendants en utilisant un seuil. On suppose que les valeurs des pics au-dessus d'un seuil donné u , sont réparties selon une distribution généralisée de Pareto (GPD), et que le processus d'occurrence des pics est poissonien (Coles et al. 2001). Cette loi s'écrit pour un seuil (μ) donné :

$$G(z) = e^{-[1+\xi(\frac{z-\mu}{\sigma})]^{\frac{-1}{\xi}}}$$

Avec : μ le paramètre de position, σ le paramètre d'échelle et ξ le paramètre de forme. Si $\xi > 0$, la distribution est de type Pareto, si $\xi = 0$, la distribution est de type exponentielle (Gumbel) et si $\xi < 0$, la distribution est de type beta.

On définit une tempête comme un événement qui commence lorsque la hauteur significative des vagues dépasse un seuil (μ) et se termine lorsque la hauteur significative devient inférieure à ce seuil durant au moins 72h. Pour l'analyse des événements de tempête par la méthode à seuil, seule la hauteur significative maximale pour un événement tempête est prise en compte dans l'ajustement à la loi GPD.

2. Estimation des paramètres de la loi GPD :

L'estimation des paramètres ξ et σ se fait grâce à la méthode des moments qui est plus précise que la méthode du maximum de vraisemblance pour des petits échantillons (Castillo and Hadi 1997 ; Lerma et al. 2015). Les paramètres sont donnés par les formules suivantes (Castillo and Hadi 1997) :

$$\hat{\xi}_{mom} = (\frac{\bar{x}^2}{s^2} - 1)/2,$$

$$\hat{\sigma}_{mom} = \bar{x}(\frac{\bar{x}^2}{s^2} + 1)/2,$$

avec \bar{x} la moyenne des excès dépassant le seuil u et s^2 la variance de ces excès.

3. Sélection des seuils :

Une des difficultés majeures dans cette méthode réside dans le choix du seuil. Il doit être assez bas pour avoir assez de pics de tempêtes sur lesquels ajuster une loi GPD mais il doit être aussi assez haut pour que les pics des tempêtes soient indépendants (ce qui a pour conséquence de limiter les biais des estimateurs). La sélection des seuils peut s'effectuer à l'aide d'outils graphiques tel que le « mean residual life plot » qui représente la moyenne des excès au delà du seuil u (Coles et al. 2001), cependant le choix du seuil reste assez subjectif car il dépend de l'opérateur. C'est pour cela que les seuils seront choisis le plus objectivement possible grâce à la méthodologie détaillée par Lerma et al. (2015). Pour chaque site, deux seuils sont choisis : un seuil minimum correspondant à un λ compris entre 5 et 10 (λ étant le nombre de tempêtes sélectionnées par le seuil μ divisé par le nombre d'années étudiées) et un seuil maximum correspondant à un λ égal à 2 (au-delà de ce seuil l'ajustement ne peut pas se faire car il y a trop peu de tempêtes). Pour chaque seuil compris entre le minimum et le maximum, le processus d'occurrence des tempêtes poissonien est vérifié, les estimateurs sont calculés et un test de Kolmogorov-Sminorf est effectué pour rendre compte de l'ajustement des données à une loi GPD. C'est une méthode par itération qui consiste à sélectionner le seuil qui aura la p-valeur la plus proche de 1 pour le test d'ajustement à la loi GPD et qui ne rejette pas l'hypothèse nulle suivante : « le processus d'occurrence des tempêtes est poissonien ».

4. Calcul des niveaux et périodes de retour :

Le niveau de retour de N année pour une loi GPD est défini par :

$$z_N = \mu + \frac{\sigma}{\xi} [(N \times \lambda)^\xi - 1]$$

Les intervalles de confiance pour un niveau de retour donné sont calculés grâce à une méthode de bootstrap paramétrique décrite par Mazas and Hamm (2011). Des graphiques de niveaux de retour ou return level plot seront aussi tracés pour la méthode à seuil.

Création de l'application shiny

L'application est une interface graphique qui permet à un utilisateur novice d'accéder aux résultats obtenus durant cette étude. Elle regroupe le travail effectué sur le site d'Anglet mais aussi sur tous les autres sites de la baie de Gascogne (Bermeo, Capbreton, Biscarosse et Saint Jean-de-luz). Cette application a été créée avec le logiciel Rstudio et le package **shiny** (Annexe 1). Elle est accessible sur le lien suivant : <https://aureliencallens.shinyapps.io/application/> . Les scripts et les données seront mis en ligne prochainement sur Github.

Résultats et Discussion

Houle

Analyse descriptive

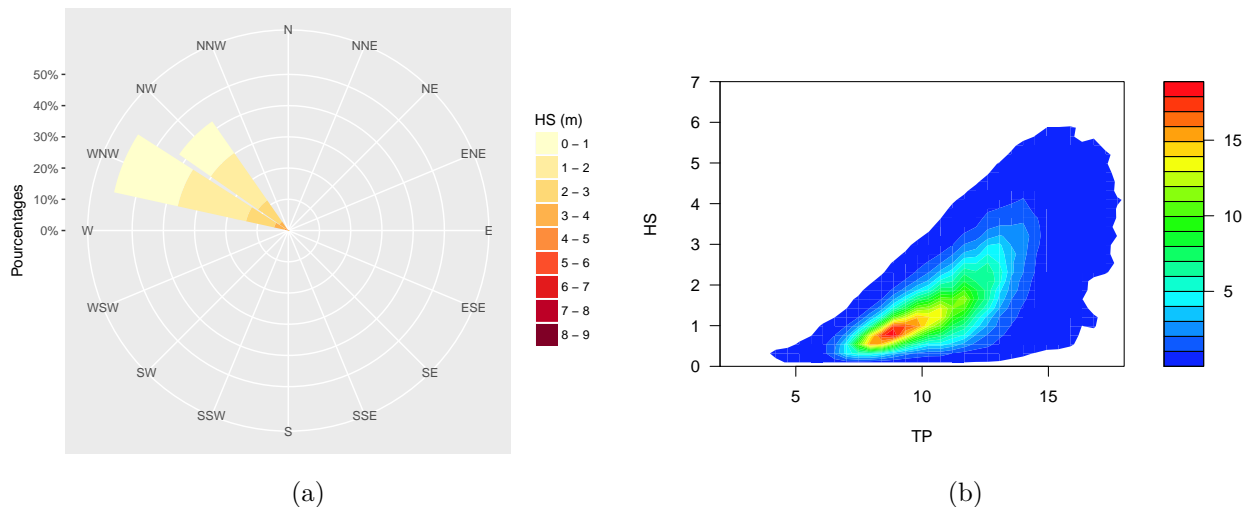


Figure 1: (a) Rose des houles présentant l'occurrence des vagues selon leur hauteur significative et leur direction. (b) Graphique bivarié de la hauteur significative en fonction de la période. Les couleurs indiquent l'occurrence des vagues en pourcentage. Ces deux graphiques sont issus des données du site d'Anglet de 1949 à 2014.

Les caractéristiques des vagues sont déterminées à l'aide de graphiques bivariés. La figure 1a représente la rose des houles associée au site d'Anglet. Ce site est caractérisé par des vagues de faibles hauteurs significatives (entre 0 et 2 mètres) provenant essentiellement de l'Ouest Nord Ouest et du Nord Ouest. Un graphique bivarié représentant la distribution des hauteurs de vagues selon leur période est représenté en figure 1b. Durant les 66 années, les vagues les plus fréquentes ont une hauteur significative de 1 mètre et une période d'environ 8 secondes. Ces résultats sont cohérents avec les mesures effectuées par le réseau Candhis⁵ au niveau de la bouée d'Anglet et avec la littérature scientifique. En effet, les mêmes caractéristiques de vagues ont été trouvées dans cette région par Butel et al. (2002).

La série temporelle de la hauteur des vagues a été décomposée à l'aide d'un modèle multiplicatif (AIC modèle additif = 667.5, AIC modèle multiplicatif = 461,6). L'analyse des résidus montre que le modèle est adapté (Annexe 2), de plus l'hypothèse de normalité n'est pas rejetée (p-value >0.05 pour le test de Jarque-Bera). Cette décomposition a mis en évidence une augmentation minime de la hauteur significative des vagues durant la période étudiée (Figure 2). Cette augmentation est significative mais explique peu de variance (moins de 1%) et reste infime rapportée à l'échelle de l'année (augmentation de 11 cm en 65 ans). Des augmentations plus importantes ont déjà été trouvées sur des sites du Golfe de Gascogne et certains auteurs en ont cherché la cause (Le Cozannet et al. 2011). Ces augmentations seraient liées à l'oscillation Nord Atlantique et à "l'East Atlantique pattern" d'après Charles et al. (2012) et Izaguirre et al. (2011). Selon les phases de ces phénomènes, les vagues se trouvent renforcées ou diminuées. Par exemple, la phase positive de l'oscillation Nord Atlantique (correspondant à des pressions plus élevées sur les Açores) a tendance à renforcer les vagues (augmentation de leur période et de leur hauteur significative) durant la période hivernale et au contraire, diminuer celles-ci durant la période estivale.

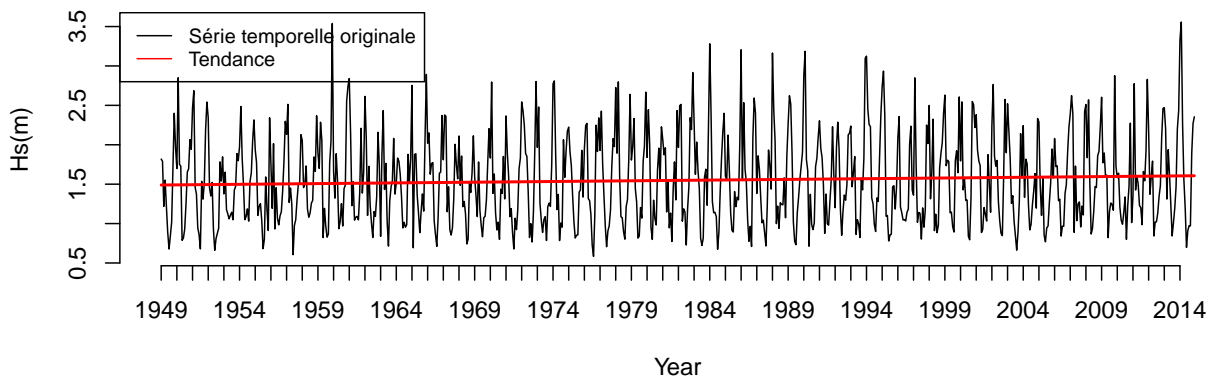


Figure 2: Série temporelle des moyennes mensuelles de la hauteur significative pour la période 1949-2014 (Site d'Anglet). La tendance est représentée en rouge et les données originales en noir.

La décomposition de la série temporelle a également montré une forte saisonnalité dans la hauteur significative des vagues, avec des vagues plus hautes l'hiver que l'été (Figure 3a). Cette

⁵Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

saisonnalité est liée aux phénomènes évoqués précédemment et à la saisonnalité du vent, les vagues étant une déformation de la surface d'une masse d'eau sous l'effet du vent (Kinsman 1965). De plus, le monthplot de la série temporelle (Figure 3b) n'indique pas d'évolution explicite de la hauteur des vagues au sein des différents mois.

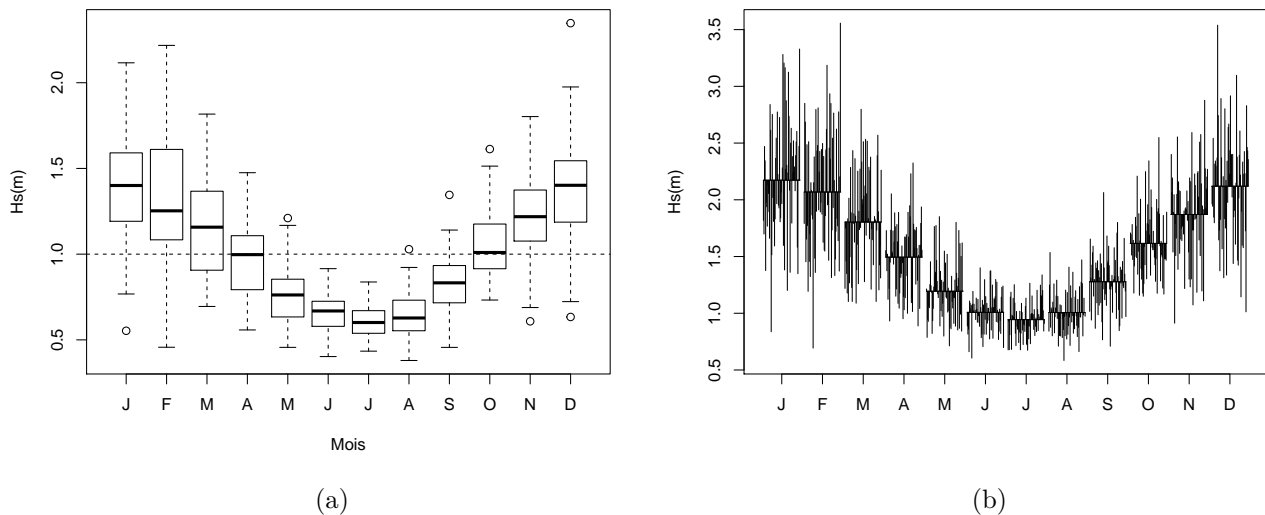


Figure 3: (a) Indices saisonniers représentant les différences à la moyenne des hauteurs significatives des vagues selon les mois. (b) Monthplot représentant les séries temporelles de chaque mois durant les 65 années étudiées (1949-2014) pour le site d'Anglet. Dans le graphique des indices saisonniers, la droite $y=1$ correspond à la moyenne annuelle. Le monthplot représente les séries temporelles au sein de chaque mois, il permet de voir une éventuelle évolution dans le temps.

Etude des extrêmes

Pour la méthode des maxima annuels, les deux estimateurs suivants ont été calculés : $\hat{\mu} = 5.137$ et $\hat{\sigma} = 0.723$, avec une p-valeur égale à 0.922 pour le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (Figure 4a). Pour la deuxième méthode, le seuil optimal a été fixé à 4.5 mètres (Annexe 2) ce qui a permis la selection de 203 événements de tempêtes. Grâce à ces 203 pics de tempêtes, les deux estimateurs suivants ont pu être calculés : $\hat{\sigma} = 0.659$ et $\hat{\xi} = 0.026$, avec une p-valeur égale à 0.283 pour le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (Figure 4b). Les deux ajustements ne peuvent pas être comparés par le critère d'Aikaike car les deux méthodes n'utilisent pas les mêmes données.

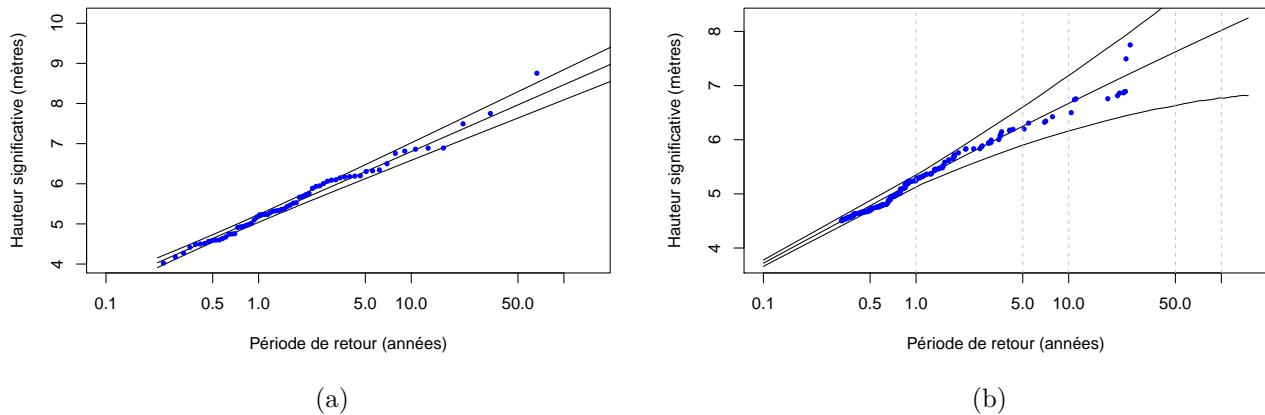


Figure 4: (a) Graphiques des périodes de retour calculées avec la méthode des maxima annuels. (b) Graphiques des périodes de retour calculées avec la méthode à seuil pour le site d’Anglet. Les intervalles de confiance sont à 70 pourcents.

Cependant, les hauteurs de vagues pour une période de retour donnée restent assez proches selon la méthode utilisée (Tableaux 1 et 2). La méthode des maxima annuels semble donner des résultats légèrement plus grands que la méthode à seuil avec néanmoins un intervalle de confiance plus petit que l’autre méthode. Pour une période de retour de 100 ans, les hauteurs significatives des vagues sont comprises entre 8.09 et 8.84 mètres, ce qui est beaucoup plus faible que les résultats trouvés par Lerma et al. (2015). Ces différences peuvent s’expliquer par le fait que leur période de retour est calculée pour une région (“regional frequency analysis”) et non pas pour une station. Le fait que notre station est proche de la côte pourrait aussi expliquer les résultats plus faibles que l’on trouve.

Tableau 1: Périodes de retour des hauteurs de vagues calculées avec la méthode à seuil

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation HS en m	Borne sup IC 70 %
5	5.90	6.25	6.60
10	6.16	6.67	7.18
30	6.51	7.32	8.15
50	6.63	7.62	8.62
100	6.77	8.00	9.23

Tableau 2: Périodes de retour des hauteurs de vagues calculées avec la méthode des maxima annuels

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation HS en m	Borne sup IC 70 %
5	6.05	6.22	6.39
10	6.55	6.76	6.98
30	7.29	7.58	7.88

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation HS en m	Borne sup IC 70 %
50	7.63	7.96	8.29
100	8.09	8.46	8.84

Lien avec le panache de l'Adour

D'après Petus et al. (2014), les vagues ne sont pas le forçage majeur du panache de l'Adour. En effet, le débit et le vent ont une influence beaucoup plus importante sur celui-ci. Cependant, Anderson (1972) indique que leur action sur la remise en suspension de sédiments dans l'estuaire n'est pas négligeable. De plus, dépendamment de leur direction, les vagues génèrent des courants littoraux le long des plages (Rasle 2007) qui peuvent influencer la direction du panache. Au vue des résultats obtenus pour les vagues, les sédiments seraient remis en suspension plus souvent durant la période hivernale et les courants littoraux pouvant influencer sur le panache se trouveraient aussi renforcés durant cette période.

Vent

Le site d'Anglet est caractérisé par des vents de faible intensité (en moyenne 12,3 km/h), avec une orientation essentiellement comprise entre le Sud-Ouest et le Nord Nord-Est (Figure 5).

