

# **Annexe 1 / Rapport technique :** **Production cartographique des zones exposées au risque de submersion marine dans le secteur de la centrale de Gravelines**



**Date de finalisation :** 24/07/2024

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
Situation géographique	4
<b>Sources de données</b>	<b>7</b>
Topographie	7
Référentiel d'altitude	7
Projection du niveau marin	11
Phénomènes de surcote	12
<b>Méthode</b>	<b>15</b>
Calcul de hauteur	15
Création de masques	16
<b>Résultats</b>	<b>17</b>
<b>Limites</b>	<b>19</b>
<b>Références scientifiques</b>	<b>21</b>
<b>Glossaire</b>	<b>22</b>

# Introduction

La centrale nucléaire de Gravelines (Nord) est la plus grande de France en termes de production électrique et sa localisation est présentée comme idéale pour diverses raisons : faible risque sismique, source d'eau froide, zone urbaine densément peuplée, à proximité de pays acheteurs d'énergie et de plusieurs industries métallurgiques très consommatrices d'énergie.

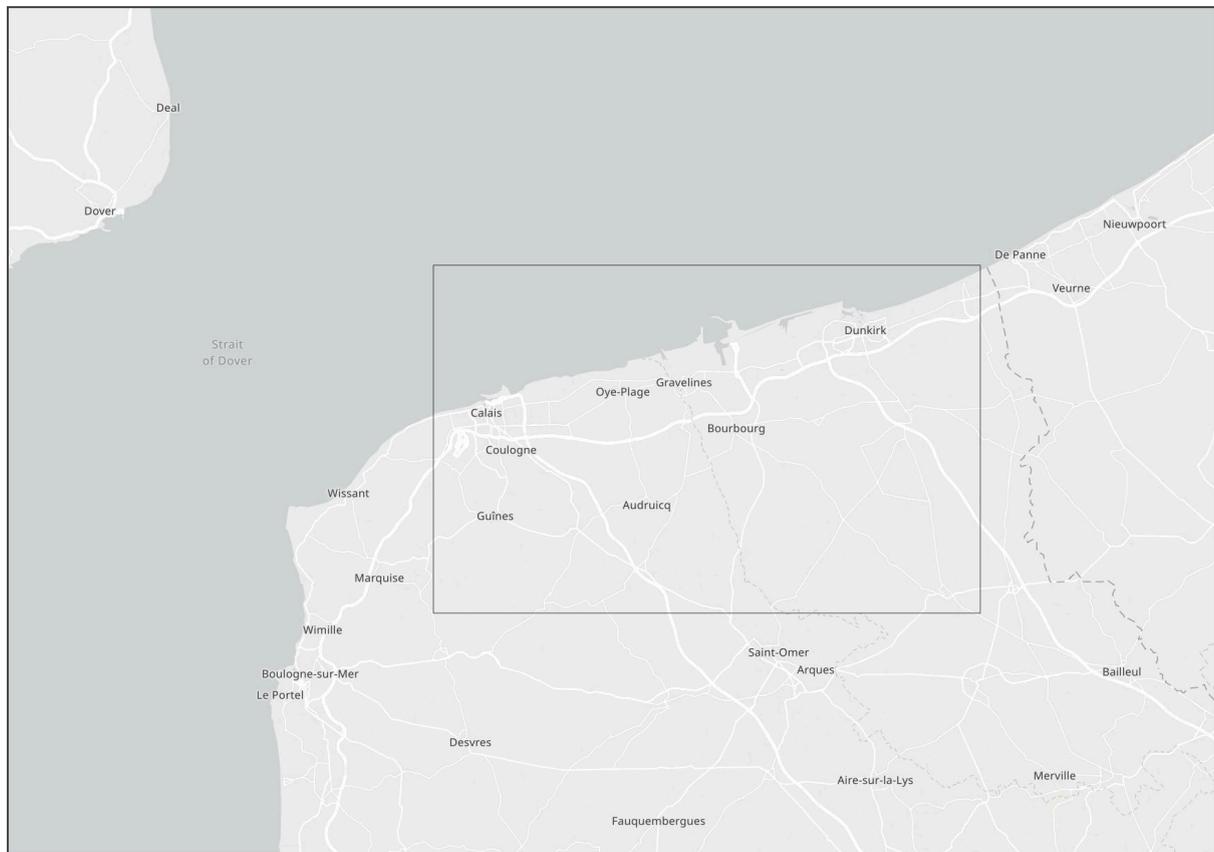
Cependant, cette région est soumise à un risque d'inondation important aussi bien par submersion marine que par crue fluviale et remontée de nappe phréatique. Les communes littorales du Nord et du Pas-de-Calais sont régulièrement exposées à ces risques naturels dont la fréquence tend à augmenter avec le réchauffement climatique et la hausse du niveau marin (1).

Dans ce contexte, le projet annoncé en 2022 de construire deux nouveaux réacteurs EPR2 sur un site voisin de la centrale existante est sujet à débat. Malgré les promesses de création d'emploi et de dynamisme territorial, on peut questionner la pertinence de cette localisation et l'adéquation des mesures de protection minimales imposées, vu les risques des surcoûts induits par la réduction des risques et la réparation des dommages causés par des potentielles inondations.

La présente étude vise à produire, à partir des scénarios d'élévation du niveau de la mer estimés par le GIEC, des cartes d'exposition au risque de submersion marine dans une zone élargie autour du futur site EPR2 de Gravelines. Les cartes sont obtenues en réalisant un « masquage » des zones dont l'altitude est inférieure à un niveau marin maximal théorique pour la zone, en situation de plus haute marée et avec un éventuel phénomène de surcote.

Utilisée par des instituts de référence comme le BRGM comme visible sur le site <https://sealevelrise.brgm.fr/slr> qui a inspiré cette étude, cette méthode relativement simple permet de visualiser les zones particulièrement fragiles face à un risque de submersion. Contrairement à des simulations hydrodynamiques difficiles à produire sur des grandes zones et pour de tels scénarios, les cartes présentées ici ne permettent pas de localiser avec précision les zones qui pourraient être submergées, mais elles offrent une vue d'ensemble sur la vulnérabilité d'un territoire face au phénomène de submersion marine.

## Situation géographique



↑ **Figure 1** : carte de localisation de la zone d'étude

La zone cartographiée est centrée autour de la commune de Gravelines, à cheval entre les départements du Nord et du Pas-de-Calais, dans une emprise allant de Calais à Dunkerque.

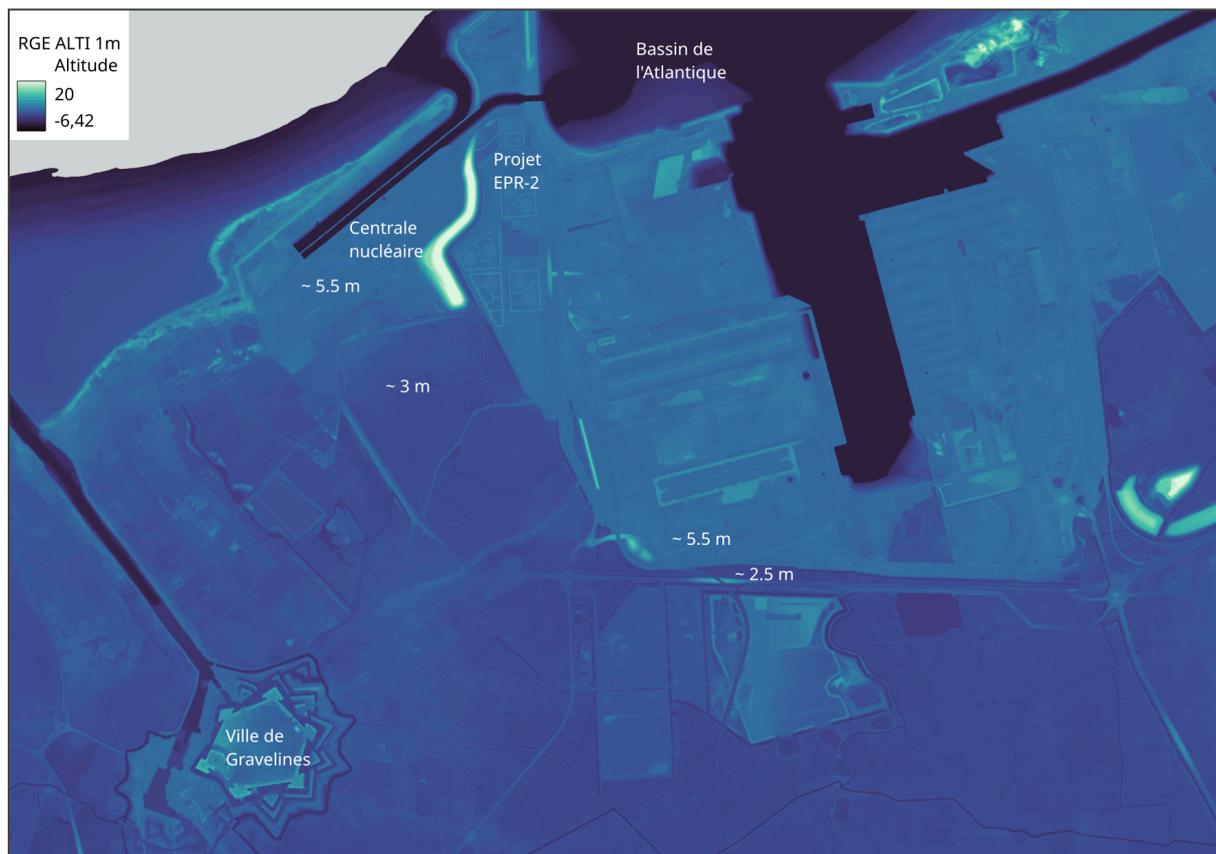
Le site existant de la centrale nucléaire de Gravelines est situé à l'Ouest de la Commune, près du port industriel ouest de Dunkerque (bassin de l'Atlantique) à une distance d'environ 500 m du rivage.

Étant données les vues 3D publiées par le cabinet d'architectes SanterVanhoof, le projet de nouveaux réacteurs EPR2 serait à priori situé à l'est du site existant, sur une parcelle actuellement non utilisée.



↑ **Figure 2 :** vue d'architecte du projet EPR2

Le complexe est situé à une altitude moyenne de 5.5 m. Il est a priori bâti sur une zone de remblai tout autour du bassin, étant donné l'altitude naturelle de la zone aux alentours, comprise entre 2 et 4 m comme on peut le voir sur le modèle numérique de terrain (MNT) ci-dessous. Le site existant est en partie protégé des vagues par un cordon dunaire dont l'altitude 7 et 12 mètres et divers ouvrages de protection tels que des digues.



↑ **Figure 3 :** modèle numérique de terrain de la zone d'activité de Gravelines

EDF a achevé en 2022 divers travaux visant à réhausser un mur de protection directement sur le front de mer au niveau du canal de refroidissement, ainsi qu'une protection périphérique contre l'inondation (PPINO) de 4 m de hauteur autour du site, amenant la protection à 7,48 mètres NGF (Nivellement Général de la France : le référentiel altimétrique officiel, voir explications page 7).

# Sources de données

## Topographie

Afin de positionner des éléments de vulnérabilités sur les cartes (routes, réseau électrique ou de transport, etc.), les données de référence issues du millésime Juin 2023 de la BDTOPO produites par l'Institut Géographique National (IGN) ont été utilisées. Ces données servent entre autres à la production des cartes topographiques de la série « SCAN 25 ».

Les données sur les sites SEVESO géolocalisés sont issues d'un jeu de données disponible sur [opendata.gouv](https://opendata.gouv.fr/).

## Référentiel d'altitude

La terre n'est pas une surface parfaitement ronde ou elliptique et présente des déformations. La variabilité locale des marées est due à cette répartition inégale des masses terrestres et des effets de la gravité, couplée aux caractéristiques locales du relief sous-marin. Ainsi, la notion « d'altitude zéro » est particulièrement relative et localisée, et ne peut être précise au niveau mondial.

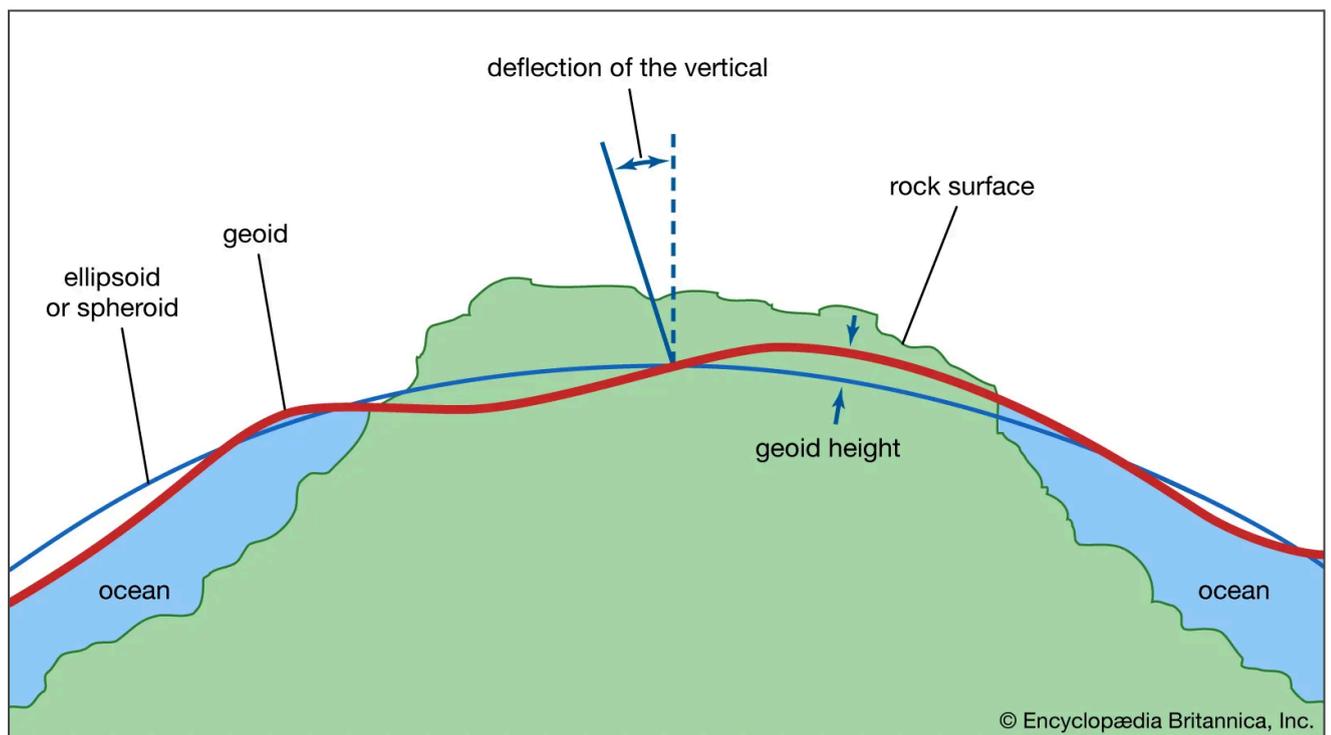
Si des bases de données communes d'altitude et des systèmes de référence de coordonnées mondiaux existent, la plupart des pays disposent de leur propre système de référence permettant une meilleure précision des cartes. Afin de représenter la surface terrestre sphérique sur une surface plane / carte, il est nécessaire définir un mode de déformation appelé projection cartographique.

La France utilise un système de projection cartographique nommé Lambert 93 qui définit un certain type de déformation (projection conique conforme de Lambert), et un référentiel de coordonnées (origine des axes X / Y dans un repère orthonormé). Un système de projection est associée à un ellipsoïde (une approximation elliptique de la surface de la terre) permettant de calculer correctement la transformation d'une distance en courbe sur la surface terrestre vers une distance plane sur une carte.

Cependant, cet ellipsoïde ne permet pas une grande précision verticale pour l'ensemble du globe. Il est suffisant quand on s'intéresse uniquement au positionnement horizontal, ou si on tolère quelques mètres d'erreur sur l'altitude comme avec les GPS. Mais dans le cas de mesures fines, il est nécessaire d'utiliser un référentiel d'altitude permettant des mesures plus précises pour une zone donnée. Ce référentiel est généralement construit grâce à un ensemble de mesures gravimétriques (mesures de la force de pesanteur) et contrôlées par satellite.

Cet ensemble de mesures permet d'estimer la surface d'un géoïde, objet géométrique qui correspond à la « surface équipotentielle de référence du champ de pesanteur terrestre » ([source](#)). En d'autres termes, cette surface pour laquelle la force de pesanteur est égale en tout point correspond aussi à niveau marin moyen, et peut servir d'origine pour un système altimétrique.

Le schéma ci-dessous représente la différence entre ellipsoïde et géoïde.



↑ **Figure 4** : schéma explicatif du géoïde, source : [www.britannica.com/science/geoid](http://www.britannica.com/science/geoid)

Les altitudes sont fournies relativement à un point d'origine dans ce repère vertical. Le nivellement général de la France (NGF) constitue un réseau de repères altimétriques répartis sur toute la France métropolitaine, et il est actuellement le réseau de nivellement officiel en France métropolitaine et utilisé pour définir un système vertical officiel appelé NGF - IGN69. Le système de projection Lambert 93 peut ainsi être décliné en fonction du repère vertical utilisé : une projection Lambert 93 + référence verticale IGN69 est identifiée EPSG:5698.

Dans le monde entier, un réseau de ports de référence est établi et des instituts géographiques ou militaires sont responsables de tenir à jour une base de données des hauteurs d'eau mesurées par les marégraphes. Le niveau zéro ou zéro altimétrique du système de référence est ensuite défini à partir d'une mesure du niveau marin moyen. En France continentale, c'est le marégraphe de Marseille qui sert de référence pour situer le point zéro du système altimétrique IGN69. C'est relativement à ce point zéro que sont positionnées les données altimétriques de référence de l'IGN comme la base de données RGE ALTI utilisée dans cette étude. Le RGE ALTI est la donnée MNT (Modèle Numérique de Terrain) la plus précise disponible sur toute la France, elle est produite à partir de différents modes de mesure. Une technique de télémessure laser - Light Detection And Ranging (LiDAR) est utilisée pour les zones côtières. Cette technique est la plus précise pour ce type de mesure et permet à l'IGN de garantir une précision altimétrique de l'ordre de 20 cm sur la bande littorale.

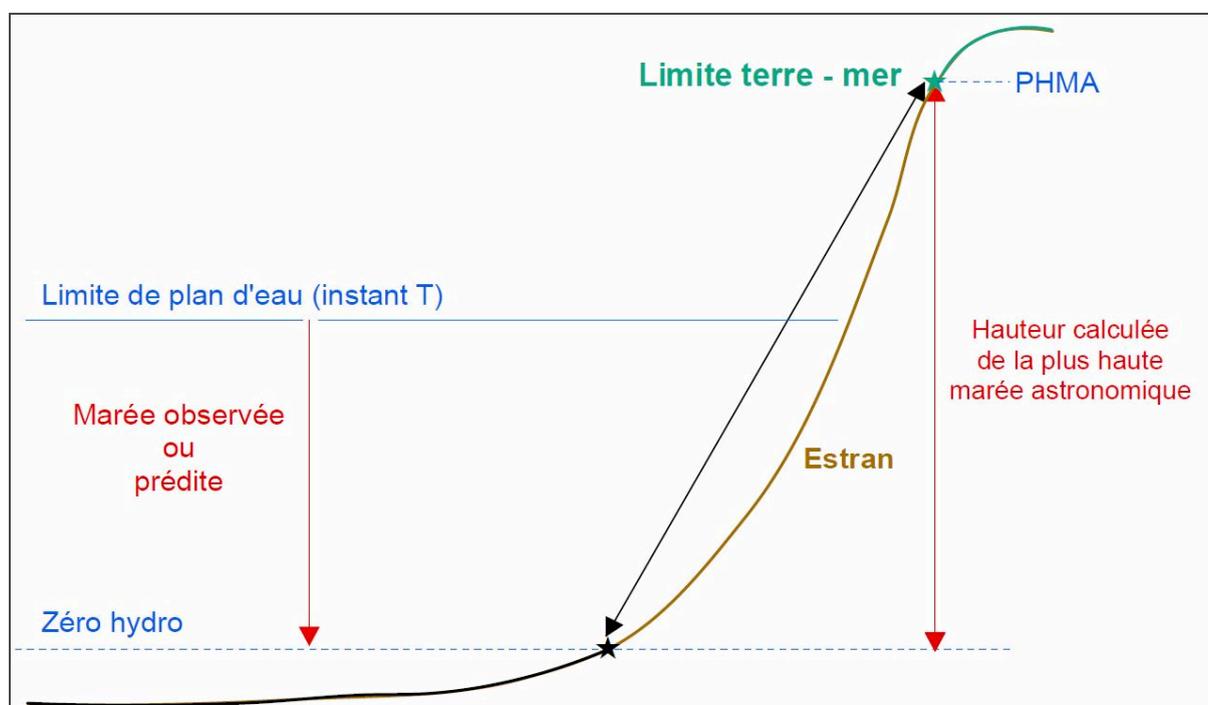
On distingue le zéro altimétrique utilisé comme repère pour les cartes terrestres, et le zéro hydrographique qui peut varier d'un port à l'autre. Celui-ci correspond à peu près au niveau marin le plus bas avec une forte amplitude de marée et il est utilisé pour les cartes marines puisqu'il permet d'indiquer avec certitude le tirant d'eau maximum pour le passage des navires. La position du zéro hydrographique est fournie relativement à différents repères (ellipsoïde, réseau de repère NGF).

