



HAL
open science

Évaluation systémique et globale des évolutions des risques côtiers : méthode et application à la France et à ses territoires d'outre-mer

Marc Igigabel, Marissa Yates, Michalis Vousdoukas, Youssef Diab

► **To cite this version:**

Marc Igigabel, Marissa Yates, Michalis Vousdoukas, Youssef Diab. Évaluation systémique et globale des évolutions des risques côtiers : méthode et application à la France et à ses territoires d'outre-mer. 2024. hal-04690934

HAL Id: hal-04690934

<https://hal.science/hal-04690934>

Submitted on 6 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Évaluation systémique et globale des évolutions des risques côtiers : méthode et application à la France et à ses territoires d'outre-mer

Marc Igigabel¹, Marissa Yates^{2,3}, Michalis Vousdoukas⁴, and Youssef Diab⁵

¹Cerema, Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280 Plouzané, France

²LHSV&Cerema, 6 quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

³LHSV, Ecole des Ponts, EDF R&D, 6 quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

⁴Department of Marine Sciences, University of the Aegean, Mytilene, Greece

⁵Lab'Urba, Université Gustave Eiffel, 5 Boulevard Descartes, 77430 Champs-sur-Marne, France

Correspondance : Marc Igigabel (marc.igigabel@cerema.fr)

Reçu : 25 août 2023 – Discussion engagée : 30 août 2023

Revisé : 20 mars 2024 – Accepté : 22 avril 2024 – Publié : 12 juin 2024

Résumé :

Dans le contexte du changement climatique, les variations de hauteur et de fréquence des niveaux marins extrêmes (en anglais, extreme sea levels (ESL)) ont été étudiées par des approches déterministes et probabilistes. Cependant, ce type d'approche ne met pas en évidence les effets dynamiques (vagues, courants) générés par les événements météo-marins (tempêtes, cyclones, houles longues et tsunamis) au-delà des effets sur les niveaux marins. En particulier, les estimations des ESL sont calculées en tenant compte des principaux facteurs physiques déterminants, mais ne peuvent rendre compte de tous les effets de ces facteurs. En définitive, il peut en résulter une confusion entre ESL et aléa. Cet article propose une méthode systémique d'évaluation de l'évolution des aléas littoraux à des échelles régionales, intégrant les paramètres influençant les niveaux marins, ainsi que des facteurs décrivant la configuration géomorphologique (longueur et forme de la côte, largeur du plateau continental), les événements météo-marins (tempêtes, cyclones, houles longues et tsunamis) et l'environnement marin (p. ex., état des récifs coralliens et étendue des glaces de mer). Des territoires français de métropole et d'outre-mer ont été sélectionnés pour appliquer la méthode. La présente étude met en évidence la nécessité de considérer non seulement la variabilité des niveaux marins, mais également les caractéristiques actuelles et futures des événements météo-marins. Les longues façades maritimes, de formes concaves et bordées par un large plateau continental apparaissent particulièrement sensibles aux variations d'intensité ou de trajectoire des événements météo-marins. La dégradation des récifs coralliens dans les tropiques, et la diminution de l'étendue de la glace de mer dans les régions polaires peuvent changer significativement les actions hydrauliques et leurs impacts sur la côte. Ces résultats contribuent à prévoir les types d'aléa (érosion, submersion rapide et/ou inondations permanentes des terres basses) qui augmenteront le plus sur les divers territoires littoraux.

1 Introduction

En 2001, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)) a considéré que la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes, y compris le risque de submersion marine se produisant au passage de tempêtes tropicales et extra-tropicales, représentaient l'un des cinq « motifs de préoccupation » du changement climatique (IPCC, 2001, 2007, 2014, 2023a). Les recherches récentes ont amélioré la connaissance des mécanismes générant la hausse du niveau de l'océan (Cazenave et Llovel, 2010; Cazenave et Le Cozannet, 2013; Hamlington et al., 2020; Fox-Kemper et al., 2021). Frederikse et al. (2020) ont montré que depuis 1900 la somme des contributions au changement du niveau de la mer est conforme aux tendances et à la variabilité multidécennale du niveau de la mer observé à l'échelle du monde et des bassins. Des incertitudes importantes demeurent néanmoins concernant l'évolution des aléas générés sur le littoral par le milieu marin. Dans cet article, ces aléas seront désignés sous le terme « aléas littoraux », étant entendu toutefois que le littoral peut être affecté par d'autres sources d'aléa (précipitations intenses, débordement de cours d'eau, etc.).

La question de l'évolution des aléas littoraux est souvent abordée dans la littérature scientifique au travers de l'évolution des niveaux marins extrêmes (en anglais, *Extreme Sea Level (ELS)*) le long des côtes. Par exemple, Vitousek et al. (2017) ont averti que la hausse de 10 à 20 cm du niveau de la mer prévue au plus tard en 2050 fera plus que doubler la fréquence des événements extrêmes du niveau de l'eau dans les tropiques. Vousdoukas et al. (2018) prévoient une augmentation très probable de la moyenne mondiale des ELS sur 100 ans, entre 2000 et 2100, de 34 à 76 cm selon un scénario de politique d'atténuation modérée des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de 58 à 172 cm selon un scénario « business-as-usual ». Selon ces scénarios, une grande partie des tropiques serait exposée annuellement à l'ESL actuel de 100 ans à partir de 2050. Ces affirmations concernent l'évolution des niveaux d'eau à la côte, mais ne suffisent pas à décrire l'évolution des aléas littoraux. Pourtant, nombre d'auteurs évaluant l'évolution des risques littoraux restreignent la représentation de l'aléa aux ESL (p. ex., Hallegatte et al. (2013), Tiggeloven et al. (2020), Rasmussen et al. (2022)). Ce type d'analyse utilise une approche déterministe basée sur un seul facteur (l'ESL qui est exprimé par deux paramètres, le niveau maximum de l'eau et sa fréquence) pour représenter un aléa complexe qui ne peut être appréhendé complètement que par une approche systémique prenant en compte de multiples facteurs (Igigabel et al., 2021). En comparaison, sur terre, des approches systémiques sont utilisées pour étudier le ruissellement de surface et définir des stratégies de gestion des ressources en eau et des risques d'inondation (Shaikh et al., 2022; Verma et al., 2023; Mehta et al., 2023).

Pour traiter de ce problème dans le domaine côtier, il est nécessaire de souligner que lors d'un événement météo-marin, les phénomènes d'inondation et d'érosion côtière sont déterminés non seulement par le niveau maximal de la mer, mais aussi par les vagues et les courants côtiers, les franchissements et le débordement des ouvrages de protection contre les inondations (Formentin et al., 2018 ; Almar et al., 2021 ; Igigabel et al., 2022). L'estimation des débits et des conditions hydrodynamiques sur la durée d'un événement nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques qui génèrent l'aléa. Les analyses rétrospectives des événements aident à comprendre correctement les mécanismes qui causent l'inondation ou l'érosion observée. Par exemple, en simulant les niveaux d'eau totaux (en anglais, *total water level (TWL)*) le long de la baie s'étendant de la Caroline du Nord à la Floride pendant trois cyclones tropicaux (en anglais, *tropical cyclone (TC)*) historiques aux trajectoires similaires, Hsu et al. (2023) ont constaté que l'ampleur et la durée de l'augmentation des TWL et des vagues générées par le vent sont influencées par l'intensité, la vitesse de translation et la distance par rapport au rivage des TC. En particulier, les auteurs ont montré qu'une diminution de la vitesse de translation des TC entraînait des dépassements plus longs des TWL, ce qui peut engendrer des impacts plus importants. Cependant, il n'est pas possible de prédire de manière déterministe les caractéristiques physiques des événements futurs, ni d'évaluer les conditions hydrodynamiques correspondantes. Pour pallier cela, des approches probabilistes ont été développées. Par exemple, en utilisant un grand nombre d'ouragans synthétiques qui tiennent compte de la variabilité naturelle de la fréquence, de la taille, de l'intensité et de la trajectoire des ouragans, Krien et al. (2015) infèrent des niveaux de surcote de 100 ans et de 1000 ans pour l'archipel de la Guadeloupe. Suivant le même principe, Krien et al. (2017) estiment des niveaux de surcote de 100 ans en Martinique pour le climat actuel ou en envisageant une élévation potentielle du niveau de la mer. Ces résultats permettent de déterminer les niveaux de protection nécessaires à court et moyen terme. Cependant, un seul paramètre (le niveau d'eau maximal) ne suffit pas pour caractériser l'aléa et définir toutes les mesures de gestion de crise, en particulier lorsque les niveaux d'eau dépassent le niveau de protection ou lorsque les structures de protection connaissent des défaillances (par exemple, des brèches dans les digues ou les dunes). En outre, l'exactitude de ces estimations diminue à long terme en raison (i) des incertitudes élevées quant au niveau de la mer au-delà de 2050 (IPCC, 2019) ; (ii) de l'augmentation de la proportion de cyclones de haute intensité dans le monde (Masson-Delmotte et al., 2021) ; et (iii) de l'instabilité environnementale, notamment en raison des changements géomorphologiques (p. ex., affaissement, retrait du littoral) et biologiques (p. ex., dégradation des récifs coralliens et des mangroves). Ces changements modifient les processus hydrodynamiques et hydrosédimentaires sur la côte à long terme et lors d'événements particuliers.

Dans le but de progresser à long terme dans l'évaluation globale des risques côtiers, le principe directeur de cet article est de promouvoir l'utilisation des dernières avancées de la recherche sur les changements dans les événements météo-marins et les niveaux d'eau, tout en montrant l'importance de l'étude d'autres facteurs dont l'évolution est plus prévisible que les ondes de tempête, à savoir les régimes de marée, les configurations géomorphologiques et les changements environnementaux (en particulier ceux qui modifient les conditions hydrodynamiques sur la côte).

Bien que les niveaux d'eau ne soient pas le seul paramètre à considérer, il est nécessaire de commencer par clarifier les définitions des différents niveaux auxquels nous nous référerons régulièrement.

Tout d'abord, il est nécessaire de distinguer entre le niveau moyen global de la mer (en anglais, *Global Mean Sea Level* (GMSL)) et le niveau relatif de la mer (en anglais, *Relative Sea Level* (RSL)). La hausse du GMSL peut être définie comme le changement à l'échelle de la planète du niveau moyen de la mer (en anglais, *Mean Sea Level* (MSL)) par rapport au cadre de référence terrestre en raison des effets combinés du changement du volume de l'océan et du changement du niveau du plancher océanique (Church et al. 2013). La hausse du RSL peut être définie comme le changement du niveau de la mer par rapport à la terre (Lowe et al., 2010).

Ensuite, il est nécessaire d'apprécier les principaux facteurs influençant l'évolution des niveaux d'eau, qu'il s'agisse du GMSL, du RSL ou des ESL.

Le MSL varie, à la fois globalement et localement, à des échelles saisonnières, annuelles et plus longues. Ces variations peuvent être induites par des fluctuations des masses d'eau liquides dans l'océan (p. ex., en raison de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et des changements dans le stockage d'eau terrestre), par des changements de la densité de l'eau océanique (p. ex., expansion due au réchauffement de l'eau), par la variation de la forme des bassins océaniques (p. ex., en raison de la tectonique des plaques) et des champs gravitationnels et rotationnels de la Terre, et par la subsidence ou l'élévation locale des terres (Oppenheimer et al., 2019). À l'avenir, les changements du GMSL devraient être fortement influencés par les émissions de GES (Oppenheimer et al., 2019 ; Fox-Kemper et al., 2021) et l'évolution de la cryosphère : dans le cas d'une fonte plus rapide des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, Bamber et al. (2019) estiment la hausse du GMSL supérieure à 2 m au XXI^e siècle.

Le RSL dépendra du GMSL et du mouvement vertical du sol (en anglais, *Vertical Land Movement* (VLM)) au lieu considéré. Le VLM peut avoir des causes naturelles (par exemple, l'isostasie, la flexion élastique de la lithosphère, les tremblements de terre et volcans, les glissements de terrain et la sédimentation) et, plus localement, des causes anthropiques, en particulier le chargement du sol, l'extraction d'hydrocarbures et/ou d'eaux souterraines, le drainage et les activités minières (Gregory et al., 2019). Au cours du XX^e siècle, les côtes de Tokyo, Shanghai et Bangkok se sont effondrées de plusieurs mètres en raison de l'extraction d'eau et du chargement des sols par la construction de bâtiments et d'infrastructures (Nicholls et al., 2008). Les taux d'affaissement de l'ordre de 1 à 10 cm/an sont couramment mesurés dans les mégapoles côtières et dépassent les taux de variation du niveau de la mer d'un facteur 10 (Erkens et al., 2015). Cependant, même en l'absence de subsidence, la majorité des côtes devraient connaître des changements de RSL de l'ordre de 30 pour cent de la hausse du GMSL (Gregory et al., 2019 ; IPCC, 2019 ; Dayan et al., 2021).

Les ESLs devraient aussi évoluer à cause des changements du RSL, des marées, des vagues et des surcotes de tempête (Vousdoukas et al., 2018). Les surcotes de tempête sont définies par Gregory et al. (2019) comme « l'élévation ou la dépression de la surface de la mer par rapport à la marée prévue pendant une tempête ». Le facteur prépondérant dans l'évolution des ESL est la variabilité des niveaux marins générée par les marées astronomiques et les surcotes de tempête (Buchanan et al., 2016). La conjugaison des phénomènes de marée et de surcote oblige à une approche statistique. Ainsi, l'évolution des niveaux marins extrêmes est généralement exprimée en termes de facteurs d'amplification et de surélévation. Le facteur d'amplification désigne l'amplification de la fréquence moyenne d'un événement extrême donné, souvent en référence au niveau de l'eau avec une période

de retour de 100 ans estimée à partir de données historiques. La surélévation indique l'augmentation du niveau d'eau (m) pour une période de retour donnée. Cette surélévation est égale à la projection régionale de la variation du RSL avec une hauteur supplémentaire liée à l'incertitude de la projection (Hunter, 2012). Les facteurs d'amplification sont fortement déterminés par la variabilité locale des ESL. Les endroits où cette variabilité est importante en raison des grandes ondes de tempête et des marées astronomiques connaîtront une amplification modérée de la fréquence des événements extrêmes en comparaison des endroits où la variabilité est faible. Globalement, ce contraste entre les régions à grands et petits facteurs d'amplification devient clair pour les projections d'ici le milieu du siècle, et considérable dans les siècles à venir (Vitousek et al., 2017). En particulier, de nombreuses zones côtières situées dans les basses latitudes peuvent s'attendre à des facteurs d'amplification de 100 ou plus d'ici le milieu du siècle, quel que soit le scénario d'émission de GES considéré. À la fin du siècle, et en particulier si les émissions de GES ne sont pas réduites, de tels facteurs d'amplification devraient être généralisés le long des côtes au niveau mondial (Vousdoukas et al., 2018).

L'objectif de cet article est de présenter une méthode complète pour évaluer l'évolution des aléas côtiers à l'échelle régionale dans le contexte du changement climatique. La méthode systémique proposée souligne la nécessité de se concentrer sur l'analyse et l'interprétation des résultats de modélisation en les mettant en perspective par rapport aux conditions biophysiques (actuelles et prévues).

Cette méthode a été développée à la suite d'un processus empirique, considérant diverses situations. Ce processus a l'avantage de démontrer la grande applicabilité de la méthode proposée. Les études de cas utilisées pour développer la méthode sont en France et sur les territoires français, mais ils sont situés à différentes latitudes (équateur, zones tropicales et tempérées) où ils sont exposés à différents climats et sont caractérisés par différentes configurations géomorphologiques (y compris continentale ou insulaire). Cette étude souligne que la prise en compte des facteurs qualitatifs décrivant le contexte géomorphologique, les événements météocéaniques et le milieu marin dans une approche systémique était nécessaire pour évaluer l'évolution des aléas.

Pour assurer que la méthode peut être appliquée à des fins opérationnelles, l'utilisation de données librement accessibles a été favorisée. Cependant, les applications de cette méthode devraient inclure une analyse bibliographique approfondie ou même des investigations ou des modélisations supplémentaires sur les sites d'étude choisis. Il est important de souligner ici que l'application de la méthode dépend fortement des données disponibles et qu'il est donc nécessaire de recueillir les meilleures données pour chaque site. Puisque la quantité et la qualité des données ne sont pas les mêmes partout, les incertitudes dans les résultats varieront également et doivent être appréciées.