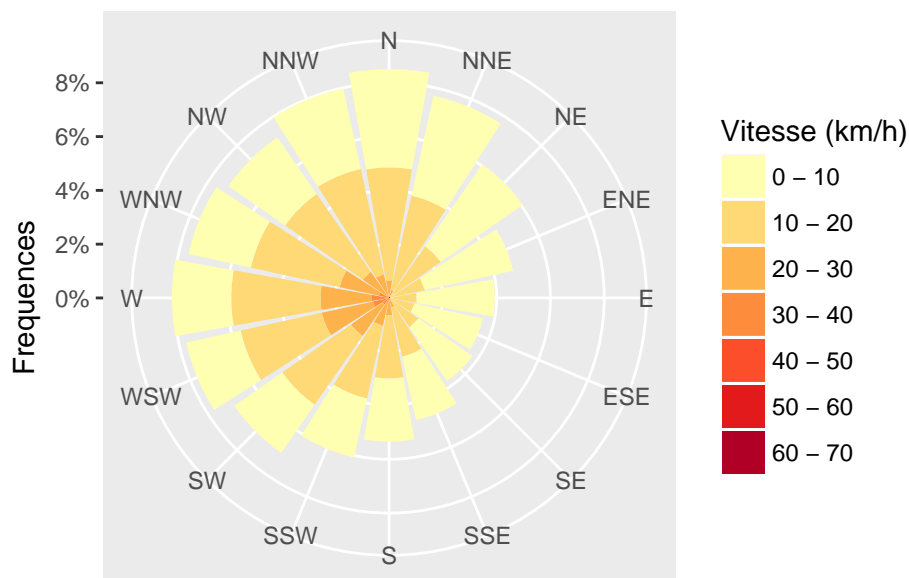


Figure 5: Rose des vents présentant l'occurrence des vents selon leur vitesse et leur direction sur le site d'Anglet pour la période 1949-2014

La série temporelle concernant la vitesse du vent a été décomposée avec un modèle multiplicatif (AIC modèle additif = 3491.9, AIC modèle multiplicatif = 3336). Aucune tendance n'est présente (Figure 6), cependant on peut noter une importante saisonnalité de la vitesse du vent. Les mois d'hiver et de début de printemps ont des indices saisonniers supérieurs à la moyenne annuelle

de 12.3 km/h tandis que les mois de fin de printemps jusqu'à début automne ont des indices inférieurs à celle-ci (Figure 7a). Le monthplot présenté figure 7b, ne montre aucune évolution sur la période étudiée au sein des différents mois. On peut noter que le modèle ne s'adapte pas parfaitement aux données de vents car l'hypothèse de normalité des résidus est rejetée (p -value < 0.05 pour le test de Jarque-Bera, Annexe 2).

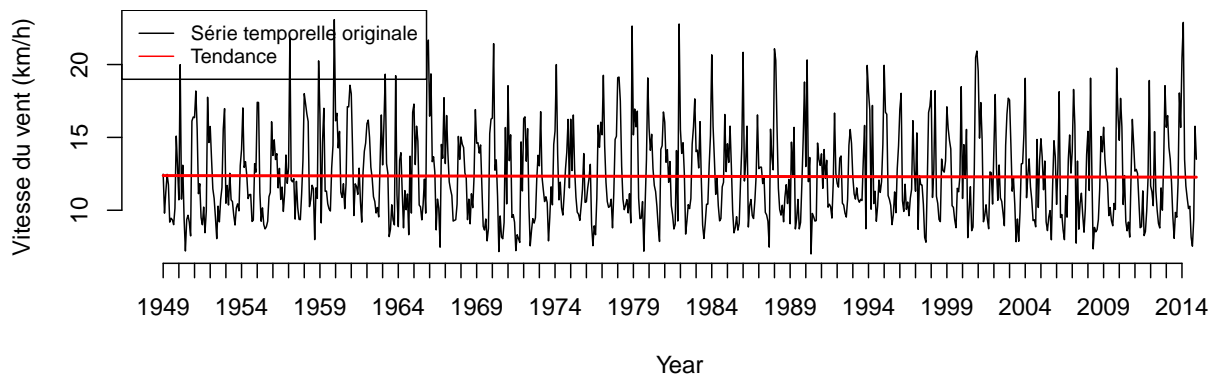


Figure 6: Série temporelle des moyennes mensuelles de la vitesse du vent pour le site d'Anglet pour la période 1949-2014. La tendance est représentée en rouge et les données originales en noir.

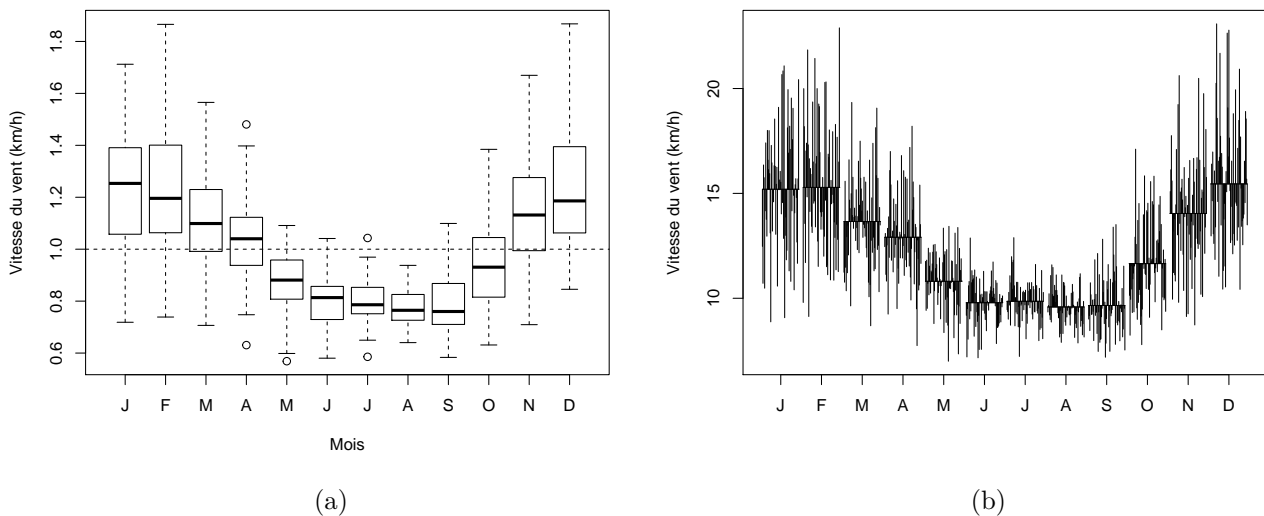


Figure 7: (a) Indices saisonniers de la vitesse du vent pour le site d'Anglet. (b) Monthplot de la vitesse du vent pour le site d'Anglet. Dans le graphique des indices saisonniers, la droite $y=1$ correspond à la moyenne annuelle. Le monthplot représente les séries temporelles au sein de chaque mois, il permet de voir une éventuelle évolution dans le temps

Lien avec le panache de l'Adour

Comme évoqué précédemment, le vent est un des deux forçages majeurs du panache de l'Adour. Petus et al. (2014) expliquent que la direction du vent va fortement modifier l'étalement du panache. En absence de vents ou en présence de vents de très faible intensité, il va s'étendre vers le Nord à cause de l'effet de Coriolis (Petus et al. 2014). En présence de vents d'Ouest, l'étalement du panache va s'effectuer le long de la côte vers le Nord tandis que des vents du Nord ont tendance à pousser celui-ci vers le Sud-ouest. Les résultats montrent que l'intensité du vent varie au cours de l'année. Durant la période estivale, la vitesse moyenne du vent est faible, ce qui induit un étalement préférentiel du panache de l'Adour vers le Nord (Effet de Coriolis). Durant la période hivernale, les vents sont plus intenses, l'étalement du panache dépendra alors de la direction du vent.

Débits

Analyse des séries temporelles

Les débits annuels moyens sont de 326.4, 301.9 et 29.82 m^3/s pour l'Adour à l'embouchure, l'Adour au pont Saint-Esprit et la Nive, respectivement. Dans un premier temps, le débit de l'Adour à l'embouchure a été étudié. Un modèle multiplicatif a été utilisé pour décomposer cette série (AIC modèle additif = 6563, AIC modèle multiplicatif = 3915). Cette décomposition met en évidence une baisse importante du débit (coefficient de -0.266) sur la période 1970-2010 (Figure 8a). Malgré la significativité de la pente de la tendance, son coefficient peut être remis en question. En effet, le modèle utilisé pour la décomposition n'est pas adapté : les résidus de ce modèle contiennent encore une trace de saisonnalité dans le corrélogramme et ne suivent pas une loi normale (Figure 8b). Cependant, ce coefficient semble proche de la réalité car des valeurs similaires sont trouvées dans la littérature (SAGE Adour Aval, 2015).

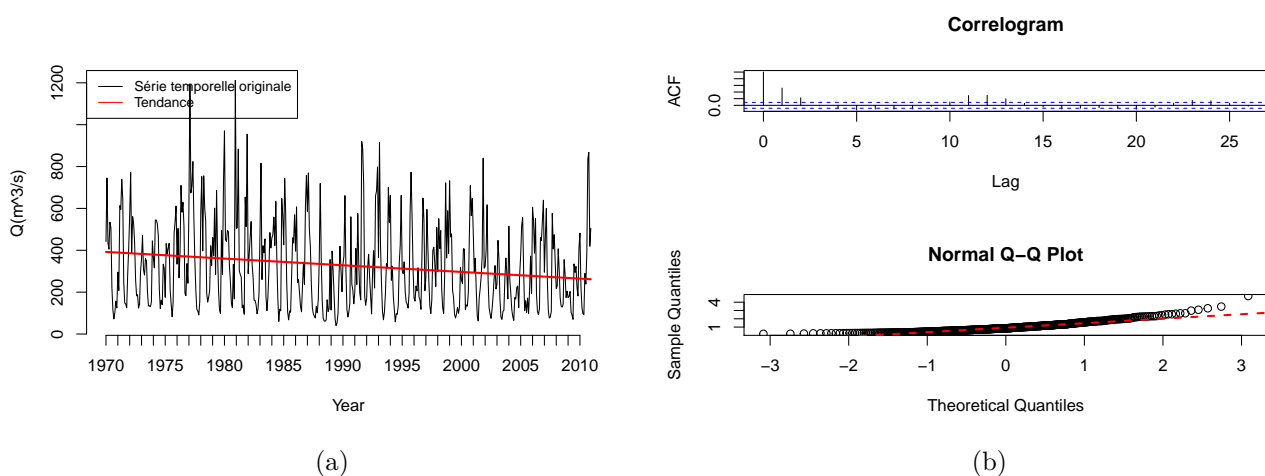


Figure 8: (a) Moyenne mensuelle des débits à l'embouchure de l'Adour pour la période 1970-2010. La ligne rouge est la tendance linéaire extraite par un modèle multiplicatif. (b) Analyses des résidus issus du modèle multiplicatif à l'aide d'un corrélogramme et d'un qqplot. Les résidus ne suivent pas une loi normale et une forte trace de saisonnalité est présente dans le corrélogramme

Une saisonnalité est aussi retrouvée au niveau des débits de l'Adour à l'embouchure (Figure 9a). Les mois de la période hivernale (décembre, janvier, février, mars) ont des coefficients saisonniers supérieurs à la moyenne annuelle tandis que les autres mois sont caractérisés par coefficients inférieurs à celle-ci. Les débits sont donc plus élevés durant la période hivernale et plus bas durant la période estivale. Ces débits sont liés aux précipitations, qui sont plus présentes durant la période hivernale (Bouwer, Vermaat, and Aerts 2006). Le monthplot de la série temporelle (Figure 9b) nous indique une baisse de débit au cours de la période étudiée pour certains mois (février à aout). L'étiage semble donc plus important durant les dernières années avec des débits bien plus faibles. Ce durcissement de l'étiage est documenté dans le SDAGE Adour Garonne (2010) et le SAGE Adour aval (2015).

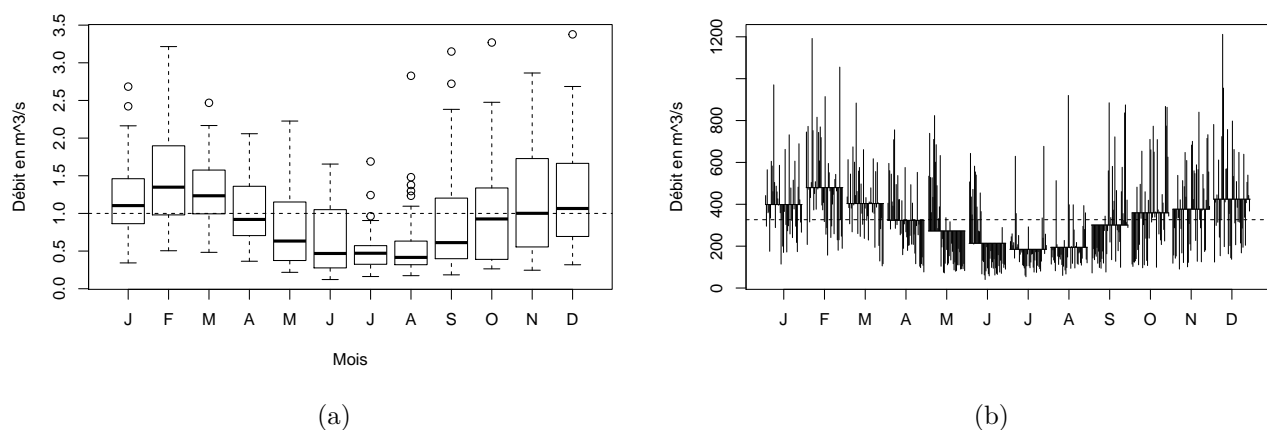


Figure 9: (a) Indices saisonniers des débits de l'Adour à l'embouchure. (b) Monthplot des débits de l'Adour à l'embouchure. Ces deux graphiques sont issus des données de la période 1970-2010. Dans le graphique des indices saisonniers, la droite $y=1$ correspond à la moyenne annuelle. Le monthplot représente les séries temporelles au sein de chaque mois, il permet de voir une éventuelle évolution dans le temps.

Les séries temporelles des débits de la Nive et de l'Adour au pont Saint-Esprit ont aussi été étudiées avec des modèles multiplicatifs (Tableau 3). La tendance de l'Adour au pont Saint-Esprit est la même qu'à l'embouchure avec un coefficient de pente légèrement plus petit de -0.277 (Figure 10a). Pour la Nive, une très faible baisse de débit est remarquée avec un coefficient de -0.019 (Figure 10b).

Tableau 3: AIC des différents modèles pour l'Adour au pont Saint-Esprit et la Nive

	Nive	Adour Pont Saint-Esprit
Modèle Additif	4243.8	6442.4
Modèle multiplicatif	4063.4	6440.3

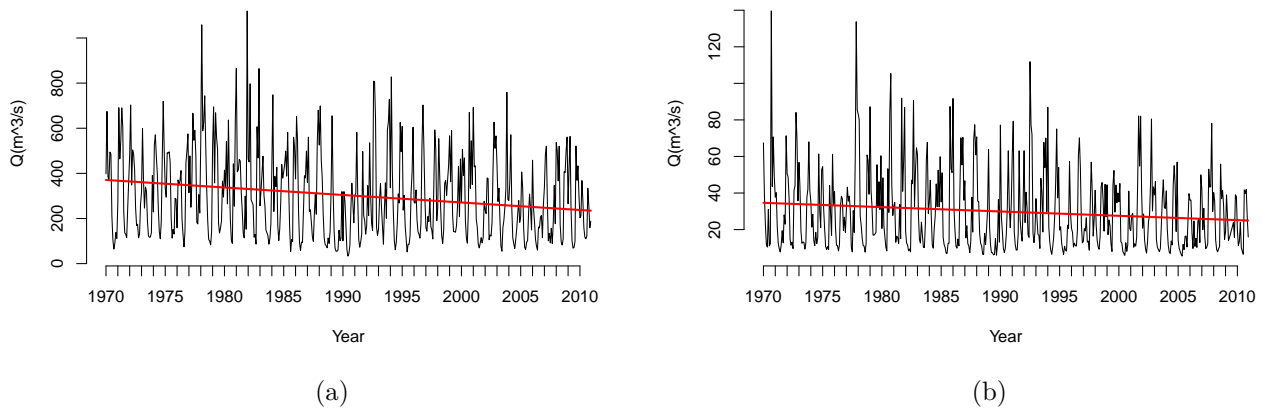


Figure 10: (a) Moyenne mensuelle des débits de l'Adour au niveau du pont Saint-Esprit et de la Nive (b) pour la période 1970-2010. Les deux séries temporelles ont été décomposées à l'aide d'un modèle multiplicatif. La tendance linéaire extraite des modèles est représentée en rouge sur les deux graphiques

Tout comme le modèle de l'Adour à l'embouchure, les deux modèles utilisés ne sont pas adaptés. En effet, dans les deux cas les résidus possèdent encore une importante trace de saisonnalité dans le corrélogramme et ne suivent pas une loi normale (Figure 11). Ces coefficients montrent tout de même que la baisse de débit est plus importante sur l'Adour que sur la Nive. Cette différence pourrait s'expliquer par l'agriculture irriguée qui est très implantée sur l'ensemble du bassin de l'Adour ce qui n'est pas le cas de la Nive, et qui exerce une très forte pression sur la ressource en eau durant la période estivale (SAGE Adour aval, 2015).

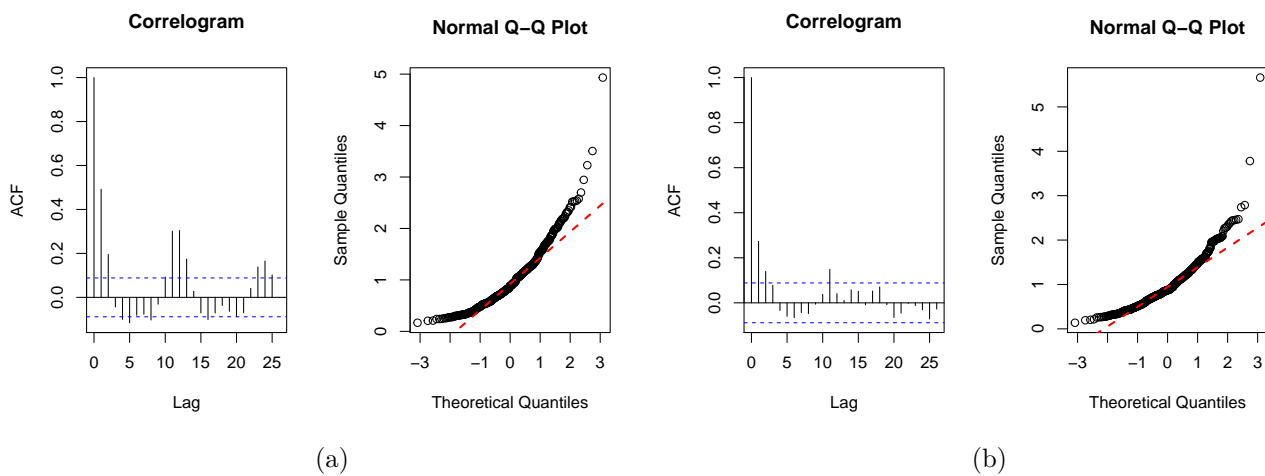


Figure 11: Analyse des résidus pour les modèles multiplicatifs des débits de l'Adour au pont Saint-Esprit (a) et de la Nive (b). Les résidus issus des deux modèles sont analysés par un corrélogramme et un qqplot. D'après les qqplots, ils ne suivent pas une loi normale et comportent encore de la saisonnalité (visible dans les corrélogrammes).

Pour la saisonnalité, des résultats similaires à ceux de l'Adour à l'embouchure sont trouvés pour l'Adour au pont Saint-Esprit (Annexe 2). Les débits de la Nive ont aussi une saisonnalité. Les mois allant de mars à juillet sont caractérisés par des débits inférieurs à la moyenne annuelle ($29.82m^3/s$) tandis que les autres mois ont des débits supérieurs à celle-ci (Figure 12a). Au niveau du monthplot, une faible baisse de débit durant la période estivale est observée (mois allant de avril à juillet) pour les dernières années (Figure 12b). Elle est cependant beaucoup moins marquée que celle observée sur l'Adour.

