

RD35B – Pont de Barcarin

Note synthétique sur l'élévation du niveau marin liée au changement climatique

Site d'étude

RAPPORT D'ETUDE

Mai 2023

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

RD35B – Pont de Barcarin

Note synthétique sur l'élévation du niveau marin liée au changement climatique

Commanditaire : Conseil départemental des Bouches-du-Rhône

Auteur : Cerema

Responsable du rapport

David CRIADO – Département Risques Naturels – Groupe Risques Inondations et Littoraux

Tél. : +33(0)4 42 24 79 70

Courrier : david.criado@cerema.fr

Direction Territoriale Méditerranée Pôle d'activités Les Milles - avenue Albert Einstein 13290 AIX-EN-PROVENCE

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	08/08/2022	Version provisoire transmise le 8 août
V1	25/01/2023	Prise en compte remarques CD13 reçues le 17/11/2022 et lors de la réunion du 17/01/2023
V2	16/05/2023	Prise en compte de remarques du CD13 reçues le 05/05/23

Références

N° chrono : RN/23-060

Partenaires : EGIS

N° AFF : 2022-010149

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
CRIADO	David	Auteur		
GAUFRES	Pierre	Auteur		
PONS	Frédéric	Vérificateur		
CRIADO	David	Approbateur		

Résumé de l'étude

Le Département des Bouches-du-Rhône prévoit la création d'un ouvrage d'art de franchissement du Grand Rhône entre Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône en remplacement du bac actuel dit de « Barcarin ». La localisation du projet à proximité du Delta du Rhône rend indispensable une analyse sur l'impact du changement climatique en matière d'élévation du niveau marin. Le Département a sollicité une assistance du Cerema sur cette problématique, objet de la présente note synthétique.

Le niveau marin exerce en effet une influence sur les crues du Rhône et sur les submersions marines. Les marégraphes côtiers et l'altimétrie spatiale mesurent l'élévation du niveau marin régional et global consécutive au changement climatique. Ainsi, d'après le dernier rapport du GIEC AR6 (2021), le niveau moyen des océans à l'échelle planétaire s'est élevé de 20 cm entre 1901 et 2018 ; ce rythme s'est accéléré pour atteindre 3,7 mm/an sur la période 2006-2018.

La présente note synthétise les prévisions d'élévation du niveau marin moyen selon les dernières projections du GIEC. Les résultats de diverses études concernant les conséquences en matière d'inondation par submersion marine (permanente ou temporaire) sont présentés. Ces données sont mises en perspectives de l'échéance d'utilisation du pont et des connaissances actualisées issues du dernier rapport du GIEC (AR6, 2021).

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Changement climatique	Submersion marine
Niveau marin	Ennoisement
Inondation fluviale	Franchissement d'écoulement naturel
Rhône	Camargue

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☐ Accès libre : document accessible au public sur internet
- ☒ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Contexte et objet de l'étude

Le Rhône, entre Arles Sud et Salin-de-Giraud, n'est franchi par aucun ouvrage d'art routier. La liaison des deux rives du Rhône entre Salin-de-Giraud à l'Ouest et Port-Saint-Louis-du-Rhône à l'Est s'effectue par un bac dit « de Barcarin ». Deux unités de navigation autopropulsées sont utilisées, géré par le Syndicat Mixte des Traversées du Rhône. La participation du Département est la principale source de financement du syndicat et elle est en constante progression.

Malgré des améliorations concernant la fréquence des dessertes et la réduction de l'amplitude des coupures nocturnes, les riverains expriment une insatisfaction constante.

Les dernières études préliminaires, menées par le Département et la concertation qui a suivi en 2021 confirment l'intérêt de la solution du pont, notamment en termes de faible impact sur les enjeux environnementaux et le paysage mais aussi en termes de liens socio-économiques entre Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône et les bassins d'emploi de la rive gauche.

Dans ce contexte, le Département des Bouches-du-Rhône prévoit la création d'un ouvrage d'art de franchissement du Grand Rhône entre Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

Le projet de franchissement du Rhône doit répondre à une triple préoccupation :

- Trouver une alternative au Bac, économiquement moins pénalisante pour les collectivités en considérant le coût global de l'équipement ;
- Assurer un niveau de service, répondant aux besoins de déplacement des habitants et des industriels de Salin-de-Giraud ;
- Respecter les impératifs de protection du delta camarguais.

Le projet rentre dans sa phase AVP, les études environnementales avec notamment l'étude d'impact vont être lancées prochainement. Le projet intervenant dans le territoire naturel et sauvage de la Camargue, le Département souhaite que la production de ces études soit la plus rigoureuse possible.

Par ailleurs lors de la concertation publique portant sur les études Préliminaires en 2021, les principales craintes vis-à-vis du projet abordé par les contributeurs concernaient notamment :

- L'impact environnemental du pont
- L'optimisation du Bac
- La montée des eaux

Le Département a donc souhaité être accompagné dans ces domaines par un Assistant à Maitrise d'Ouvrage sur les Trois thèmes suivants :

- Le bilan carbone du projet (selon les deux alternatives de franchissement : pont ou bac) ;
- Les modélisations hydrauliques simulant l'impact hydraulique de l'ouvrage ;
- Les impacts du changement climatique en matière d'élévation du niveau marin.

La présente note synthétise les connaissances actualisées sur les projections d'élévation du niveau marin issues du dernier rapport du GIEC (AR6, 2021), et leurs conséquences en termes de submersion marine (permanente ou temporaire). Cette note ne traite pas en revanche de l'influence du niveau marin sur les crues du Rhône et des risques de débordement associés.

Sommaire

1	Le niveau marin	9
1.1	Niveau marin relatif et niveau marin absolu	9
1.2	Les marégraphes	11
1.3	Les composantes du niveau instantané	12
1.3.1	Le niveau marin moyen	12
1.3.2	La marée	12
1.3.3	Les surcotes	13
2	Impact du changement climatique sur le niveau marin.....	14
2.1	Réponse climatique et évolution passée	14
2.2	Projections d'élévation du niveau marin moyen à l'échelle mondiale	14
2.3	Projections d'élévation du niveau marin moyen à l'échelle régionale	16
2.4	Prise en compte de l'évolution du niveau marin due au changement climatique dans les documents réglementaires	18
2.5	Projection d'élévation du niveau marin à l'horizon de la durée d'utilisation du pont	18
3	Impact du changement climatique en termes d'aléa submersion	18
3.1	Ennoiement permanent des terres	18
3.2	Le phénomène de submersion marine.....	20
3.3	Évolution de la fréquence des surcotes extrêmes	21
3.4	Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) du bassin Rhône-Méditerranée	21
3.5	Plans de Prévention des Risques inondation.....	22
3.6	Modélisation numérique de la submersion marine en Camargue	26
4	Synthèse	30
5	Annexes	31
5.1	Le marégraphe de Marseille	32
5.2	Le phénomène de subsidence du delta de Camargue.....	34
5.3	Bibliographie	36
5.4	Table des illustrations	38
5.4.1	Tableau	38
5.4.2	Figures	38

Introduction

Le delta de Camargue, et particulièrement l'embouchure du Rhône, est une zone d'influence combinée d'inondations par débordement de cours d'eau et par submersion marine.

Les phénomènes sont couplés aux embouchures (Petit et Grand Rhône). Le régime d'écoulement du fleuve étant influencé par les conditions aval (régime fluvial), le niveau marin de la Méditerranée conditionne donc en partie les niveaux d'eau du Rhône en crue. Les observations montrent en effet que les hauts niveaux marins et les vagues bloquent l'évacuation des crues du Rhône au niveau des embouchures en mer. Ils créent ce qu'on appelle le phénomène de « bouchon marin » qui aggrave les inondations dans le Delta par l'effet de surcote marine

Le secteur d'implantation de l'actuel bac de Barcarin est concerné par le risque d'inondation par débordement du Grand Rhône et le risque de submersion marine comme le stipulent les PPRi d'Arles (DDTM13 2015) et de Port-Saint-Louis-du-Rhône (DDTM13 2016). Ces derniers précisent que pour l'aléa de référence les inondations par débordement du Rhône sont à l'heure actuelle prépondérantes en matière de niveau d'eau atteint en rive gauche, et celle par submersion marine en rive droite.

Selon le dernier rapport du GIEC (Fox-Kemper et al. 2021), le niveau moyen de la mer, à l'échelle planétaire, s'est élevé de 20 cm entre 1901 et 2018 ; ce rythme s'étant accéléré pour atteindre 3,7 mm/an sur la période 2006-2018. L'inondation par submersion marine pourrait devenir prépondérante sur le secteur en raison de l'élévation du niveau marin liée aux effets du changement climatique.

Conformément aux Eurocodes la durée de vie des ouvrages d'art neufs est de 100 ans (cf. Tableau 2.1, NF EN 1990, (AFNOR 2003)). Ainsi, le niveau marin sera affecté par le changement climatique durant la vie des ouvrages (pont ou bac, infrastructures de raccordement, etc.). En conséquence il est nécessaire de projeter l'impact du changement climatique sur les niveaux marins et ses conséquences en matière de submersion marine pour le dimensionnement optimal du projet.

Nota : Le changement climatique aura également des effets sur le régime hydrologique du Rhône qui ne sont pas abordés dans la présente étude. Les conséquences de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de crue du Rhône (effet de « bouchon » en mer, modification morphologique du fond, etc.) ne sont également pas traitées.

1 LE NIVEAU MARIN

Le niveau marin à la côte (Figure 1.1) est contrôlé par des processus astronomiques (marées), atmosphériques (champs de pression et houles), océaniques (courants et vagues) et terrestres (mouvements tectoniques). Ces processus varient sur une large gamme d'échelles de temps et peuvent interagir les uns avec les autres, ce qui rend délicate la prédiction du niveau marin en général.

Le niveau marin instantané est composé du niveau marin moyen, de la marée astronomique et d'une résultante appelée surcote/décote qui prend en compte les effets atmosphériques (pression, vent) et la combinaison d'autres ondes (vagues, seiches, tsunamis, etc.).

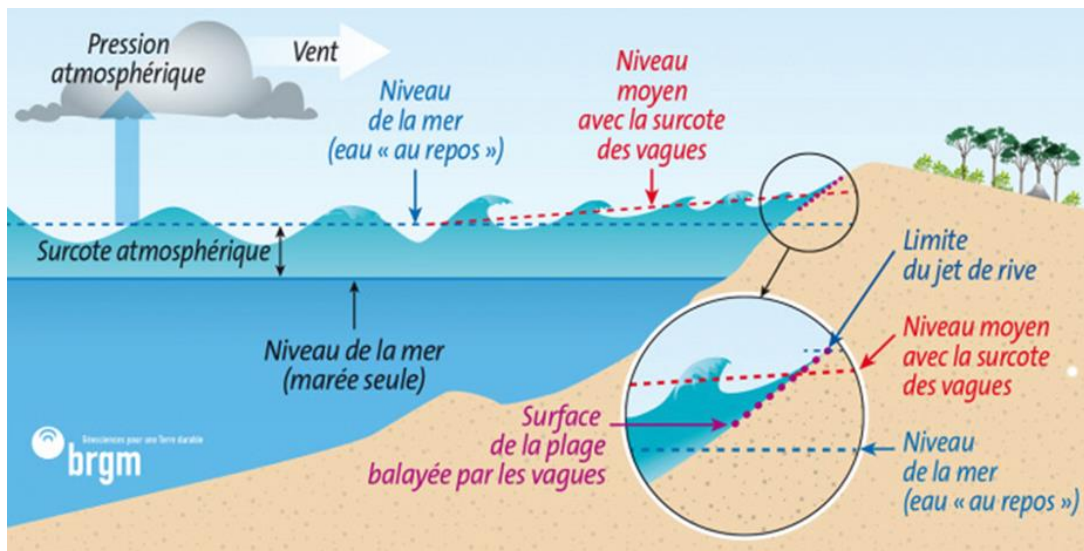


Figure 1.1 : Les Phénomènes influençant le niveau marin à la côte - (Source BRGM)

1.1 Niveau marin relatif et niveau marin absolu

Les marégraphes enregistrent le mouvement de la mer par rapport au sol sur lequel ils sont fixés et fournissent un niveau dit « relatif » qui intègre les mouvements verticaux du sol (tectonique). Si l'on cherche à connaître uniquement la composante climatique du niveau de la mer, il faut donc corriger la mesure marégraphique des mouvements du sol (Figure 1.2).

L'altimétrie satellitaire (Figure 1.3) fournit quant à elle une mesure « absolue » du niveau marin référencée au centre des masses de la Terre (Planton, 2015). Ainsi, à la différence des marégraphes, l'altimétrie spatiale produit donc essentiellement la composante climatique du niveau de la mer. L'eustatisme désigne la variation absolue du niveau moyen des mers.

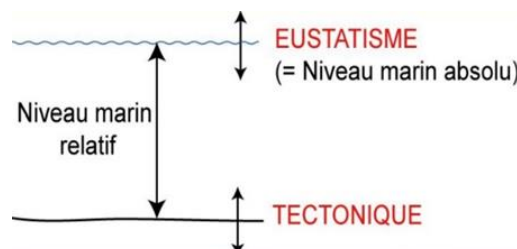


Figure 1.2 : Niveau marin relatif et absolu

La station GNSS (Global Navigation Satellite System) permet de déterminer les mouvements absolus du sol au niveau du marégraphe côtier. La combinaison des deux mesures rend possible le suivi du comportement réel du niveau de la mer à l'endroit considéré.

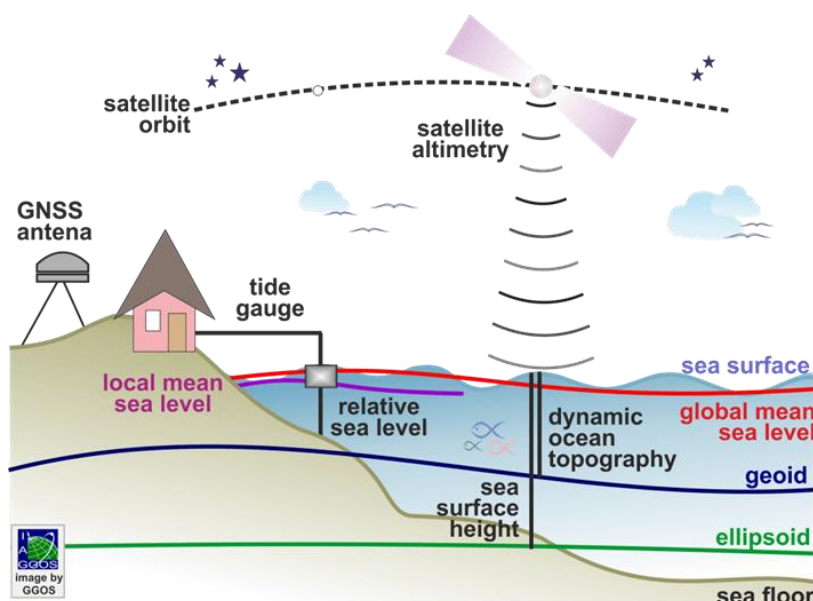


Figure 1.3 : Principe du marégraphe côtier et de l'altimétrie spatiale - Source Global Geodetic Observing System (GGOS) <https://ggos.org>

L'altimétrie spatiale a révélé la forte hétérogénéité spatiale du gradient d'élévation du niveau marin (Figure 1.4). Les importantes disparités régionales résultent principalement de la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité, en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales ainsi que les variations du cycle hydrologique (Planton, 2015).

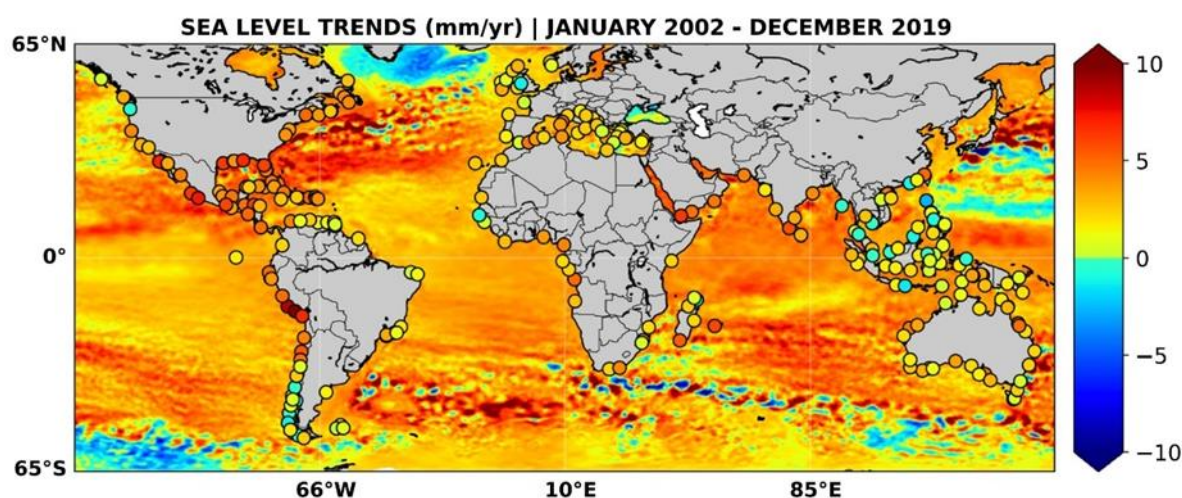


Figure 1.4 : Tendances côtières et régionales d'élévation du niveau de la mer (mm/an) de Janvier 2002 à Décembre 2019 - Données satellitaires Copernicus Climate Change Service (C3S, <https://climate.copernicus.eu>) - Source (Cazenave et al. 2022)

Distinguer le mouvement vertical de la croûte terrestre intégré dans le signal enregistré par les marégraphes est important car parfois, sur le long terme et dans certains secteurs, celui-ci est du même ordre de grandeur, voire plus grand que les variations absolues du niveau de la mer. Dans le delta Camarguais, le phénomène est encore mal documenté (cf. Annexe 2). Dans la pratique, l'influence de la tectonique est intégrée dans une marge globale d'incertitudes sur les niveaux marins dans les PPRi des communes d'Arles (DDTM13 2015) et Port-Saint-Louis du Rhône (DDTM13 2016).

Pour l'adaptation au changement climatique des ouvrages de franchissement du Rhône par la RD 35B, c'est bien le niveau de la mer relatif, incluant la composante climatique et les mouvements de la croûte terrestre qu'il faut considérer.

1.2 Les marégraphes

Les marégraphes les plus proches du site d'étude Figure 1.5 sont ceux de :

- ▶ Grau de la Dent (depuis 12/1905) ;
- ▶ Domaine de La Palissade (depuis le 06/12/2007) ;
- ▶ Fos-Sur-Mer (depuis le 31/01/2006) ;
- ▶ Marseille Corniche (depuis le 01/11/1849).

Les deux derniers instruments appartiennent au réseau [REFMAR](#) du SHOM (Réseaux de Référence des observations Marégraphiques).

Les données des marégraphes (hauteurs d'eau) sont téléchargeables sur le site internet du [SHOM](#) (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et les moyennes de niveau de mer (journalières, mensuelles, annuelles) sur le site du [SONEL](#) (Système d'observation du niveau des eaux littorales).

Des observations marégraphiques ont été réalisées dans le passé dans le golfe de Fos, par exemple à Port-de-Bouc (1956-1975) et Martigues (1956-1983) mais ne sont pas exploitables à des fins d'analyse de tendance sur le long terme (archives papier non numérisées ou niveaux moyens mensuels seuls disponibles, source : REFMAR).

Plus récemment, des instruments ont été installés dans les ports de Carro (depuis le 16/02/2019) et Ensues-La-Redonne (depuis le 21/02/2021). Bien que plus proches du site du projet, ces séries de données - comme celles de Fos-sur Mer et du domaine de La Palissade - sont trop courtes et ne permettent pas de réaliser des analyses de tendance pour mesurer l'impact du changement climatique sur le niveau marin.

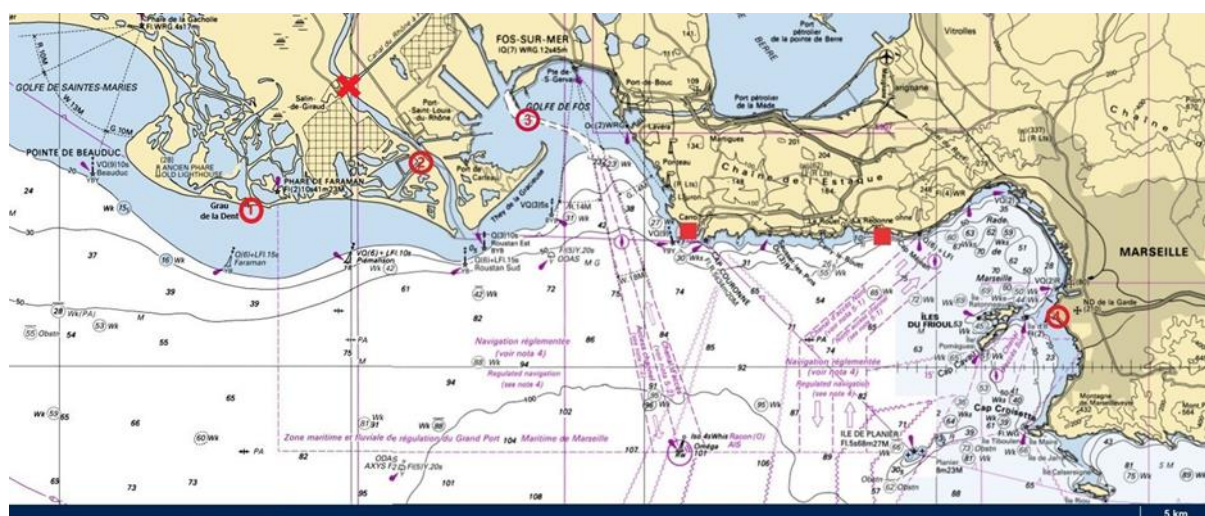


Figure 1.5 : Situation du projet (X) et marégraphes du Grau de la Dent (1), de La Palissade (2), Fos-Sur-Mer (3) et Marseille (4) – Source : [SONEL](#)

Le marégraphe du Grau de la Dent, installé pour la surveillance de la régulation des entrées d'eaux marines pour l'exploitation des plateaux salants, n'a pas la même fiabilité que les mesures de référence du marégraphe totalisateur de Marseille qui a été l'objet d'étalonnages réguliers et d'une attention particulière pendant des décennies depuis 1885.

Le marégraphe de Marseille Corniche (Annexe 1), en service depuis le 3 février 1885, fait partie du réseau du GLOSS (Global Sea Level Observing System) de 1ère catégorie et constitue l'une des plus anciennes chroniques au monde au pas horaire (Merrifield et al. 2012).

Les caractéristiques altimétriques des marégraphes de Marseille et Fos-sur-Mer sont rappelées dans le Tableau 1.1. Le zéro hydrographique est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires de marée (CM), à partir duquel sont comptées d'une part les profondeurs portées sur les cartes et d'autre part les hauteurs d'eau résultants des calculs de marées.

Port	Zéro hydrographique en NGF (IGN 69)	Niveau moyen	
		En zéro hydrographique	En NGF
Marseille (Corniche)	-0,329	0,49	0,16
Fos-sur-Mer	-0,334	0,49	0,16

Tableau 1.1 : Altitudes NGF du niveau moyen et du zéro hydrographique en mètre au niveau des marégraphes de Marseille et Fos-sur-Mer (SHOM 2020)

1.3 Les composantes du niveau instantané

Le niveau marin instantané est composé du niveau marin moyen, de la marée astronomique et d'une composante météorologique appelée surcote marine (ou surcote de tempête lorsqu'elle est positive).

1.3.1 Le niveau marin moyen

Le niveau marin moyen dépend de la longueur de la période d'observation et de la série de valeurs de calcul (données journalières, mensuelles, annuelles). Il est bien documenté grâce :

- ▶ aux longues séries marégraphiques qui permettent une analyse de tendance ;
- ▶ à l'altimétrie spatiale qui permet de suivre l'évolution absolue du niveau de la mer depuis le début des années 1990 en couvrant l'ensemble des océans.

Pour les données marégraphiques côtières, il existe différentes manières de calculer ces moyennes (Source [PSML](#)) :

- ▶ Valeurs annuelles : moyennes arithmétiques des moyennes mensuelles pondérées par le nombre de jours effectivement observés au cours du mois. La valeur est calculée si au moins 11 valeurs mensuelles sont effectivement disponibles ;
- ▶ Valeurs mensuelles : moyennes arithmétiques des moyennes journalières. Cependant, la valeur n'est pas calculée s'il manque plus de 15j ;
- ▶ Valeurs journalières : le choix d'une moyenne arithmétique sur une période de 24h présente l'inconvénient de ne pas filtrer suffisamment les signaux de périodes inférieures à une journée, notamment ceux de marées. Des filtres ont été conçus pour cela (Pugh 1987).

Le long de la façade Méditerranéenne française, le niveau moyen de la mer varie peu géographiquement. Il est calculé par le SHOM, organisme de référence pour ces données, à partir des mesures de niveaux marins réalisées dans les ports équipés d'un marégraphe.

Le niveau moyen de référence retenu pour la suite de cette note est celui calculé par le SHOM sur le marégraphe de Fos-sur-Mer en 2012 qui est de 0,16 m NGF (SHOM 2020).

1.3.2 La marée

Sur le littoral Méditerranéen français, la marée de type semi-diurne à inégalité diurne est faible et le marnage maximal à proximité du site d'étude (marégraphe de Fos-sur-Mer) ne dépasse pas les 0,44 m (Source : (SHOM 2020) :

- ▶ Plus Basses Mers Astronomiques : -0,06 m NGF ;
- ▶ Plus Hautes Mers Astronomiques : 0,38 m NGF ;
- ▶ Niveau Moyen : 0,16 m NGF.

On parle de conditions micro-tidales.

1.3.3 Les surcotes

Les variations du niveau de l'eau dues aux surcotes/décotes sur la Côte Camarguaise, comme en Méditerranée française, sont beaucoup plus marquées que celles liées à la marée astronomique. On parle de décote instantanée lorsque la différence entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite est négative.

La première composante atmosphérique des surcotes/décotes est imputable :

- ▶ à la pression atmosphérique. Le niveau marin répond directement à la pression atmosphérique par effet barométrique inverse (1 cm pour 1 hPa de variations de pression atmosphérique) ;
- ▶ aux vents. Une surcote est souvent observée lors des vents de mer de Sud-Est qui poussent la masse d'eau vers la côte pouvant entraîner une surcote, alors qu'inversement les décotes sont observées par vent de terre (Mistral).

La deuxième composante (wave runup) est liée :

- ▶ au déferlement des vagues à l'approche du littoral (wave setup) générant une accumulation d'eau entre la zone de déferlement et la plage ;
- ▶ à l'effet des vagues sur le jet de rive (swash runup).

La Figure 1.6 illustre les principaux phénomènes hydrodynamiques qui contrôlent le niveau d'eau instantané (pression, vent, houle).

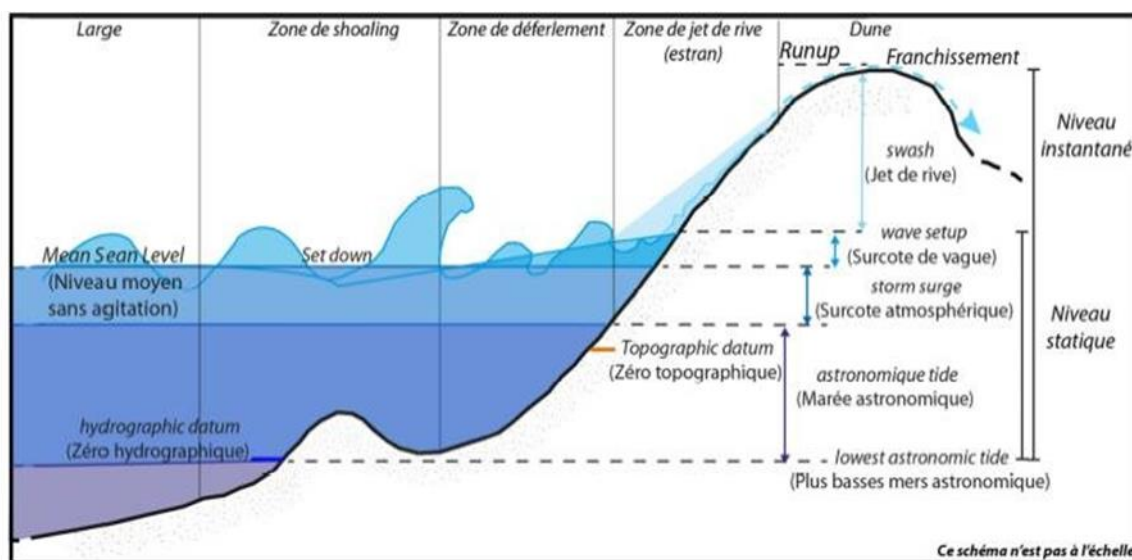


Figure 1.6 : Processus physiques en action lors d'une tempête et composition du niveau marin instantané – Source : (Nicolae-Lerma 2012)

En Méditerranée française, les observations montrent que les pics de surcotes ne sont pas toujours synchrones avec les pics de houle et que des décalages de plusieurs heures sont fréquemment observés.

Ainsi, les deux composantes principales des surcotes marines dues aux forçages atmosphériques d'une part et aux vagues d'autre part sont indépendantes.

En effet, les houles et l'onde de tempête (surcote) ne se forment pas et ne se déplacent pas avec la même vitesse (CEREMA 2020).

2 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE NIVEAU MARIN

2.1 Réponse climatique et évolution passée

Globalement, le changement climatique influencera l'ensemble des facteurs naturels liés au niveau marin vu précédemment (vent, houle, courant, ...).

Ses effets sur la marée astronomique et les courants associés ne sont pas encore connus et peuvent être négligés d'autant plus que le littoral considéré est sous condition microtidale (amplitude faible des marées).

Il en est de même pour les surcotes de tempête : l'évolution des vents est encore incertaine en Méditerranée. Le réchauffement atmosphérique pourrait entraîner une modification de la circulation atmosphérique et des changements dans l'intensité et la direction des vents, affectant ainsi les trajectoires des tempêtes. Mais les études actuelles ne permettent pas de mettre en évidence une tendance future notable sur l'évolution du risque de vent violent lié aux tempêtes (ONERC 2018).

Le manque de séries temporelles suffisamment longues rend difficile la détection des tendances à long terme (Yates-Michelin, Le Cozannet, Balouin 2011) et il en est de même des courants (circulation thermohaline).

Dans le cadre de cette note, nous décrivons seulement l'évolution sous l'effet du changement climatique du niveau marin moyen (sans agitation) et sans distinguer la contribution relative des différentes composantes du forçage (astronomiques, atmosphériques, océaniques, terrestres).

Depuis le minimum du dernier âge glaciaire, il y a environ 21 000 ans, le niveau mondial moyen de la mer s'est élevé à une vitesse moyenne qui s'est stabilisée à 0,5 mm/an au cours des 2-3 derniers millénaires avec des variations inférieures à 6 cm par siècle (Planton, 2015).

Aux échelles de temps interannuelle à multidécennale, l'élévation récente observée du niveau moyen de l'océan résulte de deux sources majeures :

- ▶ L'expansion thermique des océans due à leur réchauffement causé par la hausse des températures moyennes des basses couches de l'atmosphère (et au chauffage direct par le soleil dans les régions arctiques devenues libres de glace). Cet effet, dit stérique, augmente le volume de l'océan et donc le niveau de la mer ;
- ▶ L'augmentation du contenu en eau des océans, par l'apport d'eau douce consécutif à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (le Groenland et l'Antarctique). Une petite contribution vient aussi des échanges d'eau avec les terres émergées.

Concernant l'évolution récente du niveau marin moyen, le GIEC 2021 constate une accélération de l'augmentation du niveau due au changement climatique ces dernières années. Si le niveau moyen de la mer, à l'échelle planétaire, s'est élevé de 20 cm [fourchette comprise entre 15 et 25 cm] entre 1901 et 2018, ce rythme d'élévation s'est accéléré pour atteindre 3,7 mm/an sur la période 2006-2018 ; le plus rapide enregistré depuis au moins 3 000 ans (Fox-Kemper et al. 2021).

2.2 Projections d'élévation du niveau marin moyen à l'échelle mondiale

A l'horizon 2100, les dernières projections du GIEC 2021 prévoient une augmentation moyenne comprise entre 38 cm et 77 cm par rapport à la période (1995-2014) en fonction des scénarios de

développement socio-économiques retenus, basés sur des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle globale (Fox-Kemper et al. 2021) :

- ▶ le scénario le plus optimiste (SSP1-1.9) se base sur une très forte baisse des émissions dès 2025, l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, un niveau d'émissions net de GES négatif à la fin du siècle (2081-2100), et un réchauffement contenu à environ +1,5°C à cette échéance par rapport à la période de référence 1850-1900 (Accord de Paris) ;
- ▶ le plus pessimiste (SSP5-8.5) correspond à des émissions de GES en forte hausse, à peu près multipliées par deux entre les niveaux actuels (2015) et 2050, et un réchauffement de +4,4°C à la fin siècle par rapport à la période 1850-1900. Ce scénario permet de dessiner une évolution sans politique internationale sur le climat efficace.

La Figure 2.1 illustre les changements observés (1900-2018) et projetés (2018-2150 selon les scénarios SSP, par rapport à la moyenne sur la période de référence (1995-2014). Les lignes pleines indiquent la médiane des projections, les régions ombrées représentent les plages probables. Les traits discontinus correspondent aux 83ème et 95ème centiles d'un scénario de plus faible probabilité « SSP5-8.5 Low confidence » (une augmentation plus importante du niveau marin avant 2100 pourrait être causée par un effondrement plus précoce que prévu des calottes de glace marine).

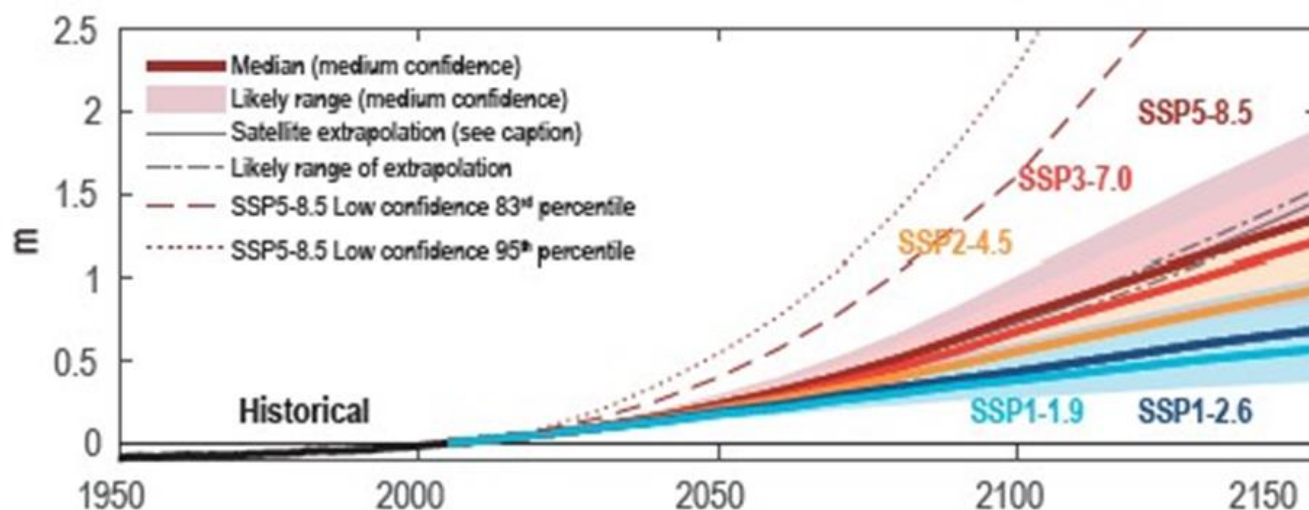


Figure 2.1 : Projections du niveau moyen des mers selon les 5 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre croissant de SSP1-1.9 à SSP5-8.5 par rapport à la moyenne de la période (1995-2014) - Source : GIEC 2021 (Fox-Kemper et al. 2021)

En tenant compte des incertitudes, à l'horizon 2100 le niveau moyen des mers et des océans devrait augmenter de 0,28 à 0,55 m (plage probable) sous SSP1-1,9 et de 0,63 à 1,02 m (plage probable) sous SSP5-8,5 par rapport à la moyenne de la période (1995-2014).

Pour le long terme, le niveau marin moyen augmentera inéluctablement encore pendant des siècles, voire des millénaires à cause de l'inertie thermique des océans et ce, quel que soit le scénario d'émission de gaz à effet de serre suivi.

2.3 Projections d'élévation du niveau marin moyen à l'échelle régionale

L'augmentation des niveaux marins moyens attendue à la station de Marseille est estimée dans le dernier rapport du GIEC. (Fox-Kemper et al. 2021). Ces données sont hébergées et visualisables sur un site dédié développé par la [NASA](#) (Figure 2.2). Les données pour la station de Marseille sont synthétisées dans le Tableau 2.1.

	2050	2100	2150
SSP1-1.9 (le plus optimiste)	0,17 m (0,07-0,29)	0,36 m (0,19-0,57)	0,52 m (0,24-0,88)
SSP5-8.5 (le plus pessimiste)	0,23 m (0,15-0,32)	0,72 m (0,53-1,00)	1,21 m (0,80-1,82)

Tableau 2.1 : Elévation du niveau marin à Marseille relativement à une base de référence (1995-2014) pour les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 aux horizons 2050, 2100 et 2150, les valeurs entre parenthèses correspondent à la plage probable soit l'intervalle de confiance 17%-83% Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

En considérant un niveau moyen pour la période de référence (1995-2014) de 0,16 m NGF, les niveaux marins attendus en termes de côtes NGF à différentes échéances selon les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 sont synthétisés dans le Tableau 2.2.

	2050	2100	2150
SSP1-1.9 (le plus optimiste)	0,33 m NGF (0,23-0,45)	0,52 m NGF (0,35-0,73)	0,68 m NGF (0,40-1,04)
SSP5-8.5 (le plus pessimiste)	0,39 m NGF (0,31-0,48)	0,88 m NGF (0,69-1,16)	1,37 m NGF (0,96-1,98)

Tableau 2.2 : Niveaux marins attendus au large du site pour les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 aux horizons 2050, 2100 et 2150, les valeurs entre parenthèses correspondent à la plage probable soit l'intervalle de confiance 17% - 83% Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

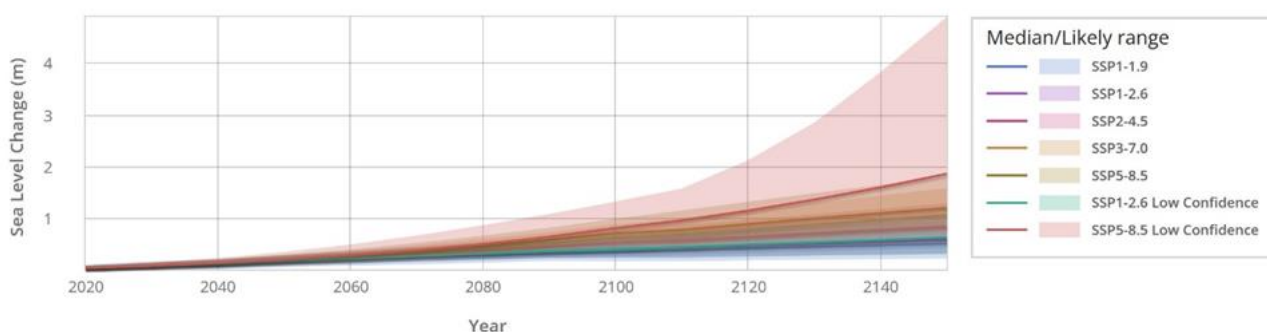


Figure 2.2 : Projection de l'élévation du niveau marin à Marseille relativement à une base de référence 1995-2014 pour les 7 scénarios de SSP1-9 à SSP5-8.5 - Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

La Figure 2.3 et la Figure 2.4 donnent les échéances de dépassement d'une élévation du niveau marin respectivement de 0,60 m et 1,00 m sur la station de Marseille selon les 7 scénarios d'émission de CO₂ retenus dans le dernier rapport du GIEC (AR6). A titre d'illustration, une élévation du niveau marin supérieur à 0,6 m par rapport à la période de référence est attendue entre environ 2090 (valeur médiane) pour le scénario pessimiste (SSP5-8.5) et 2175 (valeur médiane) pour le scénario optimiste (SSP1-1.9).

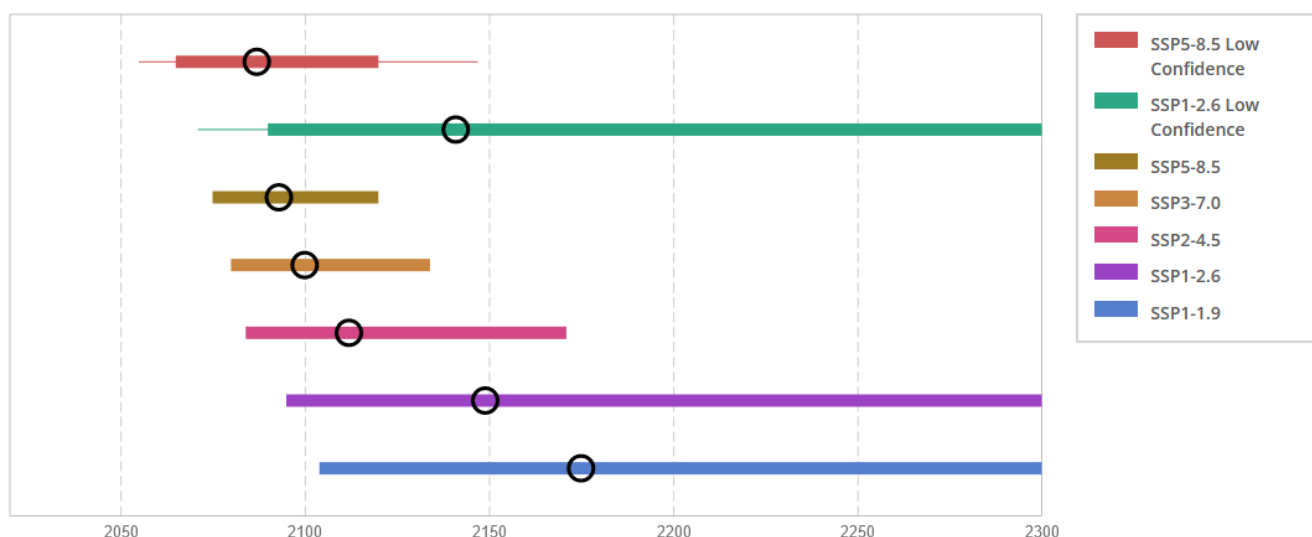


Figure 2.3 : Echéances d'élévation du niveau marin moyen de 0,60 m à Marseille selon les 7 scénarios d'émission de CO₂ - Le cercle noir correspond à la médiane et les barres colorées aux intervalles de confiance, respectivement 17% et 83% (5% et 95% pour le scénario 2-6)- Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

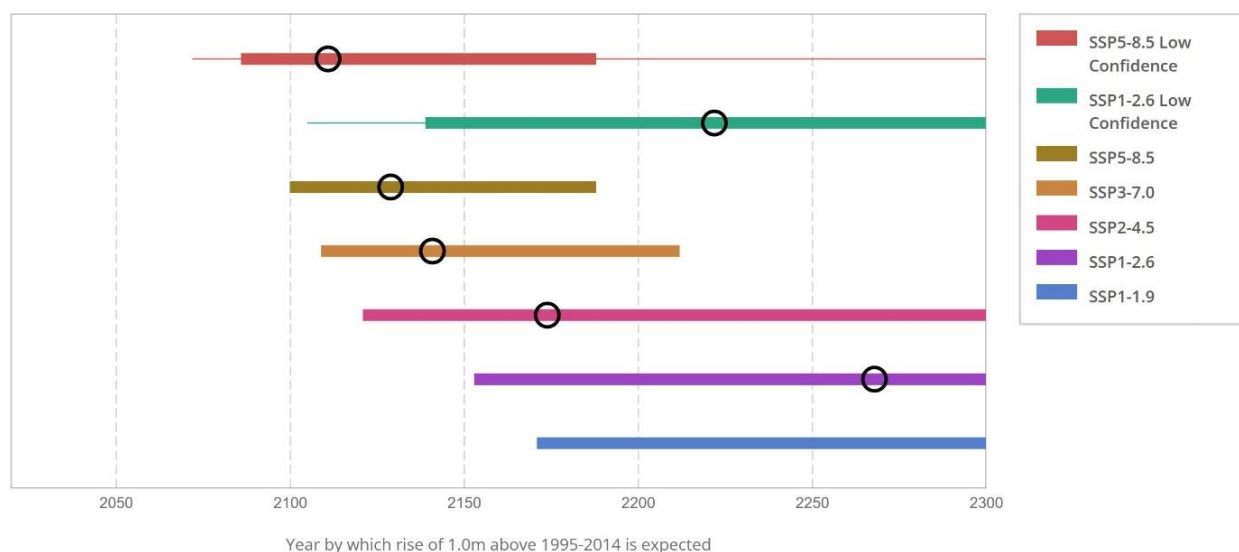


Figure 2.4 : Echéances d'élévation du niveau marin moyen de 1,00 m à Marseille selon les 7 scénarios d'émission de CO₂ - Le cercle noir correspond à la médiane et les barres colorées aux intervalles de confiance, respectivement 17% et 83% (5% et 95% pour le scénario 2-6) Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

2.4 Prise en compte de l'évolution du niveau marin due au changement climatique dans les documents règlementaires

Le guide méthodologique d'élaboration des plans de prévention des risques littoraux (PPRL) stipule que « Le PPRL doit comprendre deux cartes d'aléa submersion marine distinctes, l'aléa de référence du PPRL et un aléa à échéance 100 ans ».

Les événements retenus pour la détermination de l'aléa de référence, aléa à court terme, intègrent au niveau moyen de la mer une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm.

Pour la détermination de l'aléa à échéance 100 ans, l'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau moyen de la mer égale à 60 cm dont 20 cm sont déjà intégrés au niveau d'eau de l'événement de référence » (MEDDE 2014).

2.5 Projection d'élévation du niveau marin à l'horizon de la durée d'utilisation du pont

Dans l'hypothèse d'une mise en service de l'ouvrage en 2030, et d'une durée d'utilisation de 100 ans (cf. encart en introduction), l'horizon visé en matière d'impact du changement climatique pourrait être 2130 environ. A cette échéance, les dernières projections du GIEC d'élévation du niveau marin sur la station de Marseille en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont reprises dans le Tableau 2.3.

	Projection basse (centile 17%)	Valeur médiane (50%)	Projection haute (centile 83%)
SSP1-1.9, très faible émission GES (réchauffement < 1,5 °C en 2100)	0,22	0,46	0,76
SSP1-2.6 faible émission GES (<2°C)	0,29	0,53	0,84
SSP2-4.5 intermédiaire GES (2,7°< réchauffement< 3,4°C)	0,45	0,72	1,09
SSP3-7.0 forte émission GES (~3,5°C)	0,57	0,89	1,31
SSP5-8.5 très forte émission GES (~4,5 °C)	0,67	1,01	1,50

Tableau 2.3 : Elévation du niveau marin attendu à Marseille relativement à une base de référence (1995-2014) pour les cinq scénarios centraux du GIEC à l'horizon 2130. Les valeurs médianes et valeurs basses et hautes de la plage probable sont indiquées (intervalle de confiance à respectivement 17% et 83%) - Source : (Fox-Kemper et al. 2021)

3 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN TERMES D'ALEA SUBMERSION

L'élévation du niveau marin pourra induire ou aggraver deux types de submersions : les submersions permanentes de zones basses (ennoïement) et les submersions temporaires.

3.1 Ennoïement permanent des terres

La hausse du niveau moyen des mers conduira à une submersion permanente, appelée ennoïement, hors événements tempétueux, des zones basses situées sur le littoral. Le Cerema a produit dans le cadre de la plate-forme « [Mon Littoral Provence-Alpes-Côte d'Azur](#) », une cartographie de ce

phénomène (disponible en ligne sur le site <https://www.monlittoral.fr/>). Cette cartographie est une représentation simplifiée et théorique des phénomènes dans la mesure où elle ne se base que sur des données topographiques. Le niveau moyen futur est superposé à un modèle numérique de terrain comme explicité dans (MEDDE 2014). Les changements et l'adaptation des plages et du littoral à cette hausse du niveau moyen de la mer ne sont donc pas pris en compte. Cette cartographie suppose qu'un équilibre s'établit entre le niveau marin moyen et le niveau d'eau dans les zones basses et les étangs.

Plusieurs scénarios d'élévation du niveau marin ont ainsi été cartographiés (+60 cm, +100 cm, +140 cm et +180 cm). Dans l'hypothèse d'une mise en service de l'ouvrage en 2030, et d'une durée d'utilisation de 100 ans, l'horizon visé en matière d'impact du changement climatique pourrait être 2130 environ, soit :

- ▶ une élévation du niveau moyen de la mer supérieure à +60 cm à cette échéance (Figure 3.1, Tableau 2.3) est probable pour les scénarios d'émission SSP2-4.5 (scénario d'émission intermédiaire), SSP3-7.0 (scénario d'émission forte), et SSP5-8.5 (scénario d'émission très forte) ;
- ▶ une élévation du niveau moyen de la mer supérieur à +100 cm à cette échéance (Figure 3.2, Tableau 2.3) n'est probable que pour les scénarios d'émission les plus pessimistes SSP3-7.0 (scénario d'émission forte), et SSP5-8.5 (scénario d'émission très forte).

Les cartes suivantes permettent d'évaluer l'envolement au droit du secteur d'étude, pour une élévation du niveau marin respectivement de +60 cm et +100 cm. Les remblais d'accès actuels aux plates-formes du bac de Barcarin restent hors d'eau.

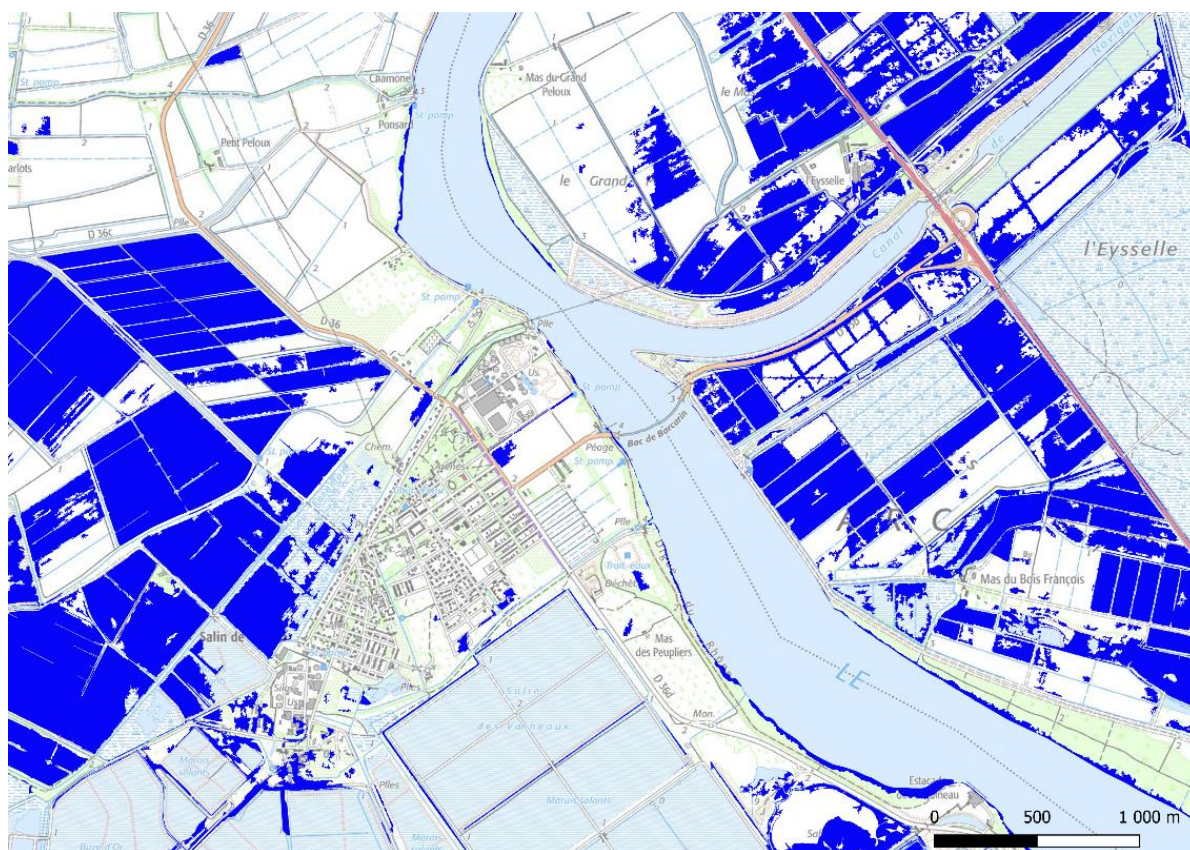


Figure 3.1 : Carte d'envolement des terres au Barcarin pour une élévation du niveau marin de +60 cm (en bleu les zones envoyées) – Source : Cerema à paraître

3.2 Le phénomène de submersion marine

Trois modes de submersion marine sont distingués :

- Les principaux évènements recensés au cours des dernières décennies à proximité du site (CETE Méditerranée 2007) sont les tempêtes de novembre 1982 (l'une des plus fortes connues sur ce littoral, avec des vents atteignant environ 180 km/h) et de décembre 1997, ainsi que le raz-de-marée d'août 1985.

Une fois le ou les scénarios de référence retenus, différentes méthodes sont proposées dans le guide méthodologique PPRL (MEDDE 2014) afin de cartographier l'aléa de submersion marine. La superposition du niveau marin de référence au relevé topographique, comme appliqué précédemment pour l'enneigement, reste d'actualité pour appréhender de façon simple les zones soumises à la submersion marine. Des méthodes plus complexes basées sur l'utilisation de modèles numériques sont recommandées dans les cas particuliers (zone inondable non homogène ou continue, relations complexes entre les dépressions/cuvettes, fortes contributions des franchissements, marnage important, etc.).

3.3 Évolution de la fréquence des surcotes extrêmes

Selon le GIEC, l'élévation du niveau marin moyen conduira à une augmentation des fréquences d'atteinte de niveaux (instantanés) extrêmes lors des tempêtes (Figure 3.3). De manière schématique, les tempêtes d'occurrence centennale auront une occurrence annuelle en termes de niveaux instantanés atteints au cours du XXI^{ème} siècle pour la plupart des régions côtières (GIEC 2019).

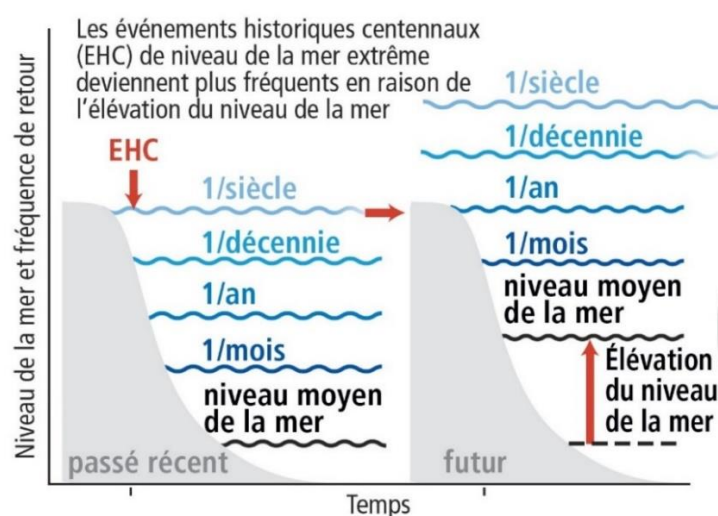


Figure 3.3 : Evolution des niveaux marins extrêmes – Source : (GIEC 2019)

Nota : Cette représentation fait l'hypothèse implicite - que nous avons adoptée dans cette note - que les contributions dynamiques du niveau marin instantané (marée, surcote de tempête, effet des vagues) ne sont pas modifiées par le changement climatique.

3.4 Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) du bassin Rhône-Méditerranée

Le projet de la Stratégie locale de Gestion des Risques d'Inondation (SLGRI) "Delta du Rhône" du Territoire à Risque important d'Inondation (TRI) du Delta du Rhône cartographie (Figure 3.4) le risque de submersion marine avec prise en compte du changement climatique (DREAL de Bassin Rhône-Méditerranée 2016).

Pour le scénario moyen avec changement climatique, une élévation de 40 cm est appliquée au niveau marin de l'événement correspondant au scénario moyen (+ 2 m NGF). Un niveau marin de 2,40 m NGF est ainsi considéré. Ce niveau marin statique est superposé à la topographie pour cartographier l'aléa submersion marine (MNT de la Base de Données Topographique du Rhône au pas de 2 m, précision 20 cm). Les secteurs situés en rive droite et en rive gauche sont submergés (Figure 3.4).

CARTE DES ALEAS

Submersion scénario extrême



Valeur de l'aléa

- Aléa fort
- Aléa moyen
- Aléa faible

Protection

- Ouvrage de protection
- Zone de sur-aléa
- Zone soustraite à l'inondation

Découpages administratifs

- Périmètre du TRI
- Périmètre de la SLGRI
- Limites de communes

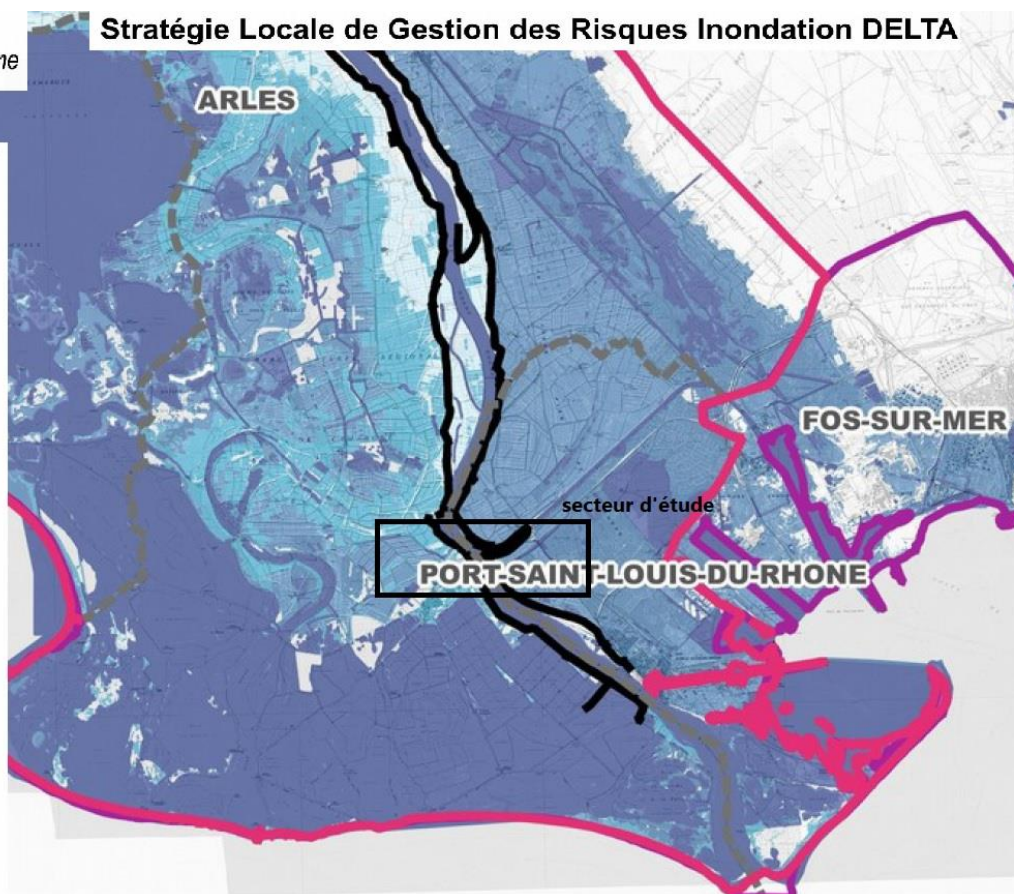


Figure 3.4 : Scénario moyen d'inondation avec changement climatique – Source : (DREAL de Bassin Rhône-Méditerranée 2016)

3.5 Plans de Prévention des Risques inondation

L'aire d'étude est concernée par le risque d'inondation par débordement du Rhône et par le risque de submersion marine.

Les communes d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône sont couvertes par un plan de prévention des risques approuvé respectivement le 3 février 2015 et le 21 juin 2016 qui reprennent les recommandations du guide (MEDDE 2014) pour l'aléa de submersion marine (+20 cm pour l'aléa de référence et +60 cm à l'horizon 2100). Comme nous avons pu le voir précédemment (§ 0, Figure 2.3), une élévation du niveau marin de +60 cm à l'horizon 2100 correspond à la valeur médiane du scénario SSP3-7.0 (scénario d'émission forte de gaz à effet de serre, néanmoins pas le scénario le plus pessimiste).

Les rapports de présentation des PPRi d'Arles (DDTM13 2015) et de Port-Saint-Louis-du-Rhône (DDTM13 2016) stipulent qu'actuellement, le niveau centennal moyen appelé « aléa météorologique » retenu pour la Camargue est de +1,5 m NGF. Il est décomposé de la façon suivante :

- ▶ un niveau moyen horaire centennal (marée et surcote atmosphérique) de + 1,1 m NGF ;
- ▶ une surcote centennale liée à la houle (« wave set-up ») de + 0,40 m NGF.

La circulaire ministérielle du 27 juillet 2011 relative à « la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux » précise que les PPR doivent intégrer des aléas calculés sur des hypothèses d'augmentation du niveau de la mer consécutive au changement climatique selon les principes suivants (Figure 3.5) :

- ▶ l'aléa de référence est défini comme étant l'aléa météorologique majoré d'une marge de 20 cm constituant la première étape de prise en compte du changement climatique. Sur la côte arlésienne, l'aléa de référence correspond donc à **+1,7 m NGF** ;
- ▶ l'aléa 2100 est défini comme étant l'aléa météorologique majoré d'une marge de 60 cm, constituant la prise en compte du changement climatique à l'horizon 2100. Sur la côte arlésienne et de Port-Saint-Louis-du-Rhône, l'aléa de référence correspond donc à **+2,1 m NGF** (DDTM13 2015) et (DDTM13 2016).

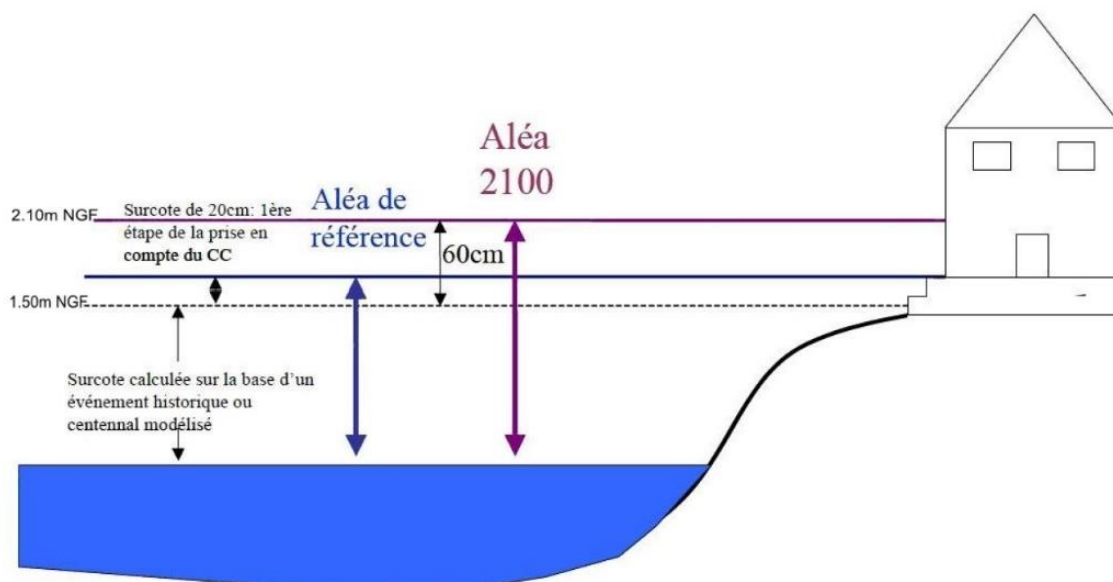


Figure 3.5 : Définition de l'aléa de référence pour la submersion marine avec prise en compte du changement climatique dans le PPRI d'Arles et Port-Saint-Louis-du Rhône - Source : (DDTM13 2015) et (DDTM13 2016)

Pour la commune de Port-Saint-Louis-du-Rhône, le rapport de présentation indique que les secteurs situés au nord de la RD268 ne sont pas soumis actuellement à l'aléa de submersion marine (+ 1,7 m NGF, Figure 3.6). L'aléa débordement du Rhône est donc prépondérant en rive gauche dans le secteur du bac de Barcarin (hors effet du changement climatique, cf Figure 3.7).



Figure 3.6 : Zone inondable pour l'évènement de référence submersion marine (+1,7 m NGF) – Source rapport de présentation du PPR Port-Saint-Louis-du-Rhône (DDTM13 2016)

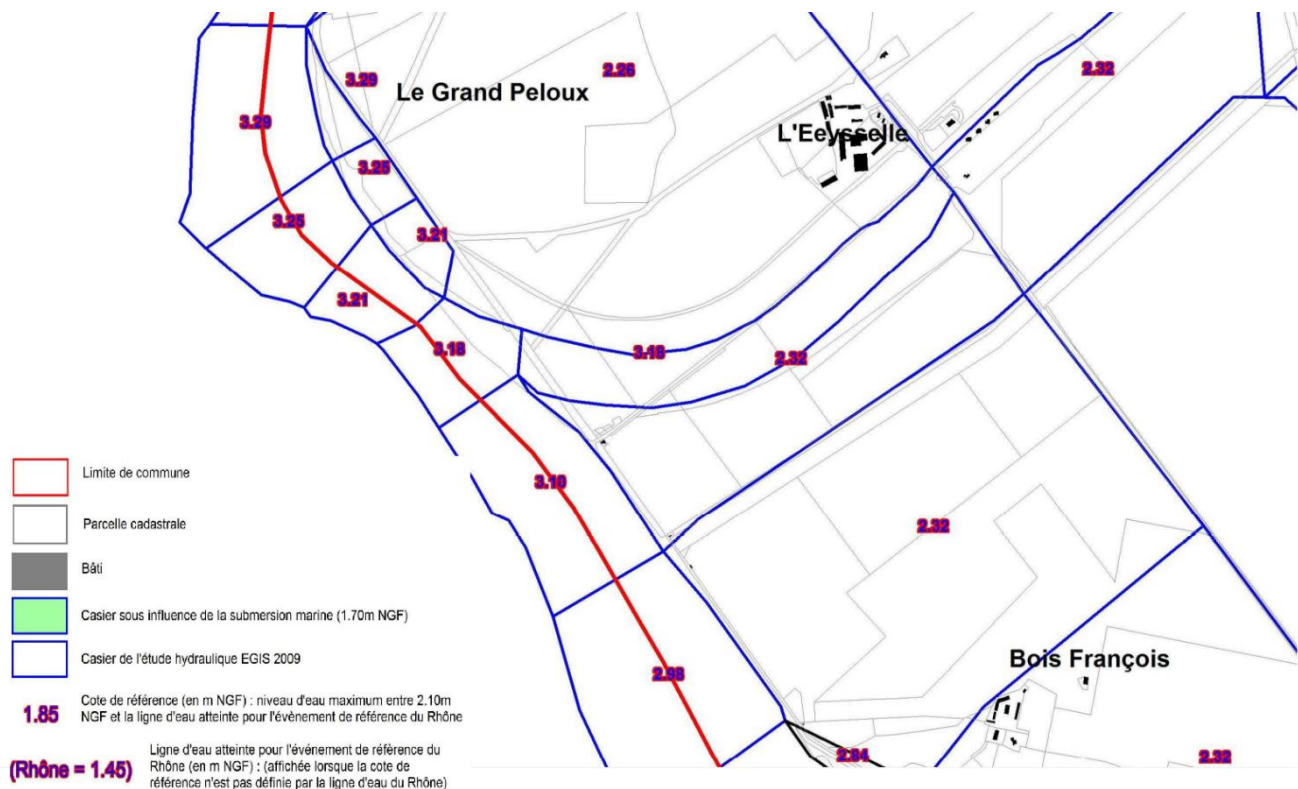


Figure 3.7 : Extrait de carte des cotes de référence du PPRi de Port-Saint-Louis du Rhône au droit du site d'étude

En rive droite par contre, au droit de Salin-de-Giraud, l'influence de l'aléa submersion marine est prépondérant (Figure 3.8) et (Figure 3.9).

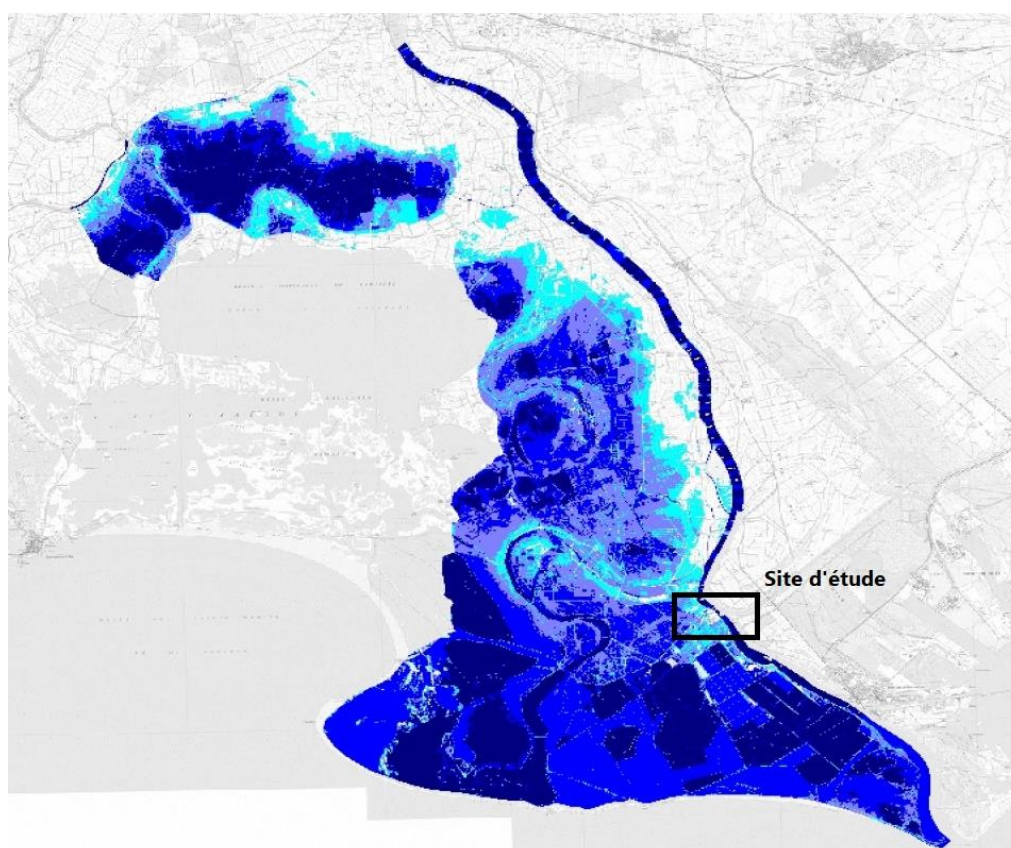


Figure 3.8 : Enveloppe approchée de la zone d'influence de la submersion marine (+1,7 m NGF) – Source : Rapport de présentation du PPR d'Arles (DDTM13 2015)

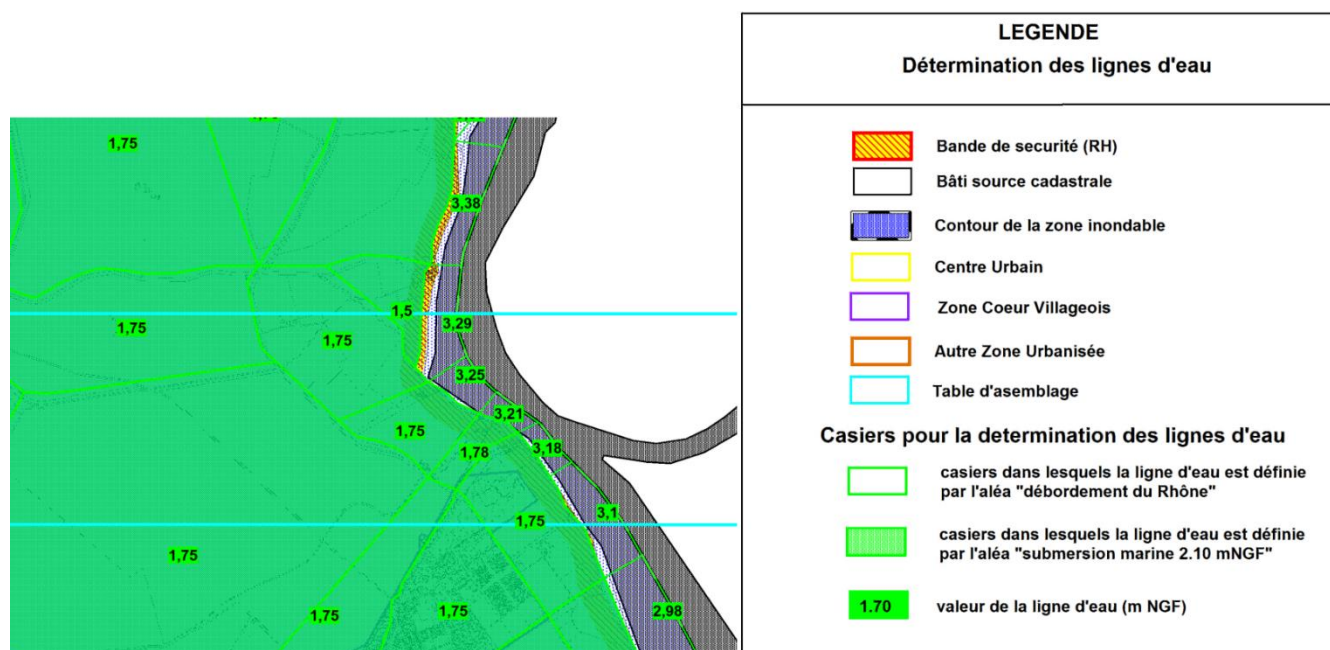


Figure 3.9 : Extrait de la carte des lignes d'eau au droit du secteur d'études – Source : PPRi d'Arles (DDTM13 2015)

3.6 Modélisation numérique de la submersion marine en Camargue

Le BRGM a développé, pour le compte de la DDTM des Bouches-du-Rhône, un modèle numérique permettant la réalisation de simulations dynamiques du phénomène de submersion marine lors de tempêtes impactant le littoral camarguais (Paris et al. 2017). La modélisation des vagues, des niveaux d'eau, des courants et des submersions marine est réalisée pour divers scénarios de forçage météo-marins au large (Figure 3.10). Des événements d'occurrence fréquente (~10 ans), moyenne (~100 ans) et extrême (~1000 ans) ont été simulés en l'état actuel (+20 cm d'élévation du niveau marin). L'évènement d'occurrence moyenne à l'horizon 2100 (+60 cm d'élévation du niveau marin) a également été intégré à l'étude.

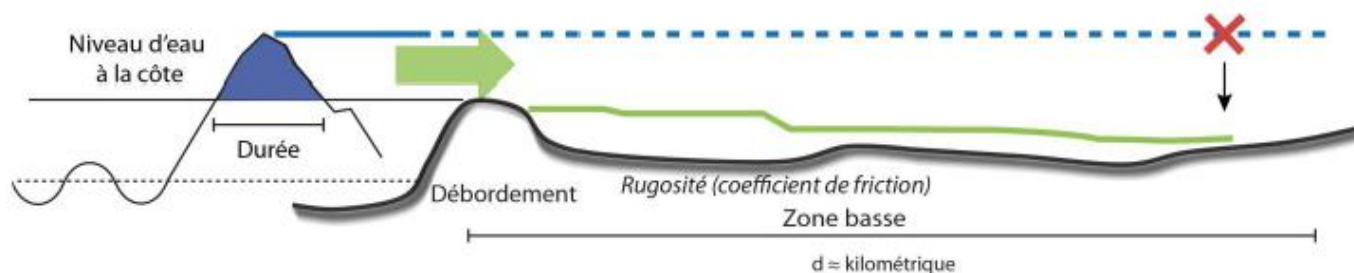


Figure 3.10 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation numérique. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais propagé suivant une dynamique de submersion (vert) – Source : BRGM (Paris et al. 2017)

Les scénarios font intervenir des combinaisons de niveaux marins moyens au large (surcotes), de houle (caractérisée par la hauteur significative des vagues H_s , la période pic des vagues T_p , la direction pic des vagues D_p), et de vent (vitesse et direction).

Le tableau suivant reprend les hypothèses retenues pour le scénario moyen à l'horizon actuel, le scénario moyen à l'horizon 2100 et le scénario extrême. Le niveau marin est la somme d'un niveau d'eau au large (« Still Water Level » ou SWL, incluant la marée et la surcote atmosphérique), d'une marge de sécurité de 20 cm liée aux diverses incertitudes de la modélisation, et des valeurs d'élévation du niveau marin lié au changement climatique (+20 cm en l'état actuel, et +60 cm à l'horizon 2100 conformément aux recommandations du guide PPRL (MEDDE 2014).

	Evènement	Moyen actuel	Moyen 2100	Extrême actuel
Vagues	H_s (m)	5,33	5,33	10,05
	T_p (s)	9,4	9,4	11,5
	D_p (°N)	155	155	125
Niveau marin (m NGF) : SWL + incertitudes + élévation du niveau de la mer		1,55	1,95	1,9
Vent	Vitesse (km/h)	87	87	144
	Direction (°N)	121	121	121

Tableau 3.1 : Conditions de forçages au large pour les événements moyen actuel, moyen 2100 et extrême – Source : BRGM (Paris et al. 2017)

La cartographie de l'altitude maximale du plan d'eau atteint par submersion marine au droit du site d'étude est reprise en Figure 3.11 pour le scénario moyen à l'horizon 2100. La rive gauche du Rhône est impactée par le phénomène de submersion marine en raison de l'élévation du niveau marin

considéré à cet horizon (+60 cm), avec des altitudes comprises entre +1,60 m NGF et +1,80 m NGF. Les altitudes en rive droite sont proches de +2,1 m NGF.

La comparaison avec les résultats du scénario moyen à l'horizon actuel (+20 cm, Figure 3.12) met en évidence des effets de seuils. La différence entre les altitudes maximales est très largement supérieure à 40 cm (différence d'élévation du niveau marin) sur le secteur d'étude en rive gauche (de l'ordre de 1,6 m à 1,8 m). Ce secteur n'était pas impacté par le phénomène de submersion marine pour le scénario moyen à l'horizon actuel (résultat similaire aux cartographies d'aléa du PPRi de Port-Saint-Louis du Rhône).

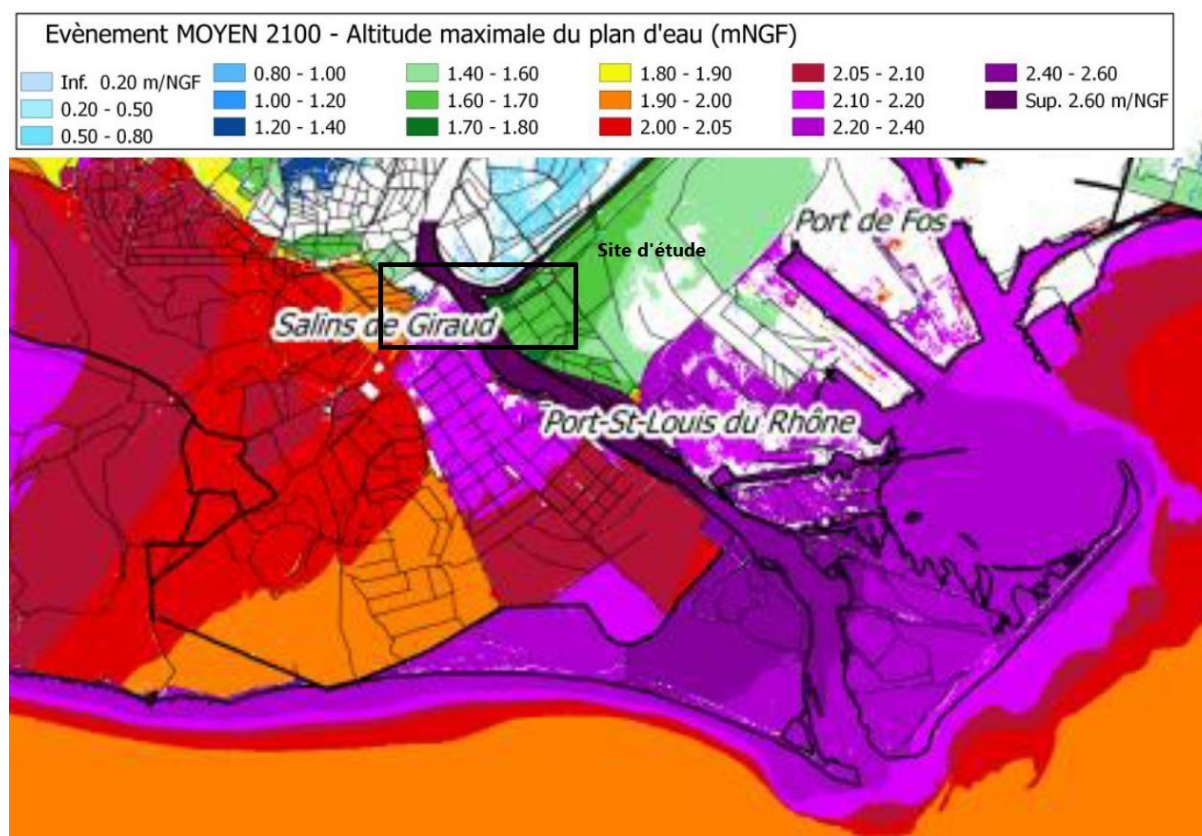


Figure 3.11 : Altitude maximale du plan d'eau en m NGF pour l'évènement moyen à l'horizon 2100 – Source : BRGM (Paris et al. 2017)

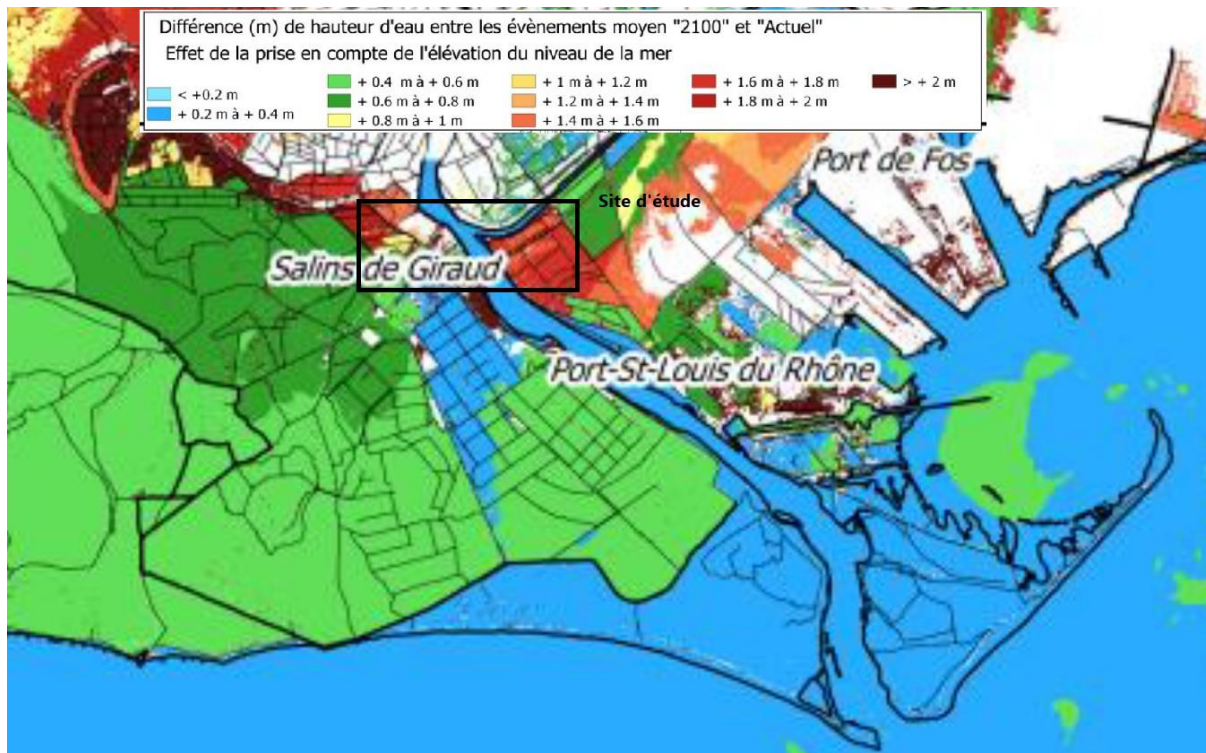


Figure 3.12 : Différence (en m) entre l'altitude maximale atteinte entre les événements moyens à l'horizon 2100 et l'horizon actuel – Source : BRGM (Paris et al. 2017)

Les résultats pour le scénario extrême présentés dans la Figure 3.13, mettent en évidence des altitudes similaires au scénario moyen à l'horizon 2100 en rive droite au droit du secteur d'étude (+2,1 m NGF), mais supérieures en rive gauche.

Ces cartographies illustrent le schéma de principe exposé par le GIEC sur la réduction de fréquence des tempêtes en termes de niveaux atteints par la submersion marine (les niveaux atteints pour une tempête millénaire actuellement sont similaires à ceux qui seront atteints pour une tempête centennale en 2100).

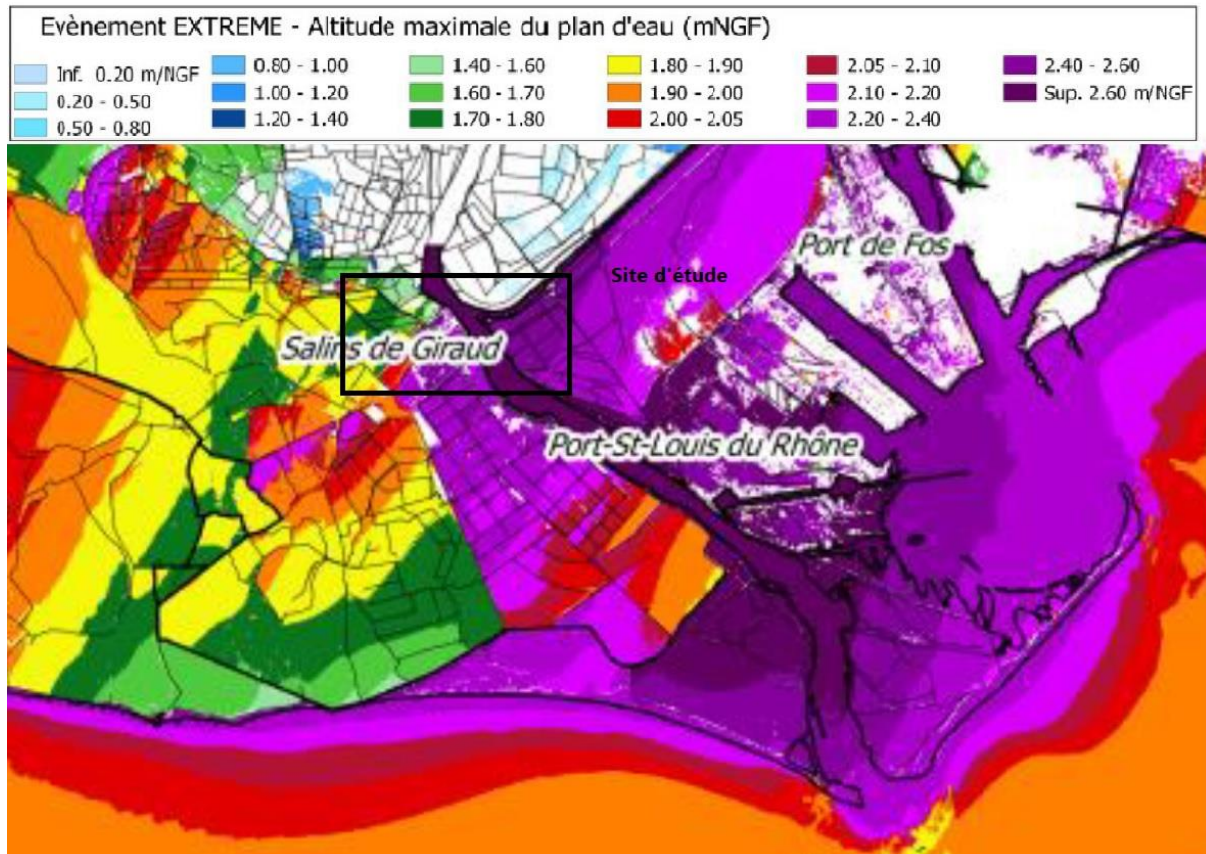


Figure 3.13 : Altitude maximale du plan d'eau en m NGF pour l'évènement extrême – source BRGM 2017

4 SYNTHÈSE

Le projet d'ouvrage d'art de franchissement du Grand Rhône entre Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône est situé proche de l'embouchure du fleuve, dans une zone d'influence fluviale comme maritime. Le GIEC constate une élévation du niveau marin liée de manière certaine au changement climatique depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. Si le niveau moyen de la mer, à l'échelle planétaire, s'est élevé de 20 cm [fourchette comprise entre 15 et 25 cm] entre 1901 et 2018, ce rythme d'élévation s'est accéléré pour atteindre 3,7 mm/an sur la période 2006-2018 ; le plus rapide enregistré depuis au moins 3 000 ans (Fox-Kemper et al. 2021).

Les projections d'élévation du niveau marin pour la fin du siècle, et au-delà, dépendent fortement des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et des politiques internationales mises en œuvre pour les réduire. A l'horizon 2130, correspondant à la durée d'utilisation de l'ouvrage d'art, l'élévation prévue à proximité du site (Marseille) varie de 0,46 m pour le scénario le plus optimiste (plage probable 0,22 à 0,76 m) à 1,01 m pour le scénario le plus pessimiste (plage probable 0,67 m à 1,50 m).

Cette élévation du niveau marin entraînera des conséquences en termes de submersion permanente des zones basses (ennoïement), et en termes de submersion temporaire lors des tempêtes. De manière schématique, les niveaux marins extrêmes mesurés avec le climat actuel lors de fortes tempêtes sont amenés à être dépassés de manière plus fréquente avec le climat futur en raison de l'élévation du niveau marin. Des effets de seuil, liés au débordement par-dessus des surélévations naturelles ou anthropiques du terrain naturel, peuvent néanmoins conduire à des submersions marines importantes dans des zones aujourd'hui épargnées.

Le phénomène d'ennoïement des terres en raison du changement climatique a été étudié récemment par le Cerema à l'échelle de la région PACA. Avec une élévation de 60 cm du niveau marin (projection probable pour des scénarios intermédiaires à l'horizon 2130), les remblais d'accès actuels aux plateformes du bac semblent toujours hors d'eau (à la précision des modèles numériques de terrain et aux hypothèses simplificatrices retenues près).

Les études d'aléas conduites dans le cadre de l'élaboration des plans de prévention des risques inondation (Arles et Port-Saint-Louis-du-Rhône) indiquent qu'à l'heure actuelle l'aléa de référence de submersion marine n'est prépondérant qu'en rive droite (Salin-de-Giraud). L'aléa débordement du Rhône est prépondérant en rive gauche, le secteur est considéré comme non soumis à l'aléa de submersion marine. Les projections à l'horizon 2100 considèrent une élévation du niveau marin de 60 cm conformément aux recommandations du guide PPRL. Ce niveau correspond environ au scénario d'émission intermédiaire des derniers travaux du GIEC.

Les résultats d'une étude du BRGM plus récente (2017), s'appuyant sur des modélisations numériques dynamiques, simulent des zones inondées par submersion marine aussi bien en rive gauche qu'en rive droite dès lors qu'une élévation du niveau marin est prise en compte (+60 cm).

Cette synthèse des connaissances actuelles pourra servir de base de travail pour la définition, par le maître d'ouvrage, des hypothèses à retenir dans la conception de l'ouvrage d'art en termes de niveaux atteints par la submersion marine.

5 ANNEXES

5.1 Le marégraphe de Marseille

En service depuis février 1885, le marégraphe de Marseille (Figure 5.1) fait partie du réseau du GLOSS (Global Sea Level Observing System - <https://gloss-sealevel.org/>) de 1^{ère} catégorie et la série marégraphique constitue l'une des plus anciennes chroniques au monde au pas horaire (Merrifield et al. 2012).

A l'origine conçu pour la définition du système altimétrique français par le Service du Nivellement General de la France (NGF), le marégraphe à flotteur de Marseille produit deux séries de mesures :

- ▶ les enregistrements sur rouleaux papier, appelés marégrammes, qui fournissent la variation temporelle du niveau de la mer en continu,
- ▶ les moyennes temporelles du niveau de la mer, obtenues avec le totalisateur.

Le besoin de données numériques horaires a conduit l'Institut Géographique National (IGN), en collaboration avec le SHOM, à numériser les marégrammes et à mettre en place un Marégraphe Côtier Numérique (MCN-Marégraphe de type RONIM) en juillet 1998.

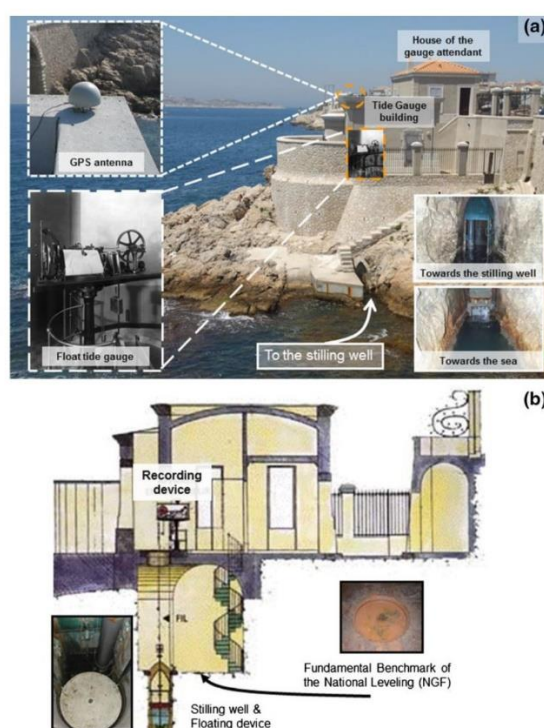


Figure 5.1 : Marégraphe de Marseille (Anse Calvo - Endoume) a) Vue générale du bâtiment : puits de tranquillisation, marégraphe totalisateur et antenne GPS. b) Vue en coupe : flotteur et repère fondamental de nivellement (NGF). Source : (Wöppelmann et al. 2014)

Un bilan de la qualité des observations du marégraphe de Marseille sur la période de 1885 à 1988 a été réalisé pour l'analyse en fréquence des surcotes marines, l'exploration comparatives des méthodes d'ajustement des extrêmes et l'étude des tendances à long terme : stationnarité, impact du changement climatique (Gaufrès, Sabatier 2006). Il a mis en évidence un certain nombre d'erreurs (manipulation des rouleaux, doublons, calages, etc.).

En 2009 une série horaire d'enregistrements plus anciens (1849-1851) a été découverte dans les archives provenant d'un marégraphe Chazalon situé plus au Nord dans le port. Les deux chroniques ont été analysées et corrigées des anomalies par (Wöppelmann et al. 2014).

L'intérêt de l'instrument réside dans la longueur remarquable de la chronique et la fiabilité des mesures de référence du totalisateur qui ont été l'objet d'étalonnages réguliers et d'une attention particulière pendant des décennies.

Concernant les évolutions passées à l'échelle régionale, la tendance d'élévation relative du niveau marin (incluant les phénomènes terrestres) est de 1.08 ± 0.04 mm/an à Marseille sur la série (1849 – 2012) Figure 5.2). La courbe en noir correspond aux données horaires, la courbe en rouge complète les données horaires manquantes par les valeurs calculées par l'instrument totalisateur.

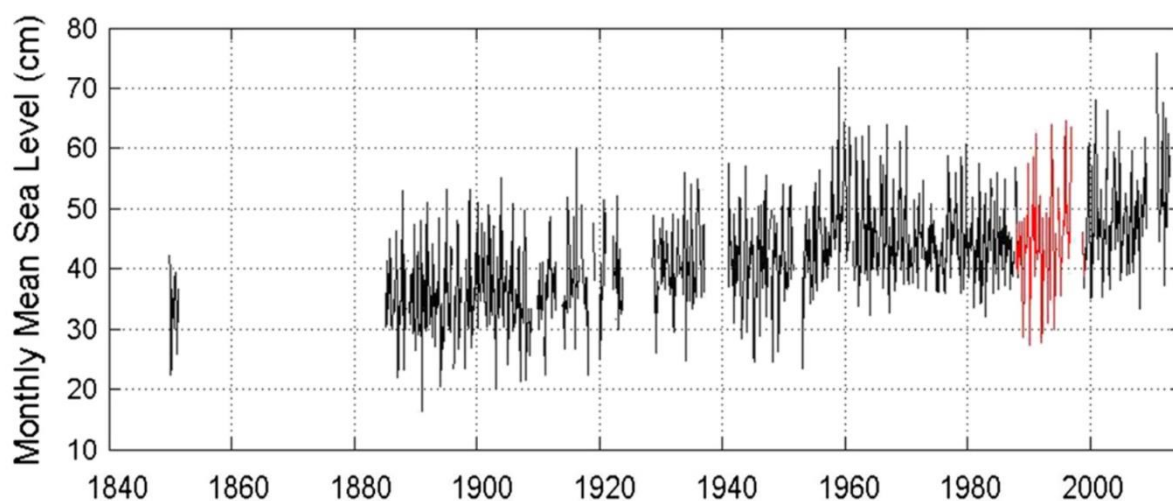


Figure 5.2 : Tendence d'élévation du niveau marin à Marseille sur la période (1849 – 2012) Source : (Wöppelmann et al. 2014)

Plus finement, les taux de variations du niveau marin de la série marégraphique de Marseille (Tableau 5.1) révèlent une accélération du phénomène comparable à celle de l'océan global (Cf. §2.2).

Période (ans)	Taux de variation du niveau de la mer (mm/an)
1849-1909	$0,40 \pm 0,30$
1909-1980	$1,40 \pm 0,13$
1980-2012	$2,60 \pm 0,40$

Tableau 5.1 : Taux de variation du niveau de la mer au XIXe et XXe siècle, estimés à partir des données du marégraphe de Marseille – Source : (Wöppelmann et al. 2014)

L'historique du site est décrit par [l'IGN](#). Les travaux sur les données sont présentés par le [SHOM](#). Les données marégraphiques haute fréquence en temps réel sont également disponibles sur le site du [SHOM](#). Les données temps réel sont disponibles sur le site de la Commission Internationale Océanographique de [l'UNESCO](#). Les données marégraphiques horaires historiques sont disponibles également sur le site du [SHOM](#).

Le [PSMSL](#) (Permanent Service for Mean Sea Level) archive les valeurs moyennes mensuelles et annuelles. Le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales ([SONEL](#)) fournit le positionnement GPS et les différences altimétriques comparées avec les données satellitaires.

5.2 Le phénomène de subsidence du delta de Camargue

A l'échelle géologique, la subsidence de la marge deltaïque du Rhône au cours du dernier cycle climatique (125 000 ans) a été étudiée par stratigraphie pour distinguer les différentes composantes de l'affaissement total : l'impact relatif de l'affaissement tectonique et de la charge sédimentaire en mer et à terre (Jouet et al. 2008). Sur une hauteur de 15 m de subsidence totale pour la période considérée, les auteurs considèrent pour 2/3 la contribution tectonique et 1/3 la charge sédimentaire.

Dans le cadre du Référentiel Géologique de la France, l'influence et l'interaction des paramètres régissant l'évolution des processus de sédimentation dans le delta du Rhône a été étudiée par le BRGM suivant quatre profils en subsurface constitués de puits espacés d'un à deux kilomètres (Boyer, Duvail, Le Strat 2003). Il en résulte que la subsidence est importante et omniprésente durant toute l'édification du delta, avec des basculements successifs, vers le Sud, liés aux différents stades de progradation.

Pour la période récente, les séries marégraphiques du Grau de la Dent et de Marseille (Corniche) ont été analysées comparativement par (Suanez, Prosper-Laget, Provansal 1997) pour distinguer la remontée tendancielle de la mer des mouvements de subsidence sur la marge deltaïque du Rhône (Figure 5.2).

Les auteurs constatent par lissage et interpolation linéaire que malgré leur forte variabilité interannuelle, l'élévation du niveau de la mer au Grau de la Dent atteint 190mm entre 1905 et 1993 soit 2,1 mm/an en moyenne contre 107 mm soit 1,1mm/an à Marseille (Corniche). L'écart (1 mm/an) est expliqué par les tassements à grande échelle des corps sédimentaires ou des mouvements subsidants correspondant à une surcharge sédimentaire sur la marge littorale deltaïque. Il est à comparer avec les deltas fortement anthropisés du Pô (7,3 mm/an) ou du Nil (4,8 mm/an). Ces conclusions doivent cependant être prises avec prudence, compte tenu des difficultés de calage de la série marégraphique du Grau de la Dent lors de la numérisation des données exposées par le Cerema (CETE Méditerranée 2007), et CEREMA (Pons, Roux 2017).

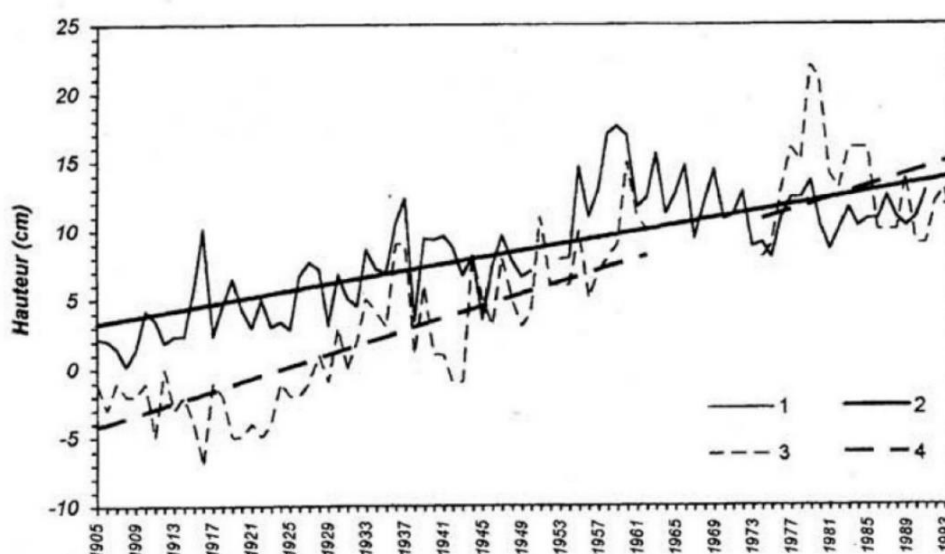


Figure 5.3 : Moyenne annuelle et moyenne mobile d'ordre 9 des séries marégraphiques au Grau de la Dent (1 et 2) et Marseille (Corniche) sur la période (1905-1993) – Source : (Suanez, Prosper-Laget, Provansal 1997)

Par ailleurs, ces résultats n'ont pas été confirmés par d'autres méthodes plus récentes comme l'altimétrie satellitaire. Le Cerema a sommairement analysé pour le besoin de l'étude les données du réseau de stations GNSS permanentes (RGP basé sur les constellations GPS, GLONASS, Galileo, Baidu) de l'IGN. Une station est implantée sur le domaine de la Palissade à proximité du site. La série temporelle (Figure 5.4) indique que l'antenne a subi un mouvement vertical global de l'ordre de -8 mm (enfoncement) entre janvier 2012 et janvier 2021 (<1 mm/an). Cette antenne est posée sur un bâtiment et le mouvement associé peut provenir de mouvements de la croûte terrestre ou simplement du bâtiment.

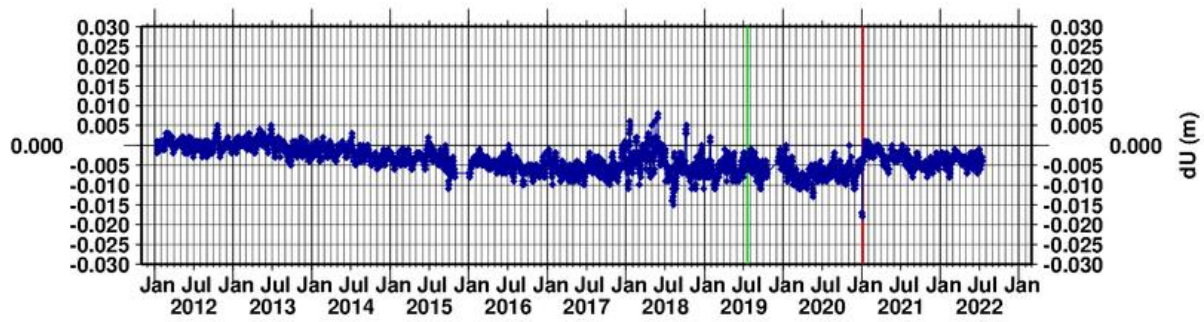


Figure 5.4 : Écarts en mètres la hauteur ellipsoïdale (dU) rapportés aux coordonnées publiées, dans le système RGF93 – source RGP/IGN

Aucune estimation récente de la subsidence sur le site du projet n'a été réalisée pour confirmer les résultats obtenus par (Suanez, Prosper-Laget, Provansal 1997). Le phénomène n'est à ce jour, et à notre connaissance, pas suffisamment quantifié.

5.3 Bibliographie

AFNOR, 2003. *Eurocodes structuraux Bases de calcul des structures* [en ligne]. 2003. Disponible à l'adresse : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1990/eurocodes-structuraux-bases-de-calcul-des-structures/fa102408/21211>

ARTELIA, 2021. *RD 35B - Franchissement du Rhône entre Salin de Giraud et Port Saint Louis du Rhône - Mission de maîtrise d'oeuvre pré DUP* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.departement13.fr/fileadmin/user_upload/Amenagement_du_territoire/Routes/Documents/r35b-barcarin/Pont_de_Barcarin-Rapport_Etude_Preliminaire-Juin_2021.pdf

BOYER, Julie, DUVAIL, Cédric et LE STRAT, Paul, 2003. BRGM RP/5279 : *Le delta du rhône : géodynamique postglaciaire* [en ligne]. BRGM. Disponible à l'adresse : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52179-FR>

CAZENAVE, Anny, GOUZENES, Yvan, BIROL, Florence et ET AL., 2022. Sea level along the world's coastlines can be measured by a network of virtual altimetry stations. *Nature Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3, n° 17, pp. 10. DOI <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00448-z>.

CEREMA, 2020. Fascicule 8 : *Dynamiques et évolution du littoral - Synthèse des connaissances de la frontière espagnole à Port-de-Bouc* [en ligne]. CEREMA. Connaissances. Disponible à l'adresse : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/dynamiques-evolutions-du-littoral-frontiere-espagnole-port>

CETE MÉDITERRANÉE, 2007. *Elaboration d'un plan de prévention des risques de submersion marine en Camargue, état des lieux des données existantes – Etude pour le compte de la DDE-13*. DDE 13.

DDTM13, 2015. *Rapport de présentation - PPR inondation sur la commune d'Arles* [en ligne]. 2015. Disponible à l'adresse : https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/10656/64144/file/2015-02-Rapport_PPRi_Arles_APPROUVE.pdf

DDTM13, 2016. *Rapport de présentation - PPR inondation sur la commune de Port Saint-Louis-du-Rhône* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/19902/122951/file/1_Rapport_de_Pr%C3%A9sentation_PPRi_PSL.pdf

DREAL DE BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE, 2016. *Stratégie Locale de Gestion des Risques Inondation du TRI Delta du Rhône* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/La-prevention/DIRECTIVE-INONDATION-STRATEGIE-LOCALE-DE-GESTION-DES-RISQUES-INONDATION-SLGRI/Delta-du-Rhone-et-submersion-marine>

FOX-KEMPER ET AL., 2021. *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press [en ligne]. IPCC. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_09.pdf

GAUFRÈS, Pierre et SABATIER, François, 2006. Extreme storm surge distributions and practical applications at Marseille (France). In : . Nice. 2006. pp. 1601-1608.

GIEC, 2019. *GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* [sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer], sous presse. [en ligne]. OMM, PNUMA. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/07/SROCC_SPM_fr.pdf

RD35B – Pont de Barcarin

Note synthétique sur l'élévation du niveau marin liée au changement climatique

Mai 2023

JOUET, Gwenaël, HUTTON, Eric, SYVITSKI, James et BERNÉ, Serge, 2008. Response of the Rhône deltaic margin to loading and subsidence during the last climatic cycle. *Computers & Geosciences*. 2008. pp. 19. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.003>.

MEDDE, 2014. *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20PPRL%20-%20version%20finale%20mai%202014.pdf>

MERRIFIELD, Mark A., HOLGATE, Simon, MITCHUM, Gary, PÉREZ, Begoña, RICKARDS, Lesley, SCHÖNE, Tilo, WOODWORTH, Philip et WÖPPELMANN, Guy, 2012. *The Global Sea-Level Observing System (GLOSS): implementation plan* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000217832>

NICOLAE-LERMA, Alexandre, 2012. *Approche analytique et étude prospective de l'aléa de submersion : de la donnée observée à la modélisation, à Carthagène des Indes, Colombie*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

ONERC, 2018. *Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique* [en ligne]. Rapport au Premier ministre et au Parlement. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2018_Evenements_meteorologiques_extremes_et_CC_WEB.pdf

PARIS, F., PEDREROS, Rodrigo, STÉPANIAN, Alexis, BULTEAU, Thomas et LECACHEUX, Sophie, 2017. RP 66904 : *Modélisation de la submersion marine en Camargue* [en ligne]. BRGM. Disponible à l'adresse : <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66804-FR.pdf>

PONS, Frédéric et ROUX, Isabelle, 2017. *Numérisation des données Grau de la Dent avec NUNIEAU de 1996 à 2015*. CEREMA.

SHOM, 2020. *Références Altimétriques Maritimes—Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée* [en ligne]. 2020. Disponible à l'adresse : <https://diffusion.shom.fr/pro/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

SUANEZ, Serge, PROSPER-LAGET, Valérie et PROVANSAL, Mireille, 1997. Variations relatives du niveau marin dans le delta du Rhône et à Marseille Implications tectoniques et/ou climatiques. *Compte rendu de l'Académie des Sciences*. 1997. Vol. 324, n° II a, pp. 639-646.

WÖPPELMANN, Guy, MARCOS, Marta, COULOMB, A, MIGUEZ, B, BONNETAIN, P, BOUCHER, C, GRAVELLE, M, SIMON, Bernard et TIPHANEAU, P, 2014. Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851. . 2014. pp. 17. DOI ^.

YATES-MICHELIN, M, LE COZANNET, G et BALOUIN, Y, 2011. RP-58872-FR : *Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en Languedoc-Roussillon* [en ligne]. BRGM. Disponible à l'adresse : <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/rapport-final-etat-des-connaissances-sur-les-effets-potentiels-du-changement-climatique-sur-les-alea0>

5.4 Table des illustrations

5.4.1 Tableau

Tableau 1.1 : Altitudes NGF du niveau moyen et du zéro hydrographique en mètre au niveau des marégraphes de Marseille et Fos-sur-Mer (SHOM 2020)	12
Tableau 2.1 : Elévation du niveau marin à Marseille relativement à une base de référence (1995-2014) pour les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 aux horizons 2050, 2100 et 2150, les valeurs entre parenthèses correspondent à la plage probable soit l'intervalle de confiance 17%-83% Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	16
Tableau 2.2 : Niveaux marins attendus au large du site pour les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 aux horizons 2050, 2100 et 2150, les valeurs entre parenthèses correspondent à la plage probable soit l'intervalle de confiance 17% - 83% Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	16
Tableau 2.3 : Elévation du niveau marin attendu à Marseille relativement à une base de référence (1995-2014) pour les cinq scénarios centraux du GIEC à l'horizon 2130. Les valeurs médianes et valeurs basses et hautes de la plage probable sont indiquées (intervalle de confiance à respectivement 17% et 83%) - Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	18
Tableau 3.1 : Conditions de forçages au large pour les événements moyen actuel, moyen 2100 et extrême – Source : BRGM (Paris et al. 2017)	26
Tableau 5.1 : Taux de variation du niveau de la mer au XIXe et XXe siècle, estimés à partir des données du marégraphe de Marseille – Source : (Wöppelmann et al. 2014)	33

5.4.2 Figures

Figure 1.1 : Les Phénomènes influençant le niveau marin à la côte - (Source BRGM)	9
Figure 1.2 : Niveau marin relatif et absolu	9
Figure 1.3 : Principe du marégraphe côtier et de l'altimétrie spatiale - Source Global Geodetic Observing System (GGOS) https://ggos.org	10
Figure 1.4 : Tendances côtières et régionales d'élévation du niveau de la mer (mm/an) de Janvier 2002 à Décembre 2019 - Données satellitaires Copernicus Climate Change Service (C3S, https://climate.copernicus.eu) - Source (Cazenave et al. 2022)	10
Figure 1.5 : Situation du projet (X) et marégraphes du Grau de la Dent (1), de La Palissade (2), Fos-Sur-Mer (3) et Marseille (4) – Source : SONEL	11
Figure 1.6 : Processus physiques en action lors d'une tempête et composition du niveau marin instantané – Source : (Nicolae-Lerma 2012)	13
Figure 2.1 : Projections du niveau moyen des mers selon les 5 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre croissant de SSP1-1.9 à SSP5-8.5 par rapport à la moyenne de la période (1995-2014) - Source : GIEC 2021 (Fox-Kemper et al. 2021)	15
Figure 2.2 : Projection de l'élévation du niveau marin à Marseille relativement à une base de référence 1995-2014 pour les 7 scénarios de SSP1-9 à SSP5-8.5 - Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	16
Figure 2.3 : Echéances d'élévation du niveau marin moyen de 0,60 m à Marseille selon les 7 scénarios d'émission de CO ₂ - Le cercle noir correspond à la médiane et les barres colorées aux intervalles de confiance, respectivement 17% et 83% (5% et 95% pour le scénario 2-6)- Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	17
Figure 2.4 : Echéances d'élévation du niveau marin moyen de 1,00 m à Marseille selon les 7 scénarios d'émission de CO ₂ - Le cercle noir correspond à la médiane et les barres colorées aux intervalles de confiance, respectivement 17% et 83% (5% et 95% pour le scénario 2-6) Source : (Fox-Kemper et al. 2021)	17

Figure 3.1 : Carte d'ennoiement des terres au Barcarin pour une élévation du niveau marin de +60 cm (en bleu les zones ennoyées) – Source : Cerema à paraître	19
Figure 3.2 : Carte d'ennoiement des terres au Barcarin pour une élévation du niveau marin de +100 cm (en bleu les zones ennoyées) – Source : Cerema à paraître	20
Figure 3.3 : Evolution des niveaux marins extrêmes – Source : (GIEC 2019)	21
Figure 3.4 : Scénario moyen d'inondation avec changement climatique – Source : (DREAL de Bassin Rhône-Méditerranée 2016).....	22
Figure 3.5 : Définition de l'aléa de référence pour la submersion marine avec prise en compte du changement climatique dans le PPRi d'Arles et Port-Saint-Louis-du Rhône - Source : (DDTM13 2015) et (DDTM13 2016).....	23
Figure 3.6 : Zone inondable pour l'évènement de référence submersion marine (+1,7 m NGF) – Source rapport de présentation du PPR Port-Saint-Louis-du-Rhône (DDTM13 2016)	24
Figure 3.7 : Extrait de carte des cotes de référence du PPRi de Port-Saint-Louis du Rhône au droit du site d'étude	24
Figure 3.8 : Enveloppe approchée de la zone d'influence de la submersion marine (+1,7 m NGF) – Source : Rapport de présentation du PPR d'Arles (DDTM13 2015)	25
Figure 3.9 : Extrait de la carte des lignes d'eau au droit du secteur d'études – Source : PPRi d'Arles (DDTM13 2015).....	25
Figure 3.10 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation numérique. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais propagé suivant une dynamique de submersion (vert) – Source : BRGM (Paris et al. 2017).....	26
Figure 3.11 : Altitude maximale du plan d'eau en m NGF pour l'évènement moyen à l'horizon 2100 – Source : BRGM (Paris et al. 2017).....	27
Figure 3.12 : Différence (en m) entre l'altitude maximale atteinte entre les évènements moyens à l'horizon 2100 et l'horizon actuel – Source : BRGM (Paris et al. 2017)	28
Figure 3.13 : Altitude maximale du plan d'eau en m NGF pour l'évènement extrême – source BRGM 2017	29
Figure 5.1 : Marégraphe de Marseille (Anse Calvo - Endoume) a) Vue générale du bâtiment : puits de tranquillisation, marégraphe totalisateur et antenne GPS. b) Vue en coupe : flotteur et repère fondamental de nivellement (NGF). Source : (Wöppelmann et al. 2014).....	32
Figure 5.2 : Tendence d'élévation du niveau marin à Marseille sur la période (1849 – 2012) Source : (Wöppelmann et al. 2014)	33
Figure 5.3 : Moyenne annuelle et moyenne mobile d'ordre 9 des séries marégraphiques au Grau de la Dent (1 et 2) et Marseille (Corniche) sur la période (1905-1993) – Source : (Suanez, Prosper-Laget, Provansal 1997)	34
Figure 5.4 : Écarts en mètres la hauteur ellipsoïdale (dU) rapportés aux coordonnées publiées, dans le système RGF93 – source RGP/IGN	35



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN