



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Scénarios de référence pour l'élévation du niveau de la mer

Rapport final

BRGM/RP-74351-FR

Version 4 du 8 septembre 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

BRGM

Ce rapport a été vérifié le 05/09/2025 et approuvé le 05/09/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Niveau de la mer, changement climatique, TRACC

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM 2025. Scénarios de référence pour l'élévation du niveau de la mer. Rapport final V4. BRGM/RP-74351-FR, 69 p., 8 Fig., 7 Tab, 4 Ann.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 23/05/2025

Synthèse

Dans le cadre des travaux en cours de définition de la prochaine stratégie française énergie-climat, différents ministères souhaitent disposer de projections d'élévation du niveau moyen de la mer pour les côtes françaises pour différents niveaux de réchauffement global et horizons temporels, s'appuyant sur les derniers modèles du GIEC (6^{ème} rapport d'évaluation).

Ce rapport s'adresse au Ministère de la Transition Ecologique (MTE) avec qui le BRGM a passé un marché en quasi-régie pour l'élaboration et la mise à disposition de projections du niveau de la mer pour la France. L'exploitation de l'étude sera faite par les services des ministères de l'aménagement du territoire et de la transition écologique, en charge de l'adaptation au changement climatique, de la prévention des risques, de l'aménagement du territoire, ainsi que des infrastructures et transports.

Rappelons que depuis la publication de la circulaire du 27 juillet 2011, le scénario de référence utilisé pour les plans de prévention des risques littoraux en France prévoit une augmentation du niveau marin de 60 cm en 2100¹ par rapport aux niveaux de la fin 20^{ème} siècle.

L'élévation du niveau de la mer : observations, causes, projections et implications

Le taux d'élévation du niveau marin moyen mondial était de 1,35 mm/an pendant la période 1901-1990 (0,78-1,92 mm/an, fourchette très probable²). L'élévation du niveau marin accélère : elle a atteint 3,25 mm/an (2,9-3,6 mm/an, fourchette très probable) pendant la période 1993-2018 (degré de confiance élevé) et 3,7 mm/an (3,2-4,2 mm/an, fourchette très probable) entre 2006 et 2018. Du fait de cette élévation du niveau marin moyen, les niveaux extrêmes de la mer ont augmenté de façon constante dans la plupart des régions (Fox-Kemper et al., 2021).

À l'échelle globale, l'élévation du niveau de la mer est essentiellement causée par le changement climatique d'origine anthropique, qui a pour conséquences l'expansion thermique des océans et la fonte des glaciers de montagne et des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique. Ce bilan global est modulé dans une moindre mesure par les apports (ou les rétentions) d'eaux continentales. Ces effets globaux ne se traduisent pas par une montée de l'élévation du niveau de la mer uniforme à l'échelle du globe : la dynamique océanique, les effets gravitationnels et rotationnels des redistributions de masses d'eau et de glace et les déformations du sol (subsidence ou surrection³) ont des effets régionaux et locaux qui peuvent amplifier ou modérer la vitesse de l'élévation du niveau de la mer (Gregory et al., 2019).

¹ Dans la circulaire du 27 juillet 2011, les 60 cm sont associés à l'échéance 2100 (« L'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau marin égale à 60 cm à l'horizon 2100 (sur la base de l'hypothèse « pessimiste » de l'ONERC, cf. annexe IV de la circulaire du 27 juillet 2011) dont 20 cm seront intégrés directement à l'aléa de référence. »). Dans le guide méthodologique PPRL 2014 (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide_m%C3%A9thodo_PPRL_%202014.pdf), en revanche, l'aléa à 100 ans est assimilé à 2100 (voir page 15 : « aléa à échéance 100 ans (dit aléa 2100) »). Nos résultats rappellent que les écarts entre 2100 et 2120 sont de l'ordre de 20 à 25 cm. Les incertitudes pesant sur les projections du niveau marin étant fortement asymétriques (Le Cozannet et al., 2019), nos résultats impliquent qu'il est pratiquement acquis que l'élévation du niveau de la mer dépassera 60 cm dans la plupart des sites côtiers en France avant 2120.

² Dans le langage calibré du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) pour restituer les incertitudes, « virtuellement certaine » correspond à une probabilité supérieure à 99%, « très probable » à une probabilité supérieure à 90% et « probable » à une probabilité supérieure à 83%.

³ Subsidence : affaissement de la surface du sol. Surrection : soulèvement de la surface du sol.

Il est virtuellement certain² que le niveau de la mer global continuera à augmenter au 21^{ème} siècle (Fox-Kemper et al., 2021). En effet, l'expansion thermique des océans, la fonte des glaciers de montagne et des inlandsis se poursuivront tout au long du 21^{ème} siècle et au-delà. En 2050, l'élévation du niveau marin atteindra entre 15 et 29 cm en moyenne globale par rapport à la période de référence 1995-2014. En 2100, les estimations globales varient de 28 cm à 1,01 m selon les scénarios climatiques. Cependant, une élévation du niveau marin plus rapide atteignant par exemple 1,7 m en moyenne globale en 2100 ne peut pas être exclue en cas d'initiation d'effondrement de certains secteurs de l'inlandsis de l'Antarctique (Fox-Kemper et al., 2021). Un tel scénario pourrait résulter de l'initiation d'une instabilité de falaises de glace marines (MICI – marine ice cliffs instability) dès le 21^{ème} siècle. Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) accorde un niveau de confiance bas dans les processus pouvant conduire à ce type de scénario. Néanmoins, ils ne peuvent être exclus et sont typiquement utilisables pour des infrastructures côtières à longue durée de vie telles que les ports, ainsi que pour les villes et les zones d'activités ou industrielles.

Contrairement aux températures et aux précipitations moyennes et extrêmes qui cesseront d'augmenter lorsque le réchauffement climatique aura été stabilisé, **le niveau de la mer continuera à augmenter pendant des siècles**. En 2300, les estimations varient de 50 cm à 7 m selon les scénarios climatiques, mais sans pouvoir exclure 15 m en cas d'initiation de l'effondrement de l'Antarctique et de très fortes émissions de gaz à effets de serre (GIEC, AR6 WG1 SPM, 2021). Une étude plus récente propose une révision de cette valeur de 15 m à 10,4 m pour un scénario défavorable conduisant à 8-10°C de réchauffement global⁴ en 2300 (van de Wal et al., 2022). Cette même étude montre par ailleurs que 2,5 m d'élévation du niveau de la mer ne peuvent être exclus en 2300, même en cas de stabilisation du changement climatique à 2°C.

Ces constats amènent le GIEC à souligner le caractère très spécifique de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer : il s'agit à la fois de prévenir, dès aujourd'hui, les dommages dus à l'augmentation progressive de l'élévation du niveau de la mer à laquelle se superposent des événements extrêmes tels que des tempêtes, cyclones ou épisodes de houles ou de pluies intenses, mais aussi de considérer que **l'élévation du niveau de la mer se poursuivra pendant des siècles** et dépassera nécessairement plusieurs mètres à une échéance plus ou moins lointaine, qu'il n'est pas possible de définir précisément aujourd'hui.

Cette perspective de long terme a des implications complexes pour la gestion des infrastructures côtières à longue durée de vie telle que les ports, les villes et des zones d'activités ou industrielles. L'un des enjeux étant d'éviter d'aggraver encore davantage la charge d'adaptation pour les générations futures lors des projets de développement des zones côtières.

Objectif de ce rapport : fournir des scénarios de référence pour le niveau marin dont un scénario d'élévation du niveau moyen de la mer⁵ régionalisé pour la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC).

L'objectif de ce rapport est de présenter les projections de niveau moyen de la mer pour la France (métropole et outre-mer) dont l'un correspond notamment à la trajectoire de réchauffement de

⁴ Le "réchauffement global" correspond à une élévation des températures de surface moyennes globales relativement à une période de référence. La période de référence généralement choisie est 1850-1900 pour le niveau de réchauffement global. Les périodes de référence pour l'élévation du niveau de la mer se situent généralement à la fin du 20^{ème} siècle ou au début du 21^{ème} afin de limiter les effets des incertitudes de l'évolution du niveau marin avant le milieu du 20^{ème} siècle. Ces périodes de référence sont systématiquement précisées dans ce rapport.

⁵ Le niveau de la mer moyen est défini dans ce rapport suivant Gregory et al. (2019) comme la moyenne du niveau marin pendant une période suffisamment longue pour éliminer les effets de la marée, des événements extrêmes et de la variabilité interannuelle du climat.

référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). Ce scénario correspond à un niveau de réchauffement climatique global de 3°C en 2100 par rapport à la période préindustrielle 1850-1900 (4°C en France hexagonale – ci-après appelé « scénario 3°C (TRACC) »)⁶.

Le niveau moyen de la mer en un point particulier correspond à une moyenne sur une période suffisamment longue, typiquement une vingtaine d'années. À cette élévation du niveau moyen de la mer se superposent la marée et les événements extrêmes, qui sont eux-mêmes également modifiés par le changement climatique, l'élévation du niveau moyen de la mer et les évolutions de la morphologie côtière.

Au premier ordre, il est possible de supposer que la marée et les effets des événements extrêmes se superposent à l'élévation du niveau moyen de la mer⁷. Cette approche est celle du guide méthodologique de 2014 des plans de prévention des risques littoraux pour le volet submersion marine.

L'élévation du niveau moyen de la mer peut être mesurée dans un référentiel géocentrique (niveau de la mer absolu) ou dans un référentiel terrestre (niveau de la mer relatif). Le niveau de la mer relatif prend en compte les mouvements verticaux du sol induits par l'ajustement isostatique glaciaire (réponse de la terre solide à la dernière déglaciation), les effets gravitationnels, rotationnels et de déformations induites par la déglaciation actuelle (cette dernière étant due au réchauffement climatique d'origine anthropique) et d'autres mouvements verticaux du sol locaux d'origine naturelle ou anthropique (subsidence, surrection). **Ces derniers mouvements verticaux du sol locaux ne sont pas considérés dans les scénarios fournis dans ce rapport, les seules déformations du sol prises en compte dans cette étude étant l'ajustement isostatique glaciaire.** Une étude récente menée par le BRGM (Thiéblemont et al., 2024) montre que la moitié des plaines côtières françaises est affectée par une subsidence supérieure à 1 mm/an. Extrapoler cette subsidence linéairement sur le 21^{ème} siècle conduirait à majorer les scénarios de niveau moyen de la mer **d'au moins 10 cm dans les zones considérées**⁸.

⁶ En annexe de ce rapport, des scénarios complémentaires potentiellement utiles pour des problèmes d'adaptation côtière d'utilisateurs avancés sont présentés, tels que les gestionnaires d'infrastructures critiques à longue durée de vie et afin de permettre d'évaluer les bénéfices de l'atténuation ou les limites à l'adaptation. Ces scénarios correspondent à un réchauffement global de 5°C en 2100 d'une part, à une stabilisation du réchauffement climatique global à 2°C d'autre part.

⁷ Les projections de vagues, de surcotes marines et les études sur les modifications de la marée actuellement disponibles suggèrent que cette hypothèse est valable en première approximation dans beaucoup de sites côtiers. Néanmoins, le GIEC rappelle que la marée, les surcotes marines, les vagues et les débits des fleuves peuvent être modifiés de manière plus importante dans certains secteurs, notamment les baies et les estuaires du fait du changement climatique et des interventions humaines. Par ailleurs, des modifications des caractéristiques des cyclones sont anticipées en outre-mer en raison du changement climatique. Dans ces cas, l'imprécision commise en faisant l'approximation de limiter l'effet du changement climatique à une augmentation du niveau de la mer peut excéder 10% du changement projeté. Cet aspect soulève notamment un besoin d'études complémentaires afin d'intégrer dans les différentes politiques publiques concernées les éventuelles conséquences des modifications de caractéristiques des cyclones, marées, surcotes et vagues induites par l'effet du changement climatique.

⁸ Ces zones sont identifiables sur le service European Ground Motion Service de Copernicus. <https://egms.land.copernicus.eu/> Le Guide Méthodologique PPRL de 2014 laisse la possibilité de considérer la subsidence pour majorer la consigne de 60 cm en 2100 de la directive du 27 juillet 2011.

Méthode

La méthode et les données utilisées dans ce rapport sont fondées sur l'état de l'art en matière de projection d'élévation du niveau moyen de la mer, et reprennent notamment des travaux évalués dans les 5^e et 6^e rapports du GIEC. Spécifiquement, la méthode utilisée dans ce rapport consiste à :

- préciser les hypothèses de la TRACC : pour l'élévation du niveau moyen de la mer, il est en effet nécessaire de préciser les échéances temporelles auxquelles des niveaux de réchauffement anticipés seraient atteints : dans les hypothèses que nous avons retenues, la trajectoire à 3°C atteindrait 2°C vers 2050 et 3°C vers 2100 ;
- sélectionner des simulations climatiques disponibles compatibles avec cette trajectoire et utilisées dans des travaux récents, notamment les 5^e et 6^e rapports du GIEC ;
- régionaliser les projections de niveau moyen de la mer en France métropolitaine et outre-mer issues de cette sélection de simulations climatiques, en utilisant des méthodes établies depuis le 5^e rapport du GIEC.

La résolution cible des données produites dans le cadre de cette étude est de 1°×1° (longitude × latitude, soit de 70 à 80 km aux latitudes de l'hexagone), ce qui correspond aux standards actuels des données présentées dans les rapports du GIEC.

Résultats

Les résultats montrent que pour un scénario conduisant à 3°C de réchauffement climatique global en 2100, l'élévation du niveau moyen marin projetée sur une sélection de 14 sites portuaires français de métropole et d'outre-mer est de l'ordre de 25 cm [15 ; 35 cm] en 2050, 65 cm [45 ; 85 cm] en 2100 et de 85 [65 ; 110 cm] en 2120 (médiane de l'intervalle « Probable » [17^{ème} ; 83^{ème} percentile de la distribution])⁹ **par rapport à la période de référence 1995-2014**. Au-delà de 2120, l'élévation du niveau moyen de la mer se poursuit à des taux de l'ordre du centimètre par an.

Selon les régions, les valeurs exactes peuvent s'écarter d'une dizaine de centimètres des valeurs données ci-dessus. L'élévation projetée du niveau moyen de la mer est généralement sensiblement plus importante dans les régions d'outre-mer, situées en zones tropicales, loin des sources de fonte de glace, ce qui s'explique par les effets gravitationnels et rotationnels associés aux pertes de masses en Arctique et en Antarctique.

Dans ce scénario de 3°C de réchauffement climatique global en 2100 choisi pour la TRACC, les simulations actuellement disponibles suggèrent que l'initiation d'un effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique (MICI) aurait des effets limités à quelques centimètres sur l'élévation du niveau moyen de la mer au 21^{ème} siècle. Ceci ne vaut que pour le scénario de 3°C de réchauffement climatique global et pour le 21^{ème} siècle : les effets potentiels sont de plusieurs dizaines de centimètres en 2100 pour des niveaux de réchauffement supérieurs, et ils ne sont pas quantifiés dans le cadre de cette étude au-delà de 2100 pour un réchauffement moyen global de 3°C en 2100 en raison d'un déficit de connaissances à la date d'écriture de ce rapport. Nous rappelons que le GIEC accorde un niveau de confiance bas dans les processus pouvant conduire à de tels scénarios.

⁹ Nous ne fournissons pas dans ce rapport, pour les scénarios d'élévation du niveau de la mer étudiés, les valeurs correspondant aux 95^{ème} percentiles des projections. En effet, le BRGM, sur la base de travaux publiés en 2019 (Le Cozannet et al., 2019), estime que la confiance dans les valeurs correspondant à ces percentiles élevés est trop faible pour être utilisée dans le cadre de la TRACC.

Les travaux montrent que pour un réchauffement de 3°C en 2100, les scénarios « probables » précités avec ou sans effondrement de l'Antarctique coïncident à quelques centimètres près. Ainsi ces deux approches ou scénarios se confondent dans le cadre décrit par la TRACC.

Notre rapport précise que les cas d'usages idéalisés présentés dans cette étude mériteraient une application sur des cas réels, notamment dans les zones estuariennes et en prenant en compte les effets du changement climatique sur les pluies intenses. Enfin, il est important de permettre aux utilisateurs avertis, notamment gestionnaires d'infrastructures critiques, de considérer des scénarios complémentaires plus pénalisants que le scénario 3°C (TRACC) afin d'envisager des stratégies d'adaptation y compris dans des cas encore plus défavorables qu'un réchauffement de 3°C global en 2100. Dans le cas où un scénario prudent serait amené à être utilisé, le choix de ce scénario pourrait être mis en cohérence avec celui considéré en Grande-Bretagne et aux Pays-Bas pour anticiper l'adaptation d'infrastructures critiques, en utilisant le scénario de 5°C de réchauffement global avec effondrement des calottes de glace (scénarios fournis en annexe).

Ce rapport insiste sur l'importance de poursuivre des travaux de recherche et de développement pour assurer une continuité entre simulations climatiques et observations sur le début du 21^{ème} siècle, ainsi que sur l'importance du maintien et du développement d'un réseau marégraphique fonctionnel pour l'étude des niveaux marins moyens et des extrêmes. Il suggère de pérenniser et étendre le groupe scientifique constitué dans le cadre de la présente étude afin de disposer d'une communauté d'utilisateurs avertis des scénarios de niveau marin de la TRACC. Il insiste sur l'importance de former les acteurs de l'adaptation susceptibles d'utiliser ces scénarios.

Les projections d'élévation du niveau de la mer sont susceptibles d'évoluer, notamment avec l'émergence du service européen Copernicus European Ground Motion Service (EGMS) qui permet de caractériser les mouvements verticaux du sol locaux, et avec les recherches portant sur les projections d'élévation du niveau de la mer à de plus hautes résolutions menées en Méditerranée et sur le plateau continental de l'Europe de l'Ouest. Il s'agit de travaux de recherche menés respectivement par le BRGM et Mercator Ocean notamment.