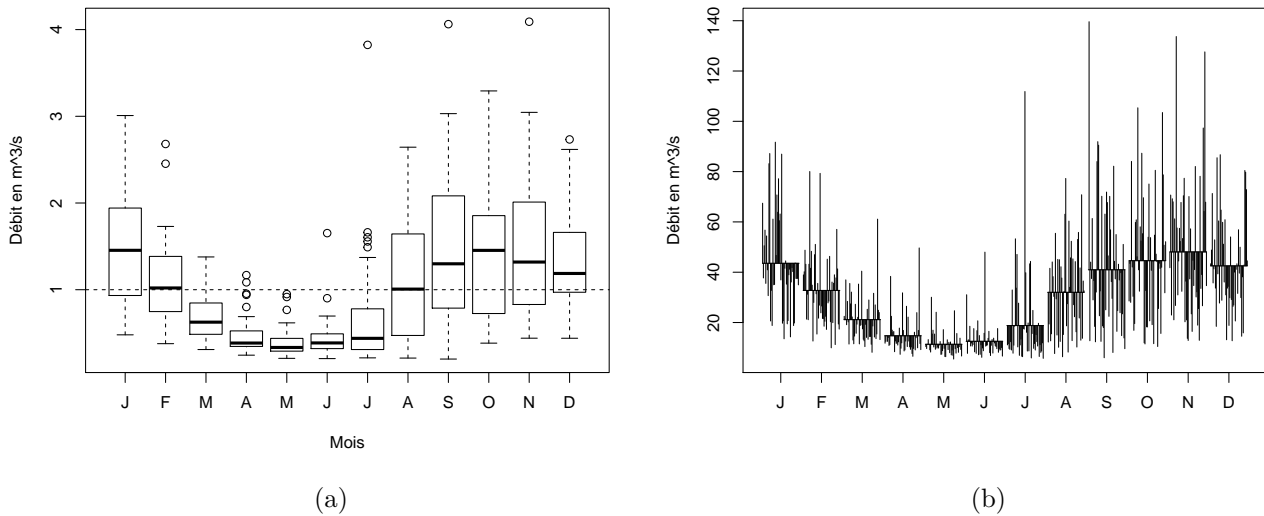


Figure 12: (a) Indices saisonniers des débits de la Nive. (b) Monthplot des débits de la Nive. Ces deux graphiques s'appuient sur les données de la période 1970-2010. Dans le graphique des indices saisonniers, la droite $y=1$ correspond à la moyenne annuelle. Le monthplot représente les séries temporelles au sein de chaque mois, il permet de voir une éventuelle évolution dans le temps.

Analyse des valeurs extrêmes

Pour l'Adour à l'embouchure, les deux estimateurs suivant ont été calculés : $\hat{\mu} = 1694.5$ et $\hat{\sigma} = 497.8$, avec une p-valeur égale à 0.769 pour le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (Figure 13). Le débit d'une crue centennale est estimé à presque $4000 m^3/s$ (Tableau 4). Aucune information n'a été trouvée dans la littérature pour confirmer cette valeur. En effet, le peu de littérature trouvée pour les crues de l'Adour définit les crues sur les hauteurs d'eau à certains endroits spécifiques et non pas sur les débits. Grâce à la figure 13, la période de retour pour des événements passés peut être retrouvée. On estime que la crue du 24-25 janvier 2014 avec un débit autour de $3300 m^3/s$ a une période de retour d'environ 30 ans.

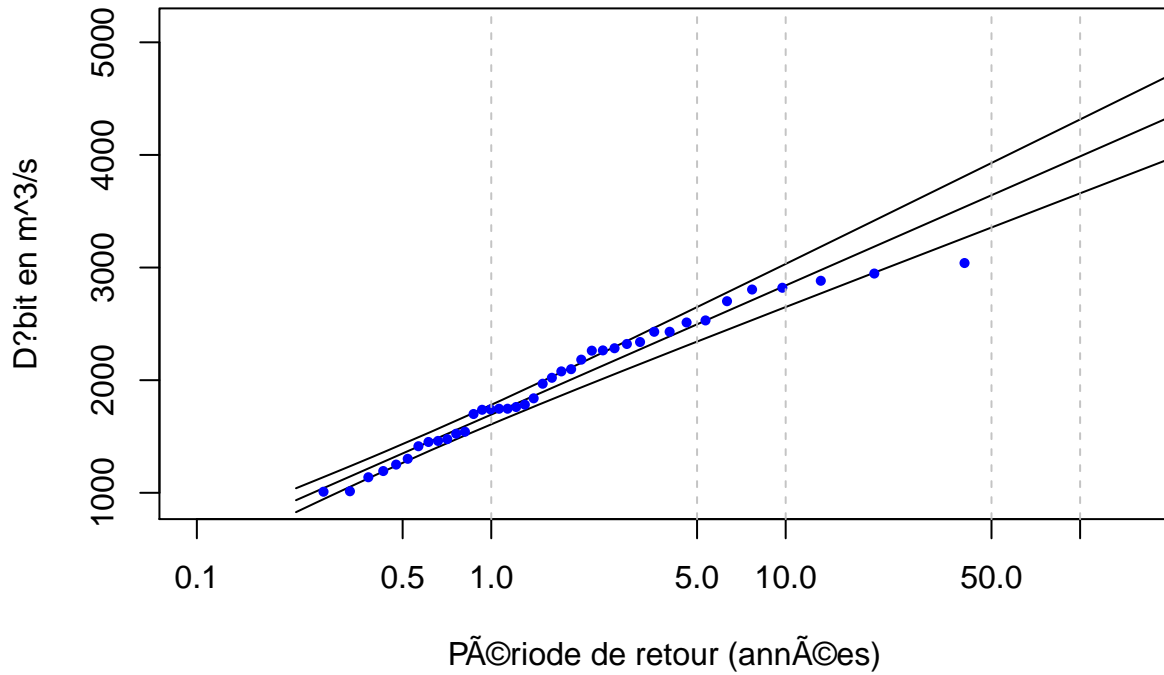


Figure 13: Graphique des périodes de retour calculées pour le débit de l'Adour à l'embouchure. L'intervalle de confiance représenté est à 70 pourcents.

Tableau 4: Périodes de retour de crues pour l'Adour à l'embouchure

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation débit en m ³ /s	Borne sup IC 70 %
5	2294.00	2441.21	2588.43
10	2626.49	2814.80	3003.10
30	3124.85	3379.29	3633.73
50	3351.53	3636.99	3922.45
100	3656.81	3984.58	4312.34

Pour L'adour au pont Saint-esprit, les deux estimateurs suivant ont été calculés : $\hat{\mu} = 1562.2$ et $\hat{\sigma} = 455$, avec une p-valeur égale à 0.908 pour le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (Figure 14a). Pour la Nive, $\hat{\mu} = 243.6$, $\hat{\sigma} = 70.6$ et la p-valeur est égale à 0.603 pour le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (Figure 14b).

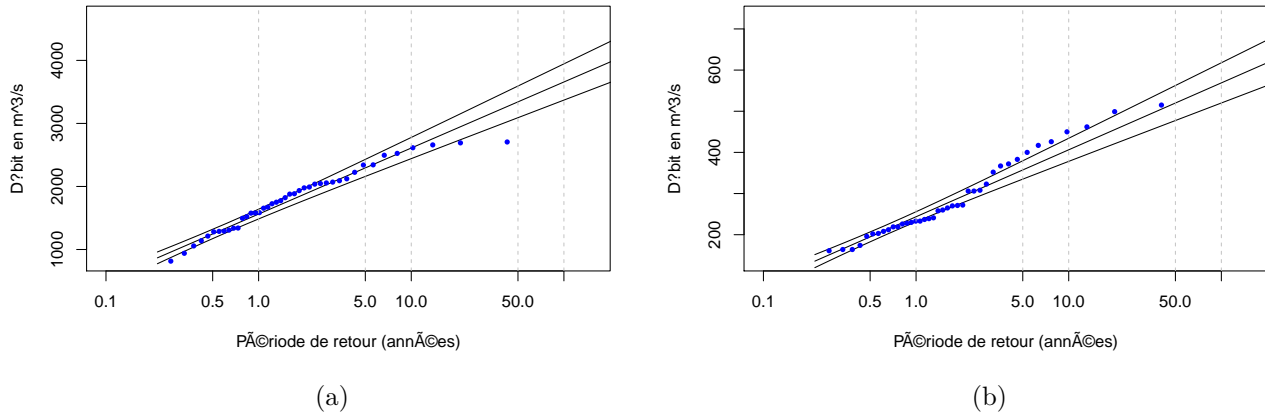


Figure 14: Graphique des périodes de retour calculées pour le débit de l’Adour au pont Saint-Esprit (a) et la Nive (b). L’intervalle de confiance représenté est à 70 pourcents.

La crue centennale pour l’Adour au pont Saint-Esprit est légèrement inférieure à celle de l’Adour à l’embouchure, ce qui est cohérent vu que ce dernier comprend aussi la Nive (Tableau 5). Pour la Nive, la crue centennale est estimée à $568 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 6), cette estimation est très faible comparée à celle trouvée dans la littérature qui est de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Plan de Prévention des Risques Inondations de Bayonne, 2012). La sous-estimation semble due à la période sur laquelle l’analyse des extrêmes a été effectuée. En effet, deux crues centennales n’ont pas été prises en compte car elles ont eu lieu en dehors de cette période, une en 1952 et l’autre en juillet 2014.

Tableau 5: Périodes de retour de crues pour l’Adour au pont Saint-Esprit

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation débit en m^3/s	Borne inf IC 70 %
5	2114.69	2244.62	2374.54
10	2420.43	2586.04	2751.65
30	2878.82	3101.94	3325.06
50	3087.34	3337.45	3587.56
100	3368.17	3655.11	3942.05

Tableau 6: Périodes de retour de crues pour la Nive

Periode de retour	Borne inf IC 70 %	Estimation débit en m^3/s	Borne inf IC 70 %
5	328.22	349.58	370.94
10	374.95	402.58	430.21
30	444.99	482.68	520.37
50	476.84	519.24	561.64
100	519.74	568.56	617.38

Lien avec le panache de l'Adour

Le débit est le forçage majeur du panache de l'Adour. Des fortes corrélations positives entre le débit et l'aire du panache ont été mis en évidence par Dailloux (2008). De plus, l'étude de Petus et al. (2014) indique que le débit expliquerait 46% de la surface du panache à lui seul et que des débits supérieurs à $400 \text{ m}^3/\text{s}$ mènent systématiquement à un panache supérieur à 10 km^2 . Au vue de nos résultats, la période hivernale serait caractérisée par des panaches plus étendus car le débit et le vent sont plus forts durant cette période. L'été, les débits étant plus faibles, le panache serait moins étendu (sauf durant les épisodes de crue). Même si le débit est le forçage majeur du panache de l'Adour, la marée joue aussi un rôle important. Une marée montante avec un grand coefficient et un débit faible peut réduire considérablement l'expansion du panache de l'Adour (Petus et al. 2014).

