

Auteur : Bernard Alexis Ingénieur d'études Cerema

Adaptation au changement climatique des ports : apport d'une caractérisation approfondie de l'élévation du niveau marin

Résumé :

Pour anticiper ses effets, réduire la vulnérabilité des territoires et favoriser leur résilience, le Cerema se mobilise pour l'adaptation au changement climatique sous différents angles (approches territoriales, approches patrimoniales sur des parcs d'infrastructures, ou approches plus ponctuelles). Le Cerema est régulièrement sollicité par les gestionnaires d'infrastructures (routières, ferroviaires...) et, pour ce qui fait l'objet de cet article, portuaires souhaitant être accompagnés d'experts techniques pour entreprendre des démarches d'adaptation au changement climatique. Quand il s'agit d'accompagner les acteurs portuaires dans une démarche d'adaptation, il est capital de rendre très concret les effets attendus du changement climatique et particulièrement de la hausse du niveau marin. L'étape d'analyse de l'exposition actuelle et sous scénarios futurs est à la fois relativement complexe pour un public plus ou moins spécialiste des niveaux marins mais combien déterminante dans la démarche globale d'adaptation et d'analyse de risques. Au cours de travaux récents (et encore en cours) sur le sujet, un certain nombre d'outils et produits caractérisant l'exposition à l'élévation des niveaux marins ont pu être mis en œuvre (tableurs, cartes, SIG). Le choix d'éléments accessibles et pertinents est décisif pour éclairer les gestionnaires sur l'exposition actuelle et future de son port et/ou des objets et fonctionnalités associées. Ces outils sont aussi particulièrement intéressants car ils permettent de se projeter sur les étapes mobilisant fortement les gestionnaires pour avancer dans leur démarche : à savoir réfléchir et s'exprimer sur les sensibilités associées aux objets/fonctionnalités et tendre vers une caractérisation des vulnérabilités, du risque et in fine des mesures d'adaptations qui ne se traduisent pas systématiquement par une rehausse (pas toujours faisable techniquement).

Mots clés : Niveaux marins, adaptation au changement climatique, ports.

1. Introduction et enjeux

1.1 La résilience des infrastructures portuaires et leur adaptation au changement climatique : un cadre méthodologique déjà existant

Le Cerema a déjà travaillé pour différents gestionnaires sur le sujet de la résilience et de l'adaptation au changement climatique des infrastructures (routières, ferroviaires, portuaires ...) à partir notamment d'une méthodologie nationale développée pour les infrastructures de transport [1]. Cette méthode a notamment été appliquée pour la première fois dans un port avec le Grand Port Maritime de Bordeaux entre 2018 et 2020 [3].

La méthode offre un cadre global générique (cf. Figure 1) présentant néanmoins une souplesse indispensable et nécessitant d'être adapté à chaque gestionnaire selon ses besoins. La méthode peut aussi être déroulée de manière itérative et avec différents niveaux de précisions.

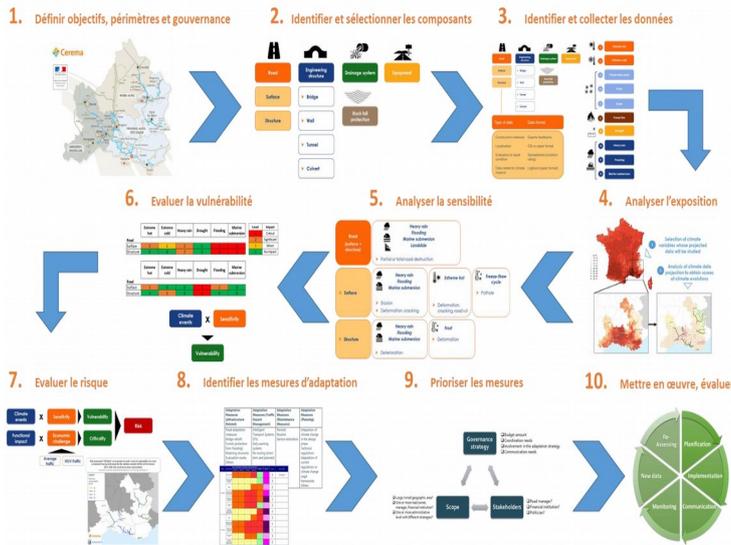


Figure 1 - Méthode d'adaptation au CC adaptée aux infrastructures de transport en dix étapes [1]