Enfin, à la suite à l'application de la méthode aux études de cas, les résultats obtenus en utilisant cette approche systémique peuvent contribuer à améliorer les prédictions de l'évolution des différents types de risques côtiers (érosion du littoral, submersion rapide et/ou inondation permanente).

2 Méthode d'évaluation de l'évolution des aléas côtiers aux échelles régionales

Pour évaluer, aux échelles régionales et multi-décennales, l'évolution des aléas côtiers, il est nécessaire de faire cohabiter une approche quantitative d'évaluation des paramètres caractérisant les ESL et une approche qualitative d'analyse d'autres facteurs plus difficiles à quantifier tels que le type de phénomènes météo-marins, la configuration géomorphologique de la côte et d'autres facteurs environnementaux (par exemple, la dégradation des récifs coralliens dans les tropiques, et la diminution de l'étendue de la glace de mer dans les régions polaires) susceptibles de modifier les actions hydrauliques sur le littoral.

La figure 1 montre les trois étapes proposées. Ces trois étapes sont présentées successivement. Dans l'application de la méthode, il est cependant possible de réaliser les deux premières étapes en parallèle.

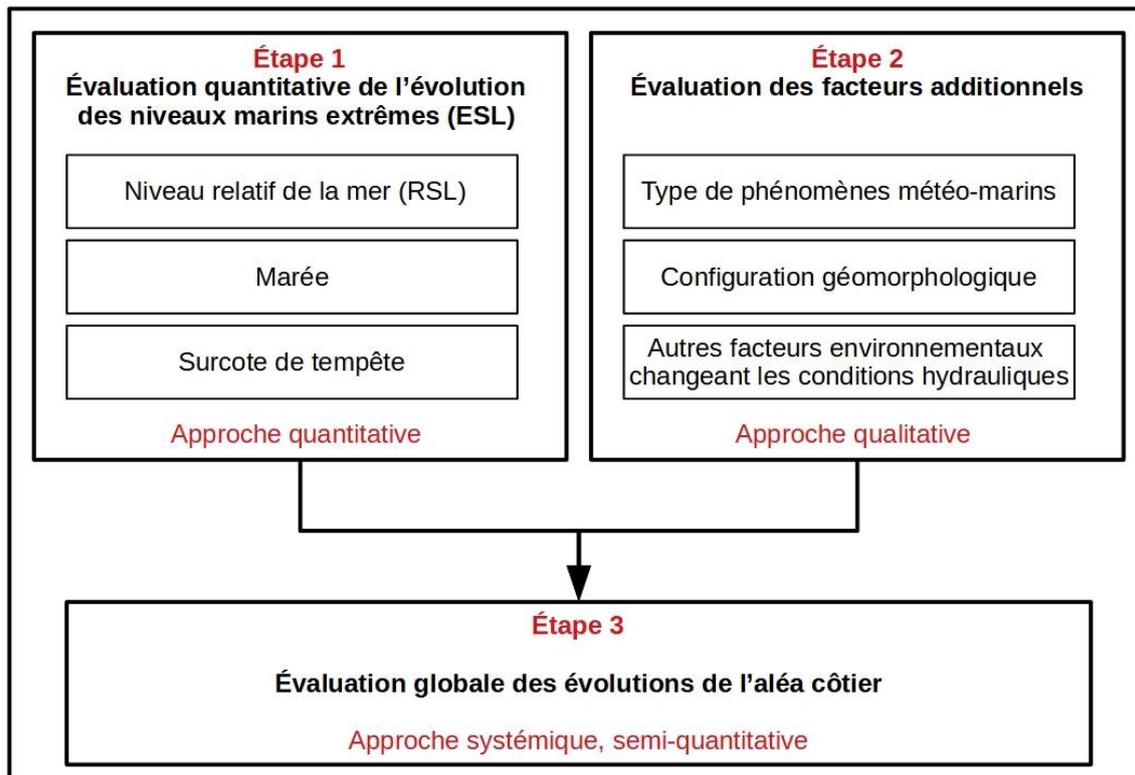


Figure 1 : Méthode d'évaluation de l'évolution des aléas côtiers

Avant de présenter ces trois étapes, il est essentiel de rappeler que le risque d'inondation, et d'une manière plus générale l'ensemble des risques côtiers, peuvent être définis de deux manières au moins (FLOODsite, 2009). La première définition considère le risque comme résultant de l'exposition d'un enjeu vulnérable à un aléa, ce que traduit la formule suivante :

(1) $\text{risque} = \text{aléa (événement météo-marin)} \cdot \text{exposition} \cdot \text{vulnérabilité (d'une communauté ou d'une zone ou d'une structure)}$

Cependant, dans l'objectif de quantifier le risque et en considérant que le mot « risque » suggère une probabilité d'occurrence, une deuxième définition peut être mise en évidence :

- Les deux termes « exposition » et « vulnérabilité » peuvent être remplacés par les « conséquences », les conséquences étant généralement plus quantifiables (par exemple, en nombre de victimes et en dommages économiques) que les deux précédents termes.
- L'aléa peut être représenté par sa distribution de probabilité.

Il en résulte la deuxième définition :

(2) $\text{risque} = \text{probabilité (de l'aléa)} \cdot \text{conséquences}$

Cet article est principalement consacré à l'évaluation de l'aléa. Les conséquences (p. ex., l'érosion et les inondations) ne seront abordées que dans la discussion. La référence aux définitions du risque est cependant nécessaire, car l'expression de l'aléa dépend de la définition du risque.

Les évaluations quantitatives des changements d'ESL (étape 1 de la figure 1) correspondent à une approche probabiliste et s'inscrivent donc dans la deuxième définition du risque. Tout l'enjeu de la méthode proposée consiste à utiliser ces évaluations avec d'autres facteurs, tels que les types d'événements météo-marins, la configuration géomorphologique de la côte et les évolutions du milieu marin altérant les conditions hydrauliques. Ces « facteurs additionnels », plus difficiles à quantifier,

seront étudiés dans une deuxième étape, parallèle à la première (étape 2 de la figure 1). La dernière étape consiste à qualifier l'évolution de l'aléa dans le cadre d'une approche systémique. Au cours de cette étape (étape 3 de la figure 1), la première définition du risque sera utilisée pour rechercher un mode de présentation des données suffisamment synthétique pour porter une appréciation d'ensemble.

Étant donné les multiples effets du changement climatique sur les niveaux marins (GMSL et RSL), les conditions atmosphériques et les états de mer, l'évolution des facteurs et paramètres ne peut être appréciée que sur la base des hypothèses de développement à l'échelle mondiale. Pour représenter différentes trajectoires, l'IPCC a identifié cinq scénarios appelés SSPx-y, où « SSPx » désigne la voie socio-économique partagée (« SSP » décrivant les tendances socio-économiques sous-jacentes au scénario) et « y » désigne le niveau approximatif de forçage radiatif (dans $W m^{-2}$) résultant du scénario en 2100. Pour déterminer le scénario le plus pertinent et déterminer l'horizon temporel le plus approprié, une analyse de l'exposition et de la vulnérabilité et une évaluation de la durée du projet sont nécessaires. Ces réflexions sont un préalable essentiel à l'application de la méthode proposée.

Pour l'évaluation des niveaux marins, le tableau 1 présente les projections pour le GMSL dans le cadre du scénario SSP5-8.5 à trois échelles de temps : 2050, 2100 et 2300.

Tableau 1 : Projection du GMSL aux horizons 2050, 2100 et 2300 suivant le scénario SSP5-8.5. Les valeurs médianes et les fourchettes (17^e à 83^e centiles) sont indiquées en prenant comme référence la période 1986-2005 (IPCC, 2019).

Scénario climatique	2050	2050	2100	2100	2300	2300
	Médiane	Fourchette 17-83%	Médiane	Fourchette 17-83 %	Médiane	Fourchette 17-83 %
SSP5-8.5	+ 32 cm	23 cm à 40 cm	+ 84 cm	61 cm à 110 cm	+385 cm	230 cm à 540 cm

Les valeurs du GMSL affichées dans le tableau 1 montrent à quel point les incertitudes sont élevées sur le long terme. Par exemple, en 2100, la valeur médiane est de 0.84 m et la fourchette des 17^e à 83^e centiles s'étend de 0.61 à 1.10 m (la valeur haute est presque double de la valeur basse). Ces estimations du GMSL ont été établies pour le scénario SSP5-8.5, mais de plus grandes différences existent si d'autres scénarios sont considérés de manière complémentaire. Des incertitudes de même ordre (ou supérieures puisque d'autres phénomènes locaux doivent être pris en compte) existent sur le RSL et l'ESL centennal.

En conclusion, il est clair que pour les adaptations sur le long terme, une description générale de l'évolution de l'aléa, y compris les incertitudes estimées, est plus appropriée qu'une prévision de l'évolution d'un paramètre à une date donnée, qui sera probablement imprécise. Par conséquent, des hypothèses prudentes seront utilisées dans cette méthode pour évaluer les composantes du niveau de la mer.

2.1 Étape 1 : évaluation de l'évolution des ESL

Les simulations des marées ne montrent aucun impact significatif de la montée du RSL sur l'amplitude des marées au cours du XXI^e siècle aux échelles régionales bien que cela n'exclut pas les effets locaux potentiels (Pickering et al., 2012 ; Haigh et al., 2020). Par exemple, Idier et al. (2017) ont montré que des augmentations notables du niveau des marées hautes se produisent dans le nord de la mer d'Irlande, dans le sud de la mer du Nord et dans la mer des Wadden, et que des diminutions se produisent principalement dans l'ouest de la Manche. Selon l'emplacement, elles peuvent représenter + / - 15% de la montée du RSL (pour une variation du RSL inférieure à 2 m). Étant donné les incertitudes fortes sur la montée du RSL, il est supposé dans cette étude que les marées et l'amplitude des marées restent constantes.

Les ESL résultent de la combinaison du RSL, du niveau de marée et des surcotes produites par les événements météo-marins (Calafat et al., 2022). Pour appréhender l'évolution des ESL, il sera supposé qu'un événement météo-marin génère simultanément une onde de tempête atmosphérique (provoquée par les dépressions atmosphériques et le vent) et des vagues de grande énergie. Sur le littoral, les vagues contribuent également au niveau d'eau total par deux phénomènes :

- le wave setup - augmentation épisodique (de l'ordre de 30 minutes) du niveau moyen de l'eau causée par les vagues à la côte, résultant de la dissipation des vagues sur le littoral (Bowen et al., 1968) ;
- le run-up - le niveau d'eau, variable dans le temps (de l'ordre de la période des vagues, c'est-à-dire quelques secondes, ou de la période des ondes infragravitaires, c'est-à-dire quelques minutes), atteinte par une vague sur une plage ou une structure côtière, par rapport au niveau d'eau statique, mesuré verticalement (le run-up génère des franchissements qui, contrairement aux débordements, se produisent de façon discontinue).

Dans la méthode proposée, l'onde de tempête et le wave setup seront pris en compte pour estimer l'ESL, mais le run-up sera négligé, à cause de la difficulté de le modéliser à petite échelle (Aucan et al., 2018 ; Gomes da Silva et al., 2020).

Pour rendre compte pleinement de l'évolution des ESL, l'analyse doit porter à la fois sur l'évolution de la fréquence moyenne d'un événement extrême donné et sur l'augmentation (absolue et en pourcentage) du niveau d'eau pour un événement de période de retour donnée. C'est la raison pour laquelle la deuxième définition du risque sera utilisée pour étudier les probabilités conjointes des paramètres déterminant les niveaux marins, à savoir le RSL, le marnage et la surcote de tempête (incluant les effets des vagues). Les changements dans l'amplitude et la fréquence de l'ESL d'occurrence actuelle 100 ans (ESL_{100}) sont évalués en s'inspirant de Vousdoukas et al. (2017). Il est supposé que l'ESL est déterminée par l'effet combiné du MSL, des marées (en anglais, *tide*) et des fluctuations du niveau de l'eau dues aux vagues et aux ondes de tempête (en anglais, *waves (w)* et *storm surge (ss)*). Par conséquent, l'ESL peut être défini comme suit :

$$(3) \quad ESL = MSL + \eta_{\text{tide}} + \eta_{w-ss}$$

Nous devons ici apprécier la nécessité d'utiliser une méthode plus détaillée pour chaque cas particulier, car selon Idier et al. (2019), en fonction du type d'environnement (p. ex., morphologie, contexte hydrométéorologique), les interactions non linéaires entre divers composants - marée, fluctuations du niveau de l'eau dues aux vagues et aux ondes de tempête - peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Par exemple, en utilisant une approche de modélisation numérique, en se concentrant sur la région de la baie allemande (sud-est de la mer du Nord) et en supposant une élévation du niveau de la mer de 0,54 m, Arns et al. (2015) montrent que la prise en compte des interactions entre le niveau moyen de la mer, les marées et les surcotes atmosphériques conduit à des changements positifs des niveaux d'eau extrêmes par rapport à la hausse du MSL. Les plus grandes augmentations non linéaires de l'ordre de +0,15 m se produisent dans les zones peu profondes de la mer des Wadden. Toutefois, en introduisant une nouvelle approche pour évaluer statistiquement l'interaction non linéaire des marées et des autres composantes du niveau marin, Arns et al. (2020) démontrent que les niveaux extrêmes de la mer sont jusqu'à 30 % (ou 70 cm) plus élevés si les interactions non linéaires ne sont pas prises en compte. Les effets les plus importants de l'interaction entre les marées (en anglais, *Tide Surge Interaction (TSI)*) concernent la côte est des États-Unis et le golfe du Mexique, le littoral de la mer du Nord du Royaume-Uni et certaines parties de la côte sud du Japon. La valeur la plus élevée, 66 cm, se trouve à Cromer le long du littoral de la mer du Nord britannique. Sur les côtes sélectionnées, les autres valeurs se situent généralement entre 20 et 50 cm. En conclusion, alors que les méthodes statistiques démontrent que, globalement, l'interaction non linéaire modère les niveaux extrêmes de la mer, la modélisation numérique montre que l'interaction non linéaire peut induire localement des augmentations de quelques dizaines de centimètres. Compte tenu des fortes incertitudes concernant l'évolution à long terme des niveaux marins et les

changements géomorphologiques, nous considérerons que l'équation (3) fournit dans le cas général une estimation conservatrice des ESL et que, si ce n'est pas le cas, les autres sources d'incertitude sont supérieures à l'accroissement de niveau d'eau lié à ces interactions non linéaires.

La contribution η_{W-SS} des vagues et des ondes de tempête aux événements extrêmes peut être estimée comme :

$$(4) \quad \eta_{W-SS} = SSL + 0.2 H_s ,$$

où SSL est le niveau de l'onde de tempête, H_s est la hauteur significative des vagues et $0,2 H_s$ est une approximation générique (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) de la surcote générée par les vagues (wave setup). Cette équation est une estimation conservatrice du setup, qui dépend principalement de la pente locale, de la hauteur des vagues déferlantes et de la période des vagues (Stockdon et al., 2006), et pourrait être plus proche de 10 % de la hauteur des vagues déferlantes. Des valeurs plus élevées ne peuvent être observées que sur des plages de sable abruptes (p. ex., Martins et coll., 2022) ou sur des plates-formes côtières abruptes (Sheremet et al., 2014; Lavaud et al., 2022). Dans l'état actuel de la technique, les simulations numériques du wave setup n'ont été effectuées que localement (p. ex., Lange et al. (2021), van Ormondt et al. (2021)). De telles simulations rétrospectives sont coûteuses sur le plan informatique (p. ex., pour simuler avec précision le wave setup, il peut être nécessaire d'avoir une résolution de grille de modèle d'environ 10 à 50 m pour les sites d'étude présentant de grandes variations de la bathymétrie locale et du champ de vagues). De plus, (i) la modélisation précise et à haute résolution des vagues exige des données bathymétriques à haute résolution (Stephens et al., 2011), qui ne sont pas disponibles à l'échelle spatiale de notre étude de cas; (ii) des changements morphologiques importants sont prévus dans les zones littorales, en particulier avec l'élévation du niveau de la mer, qui peut avoir un effet significatif sur le wave setup à différentes échelles de temps (en particulier pour les plages de sable exposées aux vagues : Ruggiero et al., 2001 ; Thiébot et al., 2012 ; Brivois et al., 2012). Ainsi, aux grandes échelles spatiales (p. ex., mondiales) et sur de longues durées (p. ex., le XXI^e siècle), des modèles simplifiés comme celui utilisé ici (Vousdoukas et al., 2018) peuvent fournir une première estimation du wave setup.

2.2 Étape 2 : Évaluation de facteurs additionnels

Deux types de facteurs régionaux peuvent être considérés comme essentiels pour tous les littoraux : les phénomènes susceptibles de générer des états de mer énergétiques et la configuration géomorphologique de la côte. En complément, d'autres facteurs environnementaux qui affectent les conditions hydrauliques devraient être considérés au niveau des tropiques (en particulier, l'état des récifs coralliens) et des pôles (en particulier, l'étendue des glaces de mer).

2.2.1 Types d'événements météo-marins

Trois catégories principales de littoraux sont considérées dans cette méthode : l'exposition à aucun phénomène particulier, l'exposition à des tempêtes ou l'exposition à des cyclones (ce qui implique une exposition également à des tempêtes). A ces trois catégories se superposent (i) l'exposition éventuelle à des houles longues qui seraient générées par un événement météo-marin très éloigné du littoral considéré (ii) l'exposition éventuelle aux tsunamis, puisque l'origine des tsunamis n'est pas liée aux conditions météorologiques.

L'aggravation des dommages par la houle pourrait aussi être évaluée en recherchant les projections locales relatives à l'évolution de la hauteur significative des vagues (la hauteur moyenne du creux à la crête du tiers le plus élevé des vagues). Cependant, les tendances d'évolution des climats de vague sur les littoraux sont indiquées avec un niveau de confiance faible dans le rapport de l'IPCC (2019). Par conséquent, ces tendances ne seront pas exploitées dans le cadre de notre méthode : l'accent sera mis sur les fortes différences qui existent déjà entre les climats de vague des façades maritimes.

2.2.2 Configurations géomorphologiques de la côte

Il convient d'identifier des caractéristiques de la côte qui influent sur les différentes composantes des surcotes.

Les ondes de tempête sont contrôlées non seulement par les caractéristiques des événements météorologiques (p. ex., pour les cyclones tropicaux (TC), l'intensité du TC, la distance à l'œil du TC, la direction du TC et la translation du TC (Hsu et al., 2023)), mais aussi par la largeur du plateau continental et la hauteur d'eau relative (Kennedy et al., 2012). Par exemple, au cours de la période de 20 années étudiée (1998-2018), les surcotes associées aux ondes de tempête ont atteint à peine 1,0 m le long des côtes du sud du golfe de Gascogne et de la Méditerranée orientale, mais ont dépassé 2,0 m dans la Manche (Dodet et al., 2019). En eaux peu profondes, les effets du vent peuvent dominer très sensiblement l'effet de la pression atmosphérique, et la surcote peut être très largement amplifiée par la bathymétrie des fonds marins en bordure de côte (Bertin et al., 2012). La largeur et la profondeur du plateau continental ont une influence importante sur l'ampleur des ondes de tempête.

En deuxième lieu, sur les territoires exposés aux cyclones, les surcotes mesurées sur les îles sont très inférieures à celles mesurées sur les façades continentales. Par exemple, sur les îles des Antilles, les surcotes dépassent rarement 3 m (Krien et al., 2015 ; Krien et al., 2017) alors que dans le cas de Katrina qui a frappé les Etats-Unis en 2005, les surcotes dans l'est de la Louisiane ont atteint des valeurs comprises entre 3,05 m et 5,79 m (Graumann et al., 2006). Au cours de ce même événement, la surcote a dépassé 8 m à plusieurs endroits le long des côtes du Mississippi (Dietrich et al., 2010). Cet écart entre les surcotes observées sur les littoraux continentaux et insulaires s'explique par le fait que dans le cas d'un cyclone, l'impact sur l'onde de la basse pression associée à la tempête est minime par rapport à l'eau forcée vers le rivage par le vent. Cependant, dans le cas des îles de petite taille (p. ex., les Antilles ou La Réunion), la surcote est globalement réduite : l'eau forcée par le vent s'accumule moins sur des rivages de faible longueur que sur des rivages de grande longueur (Durand, 1996). La longueur de la façade maritime apparaît donc comme le deuxième facteur déterminant les surcotes.

En troisième lieu, la surcote potentielle maximale pour un endroit particulier est très sensible aux moindres changements de l'intensité de la tempête, de sa vitesse de progression, de sa taille, de l'angle d'approche à la côte, de la pression centrale, et aussi la forme et des caractéristiques côtières telles que les baies et les estuaires (Flather, 2001 ; Rego and Li, 2010 ; Kennedy et al., 2012). L'accumulation de l'eau forcée par le vent sera moins importante sur les côtes de forme convexe que sur les côtes de forme concave (Bertin et al., 2012 ; Krien et al., 2015 ; Krien et al., 2017). La forme de la côte apparaît donc comme le troisième facteur déterminant les surcotes.

Par conséquent, pour rendre compte des principaux paramètres géomorphologiques déterminant l'ampleur des surcotes, nous proposons de retenir trois critères :

- la longueur de la côte
- la largeur du plateau continental
- la forme, convexe ou concave, du littoral.

2.2.3 Autres facteurs environnementaux modifiant les conditions hydrauliques

D'autres phénomènes induits par le changement climatique peuvent augmenter l'intensité et la fréquence des événements extrêmes ou aggraver leurs effets :

- l'acidification des océans se combine au réchauffement et à la désoxygénation des océans et affectent négativement certains écosystèmes (p. ex., les récifs coralliens, les bancs d'huîtres), ce qui peut réduire la protection contre les submersions marines. Dans les conditions attendues au XXI^e siècle, le réchauffement climatique et l'acidification des océans pourraient compromettre l'accrétion carbonatée, les coraux devenant de plus en plus rares sur les récifs. Il devrait en résulter des communautés de récifs moins diversifiées et des structures de récifs

carbonatés qui ne seront pas entretenues. Le changement climatique exacerbe également les stress locaux causés par la baisse de la qualité de l'eau et la surexploitation des espèces clés, poussant les récifs de plus en plus vers le point de basculement de l'effondrement fonctionnel (Hoegh-Guldberg et al., 2007 ; Albright et al., 2018) ;

- dans les régions polaires, la diminution de l'étendue de la glace de mer saisonnière dans l'Arctique, conjuguée à l'allongement de la saison des eaux libres, offre moins de protection contre les effets des tempêtes (Forbes, 2011). De plus, un fetch plus long favorise la formation de vagues plus énergiques, ce qui peut avoir des conséquences au-delà des régions polaires, par exemple sur les littoraux exposés aux houles australes.

Ces deux facteurs qui affectent les conditions de formation et de propagation des vagues, ainsi que les courants, sont également considérés dans la méthode proposée.

2.3 Étape 3 : évaluation globale de l'aléa

A la suite des étapes 1 et 2, l'évaluation globale de l'aléa devrait être produite sur la base des facteurs et paramètres suivants (évalués sur la base du scénario SSP5-8.5) :

- la variation en hauteur du RSL (Δ RSL)
- le marnage
- la surcote centennale
- la variation en hauteur de l'ESL (Δ ESL)
- la variation en pourcentage de l'ESL ($\%$ Δ ESL)
- la période de retour de l'ESL centennal actuel
- la configuration géomorphologique de la côte
- les types d'événements météo-marins
- les autres facteurs environnementaux modifiant les actions hydrauliques sur le littoral.

Dans cette méthode, chaque facteur ne doit pas être considéré séparément. Au contraire, les effets conjoints des différents facteurs doivent être évalués pour comprendre la dynamique du système. Cependant, la diversité des différents contextes observés empêche de proposer un système de calibrage et de pondération quantitatif. C'est la raison principale pour laquelle cette méthode est appelée « systémique », en référence à l'étude d'un système (la côte). Cependant, cette méthode ne doit pas être qualifiée de « systématique ». Même si le cadre d'analyse intègre de multiples facteurs, l'expert en charge de l'étude d'un site particulier devrait considérer les facteurs qualitatifs et quantitatifs ensemble. En résumé, cette méthode vise à aider les experts à structurer leur évaluation.

3 Application de la méthode proposée au cas des littoraux français

La méthode proposée est appliquée aux littoraux français de métropole et d'outre-mer (Figure 2).



Figure 2 : Carte des territoires français considérés pour cette étude. Crédit : Severine Hallot, Cerema.

Dans la suite, les îles de Saint-Martin, Saint-Barthélemy, de la Guadeloupe et de la Martinique pourront être désignées comme « les Antilles ».

Le choix du scénario et des horizons temporels doit tenir compte de l'existence d'importants enjeux humains et économiques sur les littoraux considérés (villes côtières, installations portuaires et industrielles) et des fortes incertitudes sur les contributions des calottes glaciaires à la montée du niveau des eaux (Bamber et al., 2019 ; Dayan et al., 2021). Pour ces deux raisons, nous adoptons le scénario SSP5-8.5.

3.1 Évaluation de l'évolution des ESL

L'évolution des ESL est évaluée en utilisant les trois composantes (Equ. 3) : (1) le RSL, (2) le marnage et (3) les surcotes associées aux ondes de tempête et aux vagues. Le cadre élaboré par Vousdoukas et al. (2018) est utilisé pour évaluer les contributions de chacune de ces composantes, dont les valeurs de base sont calculées dans des réanalyses globales des vagues et des ondes de tempête. Ensuite, les modèles CMIP5 sont utilisés pour estimer les changements relatifs futurs des niveaux d'eau météorologiques. Enfin, les changements du niveau de la mer, la marée astronomique et les niveaux d'eau météorologiques sont combinés pour produire les valeurs des ESL.

3.1.1 RSL : projections

Le tableau 2 présente les valeurs médianes des projections d'augmentation du RSL par rapport à la période 1995–2014 en différents points du littoral français. Pour le scénario SSP5-8.5, les valeurs médianes de la montée du RSL sur les littoraux français sont assez uniformes : comprises entre 0.16 m et 0.20 m en 2050, et comprises entre 0.76 m et 0.92 m en 2100.

Tableau 2 : projections d'augmentation du RSL en une sélection de points du littoral français par rapport à la période 1995–2014 suivant le scénario SSP5-8.5

	Coordonnées géographiques		Projection d'augmentation du RSL (m)	
	Latitude	Longitude	2050	2100
Calais	50.972122801049395	1.8400588679271384	0.19	0.86
Le Havre	49.485774012966544	0.0897840202510471	0.19	0.87
Saint-Malo	48.641170797005124	-2.0313888026241402	0.19	0.87
Brest	48.368792381060274	-4.4887286031866935	0.19	0.83
La Rochelle	46.14879125637811	-1.1691588857635562	0.16	0.76
Saint-Jean-de-Luz	43.39842588942395	-1.676715829943722	0.17	0.79
Port-Vendres	42.52411089711506	3.1143835886292806	0.16	0.76
Sète	43.39330679508365	3.699492031443802	0.16	0.76
Marseille	43.29569227471328	5.352448215467127	0.17	0.78
Saint-Pierre (Saint-Pierre-et-Miquelon)	46.786272435631275	-56.16190646722868	0.19	0.83
Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	16.23300045952869	-61.53571250198115	0.20	0.90
Cayenne (Guyane)	4.93572687841612	-52.340676954198194	0.20	0.90
Pointe des Galets (La Réunion)	-20.936178918145654	55.280686667086655	0.19	0.92
Papeete (Polynésie française)	-17.53479287238126	-149.58674796473545	0.20	0.91

3.1.2 Marnage

A l'aide du système standard de classification des marées (Masselink and Short, 1993), le littoral français peut être divisé en trois catégories en fonction des données de marée fournies par le SHOM (source: <https://data.shom.fr/#001=eyJljbpbLTY2MjgwNyw1ODIyO>, dernière date d'accès : 05/06/2024) :

- milieu microtidal (marnage < 2 m) - les côtes de Méditerranée au marnage compris entre 0.2 et 0.5 m et les côtes des Antilles, de La Réunion et de la Polynésie Française où les marnages sont inférieurs à 1 m ; s'ajoutent les côtes de Saint-Pierre-et-Miquelon, où le marnage atteint 1,7 m ;
- milieu mésotidal (marnage entre 2 et 4 m) - les côtes de Guyane (le marnage maximum atteint 2,9 m) ;
- milieu macrotidal (marnage > 4 m) sur les côtes de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord, avec des différences sensibles représentées en Figure 3.

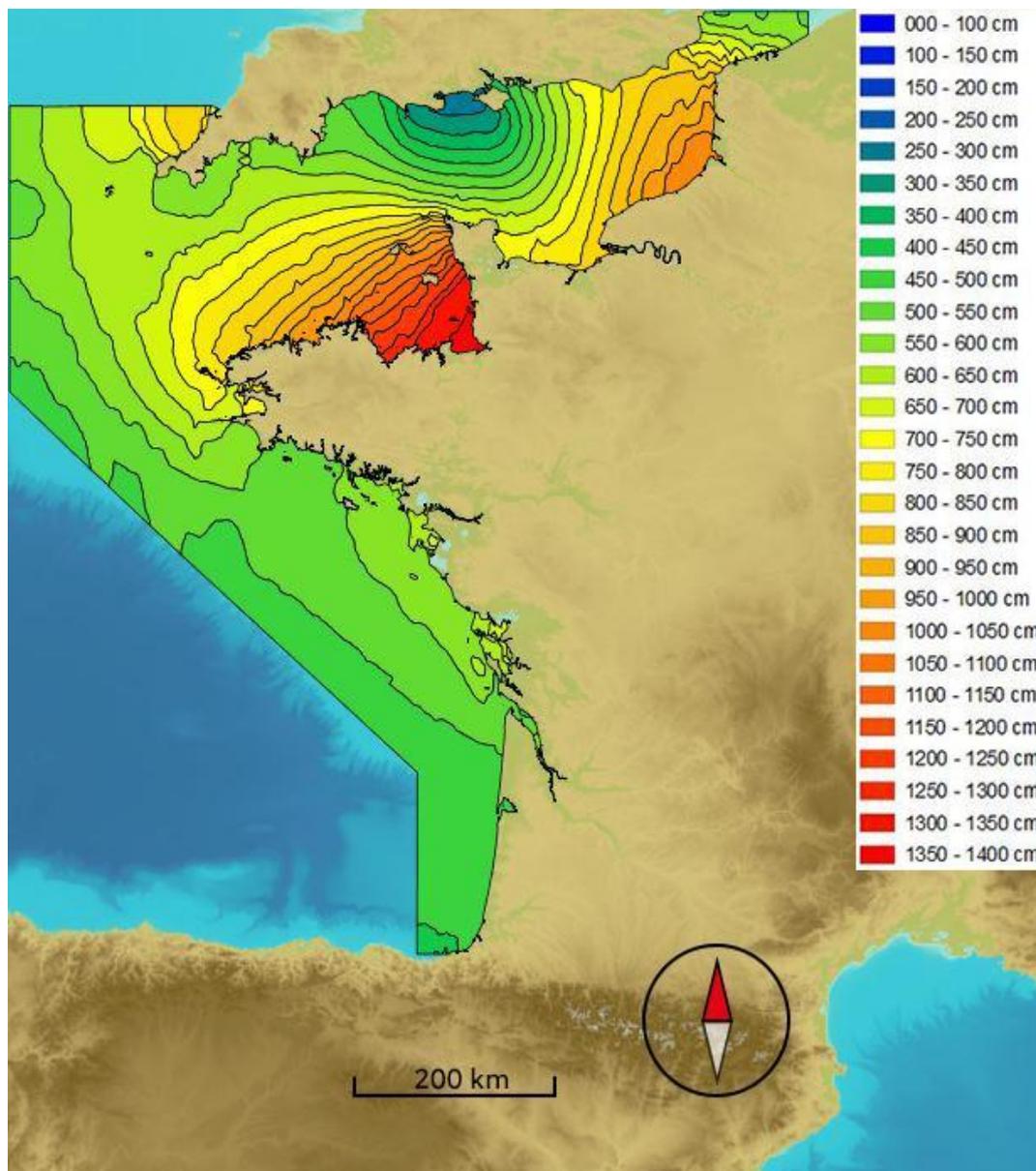


Figure 3 : Marnage maximum (source:

<https://data.shom.fr/#001=eyJljbpbLTY2MjgwNyw1ODIyOTI3XS>, dernière date d'accès : 05/06/2024)

3.1.3 Onde de tempête et surcotes liées aux vagues

Les informations sur les surcotes seront présentées successivement en métropole et en outre-mer.

En métropole, des variations sensibles existent le long des côtes, comme le montre les estimations des surcotes de tempête de période de retour 100 ans présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : estimation de la surcote de tempête de période de retour 100 ans, calculée comme la valeur moyenne des ajustements statistiques d'une distribution de Pareto généralisée (GPD) et d'une loi exponentielle appliqués aux pics de tempête (Cerema, 2018). Les valeurs de Calais, du Havre et de La Rochelle ont été corrigées pour tenir compte de l'étude comparative des méthodes d'analyse de la fréquence pour les ondes de tempête extrêmes (Hamdi et al., 2014).

Marégraphe	Surcote de période de retour 100 ans (m)
Calais	1.6
Le Havre	1.6
Saint-Malo	1.1
Brest	1.0
La Rochelle	1.7
Saint-Jean-de-Luz	0.6
Port-Vendres	0.9
Sète	1.1
Marseille	1.3

Bien que les différences relatives soient significatives, elles demeurent faibles en valeur absolue. Comme évoqué dans la présentation de la méthode, la largeur importante du plateau continental en Manche Mer du Nord et le positionnement en fond de golfe ou de baie (par exemple, Le Havre, Saint Malo, La Rochelle, Sète et Marseille) ou dans un détroit (par exemple, Calais) expliquent les valeurs supérieures observées à ces endroits.

Outre-mer, le Cerema (2020a, b, c, d, e, 2021) renseigne sur les surcotes de tempête mesurées, observées et modélisées sur les territoires de La Réunion, de la Guyane, de la Martinique, de la Guadeloupe, de Saint-Martin et Saint-Barthélemy et de Saint-Pierre-et-Miquelon. Les surcotes mesurées par les marégraphes atteignent couramment des valeurs de 0.5 à 1 m. Néanmoins, ces mesures sont réalisées à des endroits abrités (par exemple dans les ports). Des augmentations additionnelles du niveau d'eau peuvent être plus ou moins importantes sur les côtes exposées en fonction de leurs configurations géomorphologiques. Par exemple, lors du passage du cyclone Irma, le 6 septembre 2017, une surcote instantanée de 2.0 m a été mesurée au marégraphe de Saint-Martin (https://data.shom.fr/donnees/refmar/SAINT_MARTIN, dernière date d'accès : 05/06/2024). La surcote, modélisée par Météo-France, a été de plus de 3 m sur les côtes nord de Saint-Martin (baie du Marigot, Grand Case) et à Gustavia (Saint-Barthélemy), mais n'a guère dépassé 1.2 m sur le littoral presque rectiligne de l'île (De la Torre, 2017). De façon similaire, en septembre 1989, pendant le passage du cyclone Hugo sur l'archipel de la Guadeloupe, des témoignages ont indiqué que le niveau de la mer s'était élevé de 2 à 3 m le long de la côte (Pagney, 1991 ; Saffache et al., 2003; Krien et al., 2015).

Enfin, sur les îles de La Réunion et de Polynésie française, en plus des cyclones, les houles australes représentent l'un des principaux aléas (Lecacheux et al., 2012). Les mesures de hauteur d'eau et de vagues réalisées en continu par les services nationaux d'observation ReefTEMPS (<https://www.reeftemps.science/>, dernière date d'accès : 05/06/2024) et DYNALIT (<https://www.dynalit.fr/>, dernière date d'accès : 05/06/2024) montrent que sur les littoraux directement exposés à la houle (p. ex., l'Hermitage à La Réunion), les événements de période de retour

de 10 ans génèrent, au point de déferlement, des Hs ~7 à 8 m, qui induisent un setup de 1,2 m. Des ondes infragravitaires de Hs ~1 m peuvent se superposer à ce setup (Bertin et al., 2020). Ces valeurs sont inférieures dans les ports (p. ex., Saint-Gilles).

Ces observations confirment la nécessité, en complément de la mesure et de la modélisation des surcotes, d'étudier la configuration géomorphologique du littoral pour appréhender les différences très significatives qui peuvent apparaître.

3.1.4 Projection de l'ESL en intensité et en fréquence

Le modèle développé par Vousdoukas et al. (2018) fournit des estimations de l'évolution de la surélévation des ESL pour la métropole et ses territoires d'outre-mer (Tableau 4). Les résultats obtenus en 2100 pour le scénario SSP5-8.5 montrent que l'augmentation des ESL en valeur absolue est relativement homogène sur les différentes façades maritimes de la métropole : 0.89 à 1.00 m pour la Manche, 0.74 à 0.77 m pour le Golfe de Gascogne et 0.75 à 0.78 m pour la Méditerranée occidentale. Cependant, les variations en pourcentage sont très contrastées, de 16 à 22 % pour la Manche, de 20 à 24 % pour le Golfe de Gascogne et de 52 à 63 % pour la Méditerranée occidentale, en 2100. L'augmentation sera donc beaucoup plus perceptible en Méditerranée.

Le long des côtes des territoires d'outre-mer, l'augmentation estimée des ESL en valeur absolue est relativement homogène, comprise entre 0.16 et 0.24 m en 2050 et entre 0.85 et 0.95 m en 2100. Les variations en pourcentage des ESL sont estimées de l'ordre de 8 à 18 % en 2050, ce qui sera probablement déjà perceptible, en termes d'intensité de l'aléa, notamment aux Antilles et en Polynésie française où les augmentations relatives sont estimées les plus fortes. En 2100, les augmentations sont évaluées de l'ordre de 50 à 75% (à l'exception de Saint-Pierre-et-Miquelon).

Tableau 4 : Synthèse des changements absolus et relatifs prévus de l'ESL d'occurrence 100 ans (Δ ESL et % Δ ESL) pour le scénario SSP5-8.5 au cours des années 2050 et 2100.

	SSP5-8.5 - 2050		SSP5-8.5 - 2100	
	Δ ESL (m)	% Δ ESL	Δ ESL (m)	% Δ ESL
Calais	0.21	4.3	0.94	19.2
Le Havre	0.23	4.4	1.00	19.6
Saint-Malo	0.21	3.8	0.89	16.0
Brest	0.22	5.0	0.96	21.5
La Rochelle	0.16	4.3	0.77	19.9
Saint-Jean-de-Luz	0.16	5.3	0.74	24.1
Port-Vendres	0.16	13.3	0.75	60.7
Sète	0.18	12.5	0.76	52.5
Marseille	0.18	14.6	0.78	63.2
Saint-Pierre (Saint-Pierre-et-Miquelon)	0.24	8.4	0.92	31.8
Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	0.22	14.1	0.91	58.1
Cayenne (Guyane)	0.18	10.6	0.85	49.2
Pointe des Galets (La Réunion)	0.16	9.3	0.88	52.5
Papeete (Polynésie française)	0.23	17.8	0.95	74.7

L'analyse des changements en hauteur des ESL doit être complétée par une analyse en fréquence sur la base du Tableau 5. Il ressort de ces prévisions que les niveaux marins d'occurrence centennale pourraient se produire sur une base annuelle d'ici la fin de ce siècle en métropole (excepté au centre de la façade atlantique, autour de La Rochelle). Certaines régions pourraient même connaître une augmentation encore plus importante de la fréquence des ESL, notamment le long de la Méditerranée, où l'ESL actuel de 100 ans devrait se produire de l'ordre de 10 fois par an. L'augmentation supérieure en Méditerranée est étroitement liée à la faible variabilité des niveaux marins sur ces littoraux aux faibles marnages (Vitousek et al., 2017).

Pour les littoraux d'outre-mer, sous SSP5-8.5, en 2100, l'ESL actuel de période de retour 100 ans est estimé se produire plus fréquemment, de l'ordre de dix fois par an, sauf pour Saint-Pierre-et-Miquelon, où cette fréquence serait de l'ordre de 3 fois par an. L'augmentation de fréquence sera probablement déjà perceptible en 2050, en particulier en Guyane, en Polynésie française et à Saint-Pierre-et-Miquelon où les périodes de retour de l'ESL centennal actuel sont estimées n'être plus que de 7, 16 et 18 ans, respectivement.

Tableau 5 : Période de retour (en années) de l'ESL centennal actuel au cours des années 2050 et 2100, pour le scénario SSP5-8.5.

	Période de retour de l'ESL centennal actuel en :	
	2050	2100
Calais	22.81	0.75
Le Havre	26.56	0.87
Saint-Malo	27.69	0.81
Brest	20.61	0.73
La Rochelle	36.16	2.59
Saint-Jean-de-Luz	33.87	0.63
Port-Vendres	27.89	0.10
Sète	30.02	0.56
Marseille	26.88	0.10
Saint-Pierre (Saint-Pierre-et-Miquelon)	17.69	0.31
Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	35.14	0.10
Cayenne (Guyane)	7.54	0.10
Pointe des Galets (La Réunion)	57.53	0.10
Papeete (Polynésie française)	15.86	0.10

3.2 Évaluation de facteurs additionnels

Deux facteurs régionaux peuvent être considérés comme essentiels pour tous les littoraux : le type d'événement météo-marin et la configuration géomorphologique. En complément, d'autres facteurs environnementaux qui affectent les conditions hydrauliques devraient également être considérés au niveau des tropiques et des pôles.

3.2.1 Types d'événements météo-marins

Pour la France métropolitaine, le principal type d'événement météo-marin affectant les côtes sélectionnées est la tempête. Il est important de noter, cependant, que des tempêtes tropicales sur la mer Méditerranée sont occasionnellement observées. Ces tempêtes atteignent parfois l'intensité d'un ouragan et peuvent avoir de graves répercussions sur les terres côtières (Fita et al., 2007). Des valeurs extrêmes supérieures et plus fréquentes sont présentes dans le sud de la France (Patlakas et al., 2020). En classifiant l'intensité des tempêtes et des cyclones comme "faible", "modérée" ou "sévère", Romero et Emanuel (2016) prévoient un nombre plus élevé d'ouragans méditerranéens d'intensité modérée ou forte (au détriment des tempêtes d'intensité faible) et une augmentation de la fréquence des ouragans en Méditerranée occidentale au cours de la période (2081-2100) par rapport à la période (1986-2005).

Outre-mer, les types d'événements météo-marins sont les tempêtes et les cyclones aux Antilles (Krien et al., 2015 ; Krien et al., 2017) et Saint-Pierre-et-Miquelon (Catto et Batterson, 2011 ; Han et al., 2012 ; Masson, 2014), et les tempêtes, les cyclones, les houles longues et les tsunamis (exposition modérée) à La Réunion (Lecacheux et al., 2012 ; Sahal et Morin, 2012 ; Quentel et al., 2013 ; Allgeyer et al., 2017) et en Polynésie française (Larrue et Chiron, 2010). En Guyane, aucun phénomène générant des états de mer énergétiques n'est identifié.

3.2.2 Configuration géomorphologique de la côte

La configuration géomorphologique des littoraux est étudiée dans le Tableau 6 en considérant trois critères :

- la longueur de la côte,
- la largeur du plateau continental, et
- la forme convexe ou concave du littoral.

Dans le cadre d'une approche systémique, toutes les connaissances disponibles sur les sites d'étude sont utilisées pour évaluer le potentiel de surcote associé à la configuration géomorphologique. Ces connaissances comprennent des informations issues de références bibliographiques et des données obtenues à partir de cartes bathymétriques fournies par le SHOM (Tableau 6).

Tableau 6 : Evaluation du potentiel de surcote associé aux configurations géomorphologiques des sites étudiés (source des données : Data.shom.fr, dernière date d'accès : 05/06/2024)

	Références bibliographiques	Ordre de grandeur de la longueur du littoral (km)	Largeur du plateau continental	Forme du littoral	Potentiel de surcote associé à la configuration géomorphologique
Manche – Mer du Nord	Le Gorgeu and Guitonneau (1954), Hequette (2010), Bardet et al. (2011), Haigh et al. (2011), Weisse et al. (2012), Idier et al. (2012), Maspataud et al. (2013), Hamdi et al. (2014), Vousdoukas et al. (2016), Latapy et al. (2017), Vousdoukas et al. (2017), Hamdi et al. (2018), DREAL Nord Pas-de-Calais (2024)	1000	Très large (>200 km)	Alternance de formes concaves et convexes	Très élevé
Golfe de Gascogne	Allgeyer et al. (2013), Bertin et al. (2014), Hamdi et al. (2014), Bertin et al. (2015), Hamdi et al. (2015), Bulteau et al. (2015), Vousdoukas et al. (2016), Vousdoukas et al. (2017), Garnier et al. (2018), Khan et al. (2023).	1000	Large (100 à 200 km)	Concave	Elevé
Méditerranée occidentale	Ullmann et al. (2007), Fita et al. (2007), Campins et al. (2011), Conte and Lionello (2013), Cavicchia et al. (2014), Androulidakis et al. (2015), Vousdoukas et al. (2016), Romero and Emanuel (2016), Vousdoukas et al. (2017), Muis et al. (2020), Elkut et al. (2021), Patlakas et al. (2021), Toomey et al. (2022).	1000	Normal à l'ouest (~ 50 km), inexistant à l'est	Concave à l'ouest et convexe à l'est	Elevé à l'ouest Réduit à l'est
Saint-Pierre-et-Miquelon	Catto and Batterson (2011), Han et al. (2012), Masson (2014)	10	Très large (>200 km)	Alternance de formes concaves et convexes	Elevé
Guadeloupe	Pagney (1991), Zahibo et al. (2007), Dorville and Zahibo (2010), Lin and Chavas (2012), Krien et al. (2015)	5 à 20	Étroit (<20 km)	Alternance de formes concaves et convexes	Faible
Guyane	Gratiot et al. (2007), Chevalier et al. (2008), Thiéblemont et al. (2023)	1000	Large (environ 100 km)	Linéaire ou légèrement convexe, sauf pour les estuaires	Modéré
La Réunion	Lecacheux et al. (2012), Sahal and Morin (2012), Quentel et al. (2013), Allgeyer et al. (2017)	20	Inexistant	Principalement linéaire ou convexe (sauf 2 baies au Nord-Ouest)	Très Faible
Polynésie française	Pirazzoli and Montaggioni (1988), Aubanel et al. (1999), Larrue and Chiron (2010), Webb and Kench (2010), Becker et al. (2012), Yates et al. (2013), Le Cozannet et al. (2013), Martinez-Asensio et al. (2019) and Barriot et al. (2023)	1 à 20	Inexistant	Principalement linéaire ou convexe (avec de nombreuses exceptions à petite échelle)	Très faible

En France métropolitaine, les configurations géomorphologiques (longues façades maritimes, large plateau continental, forme droite et/ou concave) favorisent en général l'apparition de surcotes significatives. L'est de la façade méditerranéenne, de forme convexe et sans plateau continental (prolongement en mer du massif alpin) est une exception notoire. Une autre exception est la partie sud du Golfe de Gascogne, où la forme concave et l'étendue du littoral favorise la surcote, tandis que la faible largeur de son plateau continental est un facteur limitant.

Dans les territoires d'outre-mer, les situations sont contrastées :

- La Guyane a un plateau continental large, mais son littoral est linéaire ou convexe, ce qui favorise moins les surcotes ;
- Saint-Pierre-et-Miquelon est dans une situation qui s'apparente à celle de la métropole, avec un large plateau continental et une alternance de formes convexes et concaves de la côte. Bien que la longueur du littoral soit réduite, la proximité immédiate de la grande île de Terre Neuve, qui présente un littoral de 200 km, peut contribuer à l'apparition de surcotes importantes ;
- Les autres îles sont éloignées des continents et présentent des plateaux continentaux qui sont étroits (par exemple, en Guadeloupe) ou inexistantes pour les autres îles (par exemple, La Réunion et la Polynésie française), ce qui est, avec le faible linéaire de côte, un facteur de limitation de l'amplitude des surcotes. Pour La Réunion et la Polynésie française, les surcotes sont encore plus limitées par la forme linéaire ou convexe du littoral.

En résumé, si l'on considère seulement la configuration géomorphologique, les côtes de France métropolitaine (sauf l'est de la façade méditerranéenne et la partie sud du Golfe de Gascogne), de Guyane et de Saint-Pierre-et-Miquelon présentent toutes les caractéristiques favorisant des surcotes importantes. Par contre, les surcotes sont défavorisées sur tous les critères à La Réunion et en Polynésie française et sur tous les critères sauf la forme du littoral aux Antilles.

3.2.3 Autres facteurs environnementaux influençant les conditions hydrauliques

La Réunion et la Polynésie française sont exposées aux houles longues australes et connaîtront donc une évolution du climat de houle en relation directe avec la diminution de l'étendue de la glace de mer.

Les îles des Antilles, de La Réunion et de Polynésie française sont bordées de récifs coralliens dont la dégradation par les changements océaniques liés au climat (p. ex., augmentation de la température de l'eau et acidification des océans) constitue un facteur majeur d'aggravation des aléas littoraux.

3.3 Analyse globale de l'évolution de l'aléa

L'évolution de l'aléa sur les littoraux peut être évaluée en considérant conjointement les estimations quantitatives d'évolution du niveau marin, et l'analyse qualitative de la configuration géomorphologique, des événements météo-marins et des facteurs environnementaux, pour la France métropolitaine (Tableau 7) et ses territoires d'outre-mer (Tableau 8).

3.3.1 Evolution de l'aléa sur le territoire européen de la France

Tableau 7 : Récapitulatif des principaux facteurs d'évolution de l'aléa sur les littoraux de France métropolitaine. Les données relatives aux ESL se rapportent à un ESL actuel d'occurrence centennale. La période de référence pour la projection du RSL est 1995-2014. La période de référence pour la projection de l'ESL est 1980-2014. Les facteurs légèrement préjudiciables de l'évolution de l'aléa sont en italique, les facteurs préjudiciables en gras et les facteurs fortement préjudiciables en capital et en gras. Dans la première colonne, ces mêmes polices décrivent l'évolution globale estimée du danger pour chaque littoral.

	Potentiel de surcote associé à la configuration géomorphologique	Évènement météo-marin de référence	Marnage	Surcote centennale (m)	Δ RSL (m) pour SSP5-8.5	Δ ESL (m) pour SSP5-8.5	% Δ ESL pour SSP5-8.5	Période de retour de l'ESL centennal actuel pour SSP5-8.5 (année)
Manche – Mer du Nord	TRES ELEVE	Tempête	<i>Macrotidal</i> (7 à 14 m)	1.0 à 1.6	En 2050 : 0.19 En 2100 : 0.83 à 0.87	En 2050 : 0.21 à 0.23 En 2100 : 0.89 à 1.00	En 2050 : 3.8 à 5 En 2100 : 16 à 21.5	En 2050 : 20 à 28 En 2100 : 0.73 à 0.87
Golfe de Gascogne	Elevé au nord	Tempête	<i>Macrotidal</i> (5 à 7 m)	0.6 à 1.7	En 2050 : 0.16 à 0.17 En 2100 : 0.76 à 0.79	En 2050 : 0.16 En 2100 : 0.74 à 0.77	En 2050 : 4.3 à 5.3 En 2100 : 19.9 à 24.1	En 2050 : 33 à 36 En 2100 : 0.63 à 2.6
	Modéré au sud							
MEDITERRANEE PARTIE OUEST	Elevé à l'ouest	Tempête et exposition modérée aux cyclones	MICROTIDAL (< 2 M)	0.9 à 1.3	En 2050 : 0.16 à 0.17 En 2100 : 0.76 à 0.78	En 2050 : 0.16 à 0.18 En 2100 : 0.75 à 0.78	EN 2050 : 12.5 A 14.6 EN 2100 : 52.5 A 63.2	EN 2050 : 26 A 30 EN 2100 : 0.10 A 0.56
Méditerranée Partie Est	<i>Réduit à l'est</i>							

A l'horizon 2100, dans le scénario SSP5-8.5, les augmentations du RSL et de l'ESL sur les trois façades maritimes sont assez similaires en valeur absolue, avec des valeurs médianes comprises entre 0.74 et 1.0 m, les plus fortes estimations correspondant aux littoraux de Manche et Mer du Nord. L'effet de ces augmentations est cependant sensiblement différent pour chacune des façades maritimes, en fonction du type d'événement météo-marin, du marnage et de la hauteur de la surcote :

- en Manche et mer du Nord, le régime macrotidal et les tempêtes produisent une forte variabilité des niveaux marins. L'augmentation de 0.9 à 1.0 m de l'ESL centennal ne représente que 16 à 22 %. Le facteur de surélévation est donc relativement faible. Par contre, l'augmentation du RSL suffit à ce qu'un ESL de période de retour actuelle 100 ans, ait une période de retour inférieure à un an (facteur d'amplification supérieur à 100) ;
- dans le golfe de Gascogne, la situation est assez similaire, mais avec une amplitude de marée et une surcote plus petites (surtout sur le littoral des Pyrénées Atlantiques où le marnage maximal est de l'ordre de 5 m et la surcote centennale de l'ordre de 0,6 m). Dans ces conditions, l'augmentation de 0,75 m de l'ESL centennal correspond à une augmentation relative comprise entre 20 et 24 % et surtout, un ESL actuellement centennal devrait se produire en moyenne une à deux fois par an (facteur d'amplification compris entre 50 et 100) ;
- en Méditerranée, la situation est nettement aggravée par la très faible variabilité du niveau marin (régime microtidal et petites surcotes). Il en résulte que l'augmentation de 0,77 m de l'ESL centennal correspond à une forte augmentation relative (supérieure à 50%) et que l'ESL actuellement centennal devrait se produire de 2 à 10 fois par an (facteur d'amplification compris entre 500 et 1000).

A l'horizon 2050, la surélévation de l'ESL centennal sera de l'ordre de 5% en Manche-Mer du Nord et dans le golfe de Gascogne. En Méditerranée, cette augmentation sera déjà de l'ordre de 12 à 15%. Cependant, l'évolution de la situation sera surtout perceptible dans l'augmentation de la fréquence des ESL (d'un facteur compris entre 3 et 4).

En complément de cette analyse quantitative, l'analyse qualitative montre que les configurations géomorphologiques des trois façades maritimes métropolitaines (sauf sur la moitié Est de la façade méditerranéenne et la partie sud du Golfe de Gascogne) favorisent la formation des surcotes, tant par la largeur des plateaux continentaux, que par la longueur et la forme des façades maritimes. Sur ces littoraux, une modification des caractéristiques des tempêtes pourrait donc engendrer de fortes augmentations des surcotes. En particulier, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans en Méditerranée occidentale tel que prévu par Romero et Emanuel (2016), aggraverait fortement les risques côtiers. L'analyse de la surcote observée en 2010 lors du passage de la tempête Xynthia dans le golfe de Gascogne démontre la vulnérabilité des littoraux à des phénomènes météo-marins inhabituels (Bertin et al., 2012). Le centre dépressionnaire de cette tempête a suivi une trajectoire orientée vers le nord-est, contrastant avec les trajectoires des autres tempêtes orientées dans le secteur est à sud-est. Malgré sa faible intensité, cette tempête a provoqué d'importantes submersions marines en France (Cerema, 2016).

Il convient enfin de rappeler que les facteurs d'amplification relatifs aux ESL (qui atteindront en 2100 sur les côtes de la France métropolitaine des valeurs comprises entre 50 et 1000) doivent être distingués de l'évolution des événements extrêmes tels que les tempêtes, cyclones et tsunamis qui ne devraient pas connaître d'évolutions aussi marquées de leur fréquence et de leur intensité que les ESL. Pour autant, même dans l'hypothèse où la fréquence et l'intensité des événements météo-marins étaient stables, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des ESL augmenterait les effets de ces événements sur les côtes.

3.3.2 Evolution de l'aléa sur les territoires ultramarins de la France

Tableau 8 : Équivalent au tableau 7, mais pour les côtes des territoires d'outre-mer français.

	Potentiel de surcote associé à la configuration géomorphologique	Autres facteurs régionaux d'évolution	Évènement météo-marin de référence	Marnage	Surcote centennale (m)	ΔRSL (m) pour SSP5-8.5	ΔESL (m) pour SSP5-8.5	%ΔESL pour SSP5-8.5	Période de retour de l'ESL centennal actuel pour SSP5-8.5 (année)
Saint-Pierre (Saint-Pierre-et-Miquelon)	Elevé	<i>Aucun</i>	Tempête et exposition modérée aux cyclones	MICRO-TIDAL (< 2 M)	1 à 2	En 2050 : 0,19 En 2100 : 0,83	En 2050 : 0,24 En 2100 : 0,92	En 2050 : 8,4 En 2100 : 31,8	EN 2050 : 18 EN 2100 : 0,3
POINTE-A-PITRE (GUADELOUPE)	<i>Faible</i>	Dégradation des récifs coralliens	TEMPETE ET CYCLONE	MICRO-TIDAL (< 2 M)	1 à 3	En 2050 : 0,20 En 2100 : 0,90	En 2050 : 0,22 En 2100 : 0,91	En 2050 : 14,1 En 2100 : 58,1	EN 2050 : 35 EN 2100 : 0,1
Cayenne (Guyane)	Modéré	<i>Aucun</i>	<i>Alizés (sans tempête)</i>	Mésotidal (2 à 4 m)	0,4	En 2050 : 0,20 En 2100 : 0,90	En 2050 : 0,18 En 2100 : 0,85	En 2050 : 10,6 En 2100 : 49,2	EN 2050 : 7,5 EN 2100 : 0,1
POINTE DES GALETS (LA REUNION)	<i>Très faible</i>	Dégradation des récifs coralliens Diminution de l'étendue de la glace de mer	TEMPETE ET CYCLONE + HOULES LONGUES + EXPOSITION MODEREE AUX TSUNAMIS	MICRO-TIDAL (< 2 M)	1 à 3	En 2050 : 0,19 En 2100 : 0,92	En 2050 : 0,16 En 2100 : 0,88	En 2050 : 9,3 En 2100 : 52,5	EN 2050 : 58 EN 2100 : 0,1
PAPEETE (POLYNESIE FRANÇAISE)	<i>Très faible</i>	Dégradation des récifs coralliens Diminution de l'étendue de la glace de mer	TEMPETE ET CYCLONE + HOULES LONGUES + EXPOSITION MODEREE AUX TSUNAMIS	MICRO-TIDAL (< 2 M)	1 à 3	En 2050 : 0,20 En 2100 : 0,91	En 2050 : 0,23 En 2100 : 0,95	EN 2050 : 17,8 EN 2100 : 74,7	EN 2050 : 16 EN 2100 : 0,1

En 2100, l'analyse quantitative montre que pour le scénario SSP5-8.5 :

- les littoraux des Antilles, de La Réunion, et de la Polynésie Française sont microtidaux (<2 m), mais le passage des cyclones peut cependant générer des surcotes importantes (jusqu'à 3 m). Les facteurs de surélévation (augmentation de 50 à 75%) et d'amplification (augmentation des fréquences de l'ESL centennal actuel de l'ordre de 1000) sont similaires à ceux de la côte méditerranéenne française. Cette évolution des ESL, en intensité et en fréquence, doit cependant être considérée comme plus préoccupante sur ces territoires, du fait des dommages supérieurs que peuvent causer les cyclones tropicaux par rapport aux tempêtes (et aux ouragans méditerranéens) qui atteignent la métropole ;
- le littoral de Saint-Pierre-et-Miquelon est aussi microtidal (< 2 m). Si les vents forts qui soufflent régulièrement sur ces îles peuvent produire des surcotes importantes, la variabilité globale des niveaux marins demeure faible à cause du régime microtidal. La situation est donc similaire à celle de la Méditerranée (y compris l'exposition modérée aux cyclones), avec une estimation d'augmentation plus réduite des ESL comme en attestent les facteurs de surélévation (environ 32%) et d'amplification (environ 300) ;
- le littoral de la Guyane est mésotidal (marnage maximal est 2,9 m), et la surcote maximale enregistrée n'est que de 0,4 m. L'augmentation de la hauteur et de la fréquence des ESL devrait être du même ordre de grandeur que sur les côtes françaises de Méditerranée, qu'aux Antilles ou qu'à La Réunion. Cependant ce littoral proche de l'équateur n'est pas exposé aux événements météo-marins générateurs de fortes houles. L'augmentation des aléas côtiers devrait donc être moindre que sur les autres territoires ultramarins.

A l'horizon 2050, l'évolution de l'aléa devrait être perceptible premièrement du fait de l'augmentation de la fréquence des ESL d'un facteur 2 pour La Réunion, 3 pour les Antilles, 5 pour Saint-Pierre-et-Miquelon, 6 pour la Polynésie française et 13 pour la Guyane. Les évolutions les plus significatives sont celles des territoires dont la variabilité des niveaux marins est faible et qui sont soumis aux tempêtes et aux cyclones (Saint-Pierre-et-Miquelon, La Réunion, les Antilles et la Polynésie française, avec des augmentations respectives de l'ESL centennal de 8, 9, 14 et 18%). Dans cette comparaison, la Polynésie française présente à la fois la plus forte augmentation en fréquence et en intensité de son ESL d'occurrence centennale. La Guyane devrait certes connaître également des évolutions négatives à horizon 2050, mais son climat sans tempête ne devrait pas l'exposer à des épisodes météo-marins catastrophiques.

En complément, l'analyse qualitative montre que les configurations géomorphologiques des territoires d'outre-mer (sauf pour Saint-Pierre-et-Miquelon et la Guyane) ne favorisent pas la formation des surcotes. La situation est aggravée aux Antilles (îles exposées aux cyclones) par la dégradation des récifs coralliens, et à La Réunion et en Polynésie française (îles exposées aux cyclones et aux houles australes) par la dégradation des récifs coralliens et la diminution de l'étendue de la glace de mer.

Enfin, de même que pour les côtes de la France métropolitaine, il convient de distinguer entre les changements de fréquence et d'intensité des ESL et des événements météo-marins extrêmes. Même si les événements météo-marins extrêmes n'augmenteront pas de façon aussi marquée que les ESL, un accroissement des ESL engendrera une augmentation des aléas côtiers.

4 Discussion

L'application de la méthode proposée conduit à améliorer la compréhension des aléas littoraux, en tenant compte du forçage hydrodynamique et du contexte géomorphologique. Ces résultats, considérés conjointement avec les prévisions d'évolution des littoraux soumis aux effets du changement climatique, peuvent éclairer sur l'évolution de l'aléa sur le domaine terrestre.

4.1 Influence des facteurs locaux affectant le littoral

Appréhender l'évolution des aléas côtiers nécessite d'évaluer les évolutions lentes qui se produisent sur des échelles de temps décennales (p. ex. l'élévation du RSL, le réchauffement et l'acidification des océans, les évolutions morphologiques), conjointement avec les événements extrêmes qui se produisent sur des échelles de temps journalières, tels que les tsunamis, les cyclones et les tempêtes (Igigabel et al., 2021).

Cependant, si certains facteurs peuvent être pris en compte à l'échelle régionale (et ont donc été pris en compte par la méthode proposée), d'autres ne peuvent être considérés qu'à des échelles spatiales plus fines à cause des interactions complexes entre la montée du niveau marin et l'évolution morphologique des littoraux. Pour apprécier localement l'évolution de l'aléa, il faut étudier les effets locaux, tels que la subsidence, notamment sur les deltas (Syvitski, 2008). Deuxièmement, la zone littorale est une zone tampon où une multitude de processus et des effets de rétroactions peuvent aussi être déterminants :

- dans les estuaires, l'évolution de la morphologie côtière (bathymétrie, topographie du rivage et aménagements anthropiques) peut influencer, à la hausse ou à la baisse, les phénomènes extrêmes, notamment en modifiant la propagation des ondes de marée et de tempête (Talke et al., 2020) ;
- le long des côtes sableuses, la morphologie côtière est également susceptible d'évoluer en fonction des caractéristiques morphologiques et sédimentaires locales, des aménagements anthropiques, des évolutions climatiques (température, précipitation et vent), des conditions de vague, et de la fréquence des événements, qui a également un impact important sur la capacité d'un système à récupérer entre des événements énergétiques (Masselink et al., 2016). De plus, la direction des vagues est également un paramètre important lié aux effets de transport sédimentaire par la dérive littorale, qui peut changer la forme des littoraux (Ruggiero et al., 2010 ; Casas-Prat and Sierra, 2010) ;
- dans les régions polaires, l'accélération du dégel du pergélisol favorise l'érosion rapide des sédiments riches en glace (Lantuit et al., 2011). La fonte de la glace et la subsidence associée au dégel peuvent entraîner l'instabilité des infrastructures. L'élévation du RSL autour de l'Arctique et le réchauffement de la surface de la mer pourraient contribuer considérablement à ce dégel (Lamoureux et al., 2015).

La surélévation du RSL peut augmenter fortement les aléas côtiers, parce que, sous l'hypothèse que la bathymétrie ne change pas, une augmentation de la profondeur d'eau peut engendrer des conditions de vagues plus sévères près de la côte. Les impacts côtiers des ESL sont en grande partie dus à des effets accrus des vagues, entraînant potentiellement des changements morphologiques et de l'érosion, ainsi que des défaillances de la protection côtière, des débordements et des franchissements (CIRIA et al., 2013; Vousdoukas et al., 2017). De plus, comme l'indiquent Krien et al. (2017), les écosystèmes côtiers comme les mangroves, les récifs coralliens ou les herbiers marins pourraient ne pas être en mesure de s'adapter aux changements climatiques et aux activités humaines (p. ex., Waycott et al., 2009; Wong et al., 2014), ce qui pourrait avoir d'importantes répercussions sur les aléas côtiers (p. ex., Alongi, 2008; Wong et al., 2014 ; IPCC, 2019). Il faudrait idéalement tenir compte de l'ensemble de ces phénomènes dans l'évaluation de l'évolution de l'aléa et dans la définition des mesures d'adaptation d'un site particulier. Si ceci peut être trop difficile à réaliser à l'échelle régionale, il est nécessaire de le faire à l'échelle locale.

4.2 Compréhension de l'évolution de l'aléa à terre

Sur de nombreux littoraux, l'élévation accélérée du niveau de la mer entraînera probablement la submersion permanente de basses terres non protégées. Des inondations côtières épisodiques plus fréquentes et intenses pourraient également avoir lieu avec les changements à venir des climats de vague et les ondes de tempête. Sur certains sites, cela pourrait aussi provoquer une érosion chronique du littoral (Ranasinghe, 2016). En fonction des littoraux, il peut donc apparaître des phénomènes distincts qui peuvent être classés en utilisant la méthode proposée (caractérisation de l'aléa à l'échelle régionale dans le domaine maritime) et les éclairages des études existantes (caractérisation des phénomènes affectant localement la frange littorale).

Si l'on fait abstraction des actions d'adaptation, l'évolution de l'aléa peut être classée dans l'un des trois principaux scénarios suivants (définis en fonction de la variabilité des niveaux marins et des types d'événements météo-marins, sachant que d'autres facteurs influent également sur l'évolution de l'aléa et doivent être considérés ultérieurement) :

- *Littoraux présentant une faible variabilité des niveaux marins et non-exposés à des événements météo-marins (p. ex., la Guyane).* Une montée du RSL générera probablement une augmentation réduite du risque de submersion rapide par la mer. Cependant, des inondations rapides par des crues fluviales ou par des précipitations intenses demeurent possibles. De plus, la montée progressive du RSL peut engendrer une augmentation de l'érosion (qui se traduit généralement par un recul du trait de côte) et/ou une inondation progressive et permanente des terres basses (*i. e.*, situées sous le niveau de la mer).
- *Littoraux présentant une grande variabilité des niveaux marins et qui sont exposés à des événements météo-marins (p. ex., la façade atlantique de la France métropolitaine).* La montée du RSL générera probablement au fil des années une érosion accrue et une dégradation accrue des systèmes de protection (*i. e.*, les structures anthropiques comme les digues, les perrés, les épis et les brise-lames et les formations naturelles comme les plages, les dunes, les marais salés, les mangroves et les récifs coralliens), même en l'absence d'événements extrêmes. Lors d'un tel événement (résultant de la conjonction d'une tempête, d'un cyclone ou d'un tsunami avec une marée haute de vives-eaux), le risque devrait être augmenté à la fois par l'affaiblissement régulier des systèmes de défense (structures anthropiques et formations naturelles) et par les impacts des vagues renforcés par la montée du RSL.
- *Littoraux présentant une faible variabilité du niveau marin et qui sont exposés à des événements météo-marins (p. ex., Saint-Pierre-et-Miquelon, les Antilles, La Réunion, la Polynésie française).* La montée du RSL générera probablement, à plus court terme, les trois phénomènes décrits dans les cas précédents, à savoir un risque accru d'érosion côtière, un risque accru de submersion rapide et l'inondation permanente des terres basses.

En plus de ces trois principaux scénarios, il existe des littoraux présentant une grande variabilité des niveaux marins et qui sont relativement peu exposés aux événements météo-marins. Sur ces littoraux les aléas devraient augmenter moins rapidement que dans les situations précédentes.

5 Conclusion

Les évolutions des niveaux marins (RSL et ESL) sont soumises à de fortes incertitudes à l'échelle globale (développement économique, émission de GES, réaction des calottes glaciaires) et aux échelles régionales ou locales (réaction des littoraux aux évolutions climatiques et à la modification du climat de vagues). Les estimations quantitatives sur les évolutions des niveaux marins sont nécessaires, mais devraient aussi être remises en perspective avec des facteurs descriptifs de l'état et de l'évolution du milieu littoral. La méthode proposée pour évaluer l'évolution des aléas littoraux est basée sur ce principe, soulignant l'importance de prendre en compte les évolutions du niveau marin ; la configuration géomorphologique ; les types de phénomènes météo-marins ; et, le cas échéant, des évolutions additionnelles du milieu marin modifiant les conditions hydrodynamiques (en particulier, au niveau des tropiques ou des pôles).

L'application de cette méthode à un échantillon de littoraux français a montré des différences dans les prévisions d'évolution des aléas côtiers.

L'étude de la variabilité des niveaux marins par une approche quantitative a confirmé les résultats d'études précédentes, à savoir la plus forte augmentation des ESL sur les littoraux dont le marnage et les surcotes sont faibles. C'est le cas, pour les territoires français d'outre-mer et, en France métropolitaine, pour la façade méditerranéenne. L'augmentation des ESL, en intensité et en fréquence, devrait être moindre sur les côtes aux forts marnages (façades métropolitaines de l'océan Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord).

En complément des résultats obtenus sur les ESL par des approches quantitatives, l'approche qualitative permet d'évaluer de manière plus complète l'évolution des aléas littoraux.

Premièrement, le type d'événement météo-marin est déterminant : les côtes non exposées aux événements extrêmes (tempêtes, cyclones, houles longues ou tsunamis), même si elles sont en régime microtidal (p. ex., la Guyane), devraient connaître une augmentation modérée des aléas en comparaison des côtes exposées. Toutes les autres caractéristiques étant égales (configurations géomorphologiques, évolutions environnementales et conditions de marnage), l'aléa augmentera plus rapidement sur les côtes exposées aux cyclones (les Antilles, la Réunion, et la Polynésie française) que sur les côtes exposées aux tempêtes (façade méditerranéenne).

Deuxièmement, certaines configurations géomorphologiques (les longues façades maritimes, de formes concaves et bordées par un large plateau continental) favorisent la génération des surcotes lors des événements extrêmes. Ces critères contribuent à identifier les littoraux les plus vulnérables aux changements de caractéristiques des événements extrêmes (en particulier de leurs trajectoires). Ce résultat est important, car les approches quantitatives reposent sur des scénarios d'évolution du climat, ce qui ne représente donc qu'une partie des évolutions possibles. L'application de ces deux approches, quantitative et qualitative, au cas des territoires français permet de distinguer plusieurs cas de figures : certains littoraux bénéficient d'une forte variabilité des niveaux marins ce qui constitue une caractéristique positive pour limiter les effets de la montée du RSL, mais présentent en revanche des caractéristiques géomorphologiques favorisant les surcotes (p. ex., les côtes de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord). D'autres littoraux devraient être désavantagés à la fois par la faible variabilité du niveau marin (faible marnage et surcote modérée) et par une configuration géomorphologique favorisant les surcotes (p. ex., la partie Ouest de la façade méditerranéenne et les littoraux de formes concaves des Antilles). Enfin, certains littoraux présentent l'inconvénient d'une faible variabilité du niveau marin, sans toutefois favoriser les surcotes par leurs configurations géomorphologiques (p. ex., la partie est de la façade méditerranéenne). Cette analyse souligne la nécessité d'étudier non seulement la variabilité des niveaux d'eau, mais aussi l'exposition actuelle et future aux événements météo-marins.

Troisièmement, la dégradation des récifs coralliens dans les tropiques, et la diminution de l'étendue de la glace de mer dans les régions polaires peuvent changer significativement les actions hydrauliques et leurs impacts sur la côte.

Ces résultats constituent une avancée substantielle, non seulement parce qu'ils sont obtenus par une approche globale et systémique qui impose une prise de recul, mais aussi parce que la méthode proposée utilise des facteurs pour lesquels l'incertitude dans les projections est la plus faible : la configuration géomorphologique du plateau continental à l'échelle régionale sera invariable à l'échelle des siècles, les régimes de marnage seront stables à l'échelle régionale, le changement climatique aura un impact sur les récifs coralliens (Albright et al., 2018 ; Hoegh-Guldberg et al., 2007) et sur l'étendue de la glace de mer (Forbes, 2011). Cependant, l'évolution locale des conditions climatiques et plus particulièrement les évolutions sur les trajectoires des tempêtes et des cyclones constituent un domaine sur lequel les incertitudes demeurent particulièrement élevées (IPCC, 2023b).

In fine, les impacts des évolutions du niveau marin sur les communautés humaines sont évalués en considérant de façon complémentaire les effets locaux sur les formations naturelles et les structures anthropiques. Ces analyses visent à prévoir les types d'aléa (érosion, submersion rapide et/ou inondations permanentes des terres basses) qui augmenteront le plus sur les divers territoires littoraux. Les littoraux devraient être marqués par une augmentation quasi-généralisée des risques d'érosion des formations naturelles et d'affaiblissement des structures anthropiques. Cependant, des différences devraient apparaître à l'échelle régionale ou locale sur les types de submersion : les littoraux dont la variabilité des niveaux marins est élevée subiront principalement des effets des submersions rapides, tandis que les littoraux dont la variabilité du niveau marin est faible seront affectés principalement par la submersion permanente des terres basses, doublée, en cas d'exposition aux événements météo-marins extrêmes, de submersions rapides.

Pour aller au-delà de l'approche systémique proposée ici, une étude complémentaire pourrait être réalisée (i) par une évaluation consensuelle fondée sur des études bibliographiques (approche du GIEC) de chacun des facteurs déterminants identifiés ou (ii) par une approche d'apprentissage automatique (Machine learning) pour explorer les avantages supplémentaires de l'intelligence artificielle (IA). En plus des résultats des modèles hydrodynamiques à grande échelle et d'autres données environnementales, les analyses peuvent intégrer les résultats des méthodes d'apprentissage profond. L'apprentissage automatique peut être un outil puissant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et aider la société à s'adapter aux changements climatiques (Kaack et al., 2021; Rolnick et al., 2022). L'IA a déjà fourni des résultats intéressants dans le domaine de l'hydrologie (Kumar et al., 2023) et des inondations côtières (Tiggeloven et al., 2021; Jones et al., 2023).

En parallèle des recherches sur les approches systémiques, l'évaluation des niveaux d'eau demeure un sujet essentiel. Les efforts futurs pourraient bénéficier des développements récents sur la modélisation océanique comme la nouvelle génération de modèle global de marées et de surcotes version 3.0 (en anglais, Global Tide and Surge Model Version 3.0 (GTSMv3.0)), qui peut être utilisée pour simuler dynamiquement les marées, les ondes de tempête et les changements de MSL, y compris les effets d'interaction (Muis et al., 2020), ou le nouveau modèle global, entièrement couplé et non structuré de Mentaschi et al. (2023), qui associe vagues, ondes de tempête et marées.

6 Disponibilité du code

Le code Delft3D-FM est actuellement disponible sur : <http://oss.deltares.nl> (Open Source Community, 2024). La description du modèle WW3 est disponible sur : <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/> (NWS, 2024). Le code appliqué aux statistiques de valeurs extrêmes non stationnaires (Mentaschi et al., 2016) est disponible sur : <https://github.com/menta78/tsEva> (Mentaschi et al., 2024).

7 Disponibilité des données

Les données ESL mondiales qui étayent les résultats de cette étude sont disponibles dans le référentiel LISCoAsT de la collection de données du JCR (<http://data.jrc.ec.europa.eu/collection/LISCOAST>) via ce lien : <http://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-liscoast-10012>, avec les identifiants suivants : <https://doi.org/10.2905/jrc-liscoast-10012>; PID : <http://data.europa.eu/89h/jrc-liscoast-10012>

8 Contribution des auteurs

MI et MY ont conçu le document. MV a développé le code du modèle et effectué les simulations. MI a préparé le manuscrit avec les contributions de tous les co-auteurs.

9 Intérêts concurrents

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

10 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Xavier Bertin, Directeur de recherche CNRS au laboratoire Littoral ENVironnement et Sociétés (LIENSs) pour ses commentaires sur le manuscrit et pour avoir partagé les données de hauteur d'eau et de vagues des services nationaux d'observation ReefTEMPS et DYNALIT.

Les auteurs tiennent également à remercier le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), ainsi que Anne-Laure Tiberi-Wadier (Cerema) et Xavier Kergadallan (Cerema) pour leurs contributions à la recherche bibliographique.

11 Références

Albright, R., Takeshita, Y., Koweek, D., Ninokawa A., Wolfe K., Rivlin T., Nebuchina Y., Young J. and Caldeira K.: Carbon dioxide addition to coral reef waters suppresses net community calcification, *Nature* 555, 516–519, <https://doi.org/10.1038/nature25968>, 2018.

Allgeyer, S., Daubord, C., Hébert, H., Loevenbruck, A., Schindelé, F., and Madariaga, R.: Could a 1755-like tsunami reach the French Atlantic coastline? constraints from twentieth century observations and numerical modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 170(9–10), 1415–1431, 2013.

Allgeyer, S., Quentel, É., Hébert, H., Gailler, A. and Loevenbruck, A.: Tsunami Hazard in La Réunion Island (SW Indian Ocean): Scenario-Based Numerical Modelling on Vulnerable Coastal Sites. *Pure Appl. Geophys.* 174, 3123–3145. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1632-9>, 2017.

Alongi, D. M.: Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and response to global climate change, *Estuar. Coast. Shelf S.*, 76, 1–13, 2008.

Almar, R., Ranasinghe, R., Bergsma, E.W.J., Diaz, H., Melet, A., Papa, F., Vousdoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P. and Kestenare E.: A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping. *Nat Commun.* 12, 3775. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24008-9>, 2021.

Androulidakis, Y. S., Kombiadou, K. D., Makris, C. V., Baltikas, V. N., and Krestenitis, Y. N.: Storm surges in the Mediterranean Sea: Variability and trends under future climatic conditions. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 71, 56–82. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.06.001>, 2015.

Arns A., Wahl T., Dangendorf S., Jensen J. : The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. *Coast Eng* 96:118–131. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.002>, 2015

Arns, A., Wahl, T., Wolff, C., Vafeidis A., Haigh I., Woodworth P., Niehüser S. and Jensen J.: Non-linear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts. *Nat Commun* 11, 1918. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15752-5>, 2020.

Aubanel, A., Marquet, N., Colombani, J.M., and Salvat, B.: Modifications of the shore line in the Society islands (French Polynesia). *Ocean and Coastal Management*, 42, 419–438, 1999.

Aucan J., Hoeke R. K., Storlazzi C. D., Stopa J., Wandres M., and Lowe R.: Waves do not contribute to global sea-level rise. *Nature Clim Change* 9, 2. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0377-5>, 2019.

Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P., and Cooke, R. M.: Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(23), 11195–11200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>, 2019.

Bardet, L., Duluc, C.-M., Rebour, V., and L'Her, J.: Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1627–1639, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1627-2011>, 2011.

Barriot, J-P., Zhang, F., Ducarme, B., Wöppelmann, G., André, G. & Gabillon, A.: A database for sea-level monitoring in French Polynesia. *Geoscience Data Journal*, 10, 368–384. Available from: <https://doi.org/10.1002/gdj3.172>, 2023.

Becker, M., Meyssignac, B., Letetrel, C., Llovel, W., Cazenave, A., and Delcroix, T.: Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. *Global and Planetary Change*, 80–81, 85–98. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.09.004, 2012.

Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-Fr., Fortunato, A. and Karpytchev, M.: Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay, *Ocean Modelling*, Volume 42, Pages 16-30, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.11.001>, 2012.

Bertin X., Li K., Roland A., Zhang Y.J., Breilh J.-F. and Chaumillon E.: A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay. *Coast Eng* 94:80–89, 2014.

Bertin, X., Li K., Roland A., and Bidlot J.-R.: The contribution of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay, *Continental Shelf Research*, 96, 1-15, doi:10.1016/j.csr.2015.01.005, 2015.

Bertin, X., Martins, K., de Bakker, A., Chataigner T., Guérin T., Coulombier T., de Viron O.: Energy transfers and reflection of infragravity waves at a dissipative beach under storm waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015714. <https://doi.org/10.1029/2019JC015714>, 2020.

Bowen, A. J., Inman, D. L. and Simmons, V. P.: Wave 'set-down' and set-up, *J. Geophys. Res.*, 73, 2569–2577, doi:10.1029/JB073i008p02569, 1968.

Brivois O., Idier D., Thiébot J., Castelle B., Le Cozannet G., Calvete D.: On the use of linear stability model to characterize the morphological behaviour of a double bar system. Application to Truc Vert beach (France). *CR Geosci* 344:277–287. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.02.004>, 2012.

Buchanan, M.K., Kopp R.E., Oppenheimer M. and Tebaldi C.: Allowances for evolving coastal flood risk under 41 uncertain local sea-level rise, *Climatic Change*, 137, 347–362, doi:10.1007/s10584-016-1664-7, 2016.

Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., and Garcin, M.: How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at La Rochelle (France), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1135–1147, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1135-2015>, 2015.

Calafat, F.M., Wahl, T., Tadesse, M.G. and Sparrow, S.N.: Trends in Europe storm surge extremes match the rate of sea-level rise, *Nature* 603, 841–845. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04426-5>, 2022.

Campins, J., Genovés, A., Picornell, M. A., and Jansà, A.: Climatology of Mediterranean cyclones using the era-40 dataset. *International Journal of Climatology*, 31(11), 1596–1614. <https://doi.org/10.1002/joc.2183>, 2011.

Casas-Prat, M. and Sierra, J. P.: Trend analysis of the wave storminess: the wave direction, *Adv. Geosci.*, 26, 89–92. <https://doi.org/10.5194/adgeo-26-89-2010>, 2010.

Cavicchia, L., Von Storch, H., and Gualdi, S.: A long-term climatology of medicanes. *Climate Dynamics*, 43, 1183, 1195. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7>, 2014.

Cazenave, A. and Llovel, W.: Contemporary sea level rise. *Ann. Rev. Marine Sci.* 2, 145–173, 2010.

Cazenave, A. and Le Cozannet, G.: Sea level rise and its coastal impacts, *Earth's Future*, 2, 15–34. doi:10.1002/2013EF000188, 2013.

Cerema: Étude des systèmes de protection contre les submersions marines, Collection : Références, ISBN : 978-2-37180-118-9, 442 pages, 2016.

Cerema: Les niveaux marins extrêmes. Ports de métropole, Collection: Données, ISBN : 978-2-37180-308-4, 2018.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 11: Synthèse des connaissances de Saint-Pierre-et-Miquelon, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-341-1, 2020a.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 12: Synthèse des connaissances de Saint-Barthélemy et Saint-Martin, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-342-8, 2020b.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 13: Synthèse des connaissances de l'archipel de Guadeloupe, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-316-9, 2020c.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 14: Synthèse des connaissances de la Martinique, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-343-5, 2020d.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 17: Synthèse des connaissances de La Réunion, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-345-9, 2020e.

Cerema: Dynamiques et évolution du littoral, Fascicule 15: Synthèse des connaissances de la Guyane, Collection: Connaissances, ISBN: 978-2-37180-344-2, 2021.

Chevalier C., Froidefond J.-M. and Devenon J.-L.: Numerical analysis of the combined action of littoral current, tide and waves on the suspended mud transport and on turbid plumes around French Guiana mudbanks, *Continental Shelf Research*, Volume 28, Issues 4–5, Pages 545-560, ISSN 0278-4343, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.09.011>, 2008.

Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., and Unnikrishnan, A. S.: Sea-level rise by 2100. *Science (New York, N.Y.)*, 342(6165), 1445. <https://doi.org/10.1126/science.342.6165.1445-a>, 2013.

Church J. A., Clark P. U., Cazenave A., Gregory J. M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M. A., Milne G. A., Nerem R. S., Nunn P. D., Payne A. J., Pfeffer W. T., Stammer D., Unnikrishnan A. S.: Sea level change, In: *Climate change 2013: the physical science basis*, Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp 1137–1216, [DOI: 10.1126/science.342.6165.1445-a](https://doi.org/10.1126/science.342.6165.1445-a), 2013.

CIRIA, MEDDE, USACE: *The International Levee Handbook*, C731, CIRIA, UK, London, ISBN : 978-0-86017-734-0, 1332 pages, 2013.

Conte, D., and Lionello, P.: Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean sea and their attenuation in future climate scenarios. *Global and Planetary Change*, 111, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.006>, 2013.

Dayan H., Le Cozannet G., Speich S. and Thiéblemont R.: High-End Scenarios of Sea-Level Rise for Coastal Risk-Averse Stakeholders. *Front. Mar. Sci.* 8:569992, doi: 10.3389/fmars.2021.569992, 2021.

De la Torre, Y.: Impacts du cyclone Irma sur le littoral des « îles du Nord » à Saint-Martin et Saint-Barthélemy, Rapport BRGM/RP-67291-FR, 29 p., 20 ill., 2 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67291-FR.pdf> (last access date : 06/06/2024), 2017.

Dietrich, J. C., Bunya, S., Westerink, J. J., Ebersole, B. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., R. Jensen, Resio D. T., Luettich R. A., Dawson C., Cardone V. J., Cox A. T., Powell M. D., Westerink H. J., and Roberts H. J.: A high resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi: part II — synoptic description and analyses of Hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Review* 138, 378–404, <https://doi.org/10.1175/2009MWR2907.1>, 2010.

Dodet, G., Bertin, X., Bouchette, F., Gravelle, M., Testut, L., and Wöppelmann, G.: Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France : Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes, *Journal of Coastal Research*, 88(sp1), 10-24. <https://doi.org/10.2112/SI88-003.1>, 2019.

Dorville, J.-F. M. and Zahibo, N.: Hurricane Omar Waves Impact on the West Coast of the Guadeloupe Island, October 2008, *Open Oceanography Journal*, 4, 83–91, 2010.

DREAL Nord Pas-de-Calais: Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas de Calais. Phase 1: Compréhension du fonctionnement du littoral, https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/50292_-_sub_npc_-_phase_1_-_version_4.pdf, last access: 08 February 2024.

Durand, F.: Hydrodynamique sédimentaire sur le plateau insulaire de la Martinique, Thèse doctorale, Université Bordeaux 1. 214 p., <https://archimer.ifremer.fr/doc/00105/21587/19167.pdf> (last access date : 06/06/2024), 1996.

Elkut, A. E., Taha, M. T., Abu Zed, A. B. E., Eid, F. M., and Abdallah, A. M.: Wind-wave hindcast using modified ECMWF era-interim wind field in the Mediterranean sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 252, 107267. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107267>, 2021.

Erkens, G., Bucx, T., Dam, R., De Lange, G. and Lambert, J.: Sinking Coastal Cities. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 189-198, <https://doi.org/10.5194/piahs-372-189-2015>, 2015.

Fita, L., Romero, R., Luque, A., Emanuel, K., and Ramis, C.: Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 41, 56. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-41-2007>, 2007.

Flather, R.A.: Storm surges. In: Steele, J., Thorpe, S., Turekian, K. (Eds.), *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic, San Diego, California, pp.2882–2892, ISBN 9780122274305, <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0124>, 2001.

FLOODsite: Language of risk. Project definitions, Report T34-02-01, Second edition, 55 pp. e-publication on www.floodsite.net. Available online: www.floodsite.net (last access: 06/06/2024), 2009.

Forbes, D.L.: State of the Arctic coast 2010: scientific review and outlook. *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone*, Institute of Coastal Research, <http://arcticcoasts.org/files/sac/state%20of%20the%20arctic%20rept-exec%20summ-high%20res.pdf> (last access: 06/06/2024), 2011.

Formentin, S.M. and Zanuttigh, B.: A new method to estimate the overtopping and overflow discharge at over-washed and breached dikes. *Coast. Eng.*, 140, 240–256. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.08.002>, 2018

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011, 2021.

Frederikse, T., Landerer, F., Caron, Adhikari L. S., Parkes D., Humphrey V. W., Dangendorf S., Hogarth P., Zanna L., Cheng L. and Wu Y.: The causes of sea-level rise since 1900, *Nature* 584, 393–397, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>, 2020.

Garnier, E., Ciavola, P., Armaroli, C., Spencer, T., and Ferreira, O.: Historical analysis of storms events: case studies in France, England, Portugal and Italy, *Coast. Eng.*, 134, 10–23, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.06.014>, 2018.

Gomes da Silva, P., Coco, G., Garnier, R., Klein, A.H.: On the prediction of runup, setup and swash on beaches. *Earth-Sci. Rev.* 204, 103148. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103148>, 2020.

Gratiot N., Gardel A. and Anthony E. J.: Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: Input from ERA-40 wave data and field investigations, *Marine Geology*, Volume 236, Issues 1–2, 2007, Pages 15-26, ISSN 0025-3227, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.013>, 2007.

Graumann, A., Houston, T., Lawrimore, J. H., Levinson, D. H., Lott, N., McCown, S., Stephens, S., Wuertz, D. B.: Hurricane Katrina, A Climatological Perspective. October 2005, Updated August 2006. NOAA's National Climatic Data Center. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/13833> (last access : 06/06/2024), 2006.

Gregory, J.M., Griffies, S.M., Hughes, C.W., Lowe, J. A., Church, J. A., Fukimori, I., Gomez, N., Kopp, R. E., Landerer, F., Le Cozannet, G., Ponte, R. M., Stammer, D., Tamisiea, M. E. and van de Wal, R. S. W.: Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global. *Surv Geophys* 40, 1251–1289, <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z>, 2019.

Haigh I., Nicholls R. and Wells N.: Rising sea levels in the English Channel 1900 to 2100. *Marit Eng* 164(MA2):81–92, 2011.

Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D. F., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D. A., Jänicke, L., Lee, S. B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S., Woodworth, P. L.: The tides they are a-changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2018RG000636. doi:10.1029/2018rg000636, 2019.

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., and Corfee-Morlot, J.: Future flood losses in major coastal cities, *Nature Climate Change*, 3, 802–806, <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>, 2013.

Hamdi, Y., Bardet, L., Duluc, C.-M., and Rebour, V.: Extreme storm surges: a comparative study of frequency analysis approaches, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2053–2067, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2053-2014>, 2014.

Hamdi, Y., Bardet, L., Duluc, C.-M., and Rebour, V.: Use of historical information in extreme-surge frequency estimation: the case of marine flooding on the La Rochelle site in France, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1515–1531, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1515-2015>, 2015.

Hamdi, Y., Garnier, E., Giloy, N., Duluc, C.-M., and Rebour, V.: Analysis of the risk associated with coastal flooding hazards: a new historical extreme storm surges dataset for Dunkirk, France, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 3383–3402, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3383-2018>, 2018.

Hamlington, B. D., Gardner, A. S., Ivins, E., Lenaerts, J. T. M., Reager, J. T., Trossman, D. S., Zaron, E. D., Adhikari, S., Arendt, A., Aschwanden, A., Beckley, B. D., Bekaert, D. P. S., Blewitt, G., Caron, L., Chambers, D. P., Chandanpurkar, H. A., Christianson, K., Csatho, B., Cullather, R. I., DeConto, R. M.,

Fasullo, J. T., Frederikse, T., Freymueller, J. T., Gilford, D. M., Giroto, M., Hammond, W. C., Hock, R., Holschuh, N., Kopp, R. E., Landerer, F., Larour, E., Menemenlis, D., Merrifield, M., Mitrovica, J. X., Nerem, R. S., Nias, I. J., Nieves, V., Nowicki, S., Pangaluru, K., Piecuch, C. G., Ray, R. D., Rounce, D. R., Schlegel, N.-J., Seroussi, H., Shirzaei, M., Sweet, W. V., Velicogna, I., Vinogradova, N., Wahl, T., Wiese, D. N., and Willis, M. J.: Understanding of contemporary regional sea-level change and the implications for the future. *Reviews of Geophysics*, 58, e2019RG000672. <https://doi.org/10.1029/2019RG000672>, 2020.

Han, G., Ma, Z., Chen, D., deYoung B. and Chen N.: Observing storm surges from space: Hurricane Igor off Newfoundland. *Sci Rep* 2, 1010. <https://doi.org/10.1038/srep01010>, 2012.

Hequette A.: Les risques naturels littoraux dans le Nord-Pas-de-Calais, France, *Vertigo*, hors ser. 8, https://cosaco.univ-littoral.fr/wp-content/uploads/2018/03/Hequette_Vertigo_2010.pdf (Last access : 06/06/2024), 2010.

Idier, D., Dumas, F., and Muller, H.: Tide-surge interaction in the English Channel, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3709–3718, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3709-2012>, 2012.

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatziolos, M. E.: Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* (New York, N.Y.), 318(5857), 1737–1742, <https://doi.org/10.1126/science.1152509>, 2007.

Hsu, C.-E., Serafin, K. A., Yu, X., Hegermiller, C. A., Warner, J. C., and Olabarrieta, M.: Total water levels along the South Atlantic Bight during three along-shelf propagating tropical cyclones: relative contributions of storm surge and wave runup, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 3895–3912, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3895-2023>, 2023.

Hunter, J.: A simple technique for estimating an allowance for uncertain sea level rise, *Clim. Change*, 113(2), 239–252, doi:10.1007/s10584-011-0332-1, 2012.

Idier, D., Paris, F., Le Cozannet, G., Boulahya, F., Dumas, F.: Sea-level rise impacts on the tides of the European Shelf, *Continental Shelf Research*, Volume 137, 56-71, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.007>, 2017.

Idier D., Bertin X., Thompson P., and Pickering M. D.: Interactions between mean sea level, tide, surge, waves and flooding: Mechanisms and contributions to sea level variations at the coast. *Surveys in Geophysics*, 40(6):1603–1630, 2019.

Iggabel, M., Diab, Y. and Yates M.: Exploring Methodological Approaches for Strengthening the Resilience of Coastal Flood Protection System. *Front. Earth Sci.* 9:756936. doi: 10.3389/feart.2021.756936, 2021.

Iggabel, M., Nédélec, Y., Bérenger, N., Flouest, N., Bernard, A., Chassé, P., and Tiberi-Wadier, A.-L.: Guidelines for Analysing Coastal Flood Protection Systems After a Submersion. *Water* 14, 15. doi:10.3390/w14010015, 2022.

IPCC: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_en.pdf (last access: 06/06/2024), 2001.

IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp., <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (last access : 06/06/2024), 2007.

IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (last access : 06/06/2024), 2014.

IPCC: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)], Available online: <https://www.ipcc.ch/srocc/> (accessed on 20 December 2021), 2019.

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647, 2023a.

IPCC: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press. chapter, 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013, 2023b.

Jones A., Kuehnert J., Fraccaro P., Meuriot O., Ishikawa T., Edwards B., Stoyanov N., Remy S. L., Weldemariam K., Assefa S. : AI for climate impacts: Applications in flood risk. NPJ Climate and Atmospheric Science 2023;6(1):63. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/ai-climate-impacts-applications-flood-risk/docview/2825541476/se-2>, 2023.

Kaack, L., Donti, P., Strubell, E. and Rolnick, D.: Artificial intelligence and climate change: Opportunities, considerations, and policy levers to align AI with climate change goals. <https://eu.boell.org/en/2020/12/03/artificial-intelligenceand-climate-change>, 2021.

Kennedy, A.B., Westerink, J.J., Smith, J.M., Hope, M.E., Hartman, M., Taflanidis, A.A., Tanaka, S., Westerink, H., Cheung, K.F., Smith, T., Hamann, M., Minamide, M., Ota, A., Dawson, C.: Tropical cyclone inundation potential on the Hawaiian Islands of Oahu and Kauai. Ocean Model. 52–53, 54–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.04.009>, 2012.

Khan, M. J. U., Beld, I., Wöppelmann, G., Testut, L., Latapy, A. and Pouvreau, N.: Extension of a high temporal resolution sea level time series at Socoa (Saint-Jean-de-Luz, France) back to 1875. Earth System Science Data. 15. 5739–5753. 10.5194/essd-15-5739-2023, 2023.

Krien, Y., Dudon, B., Roger, J., and Zahibo, N.: Probabilistic hurricane-induced storm surge hazard assessment in Guadeloupe, Lesser Antilles, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1711–1720, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1711-2015>, 2015.

Krien, Y., Dudon, B., Roger, J., Arnaud, G., and Zahibo, N.: Assessing storm surge hazard and impact of sea level rise in the Lesser Antilles case study of Martinique, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 1559–1571, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1559-2017>, 2017.

Kumar, V., Kedam, N., Sharma, K.V., Mehta, D.J., and Caloiero, T.: Advanced Machine Learning Techniques to Improve Hydrological Prediction: A Comparative Analysis of Streamflow Prediction Models. Water, 15(14):2572. <https://doi.org/10.3390/w15142572>, 2023.

Lamoureux, S., Forbes, D., Bell, T. and Manson, G.: The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic. In: From Science to Policy in the Western and Central Canadian Arctic: an Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization [Stern, G.A. and A. Gaden (eds.)], ArcticNet, Quebec, pp. 300–341, <https://www.researchgate.net/publication/303566204> [The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic](https://www.researchgate.net/publication/303566204) (last access : 07/06/2024), 2015.

Lange, A.M.Z., Fiedler, J.W., Becker, J.M., Merrifield, M.A., Guza, R.T.: Estimating runup with limited bathymetry. *Coast. Eng.*, 172, 104055, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104055>, 2022.

Lantuit, H., Atkinson, D., Overduin P. P., Grigoriev, M., Rachold, V., Grosse, G. and Hubberten, H.: Coastal erosion dynamics on the permafrost-dominated Bykovsky Peninsula, north Siberia, 1951–2006, *Polar Res.*, 30(1), 7341. <https://doi.org/10.3402/polar.v30i0.7341>, 2011.

Larrue S. and Chiron T.: « Les îles de Polynésie française face à l'aléa cyclonique », *Vertigo*, Volume 10 Numéro 3 URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/10558> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.10558>, 2010.

Latapy, A., Arnaud, H., Pouvreau, N., and Weber N.: Reconstruction of sea level changes in Northern France for the past 300 years and their relationship with the evolution of the coastal zone, in: *Coast 2017, Bordeaux, from 7 to 10 November 2017*, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14180.07041>, 2017.

Lavaud, L., Bertin, X., Martins, K., Pezerat, M., Coulombier, T. and Dausse, D.: Wave dissipation and mean circulation on a shore platform under storm wave conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2021JF006466. <https://doi.org/10.1029/2021JF006466>, 2022.

Lecacheux, S., Pedreros, R., Le Cozannet, G., Thiebot, J., De La Torre, Y. and Bulteau, T.: A method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various wave regimes: a case study devoted to Reunion Island, *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, 12(7), 2425-2437, 2012.

Le Cozannet, G., Garcin, M., Petitjean, L., Cazenave, A., Becker, M., Meyssignac, B., Walker, P., Devilliers, C., Le Brun, O., Lecacheux, S., Baills, A., Bulteau, T. Yates, M., and Wöppelmann, G.: Exploring the relation between sea level rise and shoreline erosion using sea level reconstructions: an example in French Polynesia. *Journal of Coastal Research* 65(sp2), 2137-2142. <https://doi.org/10.2112/SI65-361.1>, 2013.

Le Gorgeu, V. and Guitonneau, R. : Reconstruction de la Digue de l'Est à Dunkerque, *Coast. Eng.*, 5, 555–586, <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/2043/1716>, 1954.

Lin, N. and Chavas, D.: On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling, *J. Geophys. Res.*, 117, D09120, doi:10.1029/2011JD017126, 2012.

Lowe J. A., Woodworth P. L., Knutson T., McDonald R. E., McInnes K. L., Woth K., von Storch H., Wolf J., Swail V., Bernier N. B., Gulev S., Horsburgh K. J., Unnikrishnan A. S., Hunter J. R. and Weisse R.: Past and future changes in extreme sea levels and waves. In: Woodworth PL, Aarup T, Wilson WS, Church JA (eds) *Understanding sea-level rise and variability*. Wiley-Blackwell: Chichester. ISBN 978-1-4443-3452-4. xvi, 428 pp., 2010.

Martinez-Asensio, A., Wöppelmann, G., Ballu, V., Becker, M., Testut, L., Magnan, A.K., and Duvat V.K.E.: Relative Sea-level rise and the influence of vertical land motion at tropical Pacific Islands. *Global and Planetary Change*, 176, 132–143. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818118306751>, 2019.

Martins K., Bertin X., Mengual B., Pezerat M., Lavaud L., Guérin T. and Zhang Y.J.: Wave-induced mean currents and setup over barred and steep sandy beaches. *Ocean Modelling*, Volume 179, November 2022, 102110, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102110>, 2022.

Maspataud A., Ruz M.-H. and Vanhée S.: Potential impacts of extreme storm surges on a low-lying densely populated coastline: the case of Dunkirk area, Northern France. *Nat Hazards* 66:1327–1343, 2013.

Masson, A.: The extratropical transition of Hurricane Igor and the impacts on Newfoundland. *Nat Hazards* 72, 617–632. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1027-x>, 2014.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T.,

Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B.: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf (last access : 07/06/2024), 2021.

Masselink, G. and Short, A. D.: "The effect of tidal range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model". *Journal of Coastal Research*. 9 (3): 785–800. ISSN 0749-0208, 1993.

Masselink, G., Castelle, B., Scott T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D. and Floc'h, F.: Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe, *Geophys. Res.Lett.*, 43, 2135–2143, doi:10.1002/2015GL067492, 2016.

Mehta, D., Hadvani, J., Kanthariya, D., and Sonawala, P.: Effect of land use land cover change on runoff characteristics using curve number: A GIS and remote sensing approach. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 16(1), 1-16, 2023.

Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., and Alfieri, L.: The transformed-stationary approach: a generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3527–3547, <https://doi.org/10.5194/hess-20-3527-2016>, 2016.

Mentaschi L, Vousdoukas MI, García-Sánchez G, Fernández-Montblanc T, Roland A, Voukouvalas E, Federico I, Abdolali A, Zhang YJ and Feyen L: A global unstructured, coupled, high-resolution hindcast of waves and storm surge. *Front. Mar. Sci.* 10:1233679. doi: 10.3389/fmars.2023.1233679, 2023.

Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G., and Alfieri, L.: tsEva, GitHub [code], <https://github.com/menta78/tsEva> (last access: 5 June 2024), 2024.

Muis, S., Apecechea, M. I., Dullaart, J., de Lima Rego, J., Madsen, K. S., Su, J., Yan K., and Verlaan M.: A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Frontiers in Marine Science*, 7, 263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>, 2020.

Nicholls, R. J., Hanson, S., Herweijer, C., and Patmore, N.: Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes. *OECD Environment Working Papers*, n° 1, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/011766488208>, 2008.

NWS – National Weather Service: WAVEWATCH III, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch> (last access: 29 May 2024), 2024.

Open Source Community: Delft3D FM., <http://oss.deltares.nl> (last access: 29 May 2024), 2024.

Oppenheimer, M., Glavovic B.C., Hinkel J., van de Wal R., Magnan A.K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R.M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meyssignac B., and Sebesvari Z.: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.)].

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROCC_Ch04_FINAL.pdf (last access : 07/06/2024), 2019.

Pagney, F.: Genèse et dynamique de l'ouragan Hugo sur la Guadeloupe. In: *Annales de Géographie*, t. 100, n°558. pp. 152-165. DOI: <https://doi.org/10.3406/geo.1991.21030>, 1991.

Patlakas, P., Stathopoulos, C., Tsalis, C., and Kallos, G.: Wind and wave extremes associated with tropical-like cyclones in the Mediterranean basin. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1623–E1644. <https://doi.org/10.1002/joc.6795>, 2021.

Pickering M.D., Wells N.C., Horsburgh K.J., Green J.A.M.: The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. *Continental Shelf Research*, Volume 35, 2012, Pages 1-15, ISSN 0278-4343, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.11.011>, 2012.

Pirazzoli, P. A. and Montaggioni, L. F.: Holocene sea level changes in French Polynesia, *Paleogeography, paleoclimatology paleoecology*, 68 (2-4), 153-175, 1988.

Quentel, E., Loevenbruck, A., Hébert, H., and Allgeyer, S.: Tsunami hazard in La Réunion island from numerical modeling of historical events, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 1, 1823–1855, <https://doi.org/10.5194/nhessd-1-1823-2013>, 2013.

Ranasinghe, R.: Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, Volume 160, Pages 320-332, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>, 2016

Rasmussen, D. J., Kulp, S., Kopp, R. E., Oppenheimer M. and Strauss B. H.: Popular extreme sea level metrics can better communicate impacts, *Climatic Change* 170, 30, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03288-6>, 2022.

Rego, J.L., Li, C.: Nonlinear terms in storm surge predictions: effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita. *J. Geophys. Res.*, 115, C06020, <https://doi.org/10.1029/2009JC005285>, 2010.

Rolnick D., Donti P. L., Kaack L. H., Kochanski K., Lacoste A., Sankaran K., Ross A. S., Milojevic-Dupont N., Jaques N., Waldman-Brown A., Luccioni A. S., Maharaj T., Sherwin E. D., Mukkavilli S. K., Kording K. P., Gomes C. P., Ng A. Y., Hassabis D., Platt J. C., Creutzig F., Chayes J., and Bengio Y. : Tackling Climate Change with Machine Learning. *ACM Comput. Surv.* 55, 2, Article 42 (February 2022), 96 pages. <https://doi.org/10.1145/3485128>, 2022.

Romero, R., and Emanuel, K.: Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for north Atlantic polar lows and medicanes based on cmip5 models. *Journal of Climate*, 30(1), 279–299. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0255.1>, 2016.

Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A.: Wave runup, extreme water levels and erosion properties backing beaches. *J. Coast. Res.*, 17, 407–419, 2001.

Ruggiero, P., Buijsman, M., Kaminsky, G. and Gelfenbaum, G.: Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. *Marine Geology* 273, 127-140, 2010.

Saffache, P., Marc, J.-V., and Huyghes-Belrose, V.: *Les cyclones en Guadeloupe : quatre siècles cataclysmiques*, IBIS Rouge Editions, Martinique, ISBN-10 : 2844501974, 2003.

Sahal, A. and Morin, J.: Effects of the October 25, 2010, Mentawai tsunami in La Réunion Island (France): observations and crisis management. *Nat Hazards* 62, 1125–1136. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0136-2>, 2012.

Shaikh, M. M., Lodha, P., Lalwani, P. and Mehta, D.: Climatic projections of Western India using global and regional climate models. *Water Practice & Technology*, 17(9), 1818-1825, 2022.

Sheremet, A., Staples, T., Arduin, F., Suanez, S. & Fichaut, B.: Observations of large infragravity runup at Banneg Island, France, *Geophysical Research Letters*, 41, 976–982, <https://doi.org/10.1002/2013GL058880>, 2014.

Stephens, S.A., Coco, G., Bryan, K.R.: Numerical simulations of wave setup over barred beach profiles: Implications for predictability. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 137 (4), 175–181. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000076](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000076), 2011.

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H.: Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coast. Eng.* 53, 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>, 2006.

Syvitski, J.P.M.: Deltas at risk, *Sustainability Science* 3, 23–32, <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0043-3>, 2008.

Talke, S. A., Familkhalili, R., Helaire, L. T., Jay, D. A., Orton, P. M. and Ralston, D. K.: The influence of human induced landscape and bathymetry changes on tides, surge and extreme water levels, in: *Ocean Sciences Meeting 2020, AGU, 2020, February, 2020*.

Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., D'Anna, M., Idier D., Belmadani A., Slangen A. B. A. and Longueville F.: Chronic flooding events due to sea-level rise in French Guiana. *Sci Rep* 13, 21695. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48807-w>, 2023.

Thiébot J., Idier D., Garnier R., Falquès A., Ruessink G.: The influence of wave direction on the morphological response of a double sandbar system. *Cont Shelf Res* 32:71–85. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.014>, 2012

Tiggeloven, T., de Moel, H., Winsemius, H. C., Eilander, D., Erkens, G., Gebremedhin, E., Diaz Loaiza, A., Kuzma, S., Luo, T., Iceland, C., Bouwman, A., van Huijstee, J., Ligtvoet, W., and Ward, P. J.: Global-scale benefit–cost analysis of coastal flood adaptation to different flood risk drivers using structural measures, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1025–1044, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1025-2020>, 2020.

Tiggeloven, T., Couasnon, A., van Straaten, C., Muis S. and Ward P. J.: Exploring deep learning capabilities for surge predictions in coastal areas. *Sci Rep* 11, 17224. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96674-0>, 2021.

Toomey, T., Amores, A., Marcos, M., Orfila, A., & Romero, R.: Coastal hazards of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC017964. <https://doi.org/10.1029/2021JC017964>, 2022.

Ullmann A., Pirazzoli P. A. and Tomasin A.: Sea surges in Camargue: Trends over the 20th century. *Cont Shelf Res* 27:922–934, 2007.

U.S. Army Corps of Engineers: Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC., <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544g/636F617374616C20656E67696E656572696E67206D616E75616C/> (last access : 07/06/2024), 2002.

van Ormondt, M., Roelvink D., and van Dongeren A.: "A Model-Derived Empirical Formulation for Wave Run-Up on Naturally Sloping Beaches" *Journal of Marine Science and Engineering* 9, no. 11: 1185. <https://doi.org/10.3390/jmse9111185>, 2021.

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., et al.: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>, 2011.

Verma, S., Verma, M. K., Prasad, A. D., Mehta, D., Azamathulla, H. M., Muttil, N., and Rathnayake, U.: Simulating the Hydrological Processes under Multiple Land Use/Land Cover and Climate Change Scenarios in the Mahanadi Reservoir Complex, Chhattisgarh, India. *Water*, 15(17), 3068, <https://doi.org/10.3390/w15173068>, 2023.

Vitousek S., Barnard P. L., Fletcher C. H., Frazer N., Erikson L., and Storlazzi C. D.: Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7(1), <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>, 2017.

Voudoukas, M., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A., and Feyen, L.: Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics*, 47, 3171, 3190. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3019-5>, 2016.

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., and Feyen, L.: Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5, 304–323. doi:10.1002/2016EF000505, 2017.

Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson L. P. & Feyen, L.: Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat Commun* 9, 2360. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>, 2018.

Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T., and Williams, S. L.: Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 12377–12381, 2009.

Webb, A.P. and Kench, P.S.: The dynamic response of reef islands to sea level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change*, 72, 234–246, 2010.

Weisse R., von Storch H., Niemeier H.D. and Knaack H.: Changing North Sea storm surge climate: an increasing hazard? *Ocean Coast Manag* 68:58–68, 2012.

Wong, P. P., Losada, I. J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., K. L. McInnes, Saito, Y., and Sallenger, A.: Coastal systems and low-lying areas, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 361–409, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.010>, 2014.

Yates M., Le Cozannet G., Garcin, M., Salai, E. and Walker, P.: Multi-decadal shoreline change on Manihi and Manuae, French Polynesia. *Journal of Coastal Research*, 29, 870-882, <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00129.1>, 2013.

Zahibo, N., Pelinovsky, E., Talipova, T., Rabinovich, A., Kurkin, A., and Nikolkina, I.: Statistical analysis of cyclone hazard for Guadeloupe, Lesser Antilles, *Atmos. Res.*, 84, 13–29, 2007.