Conclusion

L'analyse des trois forçages du panache de l'Adour a montré que le vent reste stable dans le temps tandis que la hauteur des vagues a tendance à légèrement augmenter et le débit à baisser au cours des années. Elle a également mis en évidence une forte saisonnalité annuelle. Durant la période hivernale, tous ces forçages se trouvent renforcés et durant la période estivale les forçages se trouvent diminués. La plupart des résultats sont confirmés par la littérature ce qui nous conforte dans l'idée de les utiliser dans le modèle hydrodynamique du panache de l'Adour. Dans un premier temps, les forçages les plus importants (marée, vent et débit) seront implémentés dans le modèle et une fois qu'il sera fonctionnel et calibré, l'effet de la houle sera pris en compte. Dès que les données de micropolluants seront disponibles, des analyses multivariées comme des analyses canoniques des corrélations (ACC) pourront être effectuées pour voir si des liens existent entre la concentration des micropolluants et les forçages physiques et climatiques étudiés.

D'ici là, des améliorations peuvent être effectuées. Pour le débit, l'utilisation de modèles plus adaptés comme les modèles ARMA (modèles autorégressifs et moyenne mobile) pourraient nous apporter des résultats plus précis. Des modèles calculant le débit à partir des précipitations comme le modèle GRJ4 développé par l'IRSTEA⁶ pourraient également nous permettre de prédire les débits pour les jours à suivre. Pour le vent, la série temporelle de la direction peut être étudiée afin de mettre en évidence une possible saisonnalité. Pour les vagues, l'analyse des valeurs extrêmes pour les tempêtes ne s'appuie que sur une variable qui est la hauteur significative des vagues. Or les tempêtes sont des événements qui dépendent de plusieurs variables. Une analyse multivariée des valeurs extrêmes à l'aide de copules nous donnerait donc des résultats plus proches de la réalité.

⁶Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

Références bibliographiques

- Akaike, Hirotugu. 1987. “Factor Analysis and AIC.” *Psychometrika* 52 (3): 317–32.
- Alvarez, Inés, Moncho Gomez-Gesteira, and David Carvalho. 2014. “Comparison of Different Wind Products and Buoy Wind Data with Seasonality and Interannual Climate Variability in the Southern Bay of Biscay (20002009).” *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 106: 38–48.
- Anderson, Franz E. 1972. “Resuspension of Estuarine Sediments by Small Amplitude Waves.” *Journal of Sedimentary Research* 42 (3).
- Arleny, Ina, Hélène Tabouret, Pablo Rodriguez Rodriguez Gonzalez, Gilles Bareille, Olivier Donard, and David Amouroux. 2007. “Methylmercury Bioconcentration in Muscle Tissue of the European Eel (*Anguilla Anguilla*) from the Adour Estuary (Bay of Biscay, France).” *Marine Pollution Bulletin* 54 (7): 1031–6.
- Beirlant, Jan, Yuri Goegebeur, Johan Segers, and Jozef Teugels. 2006. *Statistics of Extremes: Theory and Applications*. John Wiley & Sons.
- Bertin, Xavier, Kai Li, Aron Roland, and Jean-Raymond Bidlot. 2015. “The Contribution of Short-Waves in Storm Surges: Two Case Studies in the Bay of Biscay.” *Continental Shelf Research* 96: 1–15.
- Bouwer, Laurens M, Jan E Vermaat, and Jeroen CJH Aerts. 2006. “Winter Atmospheric Circulation and River Discharge in Northwest Europe.” *Geophysical Research Letters* 33 (6).
- Brunet, R-C, and KB Astin. 1999. “Spatio-Temporal Variation in Some Physical and Chemical Parameters over a 25-Year Period in the Catchment of the River Adour.” *Journal of Hydrology* 220 (3): 209–21.
- Butel, Rémi, Hélène Dupuis, and Philippe Bonneton. 2002. “Spatial Variability of Wave Conditions on the French Atlantic Coast Using in-Situ Data.” *Journal of Coastal Research* 36: 96–108.
- Carpenter, Stephen R, Nina F Caraco, David L Correll, Robert W Howarth, Andrew N Sharpley, and Val H Smith. 1998. “Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen.” *Ecological Applications* 8 (3): 559–68.
- Castillo, Enrique, and Ali S Hadi. 1997. “Fitting the Generalized Pareto Distribution to Data.” *Journal of the American Statistical Association* 92 (440): 1609–20.
- Charles, Elodie, Déborah Idier, Jérôme Thiébot, Gonéri Le Cozannet, Rodrigo Pedreros, Fabrice Arduin, and Serge Planton. 2012. “Present Wave Climate in the Bay of Biscay: Spatiotemporal Variability and Trends from 1958 to 2001.” *Journal of Climate* 25 (6): 2020–39.
- Chiffolleau, J.-F, D Claisse, D Cossa, J.-L Gonzalez, P Michel, P Miramand, C Oger, and F Petit. 2001. “La Contamination Métallique.” In *Programme Scientifique Seine Aval*, Editions Ifremer, 8:39. Plouzané (France).
- Coles, Stuart, Joanna Bawa, Lesley Trenner, and Pat Dorazio. 2001. *An Introduction to*

- Statistical Modeling of Extreme Values*. Vol. 208. Springer.
- Conil, Pierre, and Cécile Le Guern. 2013. “Le Littoral Face Aux Pollutions.” *Geosciences* 17: 64–73.
- Dailloux, D. 2008. “Video Measurements of the Adour Plume Dynamic and Its Surface Water Optical Characteristics: Université de Pau et Des Pays de L’Adour.”
- Davison, Anthony Christopher. 2003. *Statistical Models*. Vol. 11. Cambridge University Press.
- Dorioz, JM, and A Ferhi. 1994. “Pollution Diffuse et Gestion Du Milieu Agricole: Transferts Compares de Phosphore et d’azote Dans Un Petit Bassin Versant Agricole.” *Water Research* 28 (2): 395–410.
- Duran, R, M Ranchou-Peyruse, V Menuet, M Monperrus, G Bareille, MS Goni, JC Salvado, D Amouroux, R Guyoneaud, and OFX Donard. 2008. “Mercury Methylation by a Microbial Community from Sediments of the Adour Estuary (Bay of Biscay, France).” *Environmental Pollution* 156 (3): 951–58.
- Garrigues, Philippe. 2015. “Techniques Analytiques et Chimie de L’environnement.” In *Chimie et Expertise - Santé et Environnement: Santé et Environnement*, 20. Chimie et . EDP Sciences.
- Gumbel, Emil Julius. 1941. “The Return Period of Flood Flows.” *The Annals of Mathematical Statistics* 12 (2): 163–90.
- Hatje, V, TE Payne, DM Hill, G McOrist, GF Birch, and R Szymczak. 2003. “Kinetics of Trace Element Uptake and Release by Particles in Estuarine Waters: Effects of PH, Salinity, and Particle Loading.” *Environment International* 29 (5): 619–29.
- Izaguirre, Cristina, Fernando J Méndez, Melisa Menéndez, and Inigo J Losada. 2011. “Global Extreme Wave Height Variability Based on Satellite Data.” *Geophysical Research Letters* 38 (10).
- Kinsman, Blair. 1965. *Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface*. Courier Corporation.
- Lagnoux, Agnès. 2012. “Cours Master 1 ISMAG Toulouse (Informatique, Statistique, Mathématiques Appliquées à La Gestion de Production) Sur Les Séries Chronologiques.”
- Le Cozannet, Gonéri, Sophie Lecacheux, Etienne Delvallee, Nicolas Desramaut, Carlos Oliveros, and Rodrigo Pedreros. 2011. “Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay.” *Journal of Climate* 24 (3): 641–52.
- Lerma, Alexandre Nicolae, Thomas Bulteau, Sophie Lecacheux, and Déborah Idier. 2015. “Spatial Variability of Extreme Wave Height Along the Atlantic and Channel French Coast.” *Ocean Engineering* 97: 175–85.
- Luo, Yunlong, Wenshan Guo, Huu Hao Ngo, Long Duc Nghiem, Faisal Ibney Hai, Jian Zhang, Shuang Liang, and Xiaochang C Wang. 2014. “A Review on the Occurrence of Micropollutants in the Aquatic Environment and Their Fate and Removal During Wastewater Treatment.” *Science of the Total Environment* 473: 619–41.
- Mazas, Franck, and Luc Hamm. 2011. “A Multi-Distribution Approach to POT Methods for

Determining Extreme Wave Heights.” *Coastal Engineering* 58 (5): 385–94.

Monperrus, Mathilde, David Point, Jacques Grall, Laurent Chauvaud, David Amouroux, Gilles Bareille, and Olivier Donard. 2005. “Determination of Metal and Organometal Trophic Bioaccumulation in the Benthic Macrofauna of the Adour Estuary Coastal Zone (SW France, Bay of Biscay).” *Journal of Environmental Monitoring* 7 (7): 693–700.

Petus, Caroline, Vincent Marieu, Stefani Novoa, Guillem Chust, Nicolas Bruneau, and Jean-Marie Froidefond. 2014. “Monitoring Spatio-Temporal Variability of the Adour River Turbid Plume (Bay of Biscay, France) with MODIS 250-M Imagery.” *Continental Shelf Research* 74: 35–49.

Pickands III, James. 1975. “Statistical Inference Using Extreme Order Statistics.” *The Annals of Statistics*, 119–31.

Préfet des Pyrénées Atlantiques. 2012. “Plan de Prévention Des Risques Inondations, Commune de BAYONNE (64).”

Rasclé, Nicolas. 2007. “Impact of Waves on the Ocean Circulation.” Theses, Université de Bretagne occidentale - Brest.

SAGE. 2016. “Etat Des Lieux / Diagnostic Du Schéma d’aménagement et de Gestion Des Eaux de Lazonne Adour Aval. Document Validé En CLE Le 28 Septembre 2016.”

Schulz, Ralf. 2004. “Field Studies on Exposure, Effects, and Risk Mitigation of Aquatic Nonpoint-Source Insecticide Pollution.” *Journal of Environmental Quality* 33 (2): 419–48.

Schwarzenbach, René P, Beate I Escher, Kathrin Fenner, Thomas B Hofstetter, C Annette Johnson, Urs Von Gunten, and Bernhard Wehrli. 2006. “The Challenge of Micropollutants in Aquatic Systems.” *Science* 313 (5790): 1072–7.

SDAGE, AGB. 2010. “Schéma Directeur d’aménagement et de Gestion Des Eaux Du Bassin Adour-Garonne 2010-2015. Comité de Bassin Adour-Garonne. Version Présentée Au Comité de Bassin Le 16 Nov., 2009. 143 Pp.”

Smith, Richard L. 1989. “Extreme Value Analysis of Environmental Time Series: An Application to Trend Detection in Ground-Level Ozone.” *Statistical Science*, 367–77.

Turner, A, TL Hyde, and MC Rawling. 1999. “Transport and Retention of Hydrophobic Organic Micropollutants in Estuaries: Implications of the Particle Concentration Effect.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49 (5): 733–46.

Annexes

Annexe 1

Fonctionnement de l'Application Shiny

1. Page de présentation



Analyse des forçages physiques et climatiques influant sur le transport des micr

Pourquoi cette étude ?

Les activités anthropiques sur le bassin versant de l'Adour sont une source majeure de pollution. Elles relâchent de nombreuses substances chimiques qui sont rarement tra
rivières en concentrations infimes : on appelle ces substances des « micropolluants ». Les micropolluants organiques et hydrophobes ont tendance à se lier avec la matière
dynamique du panache de l'Adour sortant de l'estuaire et contenant les matières en suspension, doit être étudiée. Nous nous sommes intéressés à trois forçages majeurs re
l'Adour. Dans un premier temps, les séries temporelles de ces forçages ont été étudiées pour en extraire la tendance et la saisonnalité. Dans un second temps, des analyse
les périodes de retour des tempêtes et des crues. Aucune tendance n'a été trouvée pour le vent à l'inverse de la houle et du débit qui présentent respectivement une fa
saisonnalité a été trouvée pour tous les forçages, cette étude montre que la période hivernale est caractérisée par des vagues, des vents et des débits plus importants que la
été calculé pour différentes périodes de retour. Ce travail est le premier pas d'un projet plus grand qui vise à construire un modèle hydrodynamique de l'estuaire de l'Adour afu

Panache de l'adour :



1. Page de présentation : Explication brève du travail effectué.
2. Accès aux analyses des données de vagues : analyse des valeurs extrêmes et de la série temporelle.
3. Accès aux analyses des données de vent : analyse de la série temporelle.
4. Accès aux analyses des données de débits : analyse des valeurs extrêmes et des séries temporelles.

2. Analyse des valeurs extrêmes

Application PRESENTATION **DONNÉES DE VAGUES** DONNÉES DE VENT DONNÉES DE DÉBIT

Anglet

Selection du site **1**

Anglet à 50m **2**

Intervalle de confiance **3**

0,7

ANALYSE DES VALEURS EXTRÊMES **1**

ANALYSE TEMPORELLE

Quelques définitions

HS : la hauteur significative des vagues (en mètre) qui représente la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée de 30 minutes

TP: la période des vagues (en seconde) qui correspond à la période entre deux vagues successives.

Informations générales sur la station

Rose des houles **4**



Quantiles sur la hauteur significative des vagues

Quantiles	HS(m)
0.01	0.30
0.1	0.58
0.5	1.33
0.75	2.03
0.95	3.36
0.99	4.42
max	8.75

1. Menu déroulant pour accéder aux différentes analyses.
2. Possibilité de sélectionner le site d'étude uniquement pour les données de vagues.
3. Choix de l'intervalle de confiance pour les graphiques et tableaux.
4. Bulles informatives pour l'interprétation des graphiques.

3. Analyse des séries temporelles

Application PRESENTATION **DONNÉES DE VAGUES** DONNÉES DE VENT DONNÉES DE DÉBIT

Anglet

Selection du site **1**

Anglet à 50m

Date début **2**

1949

Date fin **3**

2014

GO! **4**

Analyse temporelle

Visualisation de la série temporelle

1. Possibilité de sélectionner le site d'étude pour uniquement les données de vagues.
2. Sélection de la date de début pour l'étude de la série temporelle.
3. Sélection de la date de fin pour l'étude de la série temporelle.
4. Bouton pour lancer l'analyse de la série temporelle avec les dates souhaitées.

Annexe 2

Graphiques supplémentaires pour les vagues

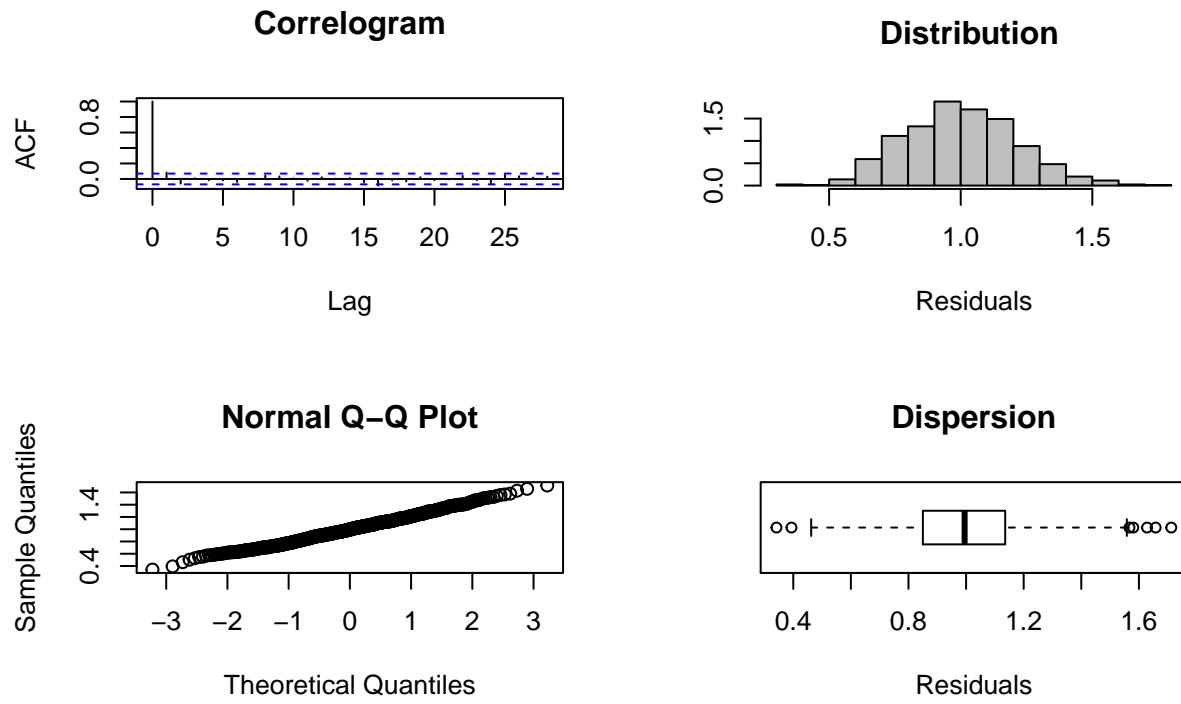


Figure 1: Analyse des résidus du modèle multiplicatif des vagues. Le modèle est correct, les résidus ne comportent pas de saisonnalité dans le corrélogramme. Les résidus sont normalement distribués. Le test de Jarque-Bera confirme la normalité des résidus

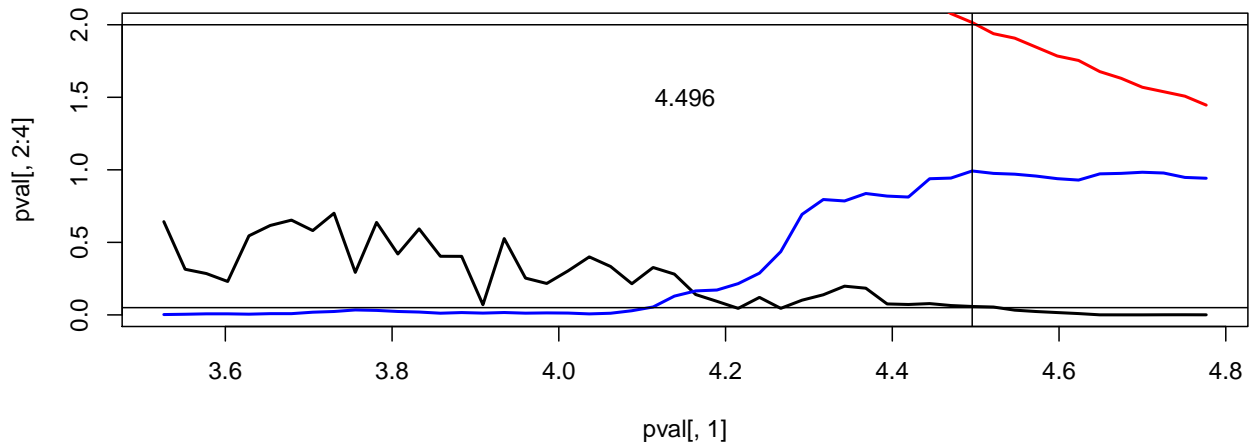


Figure 2: Méthode à double seuil pour la sélection du seuil optimal. La ligne rouge représente λ , la ligne bleue représente la P-value du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov et la ligne noire la P-value du test de poisson (Hypothèse nulle : l'occurrence des événements suit une loi de poisson). La ligne horizontale du bas est le seuil de non rejet (5%) et celle du haut est le nombre minimum d'événements par an ($\lambda = 2$). La ligne verticale est le seuil qui maximise la P-value du test d'ajustement et dont l'occurrence des événements sélectionnés suit une loi de poisson.