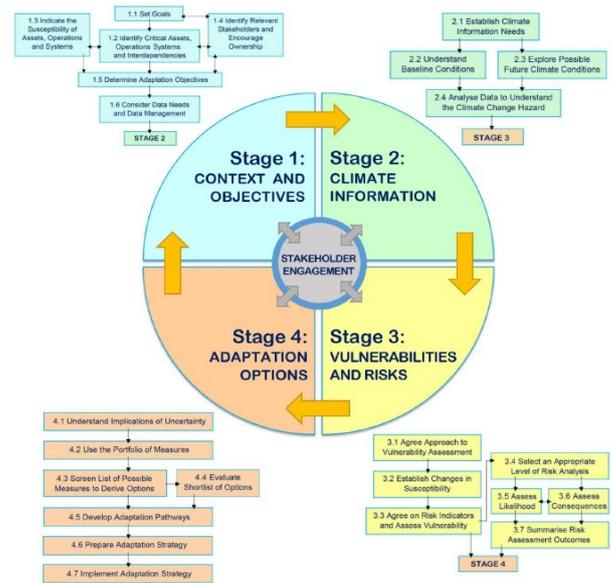


Figure 2 - Méthode d'adaptation au changement climatique en quatre étapes [13]

Dans le même temps, une méthode d'adaptation a été diffusée par l'AIPCN [13] (cf. Figure 2). Celle-ci s'accompagne d'études de cas tirés d'expériences à l'international.

Les deux méthodes découlent des méthodes d'analyses de risques. Elles présentent de nombreux points communs. Elles peuvent toutes deux se décomposer en quatre grands blocs :

- Une grande étape de définition des objectifs, des périmètres (physiques, géographiques, des infra, des fonctionnalités, des aléas...): étapes 1 à 3 de la méthode Cerema / 1 de la méthode AIPCN) ;
- Une étape de caractérisation des expositions aux aléas étudiés : étape 4 de la méthode Cerema / 2 de la méthode AIPCN ;
- Une étape de caractérisation des sensibilités, vulnérabilités, risques : étapes 5 à 7 de la méthode Cerema / 3 de la méthode AIPCN ;
- Une étape d'identification, priorisation, mise en œuvre : étapes 8 à 10 de la méthode Cerema / 4 de la méthode AIPCN.

Les méthodes diffèrent légèrement sur le vocabulaire employé (différences explicables par la difficulté de transposition) et la présentation fine des étapes.

Ces méthodes sont souvent présentées et illustrées par des études globales abordant l'ensemble (ou du moins un large panel) des aléas climatiques affectant ou pouvant affecter, sous effet du changement climatique, les infrastructures.

En contrepartie de cette logique d'ensemble (multi-aléa), la méthode peut apparaître comme s'appuyant sur une démarche purement qualitative et macro là où une approche quantitative peut sembler utile sur certains aléas. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne l'élévation du niveau marin qui revêt une importance capitale lorsqu'il s'agit de conduire de telles études sur des infrastructures portuaires.

1.2 La connaissance sur les niveaux marins et projections d'élévation future

Dans le même temps, le Cerema est un acteur reconnu sur la caractérisation des niveaux marins sur les ports et le littoral français. En collaboration avec le SHOM (référent sur la collecte et la diffusion des niveaux marins in situ), le Cerema produit les rapports de référence sur l'évaluation des niveaux marins extrêmes ([2]). Par conséquent, le Cerema produit des distributions statistiques de référence permettant une caractérisation du spectre complet des pleines mers (allant des pleines mers fréquemment rencontrées à des événements extrêmes) assorties d'intervalles de confiance indispensables à une caractérisation rigoureuse.