En France, cette base de données en accès libre nommée Référentiel Altimétrique Maritime (RAM) est maintenue à jour par le service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM). Elle fournit pour tous les ports de référence les différentes mesures permettant de passer d'un système de référence à un autre. La donnée et les documents explicatifs sont disponibles sur le site du SHOM.

Dans le cadre de cette étude, la référence utilisée est celle du port de Dunkerque, point de mesure le plus proche du site de Gravelines. Ainsi, pour le port de Dunkerque, le zéro hydrographique est situé à -2.693 mètres relativement au point de référence zéro dans le

référentiel vertical NGF - IGN69. Le RAM contient également une information sur le niveau marin en situation de grande marée appelé PHMA (Plus Haute Mers Astronomiques) et PBMA (Plus Basses Mers Astronomiques) qui correspond à une situation de marée coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales.

Le zéro hydrographique est situé légèrement sous le niveau PBMA. La hauteur PHMA est généralement utilisée pour positionner le trait de côte, comme par exemple la donnée de « limite terre-mer » fournie par l'IGN et utilisée dans les cartes topographiques. C'est à partir du niveau marin PHMA que l'on va positionner les différents scénarios de montée des eaux présentés ici.



↑ **Figure 5** : schéma explicatif des PHMA, source : SHOM via [sar.milieumarinfrance.fr](http://sar.milieumarinfrance.fr)

## Projection du niveau marin

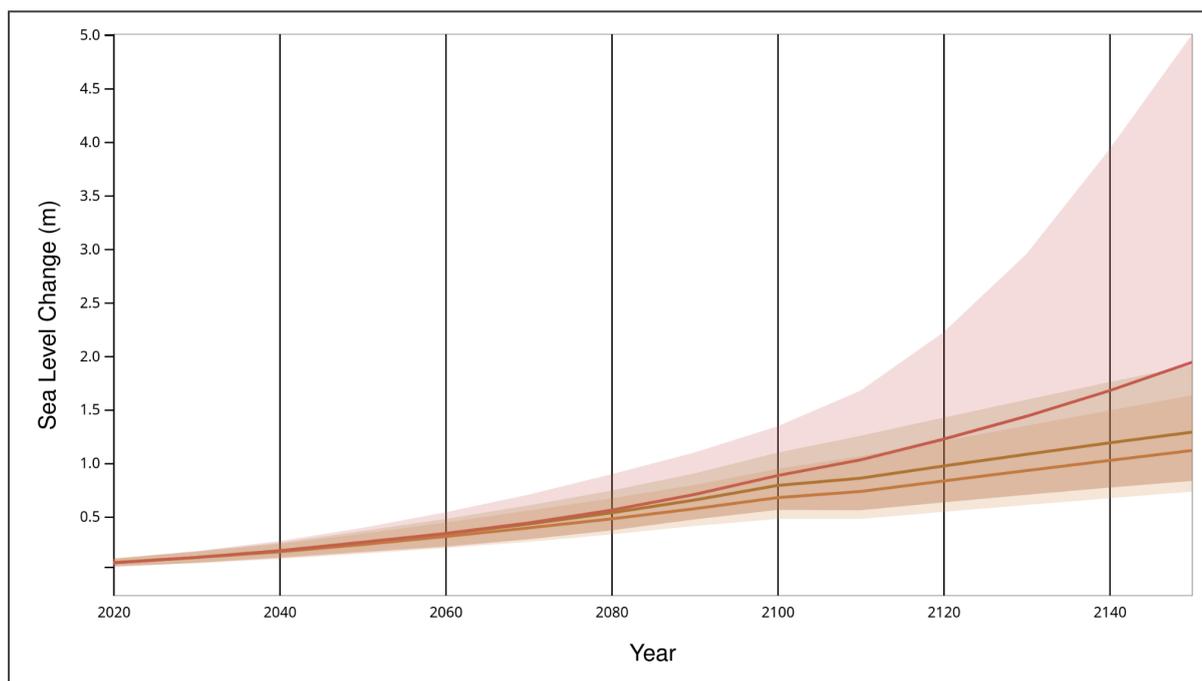
Les données d'élévation du niveau marin issues des travaux du sixième rapport du GIEC (2) sont mises à disposition sous forme d'une application créée par la NASA qui permet de calculer, pour un port de référence, une hauteur d'eau probable selon différents scénarios de réchauffement (SSP) et avec un pas de temps de 10 ans.

Certains phénomènes régionaux pouvant compenser la montée du niveau marin, tel que le rebond post-glaciaire ou isostasie, sont déjà pris en compte dans ces modélisations.

On peut souligner que la zone de Gravelines n'est pas concernée par l'ajustement isostatique. Au contraire, elle est soumise à une légère subsidence comme la plupart des bassins sédimentaires sous nos latitudes ; celle-ci est d'environ -0.63 mm par an (voir les données sur le site du SONEL). Cependant, les spécificités géomorphologiques locales (e.g. relief et composition minérale de la plage) sont ignorées dans ce type de modèles.

En raison des différents facteurs présentés plus haut (principalement la variation locale du relief terrestre et sous-marin), la hausse du niveau marin moyen s'effectue de manière inégale dans les différentes régions du monde. Les valeurs projetées du niveau marin futur peuvent ainsi varier de plusieurs dizaines de centimètres selon la localisation étudiée, c'est pourquoi il est important d'utiliser une estimation locale de la hausse du niveau marin et pas une valeur moyenne calculée pour la Terre entière (1, 2, 6).

Comme pour le référentiel altimétrique des données SHOM, le port de Dunkerque est utilisé comme point de référence (identifiant 468). Plusieurs valeurs de niveau marin sont rapportées dans un tableau, selon des dates décidées en accord avec le commanditaire (2050, 2080, 2100, 2120). L'outil permet d'exporter les données d'un port de référence sous forme de graphique interactif, comme capturé dans l'image ci-dessous.



#### Median/Likely range

— SSP3-7.0

— SSP5-8.5

— SSP5-8.5 Low Confidence

↑ **Figure 6** : graphique comparatif des projections du niveau marin, source : <https://sealevel.nasa.gov>