Graphiques supplémentaires pour le vent

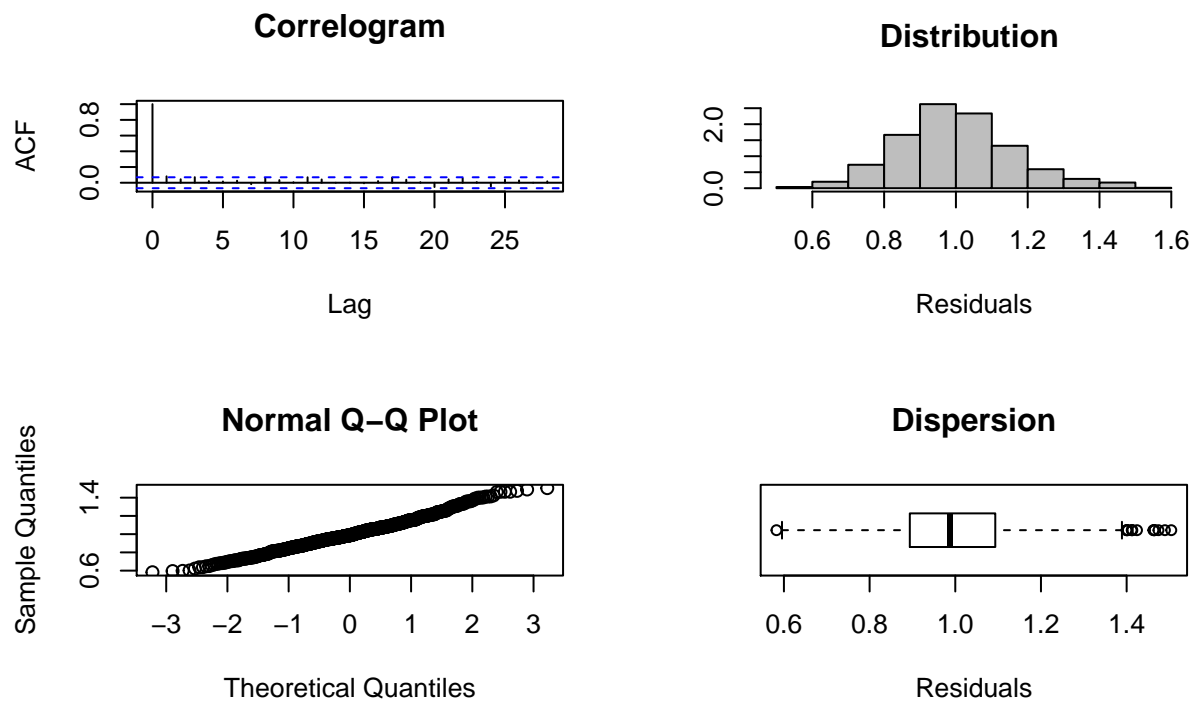
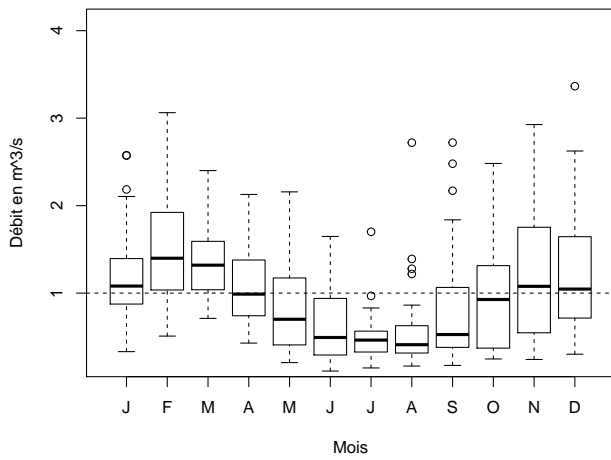
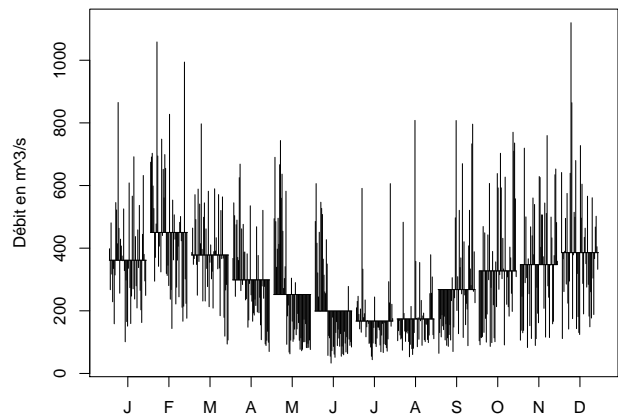


Figure 3: Analyse des résidus du modèle multiplicatif du vent. Le modèle n'est pas correct, les résidus ne comportent pas de saisonnalité dans le corrélogramme cependant ils ne sont pas normalement distribués. En effet, le test de Jarque-Bera rejette l'hypothèse de la normalité des résidus

Graphiques supplémentaires pour le débit



(a)



(b)

Figure 4: (a) Indices saisonniers des débits de l'Adour au pont Saint-Espirit. (b) Monthplot des débits de l'Adour au pont Saint-Espirit. Ces deux graphiques s'appuient sur les données de la période 1970-2010. Dans le graphique des indices saisonniers, la droite $y=1$ correspond à la moyenne annuelle. Le monthplot représente les séries temporelles au sein de chaque mois, il permet de voir une éventuelle évolution dans le temps.

Résumé

Mots clés : Adour, micropolluant, estuaire, panache, houle, vent, débit, séries temporelles, analyse des valeurs extrêmes.

Les activités anthropiques sur le bassin versant de l'Adour sont une source majeure de pollution. Elles relâchent de nombreuses substances chimiques qui sont rarement traitées par les stations d'épuration. Ces substances se retrouvent donc dans les rivières en concentrations infimes : on appelle ces substances des « micropolluants ». Les micropolluants organiques et hydrophobes ont tendance à se lier avec la matière en suspension. Dans le but de comprendre pleinement la pollution littorale, la dynamique du panache de l'Adour sortant de l'estuaire et contenant les matières en suspension, doit être étudiée. Nous nous sommes intéressés à trois forçages majeurs responsable de la dynamique du panache que sont la houle, le vent et le débit de l'Adour. Dans un premier temps, les séries temporelles de ces forçages ont été étudiées pour en extraire la tendance et la saisonnalité. Dans un second temps, des analyses de valeurs extrêmes ont été menées sur la houle et le débit pour déterminer les périodes de retour des tempêtes et des crues. Aucune tendance n'a été trouvée pour le vent à l'inverse de la houle et du débit qui présentent respectivement une faible tendance à l'augmentation et une forte tendance à la baisse. Une forte saisonnalité a été trouvée pour tous les forçages, cette étude montre que la période hivernale est caractérisée par des vagues, des vents et des débits plus importants que la période estivale. Les niveaux de retour de tempêtes et de crues ont également été calculés pour différentes périodes de retour. Ce travail est le premier pas d'un projet plus grand qui vise à construire un modèle hydrodynamique de l'estuaire de l'Adour afin de mieux comprendre la dynamique des micropolluants. L'un des objectifs secondaires de cette étude réside dans la création d'une application shiny résumant tout le travail effectué et étant librement accessible dans un souci de reproductibilité.

Key words : Adour, micropollutants, estuary, plume, swell, wind, flow rate, time series, extreme value analysis.

Anthropogenic activities of the Adour catchment are a major source of pollution. They release numerous chemical substances that are rarely removed by wastewater treatment plants. These substances are therefore found in the rivers at very small concentrations : they are called « micropollutants ». Organic and hydrophobic micropollutants tend to bind to suspended matter. In order to fully understand the coastal pollution, dynamic of the Adour river plume, that exits the estuary and contains suspended matter, must be studied. We investigate three major forcings responsible for the plume dynamic which are the wind, the flow rate and the swell. Firstly , time series of these forcings are studied to extract trend and seasonality. Secondly, extreme value analysis are made on the swell and river flow rate to determine the return period of storms and floods. No trend is found for the wind contrary to the swell and flow rate with a slightly positive trend and a negative one respectively. A strong seasonality is found for all the forcing, we show that winter period is characterised by stronger events than summer period. Return level of floods and storms are calculated for several return period. This work is the first step of a bigger

project which aims to construct a hydrodynamic model of the Adour plume for purpose of better understanding the micropollutant dynamic. One side objective lies in the creation of an open access shiny application summarizing all the work done.

Palabras clave : Adour, microcontaminantes, estuario, penacho, oleaje, viento, caudal, series temporales, análisis de valores extremos.

Las actividades antropogénicas de la cuenca hidrográfica del Adour son la principal fuente de contaminación. Introducen numerosas sustancias químicas que no son casi nunca renovadas por las estaciones depuradoras de aguas residuales. Estas sustancias se encuentran en los ríos en muy pequeñas concentraciones: son llamadas « microcontaminantes ». Los microcontaminantes orgánicos e hidrófobos tienen tendencia a asociarse con la materia en suspensión. Con la intención de comprender plenamente la polución de las costas, se debe estudiar la dinámica del penacho del río Adour, que sale del estuario y que transporta las materias en suspensión. Nos interesamos por los tres forzamientos mayores responsables de la dinámica del penacho que son el oleaje, el viento y el caudal del Adour. Al principio, se han estudiado las series temporales de los forzamientos, para extraer la tendencia y la estacionalidad. Después, se han realizado análisis de valores extremos para determinar el período de retorno de las tormentas y crecidas. No se ha encontrado ninguna tendencia por el viento al contrario del oleaje y del caudal que presentan respectivamente una pequeña tendencia al alza y una tendencia descendente. Se observa una fuerte estacionalidad por los tres forzamientos. Este estudio muestra que el período invernal se caracteriza por olas, vientos y caudales más importantes que el período estival. Se calculan niveles de retorno de las tormentas y crecidas por varios períodos de retorno. Este trabajo es el primer paso de un gran proyecto que tiene por objetivo construir un modelo hidrodinámico del estuario del Adour para entender mejor la dinámica de los microcontaminantes. Uno de los objetivos secundarios es el desarrollo de una aplicación web (Shiny) que resuma todo el trabajo efectuado y que sea libremente accesible para permitir la reproductibilidad.