Les travaux sur les évolutions futures du niveau marin sont assez connus du grand public au gré des publications scientifiques et particulièrement des rapports du GIEC. Ce sont ces travaux qui alimentent notre connaissance et seront utiles à nos projections.

1.3 Travaux réalisés

Les travaux réalisés et présentés ici ont particulièrement concerné l'étape de caractérisation de l'exposition à l'aléa « hausse des niveaux marins ». Dans la méthode Cerema, cela correspond à l'étape 4 de la méthode « analyser l'exposition » (ici à un aléa en particulier et avec un degré d'approfondissement important). Dans la méthode AIPCN, les travaux s'inscrivent dans l'étape 2 « Climate information ».

Le travail présenté s'adresse particulièrement aux gestionnaires portuaires souhaitant une caractérisation à la fois rapide à mettre en œuvre et complète pour un travail approfondi sur les expositions actuelle et futures aux niveaux marins avec un apport particulier en termes de sensibilisation sur les questions d'exploitation.

Ces travaux facilitent la fusion entre le cadre méthodologique global (approche souvent « ensembliste ») et les analyses statistiques sur les niveaux marins (approche souvent « experte »). Le but du travail était de fournir un outil permettant de manipuler un grand nombre de scénarios (panel quasi infini), dans un cadre probabiliste (les distributions actuelles des niveaux marins et les scénarios futurs d'élévation sont assortis d'intervalles de confiance) tout en restant accessible en facilitant la compréhension de notions parfois complexes (probabilité de non dépassement ou période de retour).

2. Outils de caractérisation approfondie de l'élévation du niveau marin

2.1 Quel outil développer pour aborder l'exposition actuelle et les expositions futures à l'élévation du niveau marin dans le contexte des études d'adaptation au CC ?

2.1.1 De quelles connaissances préalables dispose-t-on ?

La plupart du temps, les gestionnaires portuaires sont sensibilisés aux effets de l'élévation des niveaux marins. Pour autant, le degré de connaissance varie considérablement selon les situations. Les valeurs d'élévation futur du niveau marin sont souvent connues notamment par les services ayant eu à faire des dimensionnements récents ou s'interrogeant sur les règles de conceptions. Pour certains ports, des études sur les risques tels que les PPRL peuvent avoir sensibilisé sur les expositions futures. Néanmoins, dans de nombreuses situations, la connaissance se limite à un nombre limité de scénarios futurs apportant un éclairage limité et insuffisant pour se lancer dans une analyse complète des vulnérabilités.

2.1.2 Limite de l'approche cartographique ou par modélisation d'un événement

Lorsqu'il s'agit de modéliser ou simplement de cartographier les conséquences d'un scénario d'élévation du niveau marin, la première difficulté est de choisir des scénarios représentatifs parmi un panel quasi infini. En effet, pour aboutir à une carte, il faut fixer :

- quel événement on souhaite cartographier : choisir si on veut cartographier une pleine mer moyenne, courante, annuelle... ou extrême (décennale, centennale, millénaire...)
- et selon quel scénario futur :
 - L'horizon temporel auquel on s'intéresse
 - Le scénario d'émission de gaz à effet de serre retenue
 - Le modèle, la publication ou la famille de modèles auquel on se réfère
 - Si on se base sur la valeur médiane (la plus probable) ou un autre quantile

Horizon	Scénario	Modèle considéré	Quantile considéré dans le choix de l'élévation du niveau marin médian (le plus probable)	A quelle pleine mer s'intéresse-t-on ?
2020	RCP 4.5	IPCC AR5 – 2013		Niveau moyen de pleine mer
2030	RCP 8.5	K14 – Kopp et al. (2014)	Quantile 1% (c'est-à-dire qui a 99 % de chance d'être dépassé)	Marée « normale » Quantile 0.5 (médiane des pleines mers ou marée dépassée une fois sur deux)
2040	RCP 8.5 Lowconf	DP16 - Kopp et al. (2017)	Quantile 5% (c'est-à-dire qui a 95 % de chance d'être dépassé)	Marée « normale » Quantile 0.9 (niveau dépassé par 10 % des pleines mers)
2050	RCP 1.9	IPCC SROCC – 2019	Quantile 17% (c'est-à-dire qui a 83 % de chance d'être dépassé)	Marée courante de période de retour 0,1 ans dépassée en moyenne 10 fois dans une année
2060	RCP 2.6	IPCC AR6 – 2021	Quantile 83% (c'est-à-dire que le risque de dépassement est de 17 %)	Marée courante de période de retour 0,5 ans dépassée en moyenne 2 fois dans une année
2070	RCP 7.0	IPCC AR6 – 2021 local	Quantile 95% (c'est-à-dire que le risque de dépassement est de 5 %)	Marée importante de période de retour 1 ans
2080			Quantile 99% (c'est-à-dire que le risque de dépassement est de 1 %)	Marée importante de période de retour 1 ans
2090			Quantile 99.9% (c'est-à-dire que le risque de dépassement est de 0,1 %)	Niveau extrême de période de retour 10 ans
2110				Niveau extrême de période de retour 20 ans
2120				Niveau extrême de période de retour 50 ans
2130				Niveau extrême de période de retour 100 ans
2140				Niveau extrême de période de retour 500 ans
2150				Niveau extrême de période de retour 1000 ans

Figure 3 - Hypothèses (liste non exhaustive) pouvant être retenues et combinées pour aboutir à un scénario

Compte-tenu du nombre important de scénarios futurs à étudier, dans les cas simples où le port est soumis aux simples débordements sans effets complexes à modéliser (ex : remplissage de casiers, limitation des débits par des digues ou la topographie...), l'utilisation de modèles simples est à privilégier. C'est le cas du port de Brest où une simple cartographie des débordements sans modélisation hydraulique est suffisante. Cette approche permet de ne pas être limité par le temps et le coût de mise en œuvre d'un modèle hydraulique pour mieux mettre l'accent sur un outil de vulgarisation/communication.

A l'avancement, il est apparu que raisonner uniquement à base de niveaux de référence (additionnant un scénario d'élévation du niveau marin et un niveau choisi dans la distribution actuelle) présentait des limites pour une démarche d'adaptation. C'est notamment la multiplicité des scénarios envisageables qui rend une telle démarche inefficace. Par ailleurs, la simple cartographie d'un niveau marin tiré de la distribution actuelle plus une élévation ne permet pas forcément d'analyser l'exposition et de se projeter vers une réflexion sur la sensibilité, la vulnérabilité et in fine une stratégie d'adaptation au changement climatique.

2.2 Développement de l'outil

2.2.1 Les données à réunir

La distribution actuelle complète des pleines mers :

Pour aboutir à un outil opérationnel, il convient de collecter la meilleure information disponible sur la distribution des niveaux marins à l'horizon actuel. Lorsqu'il s'agit de ports faisant l'objet de mesures marégraphiques du réseau RONIM, les publications du Cerema dédiées au sujet des niveaux marins extrêmes peuvent servir de référence (ajustements publiés pour 28 marégraphes disposant

de plus de dix ans de données (21 pour les façades de mer du Nord, Manche et Atlantique, 7 pour la façade méditerranéenne) [2]). Lorsque le port étudié n'est pas un port de référence, la construction de la distribution de référence doit faire l'objet de justifications (relation à un port de référence avec fonction de transfert, référence aux travaux de spatialisation des niveaux marins extrêmes SHOM-CETMEF [15]....).

Les termes pris en compte dans le niveau marin sont ceux enregistrés au marégraphe ayant servi à l'élaboration de la distribution : marée astronomique et surcote atmosphérique. Les phénomènes dynamiques à savoir l'agitation et la surcote liée au déferlement des vagues ne sont pas mesurés et donc pas inclus. L'expertise locale permet de savoir si les effets de ces termes sont négligeables sur la caractérisation de l'inondation des quais et si, les mesures au marégraphe sont représentatives de l'aléa niveau marin en tout point du port.

Les niveaux rares d'aujourd'hui pouvant devenir sous certains scénarios futurs des niveaux dépassés très fréquemment, il est très utile de construire une distribution complète des pleines mers allant jusqu'à des pleines mers très fréquentes (par exemple la médiane des pleines mers, à savoir celle qui est en moyenne dépassée par une pleine mer sur deux).

Pour une première approche de sensibilisation aux conséquences de l'élévation des niveaux, on pourra éventuellement se limiter à la valeur centrale de la distribution. Lorsque la distribution est amenée à être utilisée pour des sujets de dimensionnement ou dans une démarche approfondie, il est très important d'associer systématiquement les intervalles de confiance à la valeur médiane.

Les scénarios d'élévation du niveau marin :

Nos premières versions du tableur étaient construites à partir des données du GIEC (5^e rapport de 2013 [4], SROCC de 2019 [11]) et autres publications scientifiques sur le sujet. Les données régionalisées n'étaient disponibles que pour un nombre limité de scénarios et les données complètes (incluant tous les scénarios RCP (devenus SSCP), et tous les quantiles) n'étaient disponibles qu'à l'échelle globale. Depuis la sortie du 6^e rapport du GIEC ([9], [6]), les données locales quant à l'élévation future des niveaux marins sont plus largement diffusées notamment au travers des sites dédiés [16]. Les valeurs futures de l'élévation des niveaux marins doivent être corrigées des mouvements verticaux du sol qui peuvent venir accentuer ou atténuer l'élévation relative (Le SONEL [18] ainsi qu'une rubrique dédiée sur le site de la NASA [17] fournissent des informations sur le sujet). Pour le port de Brest, les travaux [5] font références et n'ont pas amené à corriger les scénarios régionaux, les mouvements verticaux du sol étant négligeables devant les évolutions futures du niveau marin.

L'évolution passée du niveau marin peut aussi être intégrée à l'outil pour évaluer les effets déjà visibles sur les périodes de retour de l'élévation passée du niveau marin. Les analyses locales seront privilégiées quand elles apportent une précision notable ou que les tendances passées diffèrent des évolutions passées fournies par le GIEC. Dans le cas de Brest, les travaux [7] et [10] ne montrent pas de différences notables par rapport aux scénarios passés du GIEC.

2.2.2 La construction des distributions des niveaux marins sous projections futures

L'outil produit est un tableur permettant de combiner la distribution statistique de référence (horizon actuel) avec différents scénarios d'élévation du niveau marin.

Les projections d'élévation sont ajoutées à la distribution actuelle du niveau marin (cf. Figure 4).

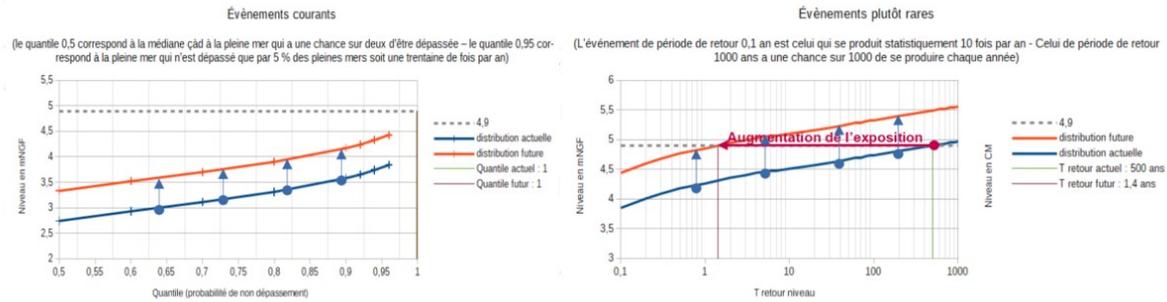


Figure 4 - Principe de construction de la distribution future des niveaux marins par transposition de la distribution actuelle de référence selon un scénario d'élévation

Ainsi, les distributions futures utiles à la détermination de la période de retour (ou fréquence de survenue) de tel ou tel scénario, sont obtenues par translation de la distribution actuelle. Par conséquent cela signifie que la distribution des niveaux ne se déforme pas lors de sa translation pour prendre en compte l'augmentation du niveau marin. Cela implique les hypothèses ci-dessous :

- Stationnarité de la composante astronomique (distribution des marées) :

Plus particulièrement, cela signifie que la marée (composante principale de la distribution) aurait les mêmes caractéristiques avec une élévation du niveau marin. C'est l'hypothèse la plus forte de la méthode puisque la propagation de la marée est fortement liée à la hauteur d'eau. Pour lever une telle hypothèse, il faudrait réaliser un travail de modélisation de la marée (sur un nombre conséquent de marées). De tels travaux ont pu être réalisés dans le domaine de la recherche ([14], [12], [8]). Ils ne concluent pas à une modification notable des caractéristiques de la marée pour les cas étudiés et les élévations prises en compte.

Point d'attention : si cette hypothèse peut être admise pour Brest, elle ne serait pas valide pour d'autres ports pour lesquels l'effet de propagation est important. C'est particulièrement le cas des ports d'estuaires où la propagation de la marée (et donc la distribution des niveaux marins) peut fortement changer avec la hauteur d'eau disponible à la propagation dans l'estuaire et la morphologie de l'estuaire (elle-même sensible aux niveaux). Il en sera de même pour les ports de la Manche et Mer du Nord où les effets de propagation sont déterminants dans la distribution des niveaux marins (en considérant uniquement la composante astronomique : la marée).

- Stationnarité de la composante atmosphérique (distribution des surcotes)

Cela signifie aussi que la composante atmosphérique (les surcotes) est considérée comme fixe sous scénario futur.

Les surcotes sont causées par les phénomènes météorologiques et particulièrement la dynamique des dépressions atmosphériques (creusement, vitesse de déplacement, trajectoire,...) et des vents (intensité, direction). La surcote provoquée par le passage d'une dépression forme une onde qui a sa propre dynamique et qui peut venir s'ajouter à la marée astronomique jusqu'à se traduire par une surcote au point de mesure (écart entre l'observation et la prédiction). Deux facteurs peuvent influencer sur l'onde de surcote. Le premier est la marée. Plus la hauteur d'eau est faible, plus les surcotes vont

être amplifiées du fait de la conservation de l'énergie. L'augmentation du niveau de la mer pourrait donc conduire inversement à une diminution de la surcote. Le deuxième est la force et la fréquence dans le futur des tempêtes à l'origine de la surcote, lié directement à l'amplitude et la fréquence des surcotes. Sous climat futur, les modèles peuvent être assez divergents sur les phénomènes à l'origine des surcotes quant à leur renforcement, à la modification de la saisonnalité... Il n'est pas exclu (particulièrement pour les scénarios à fortes émissions (SSP5-8.5)) que les surcotes soient impactées à la hausse traduisant une tempétuosité plus forte. À l'avenir, la distribution des surcotes pourrait évoluer à la fois par la prise en compte de nouvelles données (consolidation des chroniques) et à la fois en traduisant des éventuels effets du changement climatique.

- Stationnarité de l'hypothèse de combinaison marée/surcote pour établir la distribution des niveaux extrêmes.

Pour établir la distribution des niveaux marins extrêmes, le facteur le plus déterminant est l'hypothèse de concomitance retenue lors de la mise en œuvre de la convolution entre distribution des marées et distribution des surcotes. À ce jour, nous ne disposons pas d'éléments permettant de modifier cette hypothèse sous climat futur impacté par le changement climatique.

→ Par conséquent, l'hypothèse de stationnarité de la distribution des niveaux marins (modulo l'élévation future du niveau) est la seule hypothèse (en l'état actuel des connaissances) permettant de poursuivre le travail d'analyse d'exposition.

2.3 Utilisation de l'outil

Une fois développé, l'outil peut facilement être utilisé par le gestionnaire qui se familiarise alors avec celui-ci lui permettant de mener en interne de nombreuses analyses.

2.3.1 Approche par scénario

Une première approche consiste à utiliser le tableur comme un simple calculateur de niveaux marins en guidant l'utilisateur sur les hypothèses qui s'offrent à lui pour chaque paramètre.

Hypothèses :	
A quel horizon temporel vous intéressez-vous ?	2090
Quel est le scénario d'émission considéré ?	RCP 8.5 Low conf
Quel est le modèle d'élévation du niveau moyen global considéré ?	IPCC AR6 – 2021 local
Quel est parmi les résultats d'augmentation du niveau marin celui que vous retenez ?	médian (le plus probable)
A quelle pleine mer vous intéressez-vous ?	Marée importante de période de retour 1 ans

Figure 5 - Menu permettant de fixer les hypothèses à combiner dans un scénario

A l'horizon 2090, en considérant le RCP 8.5 Low conf, le modèle IPCC AR6 – 2021 local, le scénario médian (le plus probable), la/le Marée importante de période de retour 1 ans atteindra 4,902 mNGF soit 11,192 mCM.

Dans la distribution actuelle, cet événement a une période de retour = 509,2 ans

Figure 6 - Exemple de résultat avec le tableur utilisé en mode "scénario"

L'utilisation du tableur en mode scénario permet de guider le gestionnaire dans un travail exploratoire. Il permet une première prise de conscience de l'augmentation de l'exposition en termes de fréquence (ou période de retour par rapport à la situation actuelle de référence). Cette utilisation du tableur correspond à une approche de l'adaptation à l'élévation du niveau marin par détermination des côtes de dimensionnement d'infrastructures (neuves ou en cas de reconstruction).

2.3.2 Approche par objet

En complément de l'approche par scénario, le tableur a fait l'objet du développement d'un second formulaire plus orienté sur l'exposition des objets à partir du moment où leur cote est connue. On entend ici par « objet » un bâtiment, un terre-plein ou tout élément ponctuel doté d'une unique cote. Dans ce cas, l'utilisateur renseigne la cote de l'objet dont il cherche à déterminer l'exposition. Le tableur est alors en mesure de renseigner l'utilisateur sur l'exposition actuelle de l'objet (sous forme de fréquence de dépassement ou de période de retour) ainsi que l'exposition future selon le scénario considéré (cf. Figure 7). Cette approche s'avère très adaptée à la caractérisation de l'exposition et projette naturellement le gestionnaire dans une réflexion sur la vulnérabilité et in fine l'adaptation à l'élévation du niveau marin.

Hypothèses :	
Quelle est la cote de l'objet/fonctionnalité qui vous intéresse ?	3,6 m NGF
<i>Attention : la valeur doit être comprise dans la distribution actuelle soit l'intervalle 2,71-4,97 m NGF soit 9 à 11,26 m CM</i>	
	9,89 m Cotes Marines
Le niveau 3,6 m NGF est actuellement dépassé 66,6 fois par an	
A quel horizon temporel vous intéressez-vous ?	2080
Quel est le scénario d'émission considéré ?	RCP 1.9
Quel est le modèle d'élévation du niveau moyen global considéré ?	IPCC AR6 – 2021 local
Quel est parmi les résultats d'augmentation du niveau marin celui que vous retenez ?	Quantile 83% (c'est-à-dire que le risque de dépassement est de 17 %)
Selon les hypothèses définies ci-dessus, un tel niveau sera dépassé 208,3 fois par an	

Figure 7 - Exemple de l'utilisation du tableur en mode "objet"

2.3.3 Association à des analyses cartographiques

L'approche dite par objet facilite la compréhension des gestionnaires portuaires en partant non pas du scénario pour déterminer si un objet est touché ou non mais en inversant le processus. Le gestionnaire décrit le scénario redouté (ou celui qu'il cherche à caractériser) par une simple cote et le tableur le renseigne sur la fréquence de dépassement (ou période de retour) selon différents scénarios. Il est ainsi possible et aisé de bâtir des bases de données (éventuellement sous forme de SIG) où chaque objet est caractérisé en termes de fréquence de submersion.

Il est aussi possible de bâtir des cartes de submersion à une côte donnée et d'y associer une légende explicitant la période de retour de l'événement cartographié pour chaque scénario futur considéré.

Horizon	Actuel	Dépassé en moyenne tous les .. ans		
	2050	Dépassé en moyenne tous les .. ans	Dépassé en moyenne tous les .. ans	Dépassé en moyenne tous les .. ans
	2070	Dépassé en moyenne tous les .. ans	Dépassé .. fois par an	Dépassé .. fois par an
	2100	Dépassé .. fois par an	Dépassé .. fois par an	Dépassé .. fois par an
	s1	s2	s3	
Scénario				

Figure 8 - Exemple de légende pouvant être associée à une carte de submersion à une cote donnée ou à un objet dans une base de données

3. Conclusion et perspectives

Des outils ont été développés pour aborder l'impact du changement climatique et particulièrement de l'élévation future des niveaux marins dans les ports. Ces outils ont été particulièrement développés pour éclairer les gestionnaires engageant des démarches d'adaptation au changement climatique en suivant des méthodes découlant du cadre de l'analyse de risques.

Les outils développés sont relativement simples d'utilisation pour permettre une exploitation approfondie y compris par le gestionnaire. Ils s'avèrent particulièrement adaptés pour une prise de conscience sur l'exposition future sur un sujet qui est très concret pour chacun mais qui peut s'avérer complexe dans la manipulation et la communication des éléments sur les probabilités de dépassement (périodes de retour).

Ce type d'outil ne peut pas être généralisé à tous les ports et nécessite pour sa construction une approche au cas par cas pour s'assurer que les hypothèses sous-jacentes à l'élaboration des scénarios sont valides. Cette approche au cas par cas sera particulièrement importante pour les ports d'estuaires pour lesquels des phénomènes locaux viennent complexifier la production d'un tel outil ainsi que pour les ports de Manche et Mer du Nord où l'exercice pourrait être mené avec une incertitude plus forte.

Bibliographie

[1] Cerema, 2019. Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/vulnerabilites-risques-infrastructures-transport-face-au>

[2] Cerema, 2018. Les niveaux marins extrêmes. Ports de métropole. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/niveaux-marins-extremes>

[3] Cerema, 2020. Analyse de risque du Grand Port Maritime de Bordeaux dans un contexte de changement climatique et stratégie de résilience. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/resilience-infrastructures-transport-face-au-changement>

[4] Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013. 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. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf

[5] Cyril Poitevin, Guy Wöppelmann, Daniel Raucoules, Gonéri Le Cozannet, Marta Marcos, Laurent Testut, 2019. Vertical land motion and relative sea level changes along the coastline of Brest (France) from combined space-borne geodetic methods. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718305960>

[6] 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, 2021. 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.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_09.pdf

[7] G. Wöppelmann, N. Pouvreau, A. Coulomb, B. Simon, P.L. Woodworth, 2008. Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea level record.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718305960#bbb0340>

[8] Idier, D., Paris, F., Le Cozannet, G., Boulahya, F., Dumas, F., 2017. Sea-level rise impacts on the tides of the European Shelf. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.007>

[9] 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.), 2021. 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_Full_Report.pdf

[10] N. Pouvreau, 2008. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00353660>

[11] Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, and Z. Sebesvari, 2019. 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.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROCC_Ch04_FINAL.pdf

[12] Pelling, H.E., Green, J.A.M., Ward, S.L., 2013. Modelling tides and sea-level rise: to flood or not to flood. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.004>

[13] PIANC, 2020. Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways.
<https://www.pianc.org/publications/envicom/wg178>

[14] Pickering, M.D., Wells, N.C., Horsburgh, K.J., Green, J.A.M., 2012. The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.11.011>

[15] SHOM, CETMEF, 2012. Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/statistiques-niveaux-marins-extremes-cotes-france-manche>

[16] <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

[17] https://sealevel.nasa.gov/sea-level-evaluation-tool?psmsl_id=1

[18] <https://www.sonel.org/?lang=fr>