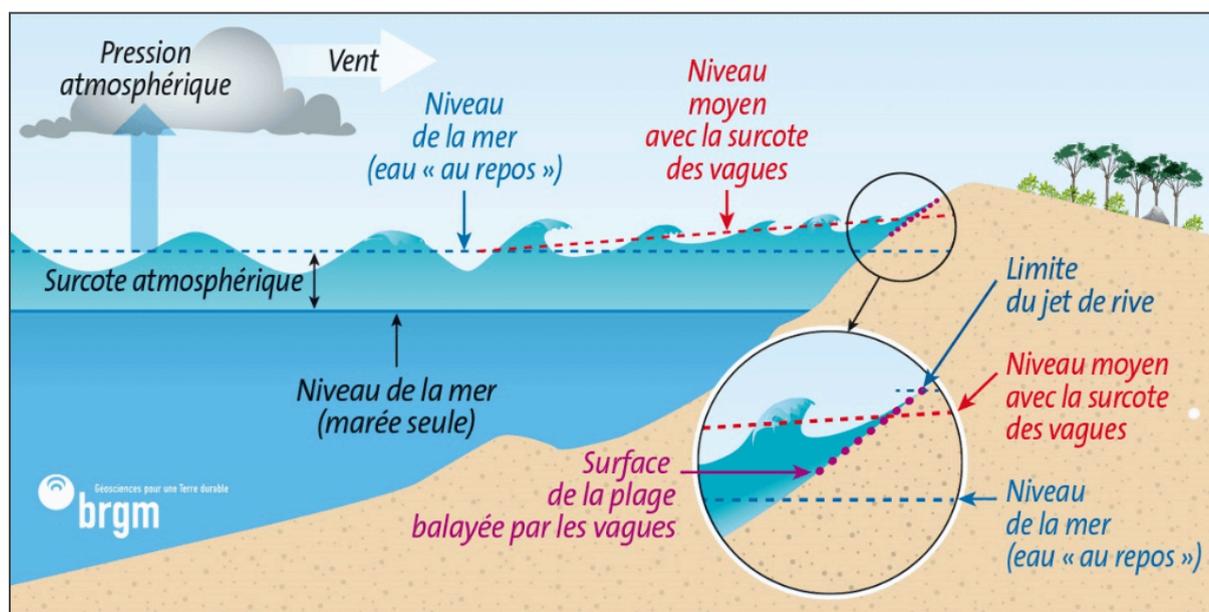
## Phénomènes de surcote

On peut trouver sur [Wikipédia](#) une définition simple de la surcote, partiellement tirée d'un glossaire de Météo-France :

« Une surcote marine est un dépassement “anormal” du niveau de la mer en marée haute ou de son recul en marée basse. Ce dépassement est induit par des conditions météorologiques inhabituelles combinant leurs effets à ceux des marées induites par la lune et le soleil. Les surcotes peuvent être responsables d'inondations et de submersions importantes en zone portuaire, de polder, ou en amont d'une écluse littorale qui aurait été débordée par la mer, ou – en période de crue – qui n'aurait pas pu s'ouvrir à temps pour vider son eau.

[...] Les surcotes sont le fait d'une conjonction de différents facteurs qui interagissent avec les marées. Le cas le plus fréquent est celui d'une onde de tempête lors de fortes dépressions, venant de la mer ou centrées sur la terre, dans leur quadrant où les vents soufflent de la mer vers la terre. L'interaction entre la période de la marée, les vents qui poussent sur la surface de la mer, la pression plus basse, la configuration du fond marin, les effets d'entonnoir des côtes, etc. agissent en synergie. Ils provoquent alors une surélévation du niveau marin sur le trait de côte, ce niveau pouvant dans certains cas atteindre plus d'un mètre. »

Par exemple, un raz-de-marée comme celui qui a conduit à l'accident nucléaire de Fukushima constitue la forme la plus extrême de surcote.



↑ **Figure 7** : schéma explicatif de la surcote, source : <https://sealevelrise.brgm.fr>

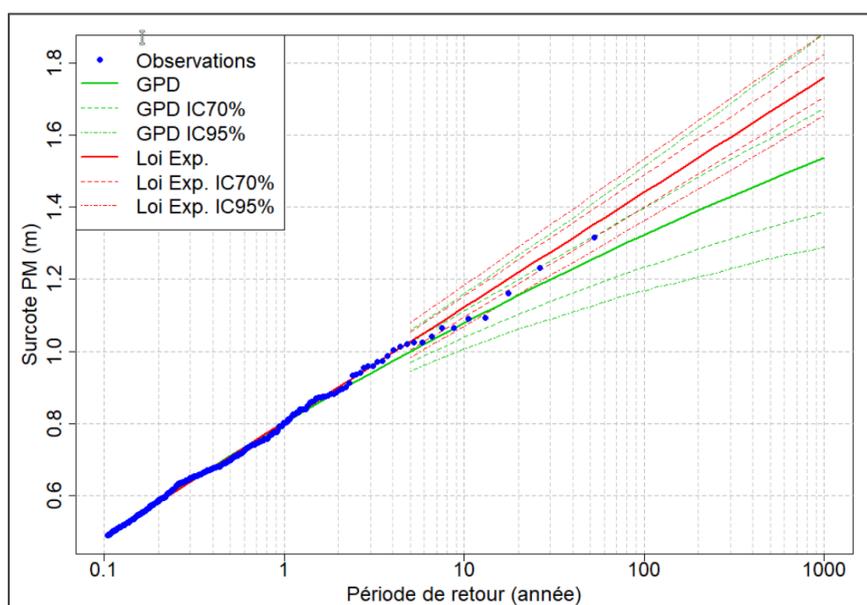
Le SHOM fournit une explication détaillée de la notion de surcote et des niveaux marins extrêmes, ainsi que les méthodes pour les mesurer. Les mesures effectuées en continu sur les marégraphes permettent d'évaluer la probabilité d'un événement pour une période donnée. Dans le cadre d'une étude réalisée en 2022, le SHOM et le CEREMA ont produit une analyse statistique de l'historique des phénomènes de surcote. Celle-ci a pour objectif d'estimer les périodes de retour de niveaux extrêmes. Elle fournit pour des

périodes décennales, centennales et millénales des hauteurs d'eau et une probabilité associée ; la donnée est en accès libre sur le [site du SHOM](#).

Les niveaux extrêmes ainsi calculés seront utilisés ici pour positionner une hauteur PHMA + surcote. On utilise la valeur calculée avec le meilleur intervalle de confiance (Int. Conf.), ce qui correspond à la valeur la plus probable – la plus basse – produite par le modèle statistique. Pour les ports situés sur l'Atlantique ou en Mer du Nord, la valeur du modèle statistique GPD (Generalised Pareto Distribution) est préconisée par le SHOM, plutôt que la Loi Exponentielle (Loi Exp.). Les valeurs sont exprimées en mètres de surcote par rapport à une situation Pleine Mer (PM). L'ensemble des données et le rapport technique associé seront intégrés aux livrables.

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	1.00 m	0.97 m à 1.03 m	0.94 m à 1.05 m	1.03 m	1.00 m à 1.05 m	0.98 m à 1.07 m
10 ans	1.08 m	1.03 m à 1.11 m	1.00 m à 1.15 m	1.12 m	1.09 m à 1.15 m	1.07 m à 1.18 m
20 ans	1.16 m	1.10 m à 1.20 m	1.05 m à 1.25 m	1.22 m	1.18 m à 1.25 m	1.16 m à 1.28 m
50 ans	1.25 m	1.17 m à 1.32 m	1.12 m à 1.39 m	1.35 m	1.30 m à 1.39 m	1.27 m à 1.42 m
100 ans	1.32 m	1.23 m à 1.40 m	1.16 m à 1.49 m	1.44 m	1.40 m à 1.49 m	1.36 m à 1.52 m
200 ans	1.39 m	1.28 m à 1.49 m	1.20 m à 1.60 m	1.54 m	1.49 m à 1.59 m	1.45 m à 1.63 m
500 ans	1.48 m	1.34 m à 1.60 m	1.25 m à 1.73 m	1.66 m	1.61 m à 1.72 m	1.57 m à 1.77 m
1 000 ans	1.54 m	1.38 m à 1.68 m	1.28 m à 1.84 m	1.76 m	1.70 m à 1.82 m	1.65 m à 1.87 m

↑ **Tableau 1** : périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote



↑ **Figure 8** : Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote. Source : [note méthodologique du jeu de données "Niveaux Extrêmes", SHOM / CEREMA](#)

# Méthode

## Calcul de hauteur

Les différents altitudes et niveaux marins projetés sont rapportés dans un tableur dans lequel sont additionnées les hauteurs PHMA actuelle, les projections d'élévation du niveau marin du GIEC, ainsi que les valeurs de surcote centennale et millénales.

Le tableau 2 présente les hauteurs (exprimées en mètres) obtenues par le croisement des différents scénarios de réchauffement et de surcote. Les cartes ont été produites pour le scénario SSP5-8.5. Le scénario SSP5-8.5 « low confidence » est présenté à titre de comparaison mais n'a pas été cartographié.

<i>Hausse projetée pour Dunkerque (GIEC)</i>			
	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 (low confidence)
2050	0,24	0,26	0,26
2080	0,48	0,53	0,56
2100	0,68	0,79	0,88
2120	0,83	0,97	1,22
2150	1,12	1,29	1,94

<i>Réf. Altimétrique Maritime (SHOM)</i>	
Ref_ZH* (IGN69)	-2,693
PHMA* (zéro hydro)	6,88
PHMA (IGN69)	4,19

Ref\_ZH : référentiel zéro hydrographique

PHMA : plus hautes mers astronomiques

<i>Niveau marin PHMA + réchauffement</i>			
	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 (low confidence)
2050	4,427	4,447	4,447
2080	4,667	4,717	4,747
2100	4,867	4,977	5,067
2120	5,017	5,157	5,407
2150	5,307	5,477	6,127

<i>Niveau marin PHMA + réchauffement + surcote 100 ans</i>			
	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 (low confidence)
2050	5,747	5,767	5,767
2080	5,987	6,037	6,067
2100	6,187	6,297	6,387
2120	6,337	6,477	6,727
2150	6,627	6,797	7,447

<i>Surcote GPD* (CEREMA / SHOM)</i>	
100 ans	1,32
1000 ans	1,54

GPD : Generalized Pareto Distribution

<i>Niveau marin PHMA + réchauffement + surcote 1000 ans</i>			
	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 (low confidence)
2050	5,967	5,987	5,987
2080	6,207	6,257	6,287
2100	6,407	6,517	6,607
2120	6,557	6,697	6,947
2150	6,847	7,017	7,667

↑ **Tableau 2** : Niveaux marins selon différents scénarios de réchauffement et de surcote

## Création de masques

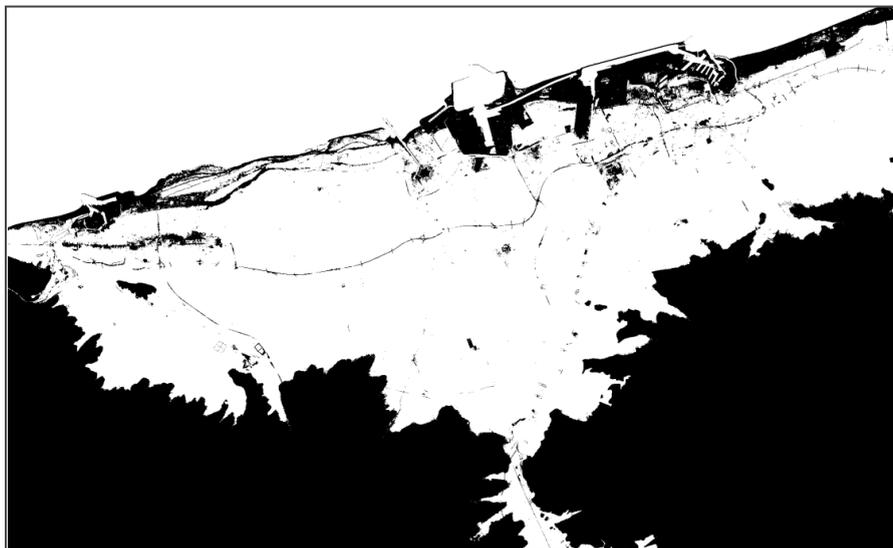
La donnée de base est une image matricielle (ou raster) extraite du MNT RGE ALTI à un mètre de résolution sur toute la zone allant de Calais à Dunkerque, et jusqu'à environ 20km dans les terres.

On procède ensuite à un « masquage » des zones situées en dessous d'une certaine altitude / hauteur d'eau calculée pour un scénario donné (3). Dans un logiciel de système d'information géographique (SIG), cette opération communément appelé « calcul de bande » correspond à utiliser une formule conditionnelle, qui sera appliquée à l'ensemble des pixels du raster :

Exemple de pseudo-code utilisé pour le calcul de bande :

SI altitude < 4.19, ALORS 1, SINON 0

On obtient ainsi un raster binaire (contenant uniquement les valeurs 0 ou 1) qui permet de distinguer les pixels / zones correspondant à une altitude inférieure à une valeur seuil, comme dans l'image ci-dessous obtenue pour une valeur seuil de 4.19 m correspondant à la hauteur PHMA actuelle.



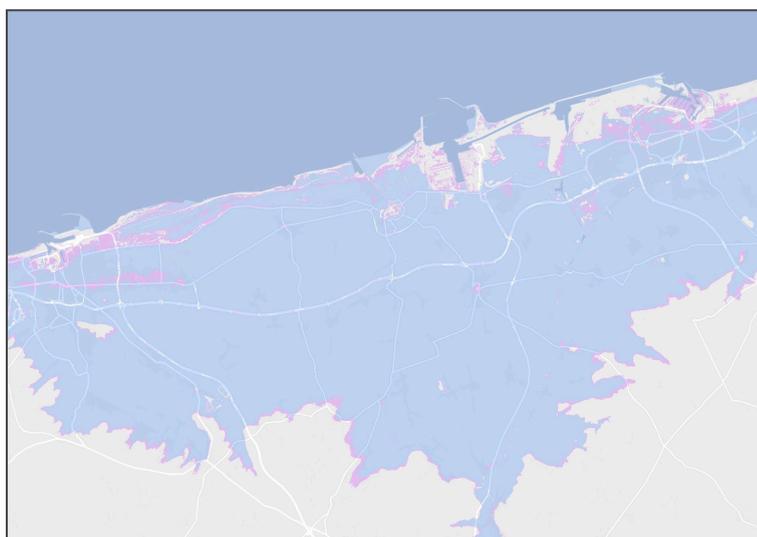
↑ **Figure 9 :** Exemple d'un masque binaire obtenu par seuillage du MNT

Le raster obtenu peut ensuite être utilisé pour produire la carte en utilisant 100 % de transparence pour les pixels de valeur 0, et une couleur et de la transparence pour les pixels de valeur 1. L'ensemble des rasters binaires ainsi produits sont intégrés aux livrables de cette étude dans le système de projection EPSG:5698.

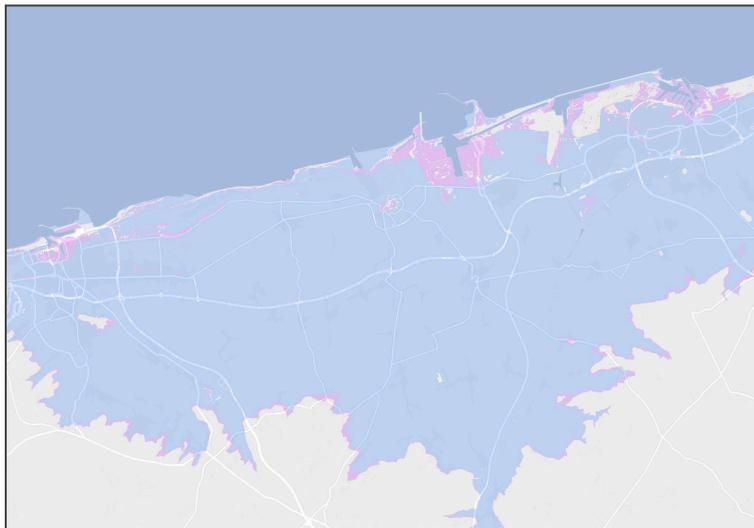
# Résultats

Ci-dessous quelques cartes obtenues avec la différence entre 2020 et 2100 SSP5-8.5.

Les zones en bleu représentent les altitudes inférieures à une hauteur seuil PHMA + hausse du niveau marin pour 2100. Les parties qui apparaissent en rose prennent en compte une surcote avec période de retour centennale.



↑ **Figures 10 et 11 :** exemple de carte PHMA + surcote en 2020



↑ **Figures 12 et 13** : exemple de carte PHMA + surcote en 2100 selon le scénario SSP5-8.5

On peut voir qu'en 2020, la quasi intégralité de la plaine littorale située dans la zone d'étude est déjà située sous le niveau PHMA. **Même si la hausse projetée pour 2100 va forcément augmenter le risque de submersion, la différence visible pour le site nucléaire concerne surtout le phénomène de surcote.**

C'est aussi le phénomène présentant le plus d'incertitude. C'est pourquoi un risque d'événement extrême provoquant une surcote supérieure à ce qui a été calculé par le SHOM et CEREMA (utilisée dans un cadre légal) ne peut être écartée. Malgré que la zone ne présente pas de risque sismique, un raz-de-marée peut également être provoqué par une puissante onde de tempête, ainsi que des phénomènes de glissement de terrain terrestre ou sous-marin.

# Limites

L'approche implémentée ici tient uniquement compte de l'altitude et ne peut suffire à cartographier précisément les zones directement exposées au risque de submersion.

Il faut tenir compte de la précision altimétrique des données utilisées. En effet, le MNT RGE ALTI est produit avec une **marge d'erreur sur le positionnement vertical annoncée de 20 cm** (pour les données LiDAR comme celle utilisée sur la bande littorale).

Dans une région comme celle de la plaine de Flandre où l'altitude est globalement basse, la méthode employée a pour effet de surestimer les zones réellement exposées à une submersion. C'est pourquoi les cartes ainsi produites ne peuvent suffire à une analyse de risque et ne sont pas comparables avec des cartes issues de simulations comme celles réalisées pour des documents comme le PPRL (Plan de Prévention des Risques Littoraux).

C'est une projection statique du niveau de la mer, et contrairement à des simulations hydrodynamiques, la distance au rivage, l'effet des vagues, le débit des rivières ou encore le relief sous-marin ne sont pas pris en compte. **Elle ne permet pas non plus de prendre en compte la réduction du risque liée à la présence d'ouvrage de protection comme des digues.**

Par conséquent, on ne peut pas lire la carte en présentant les zones bleues comme « espaces submergés en 2100 », car on met simplement en évidence les espaces situés sous un seuil d'altitude, et dans une situation de marée extrême, tandis que les phénomènes en jeu sont beaucoup plus complexes et en interaction (marée, tempêtes et surcote, érosion dunaire, rupture éventuelle d'ouvrage de protection...) (4). **C'est bien l'effet cumulé de ces différents facteurs qui va créer une situation de risque, mais c'est également pour cette raison que le phénomène de submersion marine est extrêmement difficile à simuler** (5).

Concernant les faibles différences entre deux scénarios SSP3-7.0 ou SSP5-8.5, ou entre les cartes produites pour 2080, 2100 ou 2120, et leur différence peu marquée avec la carte 2020, cela s'explique par la lenteur du phénomène de montée des eaux et l'inertie du système océanique. L'inertie est plus importante pour l'océan que pour l'atmosphère. À l'horizon 2100, si la différence de températures extrêmes se fera vraiment ressentir, la chronologie pour les océans est différente et 50 années sont peu de choses à une échelle

géologique. D'un autre côté, même si on parvenait à stopper le réchauffement climatique dès demain, les océans continueront à se réchauffer pendant des dizaines d'années (6).

Il faut aussi rappeler que l'enveloppe d'incertitude est assez grande sur ces projections de hauteurs d'eau (comme on peut le voir avec la projection de hauteur « low confidence »), car le paramètre de fonte des calottes glaciaires reste difficile à modéliser.

Enfin, on a parfois en tête des images de recul du trait de côte assez impressionnantes à certains endroits du monde, mais il faut avoir à l'esprit qu'il y a **d'autres phénomènes plus rapides qui sont en jeu (érosion, subsidence)**, et ce sont en général ceux-là qui, couplés avec les autres phénomènes marins, peuvent provoquer une « avancée » de la mer très rapide.

# Références scientifiques

(1) Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M. *et al.* Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nat. Clim. Chang.* **9**, 705–710 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8> (visible on researchgate)

(2) IPCC, 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 [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, 2391 pp., (2021). <https://doi.org/10.1017/9781009157896> (open access)

(3) Agnès Tellez-Arenas, Robin Quique, Faïza Boulahya, Gonéri Le Cozannet, François Paris, et al.. Scalable Interactive Platform for Geographic Evaluation of Sea-Level Rise Impact Combining High-Performance Computing and WebGIS Client. *Communication climate change information for decision-Making*, , pp.163-175, (2018), 978-3-319-74669-2. [hal-02137523](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02137523) (open access)

(4) Cazenave, A. and Cozannet, G.L. (2014), Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2: 15-34. <https://doi.org/10.1002/2013EF000188> (open access)

(5) Gonéri Le Cozannet, Jeremy Rohmer, Anny Cazenave, Déborah Idier, Roderik van De Wal, et al., Evaluating uncertainties of future marine flooding occurrence as sea-level rises. *Environmental Modelling and Software*, (2015), pp.44-56.

[10.1016/j.envsoft.2015.07.021](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.021). [hal-01186064v2](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01186064v2) (open access)

(6) Clark, P., Shakun, J., Marcott, S. *et al.* Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Clim Change* **6**, 360–369 (2016).

<https://doi.org/10.1038/nclimate2923> (visible on researchgate)

# Glossaire

**BDTOPO** : Base de Données TOPOgraphiques, modélisation 2D et 3D du territoire et de ses infrastructures sur l'ensemble du territoire français. La BD TOPO® est une description vectorielle 3D (structurée en objets) des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 2 000 au 1 : 50 000.

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Service géologique national, le BRGM est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

**CEREMA** : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. Établissement public relevant du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, il accompagne l'État et les collectivités territoriales pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

**EPR2** : Evolutionary Pressurized Reactor 2. L'EPR2 est une nouvelle version modifiée de l'EPR avec une conception de l'installation simplifiée qui vise à tenir compte des retours d'expérience des chantiers existants de l'EPR et de l'accident de la centrale de Fukushima-Daiichi.

**EPSG** : European Petroleum Survey Group. EPSG est un groupe créé en 1985 qui a défini une liste des systèmes de coordonnées géoréférencées et leur a associé des codes pour les identifier. Ces codes, qui existent toujours sous le nom de « code EPSG », sont notamment utilisés dans les standards de l'Open Geospatial Consortium et dans certains logiciels de Système d'information géographique.

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. C'est un organisme intergouvernemental chargé d'évaluer l'ampleur, les causes et les conséquences du changement climatique en cours.

**GPD** : Generalised Pareto Distribution. En statistique, la distribution de Pareto généralisée est une famille de distributions de probabilité continues.

**GPS** : Global Positioning System. Il s'agit du système mondial de navigation par satellite utilisé pour déterminer des données temporelles, de position et de navigation par rapport à des objets situés à la surface de la Terre.

**IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière. Il s'agit d'un établissement public à caractère administratif ayant pour mission d'assurer la production, l'entretien et la diffusion de l'information géographique de référence en France.

**IGN69** : Référentiel altimétrique terrestre officiel pour le territoire de France continentale, dont la référence pour situer le point zéro est le marégraphe de Marseille.

**LiDAR** : Light Detection And Ranging. Le LiDAR, acronyme anglais de « détection et télémétrie par la lumière », est une technologie de télédétection qui utilise des faisceaux laser pour mesurer des distances et des mouvements précis en temps réel. Les données LiDAR permettent de générer un large éventail de supports, des cartes topographiques détaillées aux modèles 3D précis et dynamiques pour guider en toute sécurité un véhicule autonome dans un environnement en perpétuel mouvement. La technologie LiDAR est également utilisée pour évaluer les dangers et les catastrophes naturelles comme les coulées de lave, les glissements de terrain, les tsunamis et les inondations.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain. C'est une représentation numérique du relief dans laquelle chaque pixel d'une image représente une valeur d'élévation.

**NASA** : National Aeronautics and Space Administration. Il s'agit de l'agence fédérale responsable de la majeure partie du programme spatial civil des États-Unis.

**NGF** : Nivellement général de la France. C'est un réseau de repères altimétriques disséminés sur le territoire français métropolitain continental, ainsi qu'en Corse, dont l'IGN a aujourd'hui la charge. Ce réseau est actuellement le réseau de nivellement officiel en France métropolitaine.

**PBMA** : Plus Basses Mers Astronomiques. Il correspond au zéro hydrographique, le niveau le plus bas théoriquement atteint par les eaux à marée basse et en situation de coefficient de marée 120 ou basse mer astronomique extrême.

**PHMA** : Plus Hautes Mers Astronomiques. Le niveau le plus haut théoriquement atteint par les eaux à marée haute et en situation de coefficient de marée 120 ou haute mer astronomique extrême.

**PPINO** : Protection périphérique contre l'inondation. Ce jargon est utilisé dans le domaine de gestion du risque afin de désigner un ensemble de protections (mur, digues, ...) disposé en périphérie d'un élément de vulnérabilité pour le protéger d'une éventuelle montée des eaux.

**PPRL** : Plan de Prévention des Risques Littoraux. Ce cas particulier du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPRN) est un outil de gestion des risques naturels qui cartographie les risques de submersion marine et qui réglemente l'urbanisation dans les zones exposées.

**RAM** : Référentiel Altimétrique Maritime. Cette base de données maintenue par le Shom contient les informations relatives aux cotes des « zéros hydrographiques » dans les systèmes de référence altimétriques légaux (ex : IGN69) des ports de France métropolitaine et d'outre-mer, ainsi que les niveaux caractéristiques de la marée.

**RGE** : Référentiel Géographique à Grande Échelle. Il contient quatre composantes cohérentes entre elles, déclinées en produits par l'IGN : image, topographique, parcellaire, adresse. La composante topographique du RGE® est composée de la BD TOPO®, modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures, et du RGE ALTI®, description du relief.

**SCAN25** : Une série d'images cartographiques numériques géoréférencées immédiatement utilisables pour localiser et positionner des informations, repérer des interventions, saisir et mettre à jour des données métier, ainsi qu'habiller des documents pour des échelles de visualisation autour du 1 : 25 000. Cette base de données image répond à des besoins clairement identifiés en participant à une plus large diffusion de l'information géographique et en permettant à des néophytes d'appréhender rapidement et en toute simplicité les enjeux cartographiques auxquels ils sont confrontés.

**SEVESO** : La Directive Seveso est le nom générique d'une série de directives européennes qui imposent aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs, appelés « sites Seveso », et d'y maintenir un haut niveau de prévention. Cette directive tire son nom de la catastrophe de Seveso qui a eu lieu en Italie en 1976 et qui a incité les États européens à se doter d'une politique commune en matière de prévention des risques industriels majeurs. Une entreprise Seveso est celle qui a une activité liée à la manipulation, la fabrication, l'emploi ou le

stockage de substances dangereuses (par ex. : raffineries, sites (pétro)chimiques, dépôts pétroliers ou encore dépôts d'explosifs).

**SHOM** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Cet établissement public à caractère administratif français placé sous la tutelle du ministère des Armées a pour mission de connaître et décrire l'environnement physique marin et d'en prévoir l'évolution. À ce titre, il assure la constitution de bases de données maritimes et littorales de référence pour de nombreux thèmes : profondeur des fonds marins, épaves, courants, température de l'eau, salinité, nature des fonds, etc.

**SIG** : Système d'Information Géographique. Ce système d'information est conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. L'acronyme SIG est parfois utilisé pour définir les « sciences de l'information géographique ».

**SONEL** : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales. À la fois regroupement de scientifiques et centre de données, il a pour objectif de diffuser des observations du niveau marin à la côte enregistrées par des marégraphes, de la meilleure qualité métrologique possible, et ce dans le but d'apporter aux chercheurs des éléments qui leur permettront de répondre aux questions qu'ils se posent aujourd'hui sur les changements qui affectent les différentes composantes du niveau de la mer.

**SSP** : Shared Socio-economic Pathways. Les SSP sont une nouvelle génération de scénarios climatiques établis par le GIEC (dans son sixième rapport) pour appréhender les futurs possibles en termes de dérive climatique. Ce sont des narratifs, traduits en ensembles d'hypothèses socio-économiques (Population, Éducation, Urbanisation, PIB). Ces narratifs décrivent des évolutions alternatives de la société future en l'absence de changement climatique ou de politique climatique.

**SSP3-7.0** : scénario avec des émissions de GES élevées qui correspond à des niveaux de réchauffement de 1,5 °C (2021-2040), 2,1 °C (2041-2060) et 3,6 °C (2081-2100)

**SSP5-8.5** : scénario avec des émissions de GES très élevées qui correspond à des niveaux de réchauffement de 1,6 °C (2021-2040), 2,4 °C (2041-2060) et 4,4 °C (2081-2100)