Sommaire

Synthèse	3
Sommaire.....	9
Liste des figures	11
Liste des tables	12
Liste des annexes	12
Liste des acronymes	13
1. Introduction	15
1.1. Contexte.....	15
1.2. Objectifs.....	16
1.3. Cadre de réalisation du projet	16
1.4. Structure du rapport	17
2. Enjeux de l'élévation du niveau de la mer.....	19
2.1. L'élévation du niveau de la mer et ses conséquences	19
2.1.1. <i>Observations</i>	19
a) <i>Niveau de la mer</i>	19
b) <i>Conséquences</i>	19
2.1.2. <i>Projections</i>	20
a) <i>Niveau de la mer</i>	20
b) <i>Conséquences</i>	20
2.2. Adaptation.....	21
2.2.1. <i>Mesures d'adaptation</i>	21
2.2.2. <i>Autres dimensions de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer</i>	22
2.2.3. <i>Quelle adaptation à l'élévation du niveau de la mer ?</i>	22
3. Définition de scénarios de références et méthodes	25
3.1. Scénarios	25
3.2. Définition des scénarios	25
3.2.1. <i>Scénario 3°C (TRACC)</i>	25
3.2.2. <i>Scénarios complémentaires</i>	27
3.3. Méthodes de projections globales et régionales	27
3.3.1. <i>Méthode générale</i>	28
3.3.2. <i>Jeux de données</i>	30
3.3.3. <i>Extrapolation au-delà de 2100</i>	31
3.3.4. <i>Agrégation probabiliste</i>	33
4. Résultats : scénarios de niveau marin	35
4.1. Scénario 3°C (TRACC)	35
4.2. Scénarios avec initiation d'effondrement des calottes de glace en Antarctique	37
4.3. Précisions sur l'utilisation des 50 ^{eme} et 83 ^{eme} percentiles	40
5. Cadres potentiels d'utilisation	43
5.1. Cadre général	43
5.1.1. <i>Cas d'usages suivant le contexte décisionnel</i>	43
5.1.2. <i>Les scénarios d'élévation du niveau de la mer dans le processus d'adaptation</i> ...	43
5.2. Applications potentielles	45
5.2.1. <i>Référencement vertical des données</i>	45
5.2.2. <i>Cas d'utilisation du scénario 3°C (TRACC)</i>	45

5.3. Limites des scénarios de niveau marin	46
6. Conclusion	49
7. Remerciements.....	51
8. Références	53

Liste des figures

Figure 1. Illustration de la chaîne de traitements permettant de construire les projections régionalisées selon les scénarios de la TRACC pour chaque composante i.....	28
Figure 2. Exemple de construction de l'ensemble de réalisations pour le scénario à 3°C de la composante glaciers : (gauche) trajectoires de températures en surface sélectionnées et (droite) changement de niveau marin global associés à cette sélection pour la composante glaciers. Les couleurs indiquent les scénarios de concentration de GES correspondant pour chaque trajectoire.	29
Figure 3. Exemple de « fingerprint » utilisé pour la régionalisation. Ici, le fingerprint considéré combine l'ensemble des 19 régions glaciaires.....	30
Figure 4. Projection de l'élévation niveau marin global due à la composante glaciers pour le scénario à 3°. Chaque trajectoire sélectionnée de l'émulateur est représentée par une couleur aléatoire. Le trait noir plein (pointillé) indique la médiane (les 17 ^{ème} et 83 ^{ème} percentiles). La barre verticale indique le début de la période extrapolée.	32
Figure 5. Projections régionalisées du niveau marin moyen médian (en mètres) pour le scénario 3°C (TRACC) en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.	36
Figure 6. Projections régionalisées du niveau marin moyen (en mètres) pour le scénario 3°C (TRACC) incluant les processus d'effondrements partiels de l'inlandsis en Antarctique (MICI) en 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014.	39
Figure 7. Projections régionalisées du niveau marin moyen (en mètres, valeur médiane à gauche et 83 ^{ème} percentile à droite) du scénario TRACC 3°C en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.	41
Figure 8. Exemple de la projection du niveau marin du scénario 3°C (TRACC) à la Rochelle ramenée dans le référentiel altimétrique IGN69. Les points indiquent les enregistrements marégraphiques. L'enveloppe en rouge délimite les percentiles 17 et 83. Cette étape est nécessaire pour ramener les projections du niveau marin (relative à la période 1995-2014) dans un référentiel vertical identique à celui de la topographie. Les projections montrent par ailleurs une bonne continuité avec les observations marégraphiques.	45

Liste des tables

Table 1. Scénario 3°C (TRACC) à la date d'écriture de ce rapport.....	26
Table 2. Adaptation du scénario 3°C (TRACC) pour l'élévation du niveau de la mer.....	26
Table 3. Récapitulatif par composante des jeux de données utilisés pour les projections régionales du niveau marin des scénarios TRACC.	31
Table 4. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario 3°C (TRACC) (sans processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. La valeur médiane est en gras et les bornes d'incertitudes (17 ^{ème} et 83 ^{ème} percentiles) entre crochets. Les projections pour l'échéance 2150 inscrites en italique sont associées à une fiabilité réduite et donc livrées à titre indicatif.	37
Table 5. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario 3°C (TRACC) (sans les processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI) et le scénario à 3°C avec les processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI, considérant le 83 ^{ème} percentile de la distribution de probabilité. Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014.	38
Table 6. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le 83 ^{ème} percentile du scénario 3°C (TRACC) qui pour mémoire n'intègre pas les processus de fonte accélérée en Antarctique (MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014.	40
Table 7. Cas d'usage des scénarios d'élévation du niveau de la mer (liste non exhaustive)	46

Liste des annexes

Annexe 1	Données ISMIP6 et LARMIP-2	57
Annexe 2	Ajustement des contributions aux projections du niveau marin pour la période de référence 1995-2014.....	59
Annexe 3	Extrapolation au-delà de 2100 et modélisation des résidus	61
Annexe 4	Scénarios complémentaires à 1,5°, 2° et 5° de réchauffement climatique global	63

Liste des acronymes

BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement
ECLISEA	European advances on CLimate services for coasts and SEAs
EGMS	European Ground Motion Service
ERA4CS	European Research Area for Climate Services
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GNSS	Global Navigation Satellite System
INSeaPTION	INtegrating SEA-level Projections in climate services for coastal adaptation
MEET	Ministère Ecologie Energie Territoires
MICI	Marine Ice Cliffs Instability
MISI	Marine Ice Sheets Instability
MTE	Ministère de la Transition Ecologique
PNACC	Plan National D'Adaptation au Changement Climatique
PNACC3	3 ^{ème} Plan National D'Adaptation au Changement Climatique
SONEL	Système d'Observations du Niveau des Eaux Littorales
TRACC	Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Dans le cadre des travaux en cours de définition de la prochaine stratégie française énergie-climat, le MTE et d'autres ministères souhaitent disposer de projections d'élévation du niveau moyen de la mer pour les côtes françaises intégrant les effets du changement climatique pour différents niveaux de réchauffement global et horizons temporels et s'appuyant sur les derniers modèles, notamment ceux évalués dans le 6^e rapport du GIEC.

Dans le cadre du 3^e Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC3), publié en mars 2025, le MTE privilégie une trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) correspondant à un scénario de 3°C en moyenne globale (soit 4°C en France). Pour cette étude, la demande est donc de fournir un scénario de référence correspondant à ce niveau de réchauffement global de 3°C. Dans la suite de ce rapport, ce scénario privilégié par le MTE est appelé « scénario 3°C (TRACC) ».

L'élévation du niveau de la mer est une conséquence très particulière du changement climatique : lorsque le réchauffement climatique aura été stabilisé, les températures moyennes et extrêmes cesseront d'augmenter. En revanche, l'élévation du niveau de la mer se poursuivra pendant des centaines d'années, en particulier du fait de la fonte des inlandsis¹⁰ du Groenland et de l'Antarctique (Fox-Kemper et al., 2021). Ceci complexifie non seulement la réalisation de scénarios, mais également les cas d'usage. En particulier, les décisions actuelles relatives à l'aménagement des zones côtières peuvent soit favoriser, soit complexifier l'adaptation pendant plusieurs générations (Cooley et al., 2022).

Dans le cadre des projets ERA4CS¹¹ INSeaPTION et ECLISEA, le BRGM a développé une interface cartographique (webmapping) permettant la mise à disposition des projections de niveau marin du GIEC (5^{ème} rapport de 2013, rapport spécial sur les océans et la cryosphère de 2019) et d'autres scénarios complémentaires, impliquant notamment un effondrement de l'Antarctique de l'Ouest. Cet outil¹² a été intégré comme démonstrateur dans le service climatique national DRIAS¹³ dans le cadre d'une collaboration avec Météo-France (Convention « Services Climatiques » entre le MEET et le CNRS).

En juillet 2021, la NASA a mis en ligne les données du 6^e rapport du GIEC. Ce site¹⁴ est la référence actuelle pour les chercheurs et les praticiens de l'adaptation, mais il présente quelques limites, notamment en ce qui concerne (1) la prise en compte des mouvements verticaux du sol, (2) la traçabilité des choix effectués pour la production de projections pour différents niveaux de réchauffement global, et (3) la cohérence des projections avant et après 2100¹⁵.

¹⁰ Un inlandsis est une étendue de glace continentale de très grandes dimensions. Actuellement la Terre contient 2 inlandsis au Groenland et en Antarctique.

¹¹ Voir la liste des projets : <https://jpi-climate.eu/programme/era4cs/>

¹² Le démonstrateur de service climatique développé par le BRGM pour donner accès aux projections d'élévation du niveau de la mer est accessible via le lien <https://sealevelrise.brgm.fr/sea-level-scenarios>

¹³ Le service climatique DRIAS est accessible via le lien : <https://www.drias-climat.fr/>

¹⁴ Le site de la NASA, présentant les données de niveau marin du 6^e rapport du GIEC, est accessible via le lien : <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

¹⁵ Les projections mises à disposition par la NASA présentent des ruptures dans les tendances et l'ampleur des incertitudes avant et après 2100.

Avant la parution de ce rapport, il n'existait donc pas de scénarios d'élévation du niveau de la mer à l'état de l'art, directement utilisables par les praticiens de l'adaptation, et alignés avec les scénarios anticipés pour la TRACC et le PNACC3.

1.2. OBJECTIFS

L'objectif général de cette étude est de développer et de mettre à disposition des projections de niveau de la mer pour la France (hexagone, Corse et outre-mer) correspondant non seulement à la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), mais également à un certain nombre de scénarios complémentaires potentiellement utiles pour un certain nombre de problèmes d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer. De manière plus spécifique, les scénarios en question correspondent à :

- la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), correspondant à un scénario de réchauffement climatique global de 3°C vers 2100 (4°C en France – ci-après appelée « scénario 3°C (TRACC) »),
- un scénario de stabilisation de ce réchauffement à 1,5°C en moyenne globale.
- des scénarios complémentaires potentiellement utiles pour des problèmes d'adaptation d'utilisateurs avancés, tels que les gestionnaires d'infrastructures critiques à longue durée de vie. Ces scénarios correspondent à un réchauffement de 5°C en 2100 d'une part, à une stabilisation du réchauffement climatique global à 2°C d'autre part.

La résolution cible des données produites dans cette étude est de 1°×1° (longitude × latitude), ce qui correspond aux standards actuels des données présentées dans les rapports du GIEC. Le projet vise également à préciser les incertitudes et des cas d'usage des scénarios de niveau marin ainsi produits.

Les scénarios sont fournis jusqu'à 2150. Au-delà, les incertitudes deviennent très importantes. Le lecteur peut se référer à Turner et al. (2023) pour des projections indicatives d'élévation du niveau de la mer jusqu'à 2500.

Les scénarios présentés dans ce rapport sont des scénarios de niveau marin moyen et non des scénarios de niveaux extrêmes.

1.3. CADRE DE REALISATION DU PROJET

Pour la réalisation de ce projet, le MTE et le BRGM ont passé un marché en quasi-régie portant sur une prestation d'élaboration et de mise à disposition de projections du niveau de la mer pour la France comprenant 2 phases :

- Une phase de développement des scénarios de niveau marin, pour les différents échéances et scénarios de réchauffement retenus. Cette phase est l'objet de ce rapport.
- Une phase visant à mettre à disposition les données ainsi produites via une interface web, prévue ultérieurement.

Le projet est accompagné par :

- un comité de pilotage comprenant financeurs (MTE) et prestataire (BRGM) ;
- un comité scientifique comprenant des chercheurs et ingénieurs d'établissements publics et privés concernés par l'élévation du niveau de la mer, ses impacts et l'adaptation associée.

1.4. STRUCTURE DU RAPPORT

Le rapport est structuré de la manière suivante :

- Le chapitre 2 présente des enjeux de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer, essentiellement sur la base du 6^e rapport du GIEC, afin de contextualiser l'utilisation potentielle du scénario 3°C (TRACC).
- Le chapitre 3 présente les hypothèses des scénarios et les méthodes pour la réalisation de projections régionalisées d'élévation du niveau de la mer.
- Le chapitre 4 présente les résultats du scénario 3°C (TRACC) et des scénarios complémentaires pour des utilisateurs avertis.
- Le chapitre 5 présente des cadres d'utilisation potentiels.

2. Enjeux de l'élévation du niveau de la mer

Ce chapitre rappelle les enjeux de l'élévation du niveau de la mer et de l'adaptation côtière associée. Il s'appuie notamment sur les messages principaux du rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) présentés dans le résumé aux décideurs du rapport du Groupe 2, ainsi que dans la « Cross Chapter Box Sea-Level-Rise » (Le Cozannet et al., 2022)¹⁶.

2.1. L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER ET SES CONSEQUENCES

2.1.1. Observations

a) Niveau de la mer

Le taux d'élévation du niveau marin moyen mondial était de 1,35 mm/an pendant la période 1901-1990 (0,78-1,92 mm/an, fourchette très probable). L'élévation du niveau marin accélère : elle a atteint 3,25 mm/an (2,9-3,6 mm/an, fourchette très probable) pendant la période 1993-2018 (degré de confiance élevé) et 3,7 mm/an (3,2-4,2 mm/an, fourchette très probable) entre 2006 et 2018. Du fait de cette élévation du niveau marin moyen, les niveaux extrêmes de la mer ont augmenté de façon constante dans la plupart des régions.

A l'échelle globale, l'élévation du niveau de la mer est essentiellement causée par le changement climatique d'origine anthropique, qui a pour conséquences l'expansion thermique des océans et la fonte des glaciers de montagne et des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique. Ce bilan global est modulé dans une moindre mesure par les apports (ou les rétentions) d'eaux continentales. Ces effets globaux ne se traduisent pas par une montée de l'élévation du niveau de la mer uniforme à l'échelle du globe : la dynamique océanique, les effets gravitationnels et rotationnels des redistributions de masses d'eau et de glace et les déformations du sol ont des effets régionaux et locaux qui peuvent amplifier ou modérer la vitesse de l'élévation du niveau de la mer (Gregory et al., 2019).

b) Conséquences

Au cours du 20^{ème} siècle, les changements les plus importants des milieux physiques côtiers (évolution du trait de côte, submersion, salinisation) ont essentiellement résulté d'activités humaines et de processus naturels affectant le transport sédimentaire et l'hydrodynamique côtière. Depuis une vingtaine d'années, de plus en plus d'effets du changement climatique sont observés sur les milieux côtiers. En ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer, on observe notamment de plus en plus de submersions chroniques à marée haute. Auparavant, ces submersions concernaient avant tout des zones en subsidence (affaissement du sol, par exemple sur la côte Est des Etats-Unis). Aujourd'hui de plus en plus d'études rapportent des cas de submersions chroniques à marée haute attribuables à l'élévation du niveau marin d'origine climatique (Thiéblemont et al., 2023).

¹⁶ Cross Chapter Box intégrée dans le chapitre 3 du rapport du Groupe 2, portant sur les Océans et les écosystèmes côtiers (Cooley et al., 2022), en le complétant de quelques études plus récentes.

L'exposition des sociétés humaines et des écosystèmes côtiers à l'élévation du niveau marin est élevée : le développement économique est important dans les zones côtières, avec la présence de ports et d'infrastructures urbaines, industrielles, énergétiques et de transport à longue durée de vie. Le 6^e rapport du GIEC rappelle que ce développement économique et urbain en zone exposée aux aléas côtiers concerne actuellement notamment l'Afrique et l'Asie du Sud, mais l'Europe est également concernée dans une moindre mesure. Par ailleurs, les risques côtiers en Europe sont largement hérités des choix de développement passés, de sorte que l'on estime à 670 000 le nombre de personnes actuellement exposées aux submersions marines (Lee et al., 2023).

2.1.2. Projections

a) Niveau de la mer

Le 6^e rapport du GIEC rappelle qu'il est virtuellement certain que le niveau de la mer global continuera à augmenter au 21^{ème} siècle. En effet, l'expansion thermique des océans, la fonte des glaciers de montagne et des inlandsis continueront à contribuer à l'élévation du niveau de la mer. En 2050, l'élévation du niveau marin atteindra entre 15 et 29 cm en moyenne globale par rapport à la période de référence 1995-2014. En 2100, les estimations globales varient de 28 cm à 1,01 m selon les scénarios climatiques. Cependant, une élévation du niveau marin plus rapide atteignant par exemple 1,7 m en moyenne globale en 2100 ne peut pas être exclue en cas d'initiation d'effondrement de certains secteurs de l'inlandsis de l'Antarctique (Fox-Kemper et al., 2021).

Contrairement aux températures et aux précipitations moyennes et extrêmes qui cesseront d'augmenter lorsque le réchauffement climatique aura été stabilisé, le niveau de la mer continuera à augmenter pendant des siècles. En 2300, les estimations varient de 50 cm à 7 m selon les scénarios climatiques, mais sans pouvoir exclure 15 m en cas d'effondrement de l'Antarctique et de très fortes émissions de gaz à effets de serre. Une étude plus récente propose une révision de cette valeur de 15 m à 10,4 m pour un scénario défavorable conduisant à 8 à 10°C de réchauffement global en 2300 (van de Wal et al., 2022), et cette étude montre également que 2,5 m d'élévation du niveau de la mer ne peuvent être exclus en 2300, même en cas de stabilisation du changement climatique à 2°C. Le rapport du GIEC de 2021 montre que dépasser 1,5°C de réchauffement climatique en moyenne globale implique qu'un seuil de 2 m d'élévation du niveau marin global sera dépassé tôt ou tard, probablement bien après 2100 (Fox-Kemper et al., 2021), ce qui a des implications immédiates pour l'aménagement du territoire (Le Cozannet et al., 2023).

b) Conséquences

Pour le 21^{ème} siècle, les conséquences de l'élévation du niveau de la mer seront les suivantes (Le Cozannet et al., 2022) :

- Submersions chroniques à marée haute de plus en plus nombreuses, notamment dans les ports. Les retours d'expérience, notamment des Etats-Unis montrent que ce type d'événement a des conséquences indirectes importantes du fait de l'indisponibilité des infrastructures.
- Submersions marines lors de tempêtes ou de cyclones, principalement du fait de la superposition de l'élévation du niveau de la mer avec un régime de tempêtes probablement faiblement modifié en France Métropolitaine – le cas des cyclones en outre-mer étant différent. Ces événements représentent des risques pour la vie humaine et des pertes économiques importantes.

- Salinisation des estuaires et des aquifères côtiers, avec des risques pour les écosystèmes côtiers et les ressources en eaux souterraines et estuariennes.
- Erosion des côtes, notamment des plages sableuses, probablement tout d'abord sur des sites relativement isolés sur le plan des bilans sédimentaires, et ultérieurement sur l'ensemble des plages sableuses.
- Submersions permanentes de zones basses, notamment de rivages limono-vaseux non protégés, lorsque le niveau de la mer se sera suffisamment élevé.

Les risques de l'élévation du niveau de la mer se matérialiseront dans un monde très différent d'aujourd'hui, dans lequel, par exemple, les tensions sur les ressources en eau seront bien plus importantes qu'actuellement du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration causée par le réchauffement climatique. Par ailleurs, le changement climatique favorise les précipitations intenses. Ces effets peuvent se combiner avec l'élévation du niveau de la mer et *in fine* augmenter les risques liés à la salinisation et aux submersions.

2.2. ADAPTATION

Le rapport du GIEC de 2022 (Pörtner et al., 2022) montre que les possibilités d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer dépendent d'actions immédiates :

- L'atténuation du changement climatique, pour limiter la vitesse d'élévation du niveau marin et donner davantage de temps à l'adaptation.
- L'adaptation aux conséquences inéluctables de l'élévation du niveau marin, et notamment à court terme à l'émergence progressive des phénomènes de submersions chroniques à marée haute.

2.2.1. Mesures d'adaptation

Le rapport du GIEC de 2022 rappelle qu'une première mesure pour limiter les risques côtiers consiste à limiter le développement des zones côtières. Ce type de mesure peut résulter en France de plans de prévention des risques littoraux. Pour les infrastructures existantes, l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer peut revêtir les formes suivantes :

- Protection : il s'agit de réduire l'aléa de submersion marine et d'érosion côtière en édifiant des protections côtières, soit par des moyens d'ingénierie (digues, brise-lames, barrières estuariennes...), soit en utilisant les processus naturels (rechargement en sable, restaurations dunaires, mesures de protection des écosystèmes tels que les coraux ou la posidonie).
- Accommodation : il s'agit de mesures visant à réduire la vulnérabilité, telles que l'élévation des systèmes électriques dans les maisons ou la pose de fenêtres étanches dans les zones non exposées aux vagues.
- Retrait des enjeux : il s'agit de réduire l'exposition en retirant les enjeux situés dans des zones inondables ou sujettes à l'érosion. Ce type d'opérations est coûteux, actuellement peu accepté socialement, mais il deviendra de plus en plus nécessaire de le considérer du fait de l'augmentation des coûts de protection dans des secteurs côtiers de plus en plus nombreux.
- Gains sur la mer : il s'agit par exemple de répondre à l'élévation du niveau de la mer en créant de nouvelles îles ou de nouvelles défenses côtières en avant de la côte. Cette stratégie, souvent davantage motivée par des choix de développement plutôt que par l'élévation du niveau de la mer, est mise en œuvre notamment dans des zones où l'espace est très contraint telles que la région de Malé dans les Maldives ou pour l'extension du port de Rotterdam aux Pays-Bas.

Toutes ces mesures d'adaptation peuvent être accompagnées de dispositions visant à restaurer des habitats pour les écosystèmes côtiers. Néanmoins, ces écosystèmes, qui peuvent aussi contribuer dans une certaine mesure à l'adaptation au changement climatique, seront eux-mêmes affectés par le changement climatique (Le Cozannet et al., 2022).

2.2.2. Autres dimensions de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer

L'adaptation à l'élévation du niveau de la mer ne se limite pas à sa dimension technique, elle comprend également :

- une dimension politique, consistant notamment à construire la gouvernance pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer de l'échelle européenne et nationale à l'échelle régionale et locale ;
- le processus de planification consistant à anticiper et à mettre en œuvre les différentes actions d'adaptation (études, réalisation, évaluation, maintenance...) de manière séquencée ;
- les aspects sectoriels de l'adaptation côtière : aménagement du territoire, agriculture, transport, etc. ;
- les mesures trans-sectorielles qui soutiennent l'adaptation en général, bien au-delà du seul cas côtier : financement de l'adaptation, assurance, politiques sociales, concertations et services climatiques.

Le rapport du GIEC de 2022 (Pörtner et al., 2022) montre que la gouvernance de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer met typiquement des décennies à se mettre en place. Ceci implique qu'il existe un risque d'être pris de vitesse par l'élévation du niveau de la mer si une gouvernance couvrant l'ensemble des dimensions de l'adaptation n'est pas mise en place suffisamment rapidement.

2.2.3. Quelle adaptation à l'élévation du niveau de la mer ?

Les mesures présentées ci-dessus constituent autant de chemins possibles pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer. Dans le rapport du GIEC de 2022 (Pörtner et al., 2022), les mesures d'adaptation, qu'elles relèvent de modifications du milieu physique ou d'autres dimensions sociales et économiques, sont évaluées au regard de leur faisabilité, de leur efficacité, et des co-bénéfices et compromis qui les accompagnent. À titre d'exemple, le résumé aux décideurs du Groupe II (Pörtner et al., 2022) présente deux mesures génériques d'adaptation côtière, l'une fondée sur l'ingénierie (proche de la pratique de la prévention des risques côtiers en Europe depuis un demi-siècle), l'autre fondée sur une gestion intégrée de la zone côtière (proche des grands principes de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte en France). Le rapport confère davantage de co-bénéfices à la seconde approche.

Il est important de noter que pour chaque territoire, c'est un choix politique – et non une évaluation des impacts du changement climatique – qui permettra de sélectionner le chemin d'adaptation qui sera effectivement suivi.

Le résumé aux décideurs du rapport du Groupe II du GIEC (Pörtner et al., 2022) synthétise ainsi les problèmes de l'adaptation côtière (Point C.2.8 – traduction non officielle) : « l'élévation du niveau de la mer pose des problèmes d'adaptation sévères et très particuliers, car elle implique de faire face à la fois à des changements à évolution lente et à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des événements extrêmes liés à l'élévation du niveau de la mer, qui s'intensifieront au cours des prochaines décennies (degré de confiance élevé). Ces problèmes d'adaptation surviendront d'autant plus tôt que le taux d'élévation du niveau de la mer sera élevé, en particulier

dans le cas peu vraisemblable – mais à fort impact – d'un effondrement d'inlandsis [en Antarctique] (degré de confiance élevé). Les réponses à l'élévation du niveau de la mer et à la subsidence du sol dans les villes et zones côtières de faible altitude et les petites îles comprennent la protection, l'accommodation, la relocalisation anticipée et planifiée (degré de confiance élevé). **Ces réponses sont d'autant plus efficaces qu'elles sont combinées et/ou séquencées, planifiées longtemps à l'avance, alignées sur les valeurs socioculturelles et les priorités de développement, et soutenues par des processus d'engagement communautaire inclusifs (confiance élevée) ».**

3. Définition de scénarios de références et méthodes

3.1. SCENARIOS

Le rapport du GIEC distingue projections, scénarios et « storylines » (Masson-Delmotte et al., 2021 ; Fox-Kemper et al., 2021). Les projections sont des réponses simulées du système climatique à un scénario d'émissions de gaz à effets de serre, d'aérosols et d'usage des sols. Les scénarios sont des futurs alternatifs fondés sur un ensemble d'hypothèses cohérentes. Les scénarios sont généralement utilisés pour explorer les conséquences de décisions. Les « storylines » sont un type de scénario particulier, explorant une séquence d'événements plausibles, même si leur probabilité peut être faible dans certains cas. Les « storylines » sont utilisées pour explorer les incertitudes du changement climatique telles que l'effondrement précoce de certains secteurs de l'Antarctique. Les politiques d'adaptation actuelles à l'élévation du niveau de la mer, par exemple en Grande-Bretagne ou aux Pays-Bas, utilisent des scénarios ou des « storylines ».

La France se distingue depuis 2011 par la référence à un scénario unique dans la politique de prévention des risques de 60 cm d'élévation du niveau de la mer. La référence par rapport à laquelle ces 60 cm sont calculés n'est pas définie précisément, mais elle correspond au niveau du début du 21^{ème} siècle selon l'annexe 4 de la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux¹⁷. Dans d'autres pays, un ensemble de scénarios et de « storylines » est élaboré afin de couvrir tout l'éventail des possibilités envisageables (Nicholls et al., 2014 ; Harrison et al., 2023). Par exemple, les « storylines » explorant les risques liés à l'effondrement de l'Antarctique, elles sont principalement mobilisées dans le cadre de réflexions portant sur les infrastructures à longue durée de vie.

Dans le cadre de ce projet, il est demandé de produire le scénario de référence de remontée du niveau marin pour la Trajectoire d'Adaptation au Changement Climatique de la France, conduisant à un niveau de réchauffement climatique global de 3°C (soit 4°C en France), dit scénario 3°C (TRACC) ; ainsi que des scénarios complémentaires correspondant à un réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C, 5°C en 2100, avec et sans effondrement de l'Antarctique de l'Ouest et fonte rapide au Groenland.

3.2. DEFINITION DES SCENARIOS

3.2.1. Scénario 3°C (TRACC)

Dans le cadre du 3^e Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC3), la trajectoire de référence pour l'adaptation est définie (MTE, 2023 ; Table 1) comme un scénario correspondant approximativement à une moyenne entre les engagements des Etats et les politiques en place en 2020, et amenant à un réchauffement global de 3°C en 2100 par rapport à la période préindustrielle, avec stabilisation du climat à 3°C après 2100 (voir MTE, 2023, page 10). Ce scénario a été associé à un réchauffement moyen de +4 °C pour la France métropolitaine en 2100. Il est désigné ci-après comme le « *scénario 3°C (TRACC)* ».

¹⁷ Cette circulaire est accessible sur Légifrance : <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=33582>

Ce scénario est également associé à la trajectoire suivante au cours du 21^{ème} siècle : 1,5°C dans les années 2030 et 2°C dans les années 2050 et 3°C en 2100, avec stabilisation ultérieurement autour de 3°C de réchauffement climatique (Table 1).

Table 1. Scénario 3°C (TRACC) à la date d'écriture de ce rapport.

Echéance	Réchauffement par rapport à la période préindustrielle (1850-1900)	
	Scénario 3°C (TRACC)	
	Moyenne globale	Moyenne en France Métropolitaine
Entre 2030 et 2040	1,5°C	2°C
Vers 2050	2°C	2,7°C
Vers 2100	3°C	4°C
2150	3°C	4°C

La stabilisation du climat autour de 3°C après 2100 pose des difficultés : tout d'abord, le rapport du Groupe III du GIEC sur l'atténuation (Skea et al., 2022) et celui de l'Emission Gap Report 2022 (UNEP, 2022) montrent que les contributions inconditionnelles déterminées au niveau national (et à plus forte raison les politiques actuellement en place) ne permettent pas d'atteindre le zéro-émissions nettes en 2100. Par conséquent, le climat continuera à se réchauffer après 2100 si cette trajectoire d'atténuation est suivie. De manière cohérente, l'essentiel des simulations climatiques disponibles actuellement fait l'hypothèse d'une poursuite des émissions et du réchauffement climatique au 22^{ème} siècle. Il n'est donc pas à l'heure actuelle faisable à ces échéances de réaliser des scénarios d'élévation du niveau de la mer suivant strictement les hypothèses de la TRACC.

Pour ces raisons, nous ne prenons pas en compte dans ce rapport l'hypothèse de stabilisation du climat à 3°C de la TRACC et ne spécifions pas les températures après 2100. Le scénario de référence pris en compte dans ce rapport est donc présenté dans la Table 2.

Table 2. Adaptation du scénario 3°C (TRACC) pour l'élévation du niveau de la mer.

Echéance	Réchauffement par rapport à la période préindustrielle (1850-1900)	
	Scénario 3°C (TRACC)	
	Moyenne globale	Moyenne en France Métropolitaine
Entre 2030 et 2040	1,5°C	2°C
Vers 2050	2°C	2,7°C
Vers 2100	3°C	4°C
2150	Non spécifié	Non spécifié

3.2.2. Scénarios complémentaires

Pour compléter le scénario 3°C (TRACC) et informer certains utilisateurs très spécialisés (exemple : opérateurs d'infrastructures critiques à longue durée de vie), ce rapport présente des scénarios complémentaires.

Ces scénarios correspondent à un réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C, 5°C en 2100, avec et sans effondrement de l'Antarctique de l'Ouest et fonte rapide au Groenland, et sont présentés pour les échéances suivantes : 2050, 2100, et 2120.

3.3. METHODES DE PROJECTIONS GLOBALES ET REGIONALES

Les projections du niveau marin régionalisées sont obtenues en suivant la méthode du GIEC (Oppenheimer et al., 2019) qui consiste à additionner les différentes composantes qui contribuent au changement (sur la période $t-t_0$) du niveau marin au point de coordonnées (λ, φ) . Cette méthode est résumée par l'équation suivante :

$$\Delta NMR(\lambda, \varphi, t) = \Delta Z(\lambda, \varphi, t) + \Delta NM_{barystatic-GRD}(\lambda, \varphi, t) + \Delta MVS(\lambda, \varphi, t) \text{ (Eq. 1)}$$

où ΔNMR définit le changement de niveau marin relatif, ΔZ la composante stérodynamique, $\Delta NM_{barystatic-GRD}$ la composante de masse et ΔMVS les mouvements verticaux du sol. Ces différentes composantes varient dans le temps (t) et l'espace (λ, φ : coordonnées longitude, latitude).

La composante stérodynamique résulte des modifications de densité (qui incluent par exemple l'expansion thermique) et des modifications de la circulation océanique. Cette composante est corrigée du baromètre inverse (Gregory et al., 2019). La composante de masse inclut les changements de masse de l'océan (contribution des glaces, stockages des eaux continentales) et les effets GRD contemporains. Le GRD (Gravitational, Rotational and solid Earth Deformation) correspond à des modifications du géoïde et à des déformations de la terre solide induites par le transfert de masse entre la terre et l'océan. Les mouvements verticaux du sol sont dus au GIA (Glacial Isostatic Adjustment) (rebond postglaciaire) et aux effets des GRD contemporains. Les termes ci-dessus suivent la terminologie de référence établie par Gregory et al. (2019) décrivant les différentes composantes du niveau marin.

La spécificité des projections du niveau marin avec réchauffement climatique global réside dans leur définition qui suit une trajectoire en température moyenne globale en surface et non une trajectoire de concentrations de GES dans l'atmosphère. En effet, les modèles de climat qui sont utilisés pour effectuer des projections des effets du changement climatique – et notamment l'élévation du niveau marin – sont contraints aux conditions limites par des trajectoires de concentrations de GES. Ces trajectoires, ou scénarios d'émissions (RCP pour l'AR5 et SSP pour l'AR6), sont standardisées de sorte que chaque groupe international de modélisation climatique participant aux exercices de simulations coordonnées pour le GIEC (exercices CMIP) utilise les mêmes conditions limites. Les modèles climatiques ont cependant des sensibilités climatiques qui diffèrent. Ainsi, pour un scénario d'émission identique, deux modèles climatiques différents vont simuler deux trajectoires en température globale différentes. Pour réaliser les projections du niveau marin selon des niveaux de réchauffement global, il convient donc d'effectuer une étape intermédiaire qui consiste à sélectionner des simulations de modèles climatiques qui présentent des changements de température globale en surface cohérents avec les trajectoires conduisant à ces niveaux de réchauffement.

3.3.1. Méthode générale

La chaîne de traitement permettant de construire un jeu de données par composante i pour chaque trajectoire en température globale en surface définie par la TRACC est illustrée par la Figure 1. Les jeux de données sources sont construits à l'aide d'émulateurs statistiques comme schématisé sur la partie gauche de la Figure 1. Cette étape est le fruit d'études réalisées en amont (p.ex. Edwards et al., 2021) des analyses conduites dans le présent rapport. Nous en détaillons brièvement les grands principes.

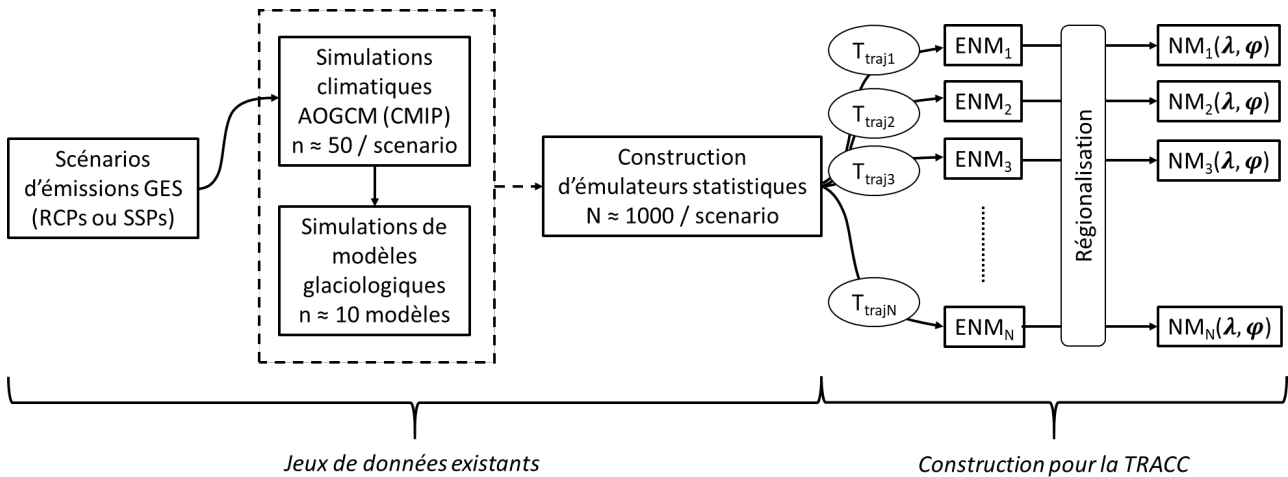


Figure 1. Illustration de la chaîne de traitements permettant de construire les projections régionalisées selon les scénarios de la TRACC pour chaque composante i .

Les scénarios d'émissions de GES (RCPs ou SSPs) sont utilisés comme conditions limites pour les simulations des modèles climatiques. Ces simulations étant très coûteuses en temps de calcul et en stockage de données, une cinquantaine de simulations est réalisée par scénario d'émission, chaque simulation étant effectuée avec un modèle de climat différent par des équipes de recherche en modélisation du climat. À l'heure actuelle, les modèles glaciologiques ne sont pas couplés aux modèles climatiques (dans le cadre d'exercices tels que CMIP). Ainsi, les résultats des simulations climatiques sont utilisés comme conditions limites pour les simulations des modèles glaciologiques. Cependant, ces simulations glaciologiques sont également coûteuses, ce qui a pour effet de réduire le nombre de réalisations possibles. À titre d'exemple, les simulations d'évolution de l'inlandsis du Groenland de l'exercice ISMIP6¹⁸ sont réalisées au moyen de 14 modèles d'inlandsis (dont certains dans 2 voire 3 configurations initiales différentes), mais pour seulement 2 scénarios d'émission de GES et 6 modèles climatiques (sur une cinquantaine disponible). L'émulation statistique de cet ensemble restreint de simulations physiques consiste alors à construire un modèle statistique qui simule la contribution de l'inlandsis du Groenland au niveau marin en fonction de l'évolution de la température globale et les incertitudes associées. En définitive, l'émulateur statistique permet de convertir un ensemble d'une dizaine de simulations physiques à un ensemble de plusieurs centaines de réalisations statistiques et donc de couvrir un éventail nettement plus large de projections futures.

Les résultats d'émulateur permettent d'associer une trajectoire de température globale en surface (notée T_{traj1} , T_{traj2} , etc. sur la Figure 1) à une trajectoire d'élévation du niveau marin global (notée

¹⁸ Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6 (ISMIP6) – Goetzler et al. (2020)

ENM₁, ENM₂, etc. sur la Figure 1) pour la composante *i*. Parmi les *N* trajectoires résultantes, seules les trajectoires cohérentes avec la TRACC (cf. Table 2) sont sélectionnées.

La Figure 2 illustre cette sélection des résultats de l'émulateur « Emulandice » (Edwards et al., 2021) pour la TRACC à 3° et la composante glaciers. Ainsi, sur ~3000 trajectoires simulées, 250 passant par ~2°C en 2050 et ~3°C en 2100 sont retenues. Il est intéressant de remarquer que ces trajectoires ne correspondent pas à un scénario d'émission de GES unique, mais à une combinaison de scénarios SSP2-4.5 (en bleu), SSP3-7.0 (en orange), SSP5-8.5 (en rouge) et autres. Ces trajectoires résultent en une élévation du niveau marin global due aux fontes des glaciers d'une valeur médiane de 5,5 (± 1.0) cm en 2050 et 14,0 (± 2.5) cm en 2100 par rapport à la période de référence 1995-2014 utilisée dans le 6^e rapport du GIEC (Figure 2).

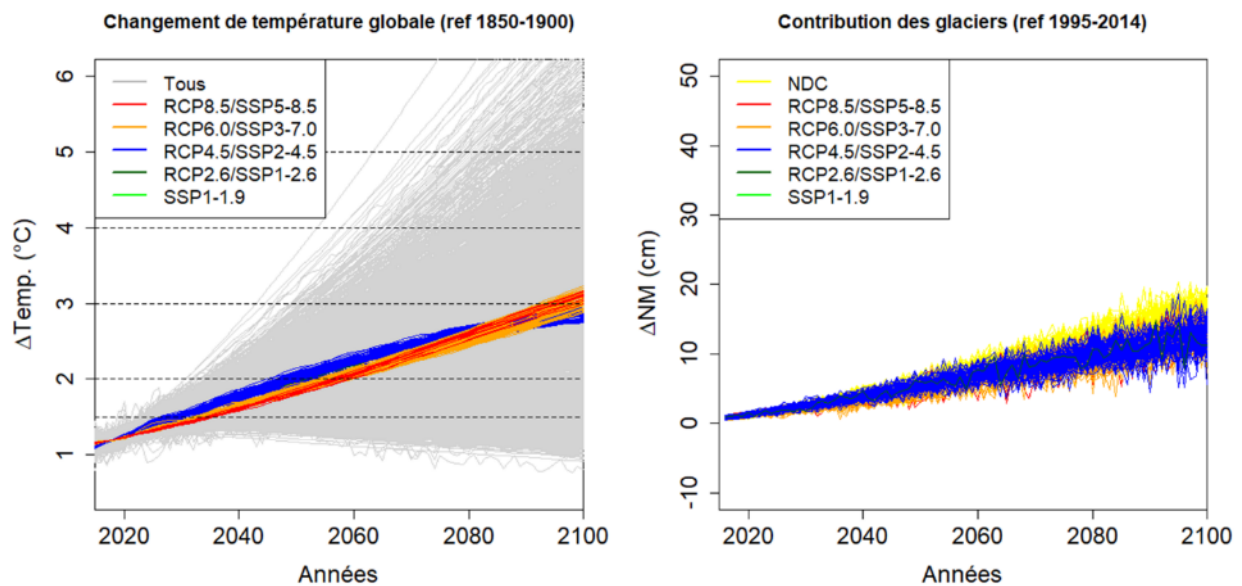


Figure 2. Exemple de construction de l'ensemble de réalisations pour le scénario à 3°C de la composante glaciers : (gauche) trajectoires de températures en surface sélectionnées et (droite) changement de niveau marin global associés à cette sélection pour la composante glaciers. Les couleurs indiquent les scénarios de concentration de GES correspondant pour chaque trajectoire.

La dernière étape consiste enfin à régionaliser les projections globales pour chaque composante *i*. Cette régionalisation s'effectue en suivant la méthode développée par Slangen et al. (2012) et reprise dans les 5^e et 6^e rapports du GIEC pour présenter des projections régionalisées de niveau de la mer. Dans ce rapport, nous appliquons cette méthode de la manière suivante :

- Pour les composantes impliquant des redistributions de masse (comme la fonte des glaciers de montagne, ainsi que celle des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique), la régionalisation prend en compte les effets gravitationnels, rotationnels et de déformation induits par ces pertes de masse. Chaque perte de masse engendre des variations régionales du niveau de la mer, selon une empreinte spatiale caractéristique (appelée *fingerprint*). Nous utilisons les *fingerprints* publiées dans le cadre du 5^e rapport d'évaluation du GIEC (AR5) ainsi que du rapport spécial sur l'océan et la cryosphère du 6^e rapport (SROCC) (Church et al., 2013 ; Oppenheimer et al., 2019). Une illustration de ces empreintes spatiales pour l'ensemble des 19 régions glaciaires (Alaska, Ouest des États-Unis et du Canada, Islande, Caucase, Russie arctique, etc.) est présentée dans la Figure 3.

- La composante océanique, également appelée *stérodynamique* (Gregory et al., 2019), représente principalement l'expansion thermique des océans ainsi que les effets liés aux modifications de la circulation océanique. Pour cette composante, nous utilisons directement les résultats des simulations climatiques disponibles.
- Enfin, la composante liée à l'ajustement isostatique glaciaire, correspondant à la réponse viscoélastique de la Terre solide à la dernière déglaciation, est modélisée à l'aide du modèle de Caron et al. (2018).

Les projections régionales d'élévation du niveau marin sont obtenues en effectuant la somme de ces composantes. Les détails de la régionalisation mise en place au BRGM sont présentés dans les articles Le Cozannet et al. (2019), Thiéblemont et al. (2019) et Dayan et al. (2021). Les sources des données utilisées sont détaillées dans la section suivante.

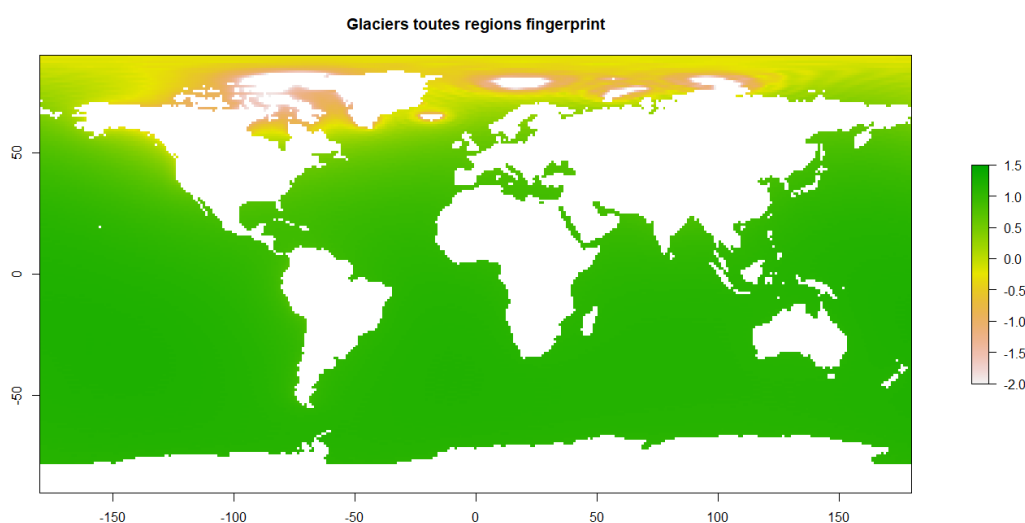


Figure 3. Exemple de « fingerprint » utilisé pour la régionalisation. Ici, le fingerprint considéré combine l'ensemble des 19 régions glaciaires.

3.3.2. Jeux de données

Les jeux de données utilisés pour réaliser les projections du niveau marin de la TRACC sont listés par composante dans la Table 3. Comme montré dans la Figure 1, nous utilisons directement les données en sortie d'émulateurs de modèles climatiques et glaciologiques pour la composante stérodynamique et les composantes Glaciers, Groenland et Antarctique. Pour les projections de l'Antarctique sans considération des processus les plus incertains, deux jeux de données sont combinés : les résultats de l'émulation des simulations ISMIP6 (Serroussi et al., 2020) et les résultats des simulations LARMIP-2 (Levermann et al., 2020) (cf. annexes 1 et 2). Pour les projections de l'Antarctique qui considèrent les processus incertains tels que le MICI (Marine Ice Cliffs Instability), les résultats du modèle de DeConto et al. (2021) sont utilisés. Ces simulations avec MICI correspondent à des scénarios d'effondrement de l'inlandsis Antarctique.

Comme indiqué dans le chapitre 9 du WGI de l'AR6, des ajustements doivent être effectués pour, entre autres, harmoniser les périodes de référence des différents jeux de données à combiner ou encore corriger de certains processus non explicitement pris en compte dans les simulations. Tous ces ajustements ont été réalisés pour nos projections TRACC (cf. annexes).

Table 3. Récapitulatif par composante des jeux de données utilisés pour les projections régionales du niveau marin des scénarios TRACC.

Composante	Méthode	Source
Stérodynamique	Expansion thermique & effets dynamiques issus des simulations CMIP6 et d'émulateurs climatiques (voir AR6, WGI chapitre 9)	https://zenodo.org/records/6382554
Glaciers	Emulation statistique des simulations GlacierMIP* (Marzeion et al., 2020 ; Edwards et al., 2021)	<i>Emulandice</i> : https://github.com/tamsinedwards/emulandice
Groënland	Emulation statistique des simulations ISMIP6* (Goezler et al., 2020 ; Edwards et al., 2021)	<i>Emulandice</i> : https://github.com/tamsinedwards/emulandice
Antarctique	• Emulation statistique des simulations ISMIP6* (Seroussi et al., 2020 ; Edwards et al., 2021) • Simulations LARMIP-2* (Levermann et al., 2020) • Ensemble de simulations d'un seul modèle de l'inlandsis antarctique qui inclut les processus MICI (DeConto et al., 2021)	• <i>Emulandice</i> : https://github.com/tamsinedwards/emulandice • https://github.com/ALevermann/larmip2020 • https://www.nature.com/articles/s41586-021-03427-0#Sec23
Eaux souterraines	Calibration des eaux souterraines et des eaux retenues par rapport à la population (voir AR6, WGI chapitre 9)	https://zenodo.org/records/6382554
Ajustement isostatique	Résultat du modèle de Caron et al., (2018)	https://zenodo.org/records/3485577
Empreintes spatiales	Empreintes spatiales de l'AR6 (voir AR6, WGI chapitre 9)	https://zenodo.org/records/6382554

*Jeux de données disponibles jusqu'en 2100.

Enfin, dans les projections de l'AR6, la méthode utilisée pour inclure les mouvements verticaux du sol repose sur une analyse statistique des données marégraphiques développée par Kopp et al. (2014). Cette analyse consiste à séparer la contribution climatique de celle des mouvements verticaux du sol au changement observé du niveau marin relatif, puis d'extrapoler linéairement cette dernière pour les projections futures. Bien que cette méthode permette théoriquement d'inclure l'ensemble des mouvements verticaux du sol, la confiance dans ces projections est faible, car la densité de marégraphes le long de la côte est souvent trop faible pour apprécier la variabilité spatiale de ces mouvements verticaux du sol. Nous avons donc opté pour ne considérer que la contribution de l'ajustement isostatique (i.e. la réponse viscoélastique du manteau terrestre consécutif à la dernière déglaciation). Bien que ce phénomène ne représente qu'une partie des mouvements verticaux du sol, il est assez bien appréhendé, modélisé, et les incertitudes associées sont bien quantifiées. Pour la TRACC, le modèle de Caron et al. (2018) a été utilisé.

3.3.3. Extrapolation au-delà de 2100

Les jeux de données principaux des composantes glaciaires et des inlandsis arctiques et antarctiques (i.e. Emulandice et LARMIP-2) sont disponibles jusqu'en 2100. En l'absence de données au-delà de 2100 de température, mais également de simulations glaciologiques, les

résultats de chaque trajectoire issue des jeux de données Emulandice et LARMIP-2 ont donc été extrapolés au moyen de fonctions quadratiques paramétrées sur le 21^{ème} siècle. Cette méthode permet de conserver la continuité dans les projections. L'absence de contraintes de températures globales ne permet cependant pas d'extrapoler à un horizon trop lointain. Ainsi, l'extrapolation est effectuée jusqu'en 2120, correspondant à une échéance de +100 ans par rapport à la période actuelle. Notons enfin que pour les données issues d'Emulandice (cf. p.ex. Figure 2 pour la composante glaciers), les résidus ont été modélisés afin de conserver la continuité dans l'enveloppe d'incertitudes (cf. annexes). La Figure 4 illustre le résultat de la procédure d'extrapolation pour la composante glaciers.

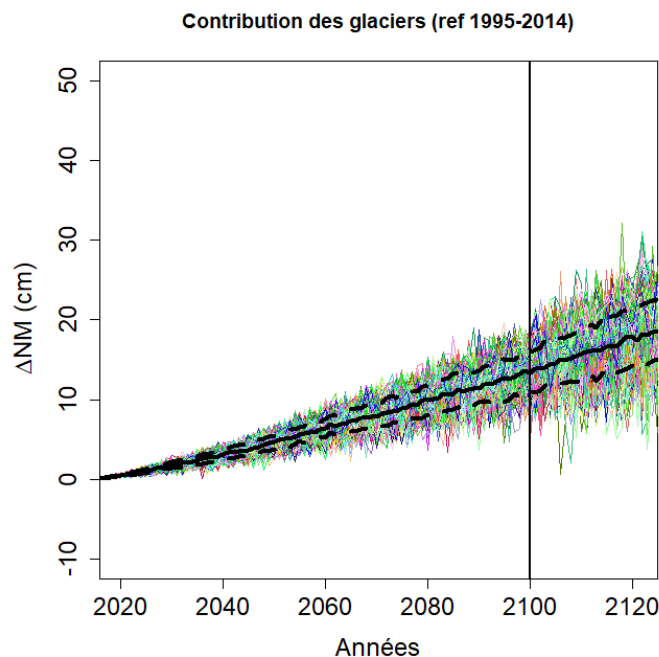


Figure 4. Projection de l'élévation niveau marin global due à la composante glaciers pour le scénario à 3°. Chaque trajectoire sélectionnée de l'émulateur est représentée par une couleur aléatoire. Le trait noir plein (pointillé) indique la médiane (les 17^{ème} et 83^{ème} percentiles). La barre verticale indique le début de la période extrapolée.

Pour l'échéance 2150, des projections locales du niveau marin (médiane, 17^{ème} et 83^{ème} percentiles) sont données pour les 2 scénarios à 1,5°C et 3°C avec une confiance réduite, car les hypothèses considérées sont fortes.

Plus précisément :

- pour le scénario à 1,5°C, les projections données en 2150 correspondent à celles du scénario SSP1-2.6 et sont obtenues à partir du portail <https://sealevel.nasa.gov/>. Le scénario SSP1-2.6 est choisi d'une part parce que les projections que nous avons calculées en 2050 et 2100 pour le scénario à 1,5°C sont celles qui s'en rapprochent le plus et d'autre part parce que le scénario à 1,5°C, tout comme le scénario SSP1-2.6, est associé à une stabilisation, voire à une baisse, de la température de surface globale après 2100 (cf. résultats en Annexe 4) ;
- pour le scénario à 3°C, les projections en 2150 sont calculées en extrapolant linéairement les projections du niveau marin obtenues sur la période 2100-2120. Cette hypothèse de linéarité de l'élévation du niveau de la mer entre 2100 et 2150 semble une approximation correcte au regard des travaux de Turner et al. (2023) portant sur des projections

multicentennales pour le scénario SSP2-4.5. Pour ce scénario, nous n'émettons aucune hypothèse sur l'évolution de la température globale après 2100.

3.3.4. Agrégation probabiliste

La dernière étape du calcul de projection consiste à résoudre l'équation 1 un grand nombre de fois afin d'obtenir, pour chaque horizon temporel et en chaque point (λ, φ) , une distribution de probabilité de valeurs de niveau marin pour un même scénario TRACC. Pour chaque réalisation $1, 2, 3, \dots, n$, on sélectionne de manière aléatoire (tirage avec remise) et pour chaque composante i une trajectoire des jeux de données construits pour la TRACC (p.ex. 1 parmi 250 du jeu de données Emulandice pour le scénario à 3°C).

Les hypothèses de dépendance entre contributions à l'élévation du niveau de la mer peuvent avoir des effets sur les projections et leurs incertitudes (Le Bars, 2018). Ici nous faisons l'hypothèse d'une dépendance entre les différentes régions de glaciers de montagne et d'indépendance entre les autres contributions. Ceci conduit à des incertitudes légèrement plus conservatives que dans un cas de dépendance entre davantage de composantes de l'élévation du niveau de la mer. En pratique, nous avons constaté lors d'études précédentes que les hypothèses sur les dépendances entre contributions ont des effets importants sur les queues de distribution (exemple, 95^{ème} percentile), mais moins sur les valeurs centrales (Le Cozannet et al., 2019). Le fait que nous sélectionnions ici des modèles à même niveau de température réduit encore davantage l'impact de ce choix sur les projections finales. L'impact de ce choix de dépendances sur les projections est donc très faible devant les incertitudes des projections.

Pour la composante antarctique du scénario TRACC (sans MICI), une subtilité s'ajoute du fait de la possibilité de deux jeux de données : LARMIP-2 ou Emulandice. Ainsi, pour chaque réalisation $i=1, 2, \dots, n$, une estimation aléatoire de chaque jeu de donnée est extraite, puis n'est retenue que celle ayant le plus grand écart avec la moyenne des médianes des deux jeux de données. Cette procédure, proche de celle utilisée dans l'AR6, conduit à maximiser l'enveloppe d'incertitude de la composante antarctique, en cohérence avec les incertitudes très fortes qui pèsent sur la réponse de l'Antarctique au réchauffement global.

Au total, $n=5000$ réalisations sont effectuées pour chaque scénario et chaque échéance temporelle.

Si les simulations effectuées permettent de calculer des niveaux marins correspondant à un percentile quelconque, y compris très élevé (95^e percentile, 99^e percentile), nous alertons sur le fait que le nombre de modèles climatiques disponibles pour calculer des distributions est trop faible pour estimer précisément le niveau marin au-delà du 83^e percentile (voir Le Cozannet et al., 2019). Les méthodes proposées depuis pour aller vers des projections jusqu'aux 5^e et 95^e percentiles (Grandey et al., 2024) sont pertinentes, mais elles ne sont actuellement pas établies comme un standard et il nous semble prématuré de les utiliser dans un cadre opérationnel. Des méthodes ont été développées pour explorer des scénarios plus pessimistes que le 83^e percentile (Stammer et al., 2019 ; van de Wal et al., 2022) et peuvent être mobilisées par les acteurs avec une forte aversion au risque.

4. Résultats : scénarios de niveau marin

Ce chapitre présente les résultats des projections de niveau marin régionalisées selon le scénario à 3°C utilisé pour la TRACC, ainsi que selon un scénario à 3°C intégrant l'effondrement de l'inlandsis en Antarctique. Les projections obtenues sont calculées jusqu'en 2120 selon les méthodes décrites dans le chapitre précédent. Pour l'échéance 2150, des estimations sont donc données de manière indicative.

En plus de ces deux scénarios, des scénarios complémentaires à 1,5°C, 2°C et 5°C en 2100 avec et sans effondrement de l'inlandsis antarctique sont présentés en annexe 4.

4.1. SCENARIO 3°C (TRACC)

La Figure 5 montre les projections médianes du niveau marin régional selon le scénario à 3°C (TRACC) aux échéances 2050, 2100 et 2120. Les changements de niveau marin sont exprimés en anomalie (et en mètres) par rapport à la période de référence 1995-2014. Notons que l'échelle de couleur est identique afin de faciliter la comparaison entre les scénarios.

Les localisations des différents marégraphes des zones portuaires françaises, où des projections de niveau marin détaillées sont fournies, sont indiquées par des triangles roses. Notons que dans d'autres régions du monde, les projections du niveau marin en 2050 diffèrent significativement de la situation en France. C'est le cas notamment de la côte Est des Etats-Unis qui indique une élévation de plus de 30 cm, voire 40 cm par endroits. A l'inverse, une large portion Nord de la mer Baltique indique une baisse du niveau marin (i.e. des valeurs négatives, en rouge) qui est une conséquence de l'ajustement isostatique.

Ces projections régionalisées du niveau marin tracées sur des cartes à échelle mondiale permettent en outre de constater que le niveau marin baisse dans les zones proches des grandes régions de fontes de glaces (p.ex. la péninsule Antarctique ou les grandes régions glaciaires Arctiques). Cette baisse résulte de la modification du champ de gravité lors du transfert de masse depuis la région de fonte vers l'océan. Ces phénomènes font partie des effets GRD pour *Gravitational, Rotational and solid Earth Deformation* (Gregory et al., 2019). Ils sont pris en compte au moyen des « fingerprints » (cf. Figure 3 et chapitre précédent) et sont propres à chaque composante du niveau marin *i*. Ces différents constats justifient l'importance de considérer l'élévation du niveau marin à l'échelle régionale et non une seule valeur globale.

En 2100, l'élévation du niveau marin médiane dépasse 60 cm pour le scénario à 3°C. A l'horizon 2120 (soit d'ici 100 ans), les projections dépassent partout 80 cm.

Les valeurs des projections de niveau marin pour 14 marégraphes portuaires pour le scénario 3°C (TRACC) sont détaillées dans la Table 4. Ces projections couvrent les 3 façades maritimes métropolitaines : la mer du Nord/Manche (Dunkerque, le Havre), l'Atlantique (Saint-Nazaire, La Rochelle et Verdon-sur-Mer) et la Méditerranée (Marseille, Fos-sur-Mer et Bastia). Les départements d'outre-mer Réunion, Guyane (Rémire-Montjoly et Kourou), Martinique (Fort-de-France) et Guadeloupe (Marie-Galante et Pointe-à-Pitre) sont également renseignés.

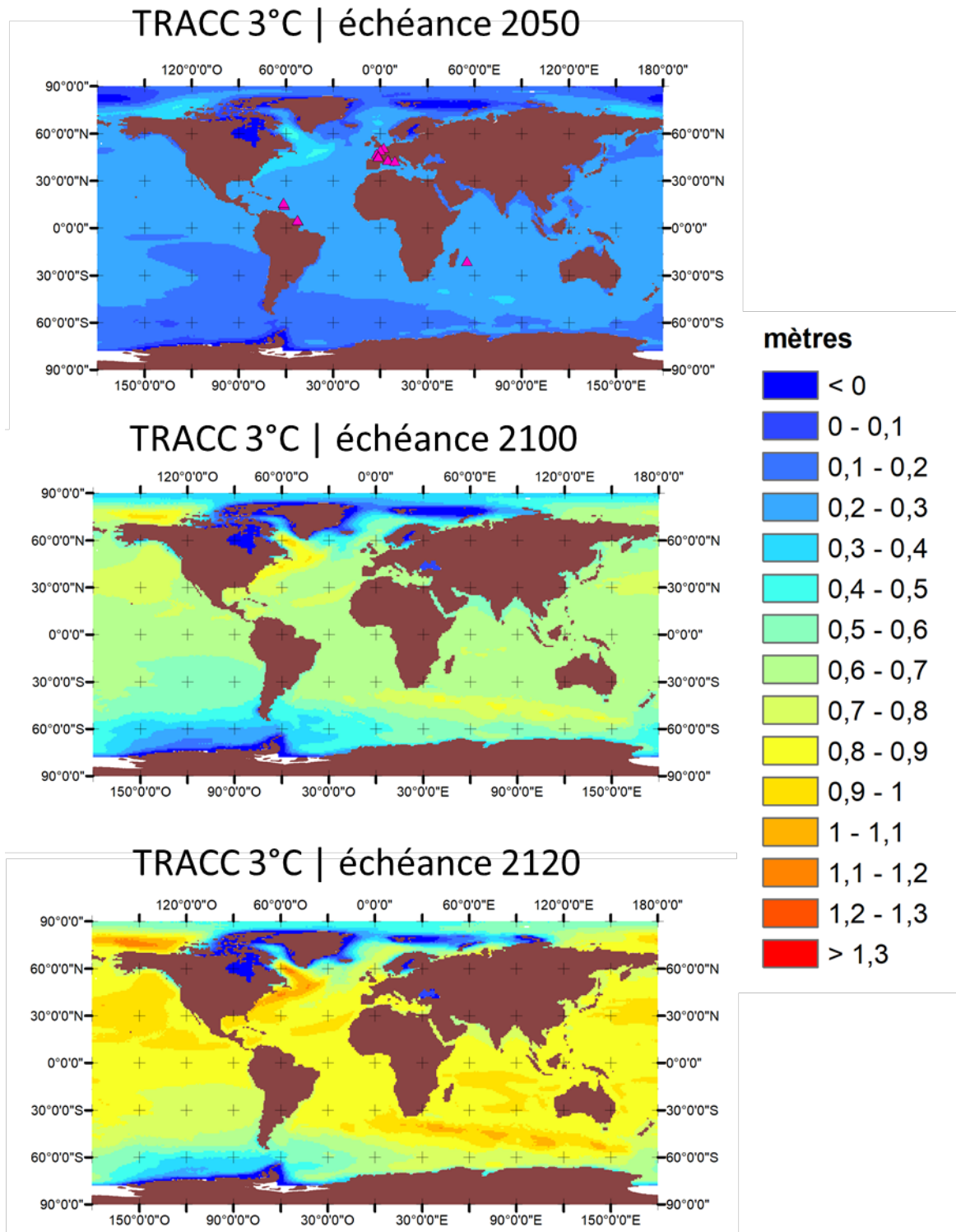


Figure 5. Projections régionalisées du niveau marin moyen médian (en mètres) pour le scénario 3°C (TRACC) en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.

Table 4. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario 3°C (TRACC) (sans processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. La valeur médiane est en gras et les bornes d'incertitudes (17^{ème} et 83^{ème} percentiles) entre crochets. Les projections pour l'échéance 2150 inscrites en italique sont associées à une fiabilité réduite et donc livrées à titre indicatif.

Scénario 3°C (TRACC)		2050	2100	2120	2150
Lieu	Coordonnées	50 [17-83]%	50 [17-83]%	50 [17-83]%	50 [17-83]%
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	27 [18,37]	64 [46,86]	82 [58,110]	108 [75,145]
Le Havre	0,11°E/49,48°N	26 [17,36]	63 [48,84]	82 [60,107]	109 [77,140]
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	25 [17,34]	62 [50,81]	81 [62,106]	108 [80,142]
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	24 [16,33]	62 [49,80]	80 [61,105]	107 [79,141]
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	25 [16,34]	62 [49,81]	80 [61,105]	107 [78,141]
Marseille	5,35°E/43,28°N	24 [15,33]	62 [48,80]	80 [61,104]	107 [79,141]
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	24 [14,33]	62 [48,80]	80 [60,104]	107 [79,141]
Bastia	9,45°E/42,70°N	24 [15,34]	63 [50,81]	82 [63,106]	110 [82,144]
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	21 [15,28]	64 [45,89]	87 [59,120]	120 [78,166]
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	23 [18,28]	64 [51,84]	84 [63,111]	112 [82,150]
Kourou	52,63°O/5,17°N	23 [18,29]	65 [51,85]	84 [63,112]	113 [81,153]
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	24 [20,30]	69 [54,91]	89 [67,118]	118 [85,160]
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	24 [20,30]	69 [54,91]	89 [67,119]	119 [86,161]
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	24 [20,30]	69 [54,91]	90 [67,120]	120 [86,162]

4.2. SCENARIOS AVEC INITIATION D'EFFONDREMENT DES CALOTTES DE GLACE EN ANTARCTIQUE

En complément du scénario à 3°C, cette section décrit des scénarios prenant en compte les processus de déstabilisation de l'Antarctique (ou MICI) : cela implique que pour le calcul de la contribution Antarctique, le jeu de données de DeConto et al. (2021) remplace la combinaison des émulateurs Emulandice et LARMIP-2 (voir Table 3). Cette approche correspond à celle de l'AR6 du GIEC (Fox-Kemper et al., 2021) pour la définition des scénarios qui incluent une représentation de l'effet potentiel des processus de l'inlandsis glaciaire à faible probabilité et à fort impact.

Note : Les projections de niveau marin incluant le MICI sont qualifiées par le GIEC de projections à faible confiance, car les processus physiques sous-jacents sont très incertains, mais potentiellement très impactant. Les scénarios de niveau marin basés sur ces hypothèses ciblent en particulier les utilisateurs qui ont une forte aversion au risque (p.ex. gestion des infrastructures critiques). Ces scénarios à fort impact, aussi appelés *high-end storylines* (voir Box 9.4 du Chapitre 9 du Groupe 1 du GIEC ; Fox-Kemper et al., 2022) se basent sur les percentiles hauts (p.ex. 83^{ème} percentile) et font généralement l'hypothèse de trajectoires de réchauffement élevées (supérieures à 3°C). **L'utilisation de valeurs médianes pour des scénarios à fort impact basés sur des projections à faible confiance doit être écartée, car l'incertitude associée est trop élevée et pourrait induire un excès de confiance dans la valeur retenue.**

Le 83^{ème} percentile des projections du niveau marin de la trajectoire à 3°C calculée en tenant compte des processus physiques conduisant à une fonte accélérée en Antarctique est affiché

Figure 6 pour les échéances 2100 et 2120¹⁹. En 2100, un tel scénario conduit à une élévation du niveau marin entre 80 et 90 cm en France métropolitaine et en outre-mer. En 2120, la gamme d'élévation s'élargit et, tandis qu'une projection du niveau marin supérieure à 1 mètre est obtenue en France métropolitaine, les régions d'outre-mer de l'océan Indien et de l'arc caribéen affichent des projections supérieures à 1,20 mètre. Les valeurs détaillées à l'endroit des marégraphes sont indiquées dans la Table 5.

Les valeurs des 83^{èmes} percentiles de la Table 5 sont très proches (< 4 cm en 2120) au sein de chacun des horizons temporels. En 2050 et 2100, le 83^{ème} percentile du scénario 3°C (TRACC) est même légèrement supérieur au 83^{ème} percentile du scénario à 3°C avec MICI. Ceci est dû au fait que les simulations de la calotte antarctique avec et sans MICI sont indépendantes l'une de l'autre et que les simulations avec MICI reposent sur un nombre plus faible de simulations. Aussi, il ne faut pas interpréter ces différences comme étant significatives. En réalité, nos résultats montrent que pour cette trajectoire au 83^{ème} percentile, l'utilisation du jeu de données de DeConto et al. (2021) (incluant le MICI) n'a qu'une influence modeste sur les projections de niveau marin pour la trajectoire à 3°C. Pour des niveaux de réchauffement plus élevés, en revanche, un impact important de la fonte de l'Antarctique à l'élévation du niveau de la mer ne peut pas être exclu, comme le montre l'annexe 4.

Table 5. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario 3°C (TRACC) (sans les processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI) et le scénario à 3°C avec les processus de fonte accélérée en Antarctique, MICI, considérant le 83^{ème} percentile de la distribution de probabilité. Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014.

Scénario 3°C (TRACC)		2050		2100		2120	
Lieu	Coordonnées	83% sans MICI	83% avec MICI	83% sans MICI	83% avec MICI	83% sans MICI	83% avec MICI
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	37	34	86	85	110	113
Le Havre	0,11°E/49,48°N	36	32	84	83	107	110
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	34	31	81	80	106	109
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	33	30	80	79	105	108
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	34	30	81	80	105	108
Marseille	5,35°E/43,28°N	33	30	80	79	104	108
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	33	30	80	79	104	107
Bastia	9,45°E/42,70°N	34	30	81	80	106	110
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	28	24	89	88	120	124
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	28	25	84	83	111	115
Kourou	52,63°O/5,17°N	29	25	85	84	112	116
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	30	26	91	89	118	122
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	30	26	91	90	119	123
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	30	26	91	90	120	123

¹⁹ L'influence du MICI est sensible après 2050. Le scénario avec MICI pour l'échéance 2050 est semblable à celui sans MICI et n'est donc pas représenté.

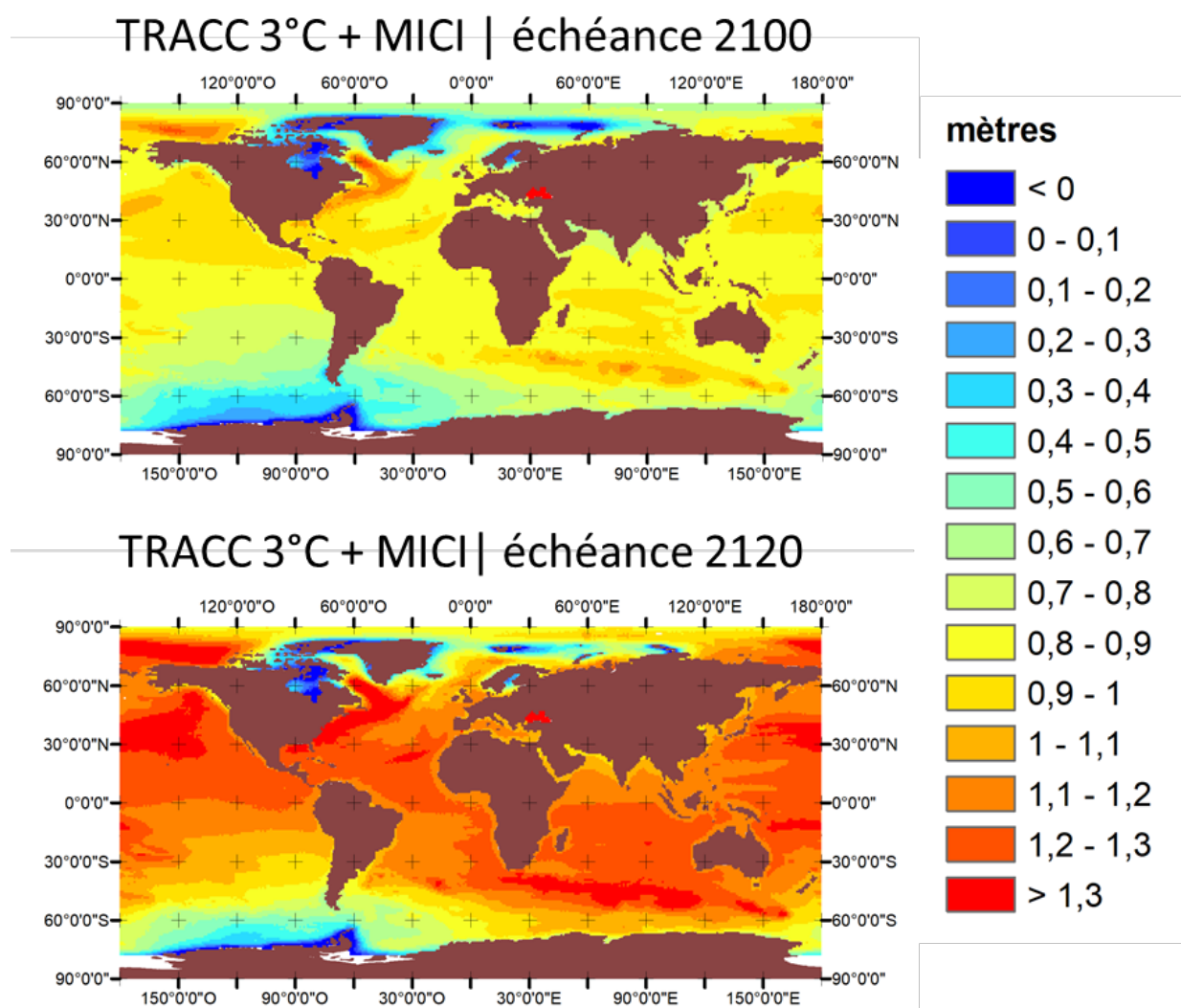


Figure 6. Projections régionalisées du niveau marin moyen (en mètres) pour le scénario 3°C (TRACC) incluant les processus d'effondrements partiels de l'inlandsis en Antarctique (MICI) en 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014.

4.3. PRECISIONS SUR L'UTILISATION DES 50^{EME} ET 83^{EME} PERCENTILES

Le scénario de base retenu pour la TRACC est celui à 3°C (sans MICI). **Les valeurs médianes (50^{ème} percentile) et le 83^{ème} percentile sont rappelées dans la table 6 et représentées sur la Figure 7.**

- La valeur médiane de l'élévation du niveau marin est comprise dans l'intervalle 62-69 cm en 2100, et l'intervalle 80-90 cm en 2120 aux différents ports renseignés dans la Table 6.
- La valeur du 83^{ème} percentile de l'élévation du niveau marin est comprise dans l'intervalle 80-91 cm en 2100, et l'intervalle 105-121 cm en 2120 aux différents ports renseignés dans la Table 6. Selon les projections que nous avons réalisées, la considération d'un effondrement précoce de l'antarctique n'influence pas de manière notable les valeurs du 83^{ème} percentile pour un scénario de réchauffement global à 3°C en 2100 (voir Table 5).
- Pour un scénario à 3°C l'élévation du niveau de la mer s'effectuera à des taux de l'ordre du centimètre par an autour de 2100 et se poursuivra pendant des siècles.

Table 6. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le 83^{ème} percentile du scénario 3°C (TRACC) qui pour mémoire n'intègre pas les processus de fonte accélérée en Antarctique (MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014.

Scénario 3°C (TRACC)		2050		2100		2120	
Lieu	Coordonnées	50%	83%	50%	83%	50%	83%
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	27	37	64	87	82	110
Le Havre	0,11°E/49,48°N	26	36	63	84	82	107
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	25	34	62	81	81	106
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	24	33	62	80	80	105
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	25	34	62	80	80	105
Marseille	5,35°E/43,28°N	24	33	62	80	80	105
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	24	33	62	80	80	105
Bastia	9,45°E/42,70°N	24	34	63	81	82	107
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	21	28	64	89	87	121
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	23	28	64	84	84	111
Kourou	52,63°O/5,17°N	23	29	65	85	84	113
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	24	30	69	91	89	119
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	24	30	69	91	89	119
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	24	30	69	91	90	120

Les valeurs médianes ne confèrent que des marges de confiance limitées, la probabilité de le dépasser étant de 0,5 et même davantage en cas d'effondrement précoce de l'Antarctique. Considérer les valeurs suivant le 83^{ème} percentile permet d'anticiper l'élévation du niveau de la mer qui se poursuivra au-delà des échéances considérées dans cette étude.

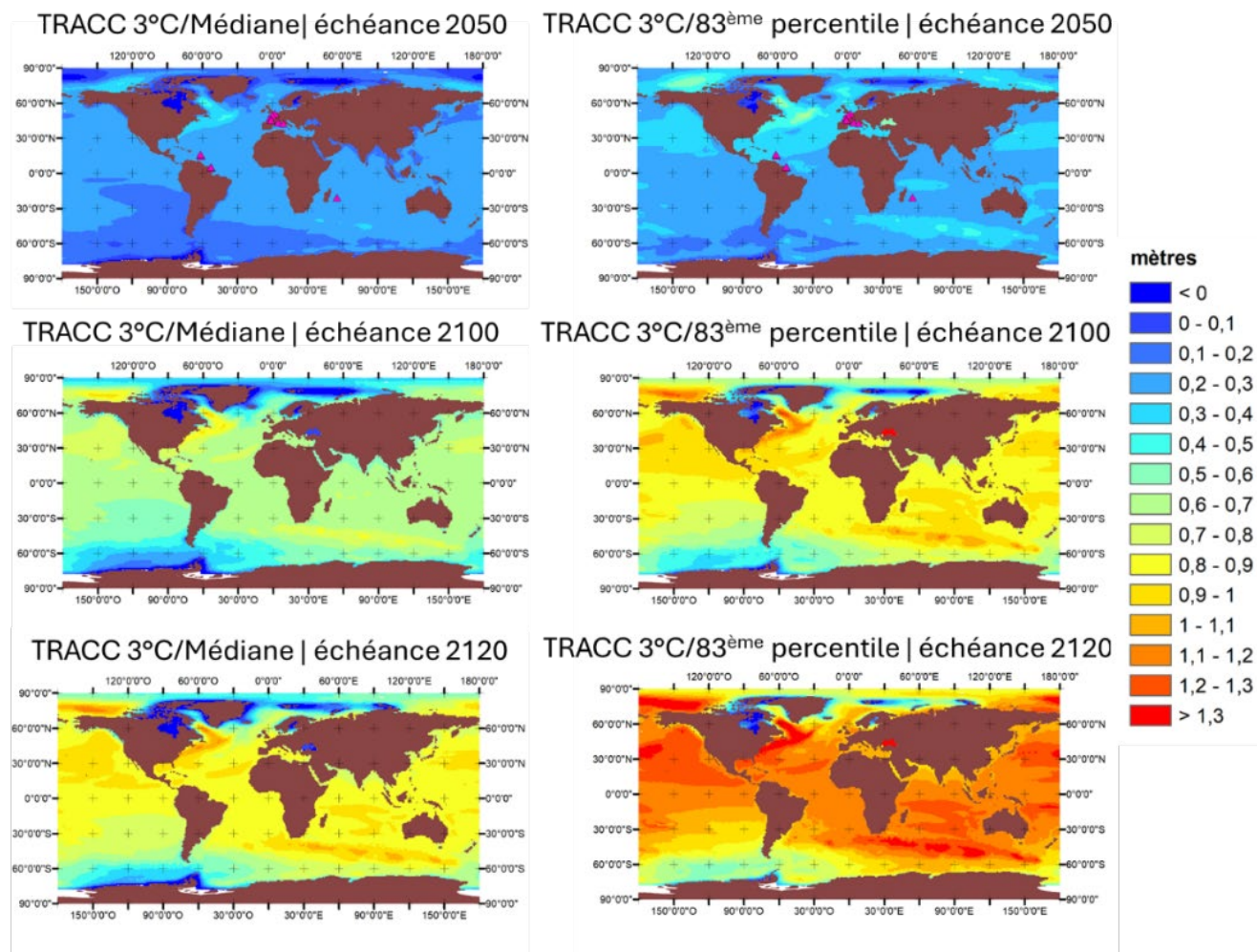


Figure 7. Projections régionalisées du niveau marin moyen (en mètres, valeur médiane à gauche et 83^{ème} percentile à droite) du scénario TRACC 3°C en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.

5. Cadres potentiels d'utilisation

Ce chapitre illustre comment les scénarios de niveau de la mer peuvent être utilisés. La section 5.1 présente comment les scénarios peuvent être exploités dans un contexte général selon les meilleures pratiques internationales. La section 5.2 présente des cas d'usage selon l'aléa considéré.

5.1. CADRE GENERAL

5.1.1. Cas d'usages suivant le contexte décisionnel

Les chapitres précédents ont montré l'importance des incertitudes dans les projections d'élévation du niveau de la mer. Ces incertitudes deviennent particulièrement importantes à partir de 2050, lorsqu'une initiation d'effondrement de certains glaciers de l'Antarctique ne peut plus être exclue. Les chercheurs travaillant sur l'adaptation ont développé des approches d'aide à la décision pour l'adaptation côtière dans ce type de situation.

L'approche mise en avant par Hinkel et al. (2019) consiste à distinguer le degré d'aversion au risque et les horizons temporels de chaque acteur. Ainsi :

- un acteur dont les horizons de décision n'excèdent pas quelques années ou dizaines d'années peut se limiter à utiliser des scénarios de niveau marin jusqu'à 2050 ;
- d'autres acteurs ont une vision stratégique à long terme, au-delà de 2050, mais peuvent tolérer des pertes et des dommages ;
- enfin, certains acteurs ont une faible tolérance aux incertitudes, car ils opèrent des infrastructures à longue durée de vie qui doivent être protégées des impacts de tempêtes, quelles que soient les circonstances et sur toute la durée de vie de l'infrastructure.

Dans les deux premiers cas, les acteurs peuvent se satisfaire du scénario 3°C (TRACC). En revanche, dans le 3^e cas, des scénarios complémentaires impliquant un niveau de réchauffement plus élevé et/ou une initiation de l'effondrement de l'Antarctique peuvent être mobilisés (Hinkel et al., 2019). Il s'agit alors d'effectuer des stress tests virtuels sur les infrastructures critiques considérées, afin de développer un plan de sauvegarde dans le cas où ce scénario se matérialiserait.

D'autre part, l'aménagement des territoires concernés (bassin de vie avec toute la population concernée) implique d'adopter une démarche globale à des horizons proches (2050/30 ans) et d'anticiper ou envisager leur « devenir » à plus long terme, comme le souligne la loi Climat et Résilience du 22 août 2021.

On observe quelques utilisations de ces scénarios défavorables d'élévation du niveau de la mer, en particulier en Grande-Bretagne et aux Pays-Bas. Il s'agit alors d'examiner quels travaux devraient être effectués pour garantir la sécurité des personnes et des biens protégés par des barrières estuariennes et d'autres systèmes de protection. La Cour des Comptes suggère également que ce type de scénario pourrait être utilisé dans le cadre de la mise en place de nouveaux réacteurs nucléaires²⁰.

5.1.2. Les scénarios d'élévation du niveau de la mer dans le processus d'adaptation

Dans un cadre général, l'adaptation est vue généralement comme un processus itératif qui peut mobiliser les scénarios d'élévation à différents niveaux :

²⁰ <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/ladaptation-au-changement-climatique-du-parc-des-reacteurs-nucleaires>

- Analyse du contexte (voir section 5.1.2).
- Evaluation des risques : cette phase mobilise les scénarios de niveau marin moyen, typiquement pour modifier les conditions aux limites des modèles hydrodynamiques, morpho-dynamiques ou hydrogéologiques.
- Identification et évaluation des mesures d'adaptation (Voir Baillis et al., 2020 pour un exemple) : au cours de cette phase, les scénarios de niveau marin peuvent être mobilisés pour évaluer l'efficacité et la faisabilité de différentes options (ex : solutions fondées sur la nature, interventions au niveau de bâtiments ou d'infrastructures portuaires).
- Planification des interventions : cette étape est typiquement réalisée en construisant des chemins d'adaptation, indiquant un ou des objectifs et les moyens d'y parvenir en mettant en œuvre de manière séquencée des mesures d'adaptation (Voir Haasnoot et al., 2019 pour des exemples). A cette étape, les scénarios de niveau marin peuvent être représentés de manière explicite pour montrer l'impact des différentes trajectoires (ex : 1,5°C ou 3°C) sur la trajectoire d'adaptation, les objectifs atteignables et les limites à l'adaptation.
- Mise en œuvre de l'adaptation : cette phase consiste à réaliser les interventions telles que la protection, l'accommodation ou la relocalisation, avec ou sans mise en œuvre de solutions fondées sur la nature.
- Evaluation des mesures d'adaptation, fondée sur le retour d'expérience, des observations et/ou une modélisation du nouvel environnement côtier après mise en œuvre de l'adaptation. A nouveau, les scénarios de niveau marin peuvent être ici utilisés pour la modélisation.

Ce processus est itératif et peut donc être réinitié au fur et à mesure que des limites à l'adaptation sont atteintes, ou lorsque de nouvelles connaissances sur le milieu côtier, l'adaptation ou le changement climatique sont disponibles.

5.2. APPLICATIONS POTENTIELLES

5.2.1. Référencement vertical des données

Les données fournies ne sont pas une finalité en soi, mais seront utilisées pour des études d'impact de l'élévation du niveau de la mer, telles que submersions chroniques à marée haute, submersions lors de tempêtes ou de cyclones, érosion côtière, salinisation des nappes et des estuaires ou recul du trait de côte.

Quelle que soit l'application considérée, il sera nécessaire de réaliser une analyse locale supplémentaire. Cette analyse consistera à :

1. Recaler la trajectoire régionalisée d'élévation du niveau de la mer de la TRACC dans le référentiel altimétrique local (Figure 8).
2. Si pertinent, ajouter à ces scénarios la contribution potentielle des mouvements verticaux du sol, par exemple en s'appuyant sur le réseau SONEL²¹ et le Ground Motion Service de Copernicus²² (EGMS).

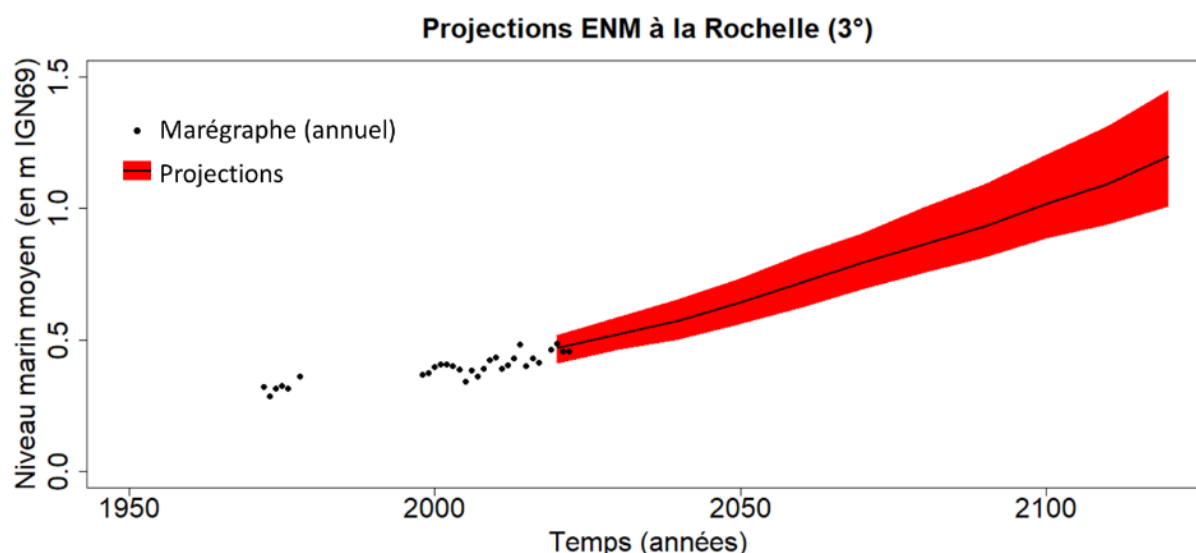


Figure 8. Exemple de la projection du niveau marin du scénario 3°C (TRACC) à la Rochelle ramenée dans le référentiel altimétrique IGN69. Les points indiquent les enregistrements marégraphiques. L'enveloppe en rouge délimite les percentiles 17 et 83. Cette étape est nécessaire pour ramener les projections du niveau marin (relative à la période 1995-2014) dans un référentiel vertical identique à celui de la topographie. Les projections montrent par ailleurs une bonne continuité avec les observations marégraphiques.

5.2.2. Cas d'utilisation du scénario 3°C (TRACC)

La Table 7 présente des cas d'utilisation typiques pour les scénarios de niveau marin. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres problèmes d'adaptation côtière (décharges littorales, évaluation de la charge pour le régime d'assurance des catastrophes naturelles ou gestion d'infrastructures côtières critiques) peuvent nécessiter des méthodes ou des scénarios complémentaires.

²¹ <https://www.sonel.org/>

²² <https://egms.land.copernicus.eu/>

Table 7. Cas d'usage des scénarios d'élévation du niveau de la mer (liste non exhaustive)

Aléa côtier	Méthodes d'analyse	Données nécessaires
Submersions chroniques à marée haute	Plusieurs méthodes d'analyse sont décrites dans Sweet et Park (2014), Longueville et al., (2022) ou Thiéblemont et al. (2023) et dans les recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (collectif BRGM/Cerema 2022).	Topographie (typiquement Lidar ²³) et données marégraphiques Refmar ²⁴
Submersions marines lors de tempêtes ou de cyclones	Voir le guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux (MEEDE, 2014) et ses mises à jour	
Erosion et recul du trait de côte	Voir le guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux (MEEDE, 2014) et les recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (collectif BRGM/Cerema 2022).	
Événements combinés (ex : secteurs exposés aux inondations fluviales et pluviales)	Voir les guides méthodologiques des PPR inondations et littoraux (MEEDE, 2014).	Projections de précipitations et de débits associés au scénario 3°C (TRACC) (exemple : données Explore 2), Topographie (typiquement Lidar), données marégraphiques Refmar et données indiquées dans les guides des PPR inondation et littoraux.

D'une manière générale, la Table 7 montre que :

- Pour les submersions marines et le recul du trait de côte, les méthodes sont bien cadrées par des guides existants. Il s'agirait alors simplement de substituer au précédent niveau marin de référence défini par la circulaire du 27 juillet 2011 le nouveau niveau marin de la TRACC en recommandant de prendre en compte les mouvements verticaux du sol locaux, lorsque cela est pertinent.
- Pour les submersions chroniques à marée haute ainsi que pour les événements combinés, les méthodes sont plus diverses et les niveaux marins de référence de la TRACC peuvent être utilisés de plusieurs manières.

Dans les deux cas, il pourrait être utile de réaliser une démonstration de l'utilisation de ces scénarios dans un ou plusieurs cas réels afin de guider les bureaux d'étude dans la réalisation des scénarios.

5.3. LIMITES DES SCENARIOS DE NIVEAU MARIN

L'utilisation du scénario de niveaux marins de la présente étude est très similaire à celle du scénario d'élévation du niveau marin de 60 cm antérieurement requis par la réglementation. Néanmoins, il convient de rappeler que lors de l'utilisation des scénarios de niveau marin, les difficultés suivantes peuvent se poser :

²³ Dans la pratique actuelle, la submersion est modélisée par simple croisement des niveaux marins à marée haute avec le modèle numérique de terrain (approche de type « Bathtub »). Pour ce type d'événements, cette approche est suffisante en première approximation. En revanche, une modélisation des niveaux d'eau peut être nécessaire (cf. limites d'utilisation des scénarios de la TRACC).

²⁴ <http://refmar.shom.fr/>

- Choix du niveau marin le plus pertinent : ce choix peut découler de la réglementation, mais des analyses ayant recours à des scénarios plus rapides d'élévation du niveau de la mer se justifient pour les enjeux à longue durée de vie.
- Calage des données d'observation et de projections par rapport à la période de référence : cette difficulté se pose surtout pour les horizons temporels courts (quelques années à deux décennies) et concerne notamment l'aléa de submersion chronique à marée haute. Résoudre cette difficulté nécessite des observations de niveau marin et parfois une réanalyse des niveaux marins passés sur le site d'étude (Longueville et al., 2022 ; Thiéblemont et al., 2023).
- Utilisation conjointe de scénarios de niveau marin avec d'autres projections climatiques (pluie, débits des fleuves, voire vagues et surcotes marines) : ce point pourrait nécessiter une étude complémentaire afin de guider les bureaux d'étude dans la réalisation des scénarios.
- Une étude récente menée par le BRGM (Thiéblemont et al., 2024) montre que la moitié des plaines côtières françaises est affectée par une subsidence supérieure à 1 mm/an. Extrapoler cette subsidence linéairement sur le 21^{ème} siècle conduirait à majorer les scénarios de niveau moyen de la mer présentés dans ce rapport **d'au moins 10 cm dans les zones considérées**²⁵.

Les projections d'élévation du niveau de la mer sont susceptibles d'évoluer, notamment avec l'émergence du service européen Copernicus European Ground Motion qui permet de caractériser les mouvements verticaux du sol locaux, et avec les recherches menées sur les projections d'élévation du niveau de la mer à de plus hautes résolutions menées en Méditerranée et sur le plateau continental de l'Europe de l'Ouest. Il s'agit de travaux de recherche menés respectivement par le BRGM et Mercator Ocean notamment.

²⁵ Ces zones sont identifiables sur le service European Ground Motion Service de Copernicus. <https://egms.land.copernicus.eu/> Le Guide Méthodologique PPRL de 2014 laisse la possibilité de considérer la subsidence pour majorer la consigne de 60 cm en 2100 de la directive du 27 juillet 2011.

6. Conclusion

Ce rapport présente les projections de niveau de la mer pour la France (métropole et outre-mer) correspondant non seulement à la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), mais également à un certain nombre de scénarios complémentaires potentiellement utiles pour un certain nombre de problèmes d'adaptation côtière. La résolution cible des données produites est de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, ce qui correspond aux standards actuels des données présentées dans les rapports du GIEC.

Les résultats montrent que pour un scénario conduisant à 3°C de réchauffement climatique global en 2100, l'élévation du niveau marin projetée dans la plupart des sites français métropolitains et d'outre-mer est de l'ordre de 25 cm [15 ; 35 cm] en 2050, 65 cm [45 ; 85 cm] en 2100 et de 85 cm [65 ; 110 cm] en 2120 (médiane [17^e ; 83^{ème} percentile de la distribution]). Au-delà de 2120, l'élévation du niveau de la mer se poursuit à des rythmes de l'ordre du centimètre par an. Toutes ces valeurs d'élévation du niveau de la mer sont données par rapport à la période de référence 1995-2014.

Selon les régions, les valeurs exactes peuvent s'écarter des valeurs données ci-dessus d'une dizaine de centimètres. L'élévation du niveau de la mer projetée est généralement sensiblement plus haute dans les régions d'outre-mer, situées en zones tropicales, loin des sources de fonte de glace. Cette élévation sensiblement plus rapide s'explique par les effets gravitationnels et rotationnels associés aux pertes de masses en Arctique et en Antarctique. Par ailleurs les mouvements verticaux du sol locaux (hors ajustement isostatique glaciaire) ne sont pas considérés dans ces scénarios.

Dans ce scénario de 3°C de réchauffement climatique global en 2100 choisi pour la TRACC, l'initiation d'un effondrement précoce de l'inlandsis de l'Antarctique aurait des effets limités pour ce qui concerne le 21^{ème} siècle selon les projections actuellement disponibles, généralement inférieur à une dizaine de centimètres. Au niveau du 83^e percentile, les projections avec et sans MICI sont très similaires, présentant des écarts non significatifs. Ceci ne vaut que pour le scénario à 3°C en 2100 et non pour des scénarios de réchauffement climatique plus intense.

Les valeurs médianes ne confèrent que des marges de confiance limitées, la probabilité de le dépasser étant de 0,5 et même davantage en cas d'effondrement précoce de l'Antarctique. Considérer les valeurs suivant le 83^{ème} percentile permet d'anticiper l'élévation du niveau de la mer qui se poursuivra au-delà des échéances considérées dans cette étude.

A l'issue de ce projet et des échanges au sein du comité de suivi scientifique, les points suivants sont ressortis :

- l'importance de recherche et de développement pour assurer une continuité entre simulations climatiques et observations sur le début du 21^{ème} siècle ;
- l'importance d'un réseau marégraphique fonctionnel pour l'étude des niveaux marins moyens et des extrêmes ;
- la suggestion de pérenniser et étendre le groupe scientifique constitué dans le projet afin de disposer d'une communauté d'utilisateurs avertis des scénarios de niveau marin ;
- l'importance de formations pour les acteurs de l'adaptation susceptibles d'utiliser ces scénarios ;
- l'utilité d'illustrer de manière pratique l'utilisation de ces données dans des applications sur des cas réels, notamment dans les zones estuariennes, au-delà de la présentation des cas d'usages idéalisés ;
- l'importance que des utilisateurs avertis, notamment gestionnaires d'infrastructures critiques, puissent considérer des scénarios complémentaires plus pénalisants que le scénario

3°C (TRACC) afin d'envisager des stratégies d'adaptations y compris dans des cas encore plus défavorables qu'un réchauffement de 3°C en moyenne globale.

Notons enfin que les projections d'élévation du niveau de la mer sont susceptibles d'évoluer, notamment avec l'émergence du service européen Copernicus European Ground Motion qui permet de caractériser les mouvements verticaux du sol locaux, et avec les recherches menées sur les projections d'élévation du niveau de la mer à de plus hautes résolutions menées en Méditerranée et sur le plateau continental de l'Europe de l'Ouest. Il s'agit de travaux de recherche menés respectivement par le BRGM et Mercator Ocean notamment.

7. Remerciements

Les auteurs du rapport remercient les membres du comité scientifique pour leurs recommandations.

8. Références

- Baills, A., Garcin, M., and Bulteau, T. 2020. Assessment of selected climate change adaptation measures for coastal areas. *Ocean & Coastal Management*, 185, 105059.
- Caron, L., Ivins, E.R., Larour, E., Adhikari, S., Nilsson, J. and Blewitt, G., 2018. GIA model statistics for GRACE hydrology, cryosphere, and ocean science. *Geophysical Research Letters*, 45(5), pp.2203-2212.
- Church et al., 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Collectif (BRGM/Cerema). Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte. Coédition BRGM et Cerema, août 2022, 95 p. ISBN : 978-2-7159-2791-9 et 978-2-37180-566-8
- Cooley S. et al., 2022. Oceans and coastal ecosystems and their services Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed. H-O Pörtner et al (Cambridge University Press) 379–550
- Dayan, H., Le Cozannet, G., Speich, S. and Thiéblemont, R., 2021. High-end scenarios of sea-level rise for coastal risk-averse stakeholders. *Frontiers in Marine Science*, 8, p.569992.
- DeConto, R.M., Pollard, D., Alley, R.B., Velicogna, I., Gasson, E., Gomez, N., Sadai, S., Condrón, A., Gilford, D.M., Ashe, E.L. and Kopp, R.E., 2021. The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*, 593(7857), pp.83-89.
- Edwards, T.L., Nowicki, S., Marzeion, B., Hock, R., Goelzer, H., Seroussi, H., Jourdain, N.C., Slater, D.A., Turner, F.E., Smith, C.J. and McKenna, C.M., 2021. Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. *Nature*, 593(7857), pp.74-82.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Fox-Kemper B. et al. 2021. Ocean, cryosphere and sea level change Climate Change 2021: the Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed. V Masson-Delmotte et al (Cambridge University Press) 1211–362
- Grandey, B. S., Dauwels, J., Koh, Z. Y., Horton, B. P., & Chew, L. Y. (2024). Fusion of probabilistic projections of sea-level rise. *Earth's Future*, 12, e2024EF005295.
- Gregory, J.M., Griffies, S.M., Hughes, C.W., Lowe, J.A., Church, J.A., Fukimori, I., Gomez, N., Kopp, R.E., Landerer, F., Cozannet, G.L. and Ponte, R.M., Stammer, D., Tamisiea M.E., van de Wal R.S.W. 2019. Concepts and terminology for sea level: Mean, variability and change, both local and global. *Surveys in Geophysics*, 40, pp.1251-1289.

- Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jimenez, J.A., Vafeidis, A.T. and Nicholls, R.J., 2019. Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environmental Research Communications*, 1(7), p.071006.
- Harrison, B., Palmer, M., Allison, L., Gregory, J., Howard, T., Pardaens, A. and Tinker, J., 2023. Towards Physically Consistent Sea Level Rise Storylines for the United Kingdom (en revue).
- Hinkel, J., Church, J.A., Gregory, J.M., Lambert, E., Le Cozannet, G., Lowe, J., McInnes, K.L., Nicholls, R.J., van Der Pol, T.D. and Van De Wal, R., 2019. Meeting user needs for sea level rise information: a decision analysis perspective. *Earth's Future*, 7(3), pp.320-337.
- Hofer, S., Lang, C., Amory, C., Kittel, C., Delhasse, A., Tedstone, A. and Fettweis, X., 2020. Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6. *Nature communications*, 11(1), p.6289.
- Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D.J., Strauss, B.H. and Tebaldi, C., 2014. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's future*, 2(8), pp.383-406.
- Le Bars, D., 2018. Uncertainty in sea level rise projections due to the dependence between contributors. *Earth's Future*, 6(9), pp.1275-1291.
- Le Cozannet, G., Thiéblemont, R., Rohmer, J., Idier, D., Manceau, J.C. and Quique, R., 2019. Low-end probabilistic sea-level projections. *Water*, 11(7), p.1507.
- Le Cozannet G. et al. 2022. Cross-Chapter Box Sea Level Rise Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed H-O Pörtner et al (Cambridge University Press) 477–480
- Le Cozannet, G., Nicholls, R. J., Durand, G., Slangen, A., Lincke, D., & Chapuis, A., 2023. Adaptation to multi-meter sea-level rise should start now. *Environmental Research Letters*, 18(9).
- Lee H. et al. 2023. Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) – Longer report. 1-85.
- Levermann, A., Winkelmann, R., Albrecht, T., Goelzer, H., Golledge, N.R., Greve, R., Huybrechts, P., Jordan, J., Leguy, G., Martin, D. and Morlighem, M., 2020. Projecting Antarctica's contribution to future sea level rise from basal ice shelf melt using linear response functions of 16 ice sheet models (LARMIP-2). *Earth System Dynamics*, 11(1), pp.35-76.
- Longueville, F., Thiéblemont, R., Bel Madani, A., Idier, D., Palany, P., D'Anna, M., Dutrieux, P. C., Védie, L., Lanson, M., Suez Panama Bouton, B. (2022) - Impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane : caractérisation et projection - GuyaClimat. Rapport final . BRGM/RP-72111-FR, 349 p.
- Masson-Delmotte, V., et al., 2021 Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) 3–32.
- Marzeion, B., Hock, R., Anderson, B., Bliss, A., Champollion, N., Fujita, K., Huss, M., Immerzeel, W.W., Kraaijenbrink, P., Malles, J.H. and Maussion, F., 2020. Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change. *Earth's Future*, 8(7), p.e2019EF001470.
- MEDDE, 2014. Guide méthodologique : plan de prévention des Risques littoraux. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Document accessible sous : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide_m%C3%A9thodo_PPRL_%202014.pdf

MTE, 2025, Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, PNACC 3, Document accessible sous : <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/gouvernement-lance-nouveau-plan-national-dadaptation-changement-climatique>

MTE, 2023: La trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). France Nation Verte. Mai 2023. Document accessible sous : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/document-reference-TRACC.pdf>

Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A., Warrick, R.A., Lu, X. and Long, A.J., 2014. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), pp.129-150.

Oppenheimer, M., et al., 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 [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321–445.

Pörtner H-O. et al., 2022 Summary for policymakers Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) 3–33

Seroussi, H., Nowicki, S., Payne, A.J., Goelzer, H., Lipscomb, W.H., Abe Ouchi, A., Agosta, C., Albrecht, T., Asay-Davis, X., Barthel, A. and Calov, R., 2020. ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21 st century. *The Cryosphere Discussions*, 2020, pp.1-54.

Skea J. et al., 2022 Summary for policymakers Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press) 4–53

Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., Van de Wal, R. S. W., Vermeersen, L. L. A., & Riva, R. E. M., 2012. Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. *Climate dynamics*, 38, 1191-1209.

Sweet, W.V. and Park, J., 2014. From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise. *Earth's Future*, 2(12), pp.579-600.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A., 2012 An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), pp.485-498.

Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., Toimil, A., Meyssignac, B. and Losada, I.J., 2019. Likely and high-end impacts of regional sea-level rise on the shoreline change of European sandy coasts under a high greenhouse gas emissions scenario. *Water*, 11(12), p.2607.

Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., D'anna, M., Idier, D., Belmadani, A., Slangen, A. B., & Longueville, F., 2023. Chronic flooding events due to sea-level rise in French Guiana. *Scientific reports*, 13(1), 21695.

Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., Nicholls, R. J., Rohmer, J., Wöppelmann, G., Raucoules, D., et al. (2024). Assessing current coastal subsidence at continental scale: Insights from Europe using the European Ground Motion Service. *Earth's Future*, 12, e2024EF004523.

Turner, F. E., Malagon Santos, V., Edwards, T. L., Slangen, A. B., Nicholls, R. J., Le Cozannet, G., O'Niell, J. & Adhikari, M., 2023. Illustrative Multi-Centennial Projections of Global Mean Sea-Level Rise and Their Application. *Earth's Future*, 11(12), e2023EF003550.

UNEP, 2022 Emission Gap Report 2022 – The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies

van de Wal, R.S., et al., 2022. A High-End Estimate of Sea Level Rise for Practitioners. *Earth's future*, 10(11), p.e2022EF002751.

Annexe 1 Données ISMIP6 et LARMIP-2

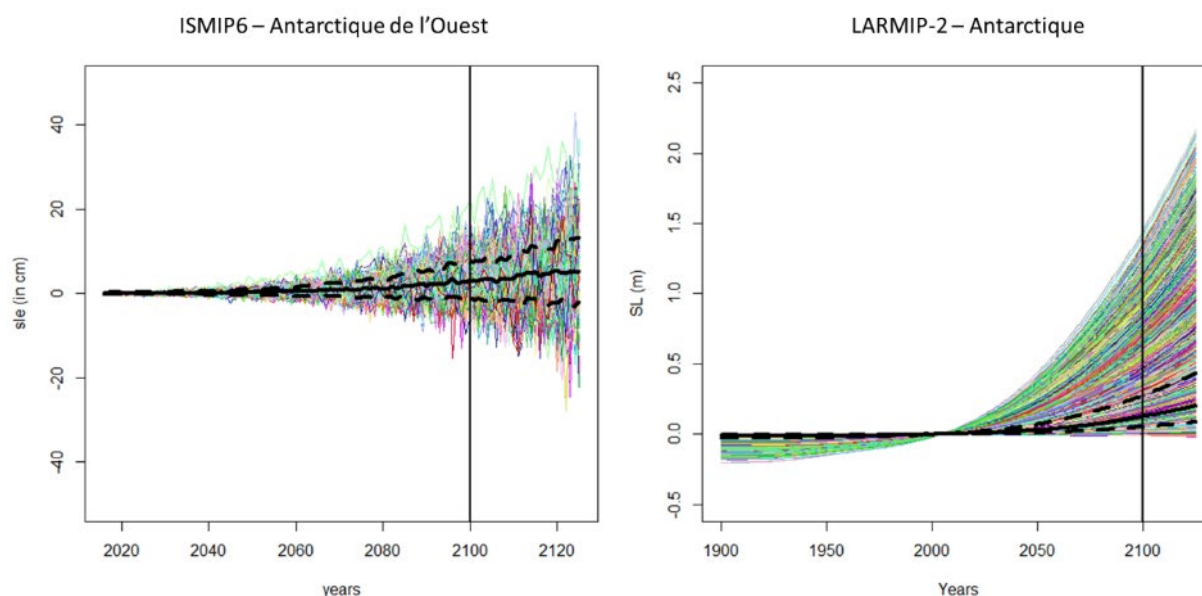


Figure A1.

Contribution à l'élévation du niveau marin global selon la trajectoire TRACC à 3°C pour l'Antarctique de l'Ouest d'après l'émulation de ISMIP6 (gauche) et LARMIP-2 (droite). Chaque série temporelle de couleur représente une réalisation. Au-delà de 2100, les résultats sont extrapolés avec des fonctions paramétriques (voir Annexe 3).

ISMIP6 : L'exercice coordonné ISMIP6 (Nowicki et al., 2020) a été conçu pour évaluer l'incertitude sur la contribution des inlandsis en fonction des scénarios climatiques, des processus physiques contrôlant ces contributions, ainsi qu'à la diversité des modèles d'inlandsis. Une dizaine de modèles d'inlandsis ont été utilisés pour les simulations Antarctique et une vingtaine pour les simulations du Groenland. Pour chaque inlandsis, le forçage a été sélectionné dans les modèles CMIP5 (Taylor et al., 2012) et CMIP6 (Eyring et al., 2016). Les champs de forçage atmosphérique ont été générés directement à partir des modèles CMIP pour l'Antarctique, tandis que pour le Groenland, une descente d'échelle dynamique des résultats CMIP à l'aide du modèle climatique régional MAR (Hofer et al., 2020) a été effectuée. Pour l'Antarctique, ISMIP6 a sélectionné six modèles de climat sur la base de deux critères principaux. Le premier critère est basé sur leur capacité à reproduire l'état moyen du climat actuel (atmosphère et océan) près de l'Antarctique, mais n'inclut pas les tendances. Le second critère permet de s'assurer que la sélection des modèles de climat inclut une diversité de taux de réchauffement au cours du 21^{ème} siècle, de sorte que la plage d'incertitude des projections soit prise en compte. L'un des risques de ce processus de sélection est de choisir des modèles dont la performance sur la période historique est relativement médiocre en termes de tendances. Les résultats pour l'Antarctique et le Groenland ont été estimés à partir de l'émulateur EMULANDICE (Edwards et al., 2021). A titre d'exemple, les résultats de l'émulateur pour la contribution de l'Antarctique de l'Ouest (incluant extrapolation au-delà de 2100) considérant le scénario 3°C (TRACC) sont montrés Figure A1.

LARMIP-2 : LARMIP se concentre sur l'incertitude du forçage océanique et la fonte de la banquise associée en Antarctique (Levermann et al., 2020) et utilise la majorité des modèles participant également à ISMIP6. Les expériences et simulations effectuées sont cependant différentes. LARMIP-2 évalue la perte de masse

de l'inlandsis due à la fonte basale de la plate-forme glaciaire et n'inclut pas le bilan de masse en surface, à l'inverse d'ISMIP6. Il faut donc le rajouter a posteriori. Dans LAPMIP-2, la relation température-fonte est paramétrée avec une dépendance linéaire au forçage thermique. La dérivée temporelle de la réponse de l'inlandsis donne une fonction de réponse linéaire, qui est ensuite convoluée avec une série temporelle de forçage de la fonte du plateau basal pour cinq régions de l'Antarctique. Les résultats LARMIP-2 sont obtenus en tirant aléatoirement dans des combinaisons de forçages et de paramètres (p.ex. facteur d'échelle et délai pour la relation entre la température de l'air à la surface du globe et le réchauffement en surface de l'océan, ou encore sensibilité à la fonte basale). Ce processus est répété 20 000 fois pour obtenir une distribution de probabilité de la contribution au niveau de la mer pour cinq secteurs de l'Antarctique. A l'inverse d'ISMIP6, il n'est pas nécessaire d'ajouter une réponse dynamique à long terme aux projections LARMIP-2, car celle-ci est incorporée dans la série chronologique de la fonte basale. Un exemple de résultats LARMIP-2 pour le scénario 3°C (TRACC) et les 5 régions antarctiques combinées est montré Figure A1.

Annexe 2 Ajustement des contributions aux projections du niveau marin pour la période de référence 1995-2014

Dans ce rapport, les projections de niveau marin sont données comme anomalie par rapport à la période de référence 1995-2014. Or, les jeux de données utilisés pour calculer les projections des différentes composantes ne sont généralement pas harmonisés par rapport à cette période de référence. Des ajustements doivent donc être apportés. Ils sont décrits dans la Table ci-dessous.

Composante	Jeu de données	Ajustement effectué
Glaciers	GlacierMIP/Emulandice (référence 2015)	Tendance estimée de $0,67 \pm 0,15$ mm/an sur la période 2000-2019, soit un ajout de $6,7 \pm 1,5$ mm de contribution, car période de référence 1995-2014.
Groenland	ISMIP6/Emulandice	- Ajout de la perte de masse observée entre la période 1995-2014 et 2015 d'après IMBIE soit $\sim 6,6$ mm. - Ajout de la réponse dynamique au forçage historique (car non simulé par ISMIP6) sur l'ensemble des projections de $0,19 \pm 0,10$ mm/an.
Antarctique	ISMIP6/Emulandice	- Ajout de la perte de masse observée entre la période 1995-2014 et 2015 d'après IMBIE soit $\sim 3,6$ mm global. - Ajout de la réponse dynamique au forçage historique (car non simulé par ISMIP6) sur l'ensemble des projections de $0,33 \pm 0,16$ mm/an.
Antarctique	LARMIP-2	- Ajout de la composante bilan de masse en surface (car non simulé dans LARMIP) à partir des résultats de l'AR5 (Church et al., 2013) - Notons que la réponse dynamique au forçage historique est incluse dans le design des simulations LARMIP-2.
Stérodynamique	AR6	Aucun
Eaux souterraines	AR6	Aucun

Annexe 3 Extrapolation au-delà de 2100 et modélisation des résidus

Les résultats des projections ISMIP6 et LARMIP-2 sont pourvus jusqu'en 2100. Les projections jusqu'en 2120 sont poursuivies en effectuant une extrapolation à partir de fonctions polynomiales d'ordre 2 calibrées sur l'ensemble de la période simulée (2016-2100). Dans le cas des projections GlacierMIP et ISMIP6 émulées par EMULANDICE (i.e. composantes glaciers, Groenland et Antarctique), l'extrapolation quadratique simple ne permet pas de reproduire la variabilité interannuelle des réalisations individuelles, conduisant à une réduction soudaine de l'enveloppe d'incertitude des projections après 2100 (voir Figure A3, gauche). Ainsi, dans le cas des projections issues d'EMULANDICE, nous avons procédé à une modélisation des résidus au-delà 2100 en considérant un processus aléatoire avec hétéroscédasticité (i.e. une augmentation de la variance des résidus avec le temps). En effet, ce phénomène est observé sur l'ensemble des réalisations du jeu de données EMULANDICE et peut être correctement modélisé en considérant que la variance des résidus suit une loi polynomiale d'ordre 2. L'hétéroscédasticité des résidus du jeu de données EMULANDICE n'a probablement pas de réalité physique, mais plutôt statistique et pourrait être associée à la méthode d'émulation elle-même. Sa prise en compte permet cependant de respecter une continuité dans les projections du niveau marin et leurs incertitudes (Figure A3, droite).

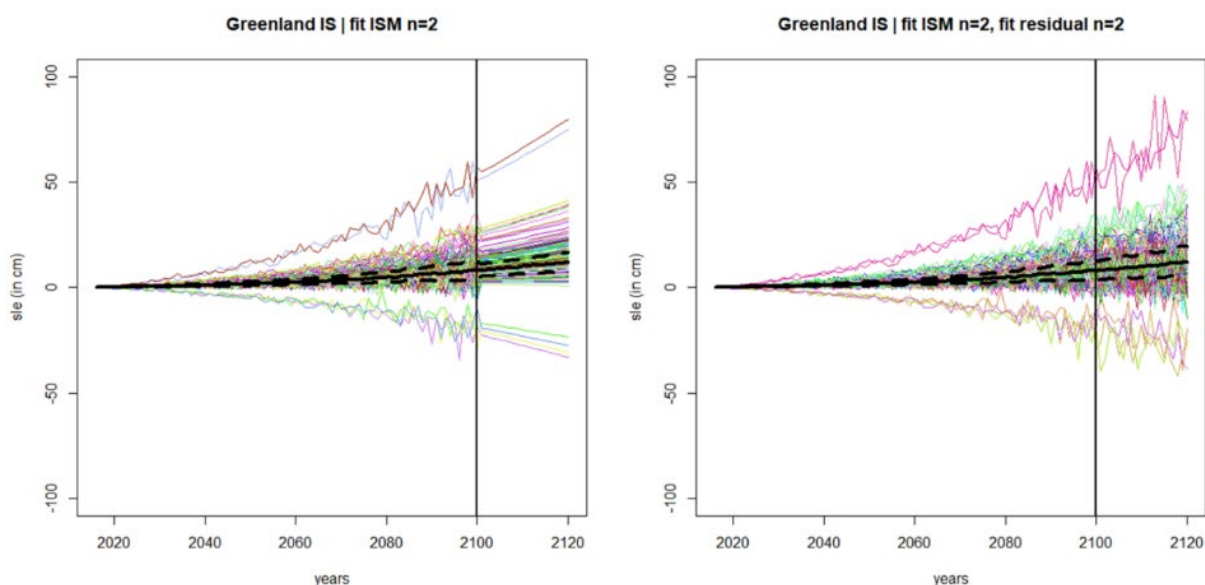


Figure A3. Exemple d'extrapolation au-delà de 2100 de la contribution Groenland issue des résultats de l'émulateur EMULANDICE pour le scénario 3°C (TRACC) (gauche) sans ou (droite) avec la modélisation des résidus.

Annexe 4 Scénarios complémentaires à 1,5°, 2° et 5° de réchauffement climatique global

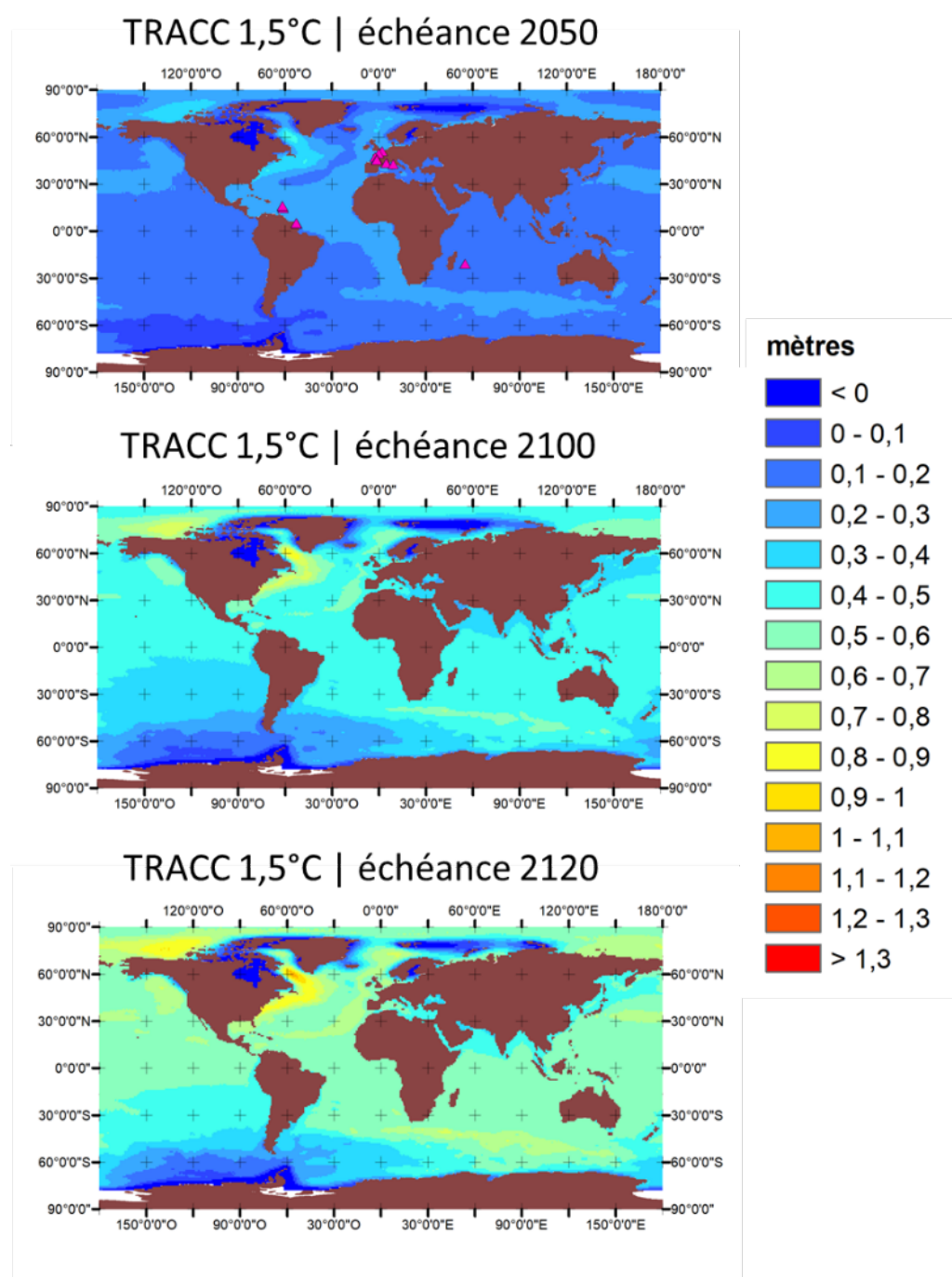


Figure A4.1. Projections régionalisées du niveau marin moyen médian (en mètres) pour le scénario 1,5°C en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.

Table A4.1. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario à 1,5°C sans les processus de fonte accélérée en Antarctique (MICI). Les

valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. La valeur médiane est en gras et les bornes d'incertitudes (17^{ème} et 83^{ème} percentiles) entre crochets.

Trajectoire à 1,5°C sans MICI		2050	2100	2120
Lieu	Coordonnées	50 [17-83]%	50 [17-83]%	50 [17-83]%
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	21 [12,31]	47 [25,70]	58 [29,87]
Le Havre	0,11°E/49,48°N	19 [11,29]	44 [24,66]	55 [27,83]
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	19 [12,26]	43 [27,62]	54 [31,79]
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	18 [12,26]	42 [25,60]	52 [30,77]
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	18 [12,26]	42 [26,60]	52 [29,76]
Marseille	5,35°E/43,28°N	18 [10,26]	39 [23,56]	48 [26,72]
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	18 [10,26]	39 [23,56]	48 [27,72]
Bastia	9,45°E/42,70°N	18 [11,26]	40 [24,58]	49 [27,73]
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	18 [14,24]	44 [27,64]	56 [31,84]
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	20 [14,27]	43 [28,60]	52 [32,75]
Kourou	52,63°O/5,17°N	21 [15,27]	44 [29,61]	53 [32,76]
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	21 [16,27]	48 [33,65]	58 [37,82]
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	21 [16,27]	48 [33,65]	58 [37,82]
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	21 [16,28]	48 [33,65]	58 [36,82]

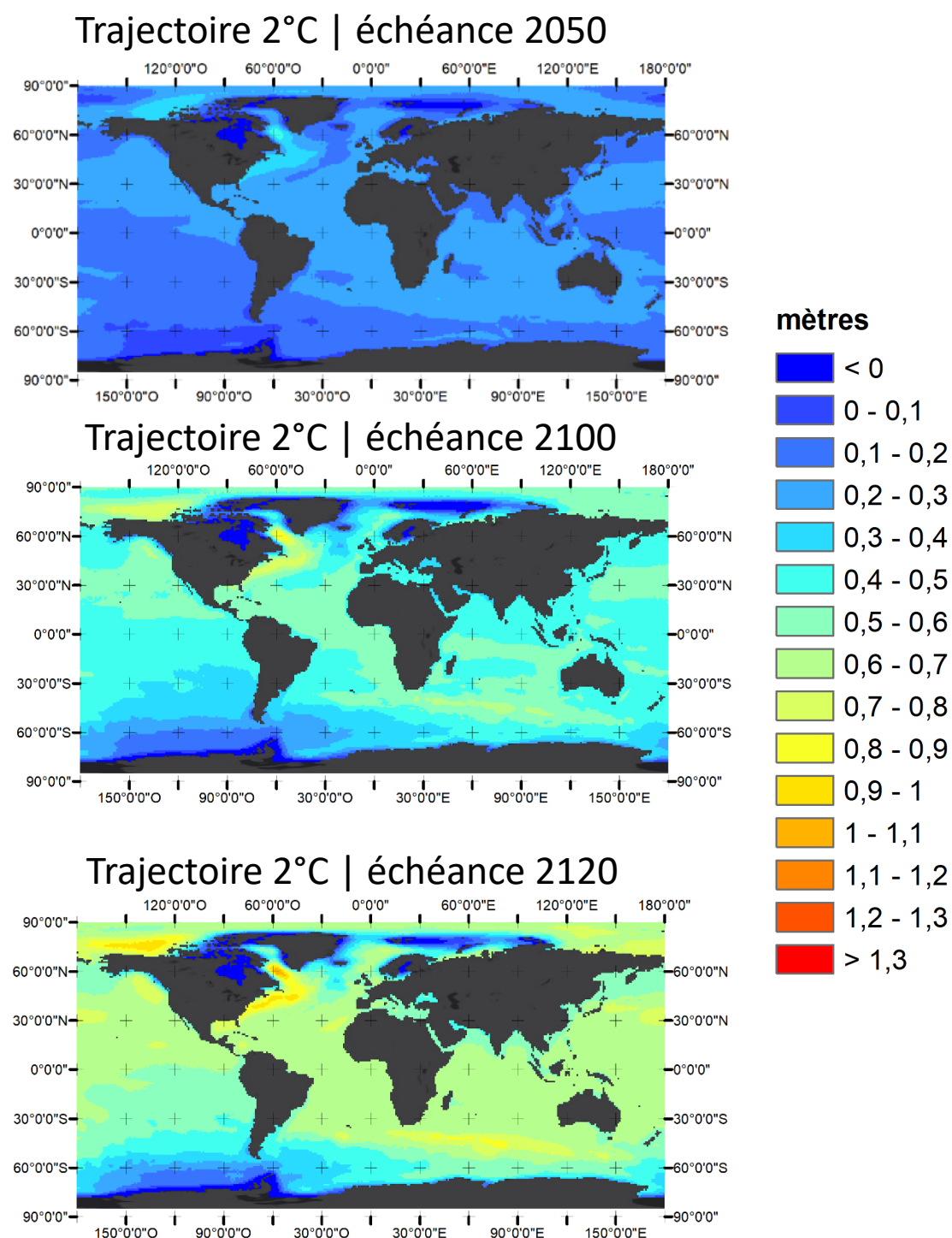


Figure A4.2. Projections régionalisées du niveau marin moyen médian (en mètres) pour le scénario 2°C en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.

Table A4.3. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario à 2°C sans les processus de fonte accélérée en Antarctique (MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. La valeur médiane est en gras et les bornes d'incertitudes (17^{ème} et 83^{ème} percentiles) entre crochets.

Trajectoire à 2°C sans MICI		2050	2100	2120
Lieu	Coordonnées	50 [17-83]%	50 [17-83]%	50 [17-83]%
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	23 [14,32]	49 [30,69]	62 [37,89]
Le Havre	0,11°E/49,48°N	22 [15,30]	46 [28,66]	58 [34,85]
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	22 [14,30]	47 [29,66]	59 [36,85]
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	21 [14,29]	45 [28,65]	58 [35,84]
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	21 [14,29]	46 [28,65]	58 [35,84]
Marseille	5,35°E/43,28°N	20 [12,28]	45 [29,64]	57 [36,82]
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	20 [12,29]	46 [29,64]	58 [36,82]
Bastia	9,45°E/42,70°N	21 [13,29]	46 [29,64]	58 [36,83]
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	19 [16,24]	46 [32,65]	60 [38,85]
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	22 [17,28]	50 [35,67]	63 [42,86]
Kourou	52,63°O/5,17°N	22 [17,28]	50 [36,68]	64 [42,87]
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	23 [18,28]	54 [38,73]	68 [46,93]
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	23 [18,28]	54 [38,73]	68 [45,93]
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	23 [18,29]	54 [38,73]	67 [45,93]

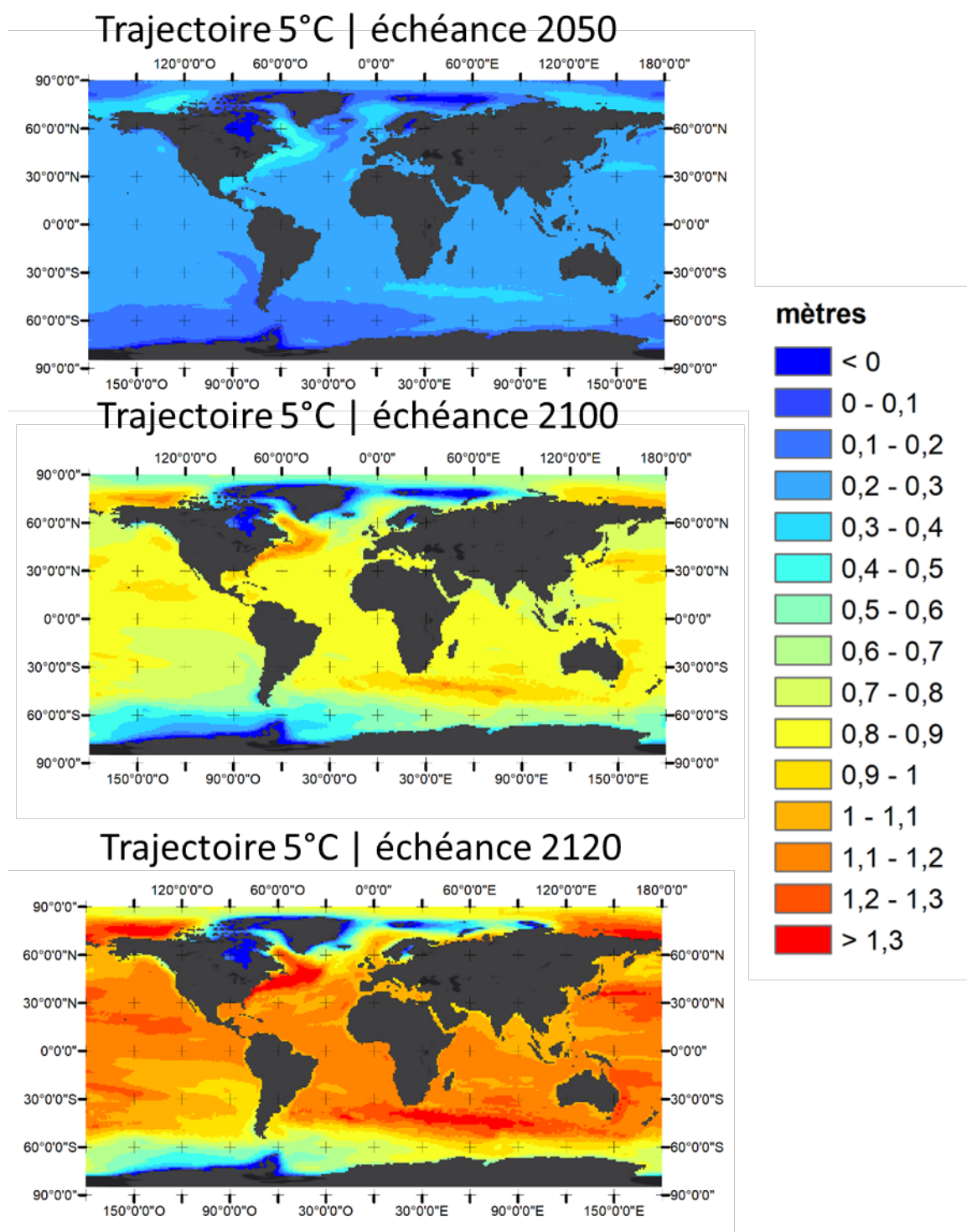


Figure A4.3. Projections régionalisées du niveau marin moyen médian (en mètres) pour le scénario 5°C en 2050, 2100 et 2120 par rapport à la période de référence 1995-2014. Les triangles roses indiquent la localisation des marégraphes sélectionnés pour les projections détaillées.

Table A4.5. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario à 5°C sans les processus de fonte accélérée en Antarctique (MICI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. La valeur médiane est en gras et les bornes d'incertitudes (17^{ème} et 83^{ème} percentiles) entre crochets.

Trajectoire à 5°C sans MICI		2050	2100	2120
Lieu	Coordonnées	50 [17-83]%	50 [17-83]%	50 [17-83]%
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	27 [21,33]	77 [62,99]	104 [81,135]
Le Havre	0,11°E/49,48°N	25 [20,31]	77 [63,98]	104 [84,135]
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	25 [20,31]	75 [62,97]	102 [82,133]
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	25 [20,31]	74 [62,96]	101 [81,131]
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	25 [20,31]	75 [62,96]	101 [81,131]
Marseille	5,35°E/43,28°N	26 [20,32]	77 [58,100]	103 [78,137]
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	25 [20,32]	77 [58,100]	103 [78,137]
Bastia	9,45°E/42,70°N	26 [22,32]	79 [60,101]	106 [80,139]
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	25 [20,31]	80 [61,106]	110 [83,148]
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	26 [22,32]	81 [65,104]	109 [86,142]
Kourou	52,63°O/5,17°N	27 [23,32]	82 [66,105]	110 [86,144]
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	27 [23,33]	85 [68,109]	113 [88,149]
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	27 [23,33]	85 [67,110]	113 [87,149]
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	28 [23,33]	85 [67,110]	113 [87,150]

Table A4.6. Projections du niveau marin à l'endroit de 14 marégraphes portuaires en France métropolitaine et en outre-mer pour le scénario à 5°C avec les processus de fonte accélérée en Antarctique (MCI). Les valeurs sont données en cm par rapport à la période de référence 1995-2014. Seule la valeur au 83^{ème} percentile est représentative et décrite.

Trajectoire à 5°C avec MCI		2050	2100	2120
Lieu	Coordonnées			
Dunkerque	2,37°E/51,05°N	30	122	218
Le Havre	0,11°E/49,48°N	28	121	218
Saint-Nazaire	2,20°O/47,27°N	28	120	218
La Rochelle	1,22°O/46,16°N	27	119	216
Verdon-sur-Mer	1,07°O/45,57°N	27	119	216
Marseille	5,35°E/43,28°N	29	121	216
Fos-sur-Mer	4,89°E/43,42°N	29	122	216
Bastia	9,45°E/42,70°N	28	123	218
Le Port (La Réunion)	55,29°E/20,93°S	27	131	242
Rémire-Montjoly	52,28°O/4,85°N	28	127	227
Kourou	52,63°O/5,17°N	28	129	230
Fort-de-France	61,06°O/14,60°N	29	135	241
Marie-Galante	61,32°O/15,88°N	29	135	242
Pointe-à-Pitre	61,53°O/16,22°N	29	136	243



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm