



Influence du changement climatique sur les niveaux marins au droit du projet de pont sur le Grand Rhône à Barcarin (Camargue, France)

Pierre GAUFRES ¹

1. CEREMA DTerMed/DRN/RIL, Pôle d'activités Les Milles, 30 Avenue Albert Einstein
13290 Aix-en-Provence, France.

pierre.gaufres@cerema.fr

Résumé :

Le projet de construction du dernier ouvrage d'art de franchissement du Rhône (RD35b entre Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône) en remplacement du bac actuel dit « de Barcarin » pose la question de l'influence du changement climatique sur les niveaux marins qui conditionnent le niveau du fleuve à proximité de l'embouchure. En effet, le delta de Camargue est une zone d'influence combinée d'inondations par débordement de cours d'eau et par submersion marine. Les aléas hydrauliques fluvial et maritime sont ainsi couplés aux embouchures (Petit et Grand Rhône). Le fleuve étant influencé à ce niveau par les conditions aval (régime subcrique), le niveau marin de la Méditerranée détermine donc les niveaux d'eau du Rhône en crue.

Selon le dernier rapport du GIEC AR6 (FOX-KEMPER *et al.*, 2021), le niveau moyen des océans 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 Rhône aval en raison de l'élévation du niveau marin liée aux effets du changement climatique. L'article synthétise les connaissances actualisées sur les projections d'élévation du niveau marin régional absolu (altimétrie spatiale) et relatif (marégraphie côtière), compte tenu de la subsidence en zone deltaïque camarguaise. Les incertitudes sur la quantification de ce processus en Camargue sont discutées. Les conséquences en termes de submersion marine (permanente ou temporaire) pour l'ouvrage d'art et les infrastructures d'accès sont caractérisées à l'horizon de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Mots-clés :

Changement climatique, Submersion marine, Niveau marin, Subsidence, Inondation fluviale, Franchissement d'écoulement naturel, Ouvrage d'art, Rhône, Camargue.

1. Introduction

Le delta de Camargue, et particulièrement l'embouchure du Rhône, est une zone de risques combinés d'inondations par débordement de cours d'eau et par submersion

Thème 6 – Risques côtiers

marine. En effet, les observations montrent que les hauts niveaux marins et les vagues de tempête bloquent l'évacuation des crues du Rhône concomitantes au niveau des embouchures (Petit et Grand Rhône). Ils créent ce qu'on appelle le phénomène de bouchon marin qui aggrave les inondations dans le delta par l'effet de surcote marine (GERVAIS, 2012). Le régime d'écoulement du fleuve étant influencé par les conditions aval aux embouchures (régime fluvial), le niveau marin conditionne donc les niveaux d'eau du Rhône en crue (GAUFRES & LAMBLIN, 2008), voir Figure 1.

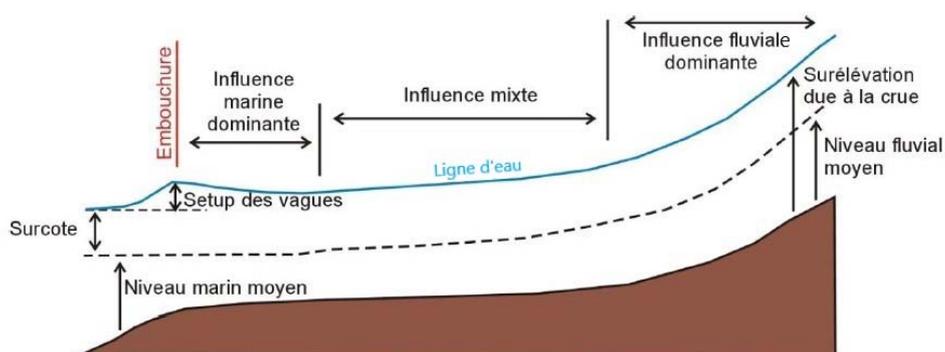


Figure 1. Paramètres météorologiques influant sur la ligne d'eau d'un fleuve en embouchure lors de crue et tempête concomitantes - Source : d'après (FAY, 2013).

L'aire d'étude du pont est concernée par le risque inondation par débordement du Rhône et submersion marine. Elle se situe à proximité de l'emprise inondée par la tempête millénale, en tenant compte d'une élévation du niveau marin de 60 cm et d'un niveau d'eau initial dans les terres basses de 0,6 m NGF (voir Figure 2).

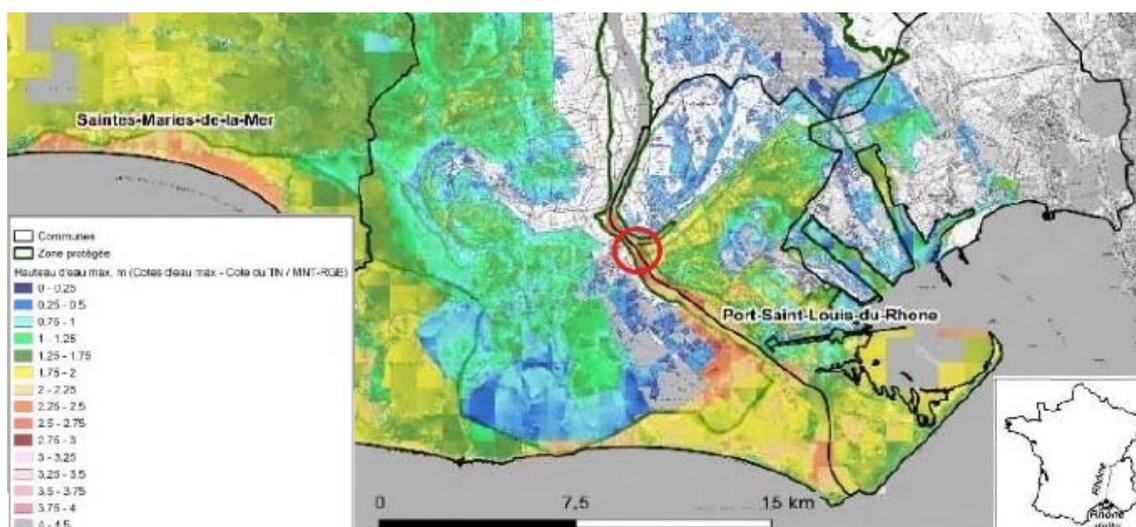


Figure 2. Plan de situation du projet et emprise inondée par la tempête millénale (niveau marin + 60cm et niveau d'eau initial dans le delta de 0,60 NGF)
Source : (ELINEAU et al., 2019).

Conformément aux Eurocodes, la durée de vie des ouvrages d'art neufs est de 100 ans (AFNOR, 2003). En conséquence il est nécessaire de quantifier l'impact de l'évolution du climat sur les niveaux marins extrêmes concomitants avec des crues du Rhône pour le dimensionnement du projet (pont, infrastructures de raccordement, etc.).

2. Le niveau marin

Le niveau marin à la côte 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. 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.).

2.1 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, il faut alors corriger la mesure marégraphique des mouvements du sol (voir Figure 3).

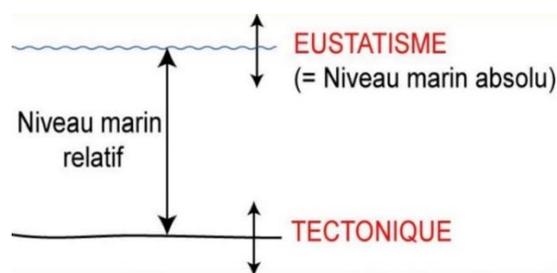


Figure 3. Niveau marin relatif et absolu.

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

Distinguer le mouvement vertical de la croûte terrestre intégré dans le signal enregistré par les marégraphes est essentiel car parfois, sur le long terme, celui-ci est du même ordre de grandeur, voire plus grand que les variations absolues du niveau marin. Ainsi en Camargue, la subsidence du sol due au tassement des sédiments accumulés dans le delta du Rhône engendre d'après (SUANEZ *et al.*, 1997) des mouvements verticaux d'une amplitude comparable à la hausse du niveau marin (voir §3).

Thème 6 – Risques côtiers

L'altimétrie satellitaire (voir Figure 4) fournit quant à elle une mesure « absolue » du niveau marin référencée au centre des masses de la Terre. Ainsi, à la différence des marégraphes, l'altimétrie spatiale fournit donc essentiellement la composante climatique du niveau de la mer. Les stations GNSS (Global Navigation Satellite System) permettent de déterminer les mouvements absolus du sol au niveau du marégraphe côtier. La combinaison des deux mesures permet de suivre le comportement réel du niveau de la mer à l'endroit considéré.

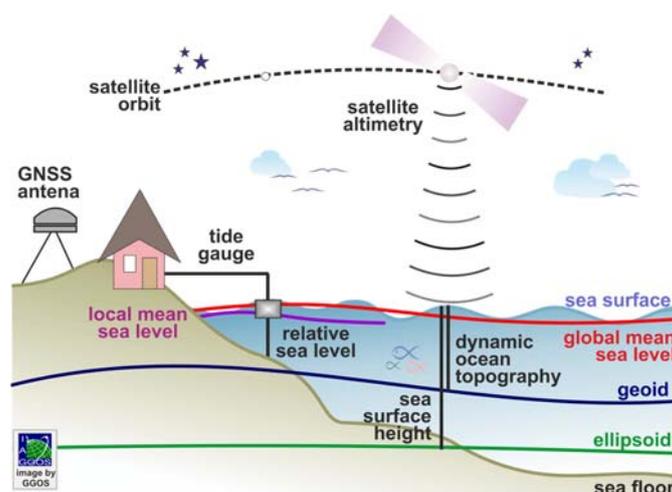


Figure 4. Principe du marégraphe côtier et de l'altimétrie spatiale, (Source : Global Geodetic Observing System (GGOS) <https://ggos.org>).

2.2 Les marégraphes

Les marégraphes les plus proches du site d'étude (voir Figure 5) sont ceux de :

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

Les 3 derniers instruments appartiennent au réseau REFMAR du SHOM (Réseaux de rEFérence des observations MARégraphiques : <http://refmar.shom.fr/fr/donnees-historiques>). Des observations marégraphiques ont été réalisées dans le passé 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. Plus récemment, des instruments ont été installés dans les ports de Carro (16/02/2019) et Ensues-La-Redonne (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.

Le marégraphe du Grau de la Dent (1), 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 (4) qui a été l'objet d'étalonnages réguliers et d'une attention particulière pendant des décennies. Toutefois cet instrument, à proximité du site d'étude, permet d'estimer les mouvements verticaux du sol par différence avec l'altimétrie spatiale.



Figure 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 : <https://www.sonel.org>).

Le marégraphe de Marseille Corniche (4) en service depuis le 03/02/1885, est remarquable car il fait partie du réseau du GLOSS (Global Sea Level Observing System) de 1^{ère} catégorie et constitue l'une des plus anciennes chroniques au monde au pas horaire. A l'origine conçu pour la définition du système altimétrique français par le Service du Nivellement Général de la France (NGF), la longueur et la qualité de cette chronique est unique en Méditerranée française (GAUFRES & SABATIER, 2006). La série horaire a été complétée par des observations antérieures (1849-1851) issues d'un marégraphe installé à proximité (WÖPPELMANN *et al.*, 2014). C'est la raison pour laquelle le site de Marseille a été retenu par le GIEC pour les projections d'élévation du niveau marin régionale induite par le changement climatique (FOX-KEMPER *et al.*, 2021).

2.3 Impact du changement climatique sur le niveau marin à l'échelle régionale

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

Thème 6 – Risques côtiers

marées). Il en est de même pour les surcotes de tempête. Le réchauffement climatique pourrait entraîner une modification de la circulation atmosphérique, de l'intensité et de la direction des vents, des trajectoires des tempêtes, mais les études actuelles ne permettent pas de mettre en évidence une tendance future notable (ONERC 2018). Le manque de séries temporelles suffisamment longues rend difficile la détection des tendances à long terme (YATES-MICHELIN *et al.*, 2011) et il en est de même des courants (circulation thermohaline). Dans le cadre de cet article nous décrirons 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).

Dans l'hypothèse d'une mise en service de l'ouvrage en 2030, et d'une durée d'utilisation de 100 ans (AFNOR, 2003), l'horizon visé en matière d'impact du changement climatique pourrait être 2130.

L'altimétrie spatiale a révélé la forte hétérogénéité spatiale du gradient d'élévation du niveau marin. Les importantes disparités résultent principalement de la distribution non uniforme de la température et de la salinité de l'océan, en lien avec la fonte de la banquise, des glaces continentales, et des variations du cycle hydrologique (PLANTON *et al.*, 2015). Compte tenu de la distance au site du projet (50 km), les projections au marégraphe de Marseille constituent la meilleure estimation pour le pont de Barcarin. 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 1 (données GIEC hébergées et visualisables sur le site dédié développé par la NASA : https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=61_).

Tableau 1. Niveaux marins à la station de Marseille pour les scénarios SSP1-1.9 et SSP5-8.5 aux horizons 2050, 2100 et 2150 (intervalle de confiance 17% - 83%), source : GIEC et NASA (FOX-KEMPER *et al.*, 2021).

	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)

3. La subsidence

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.

Selon (BOYER *et al.*, 2003) 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 *et al.*, 1997) pour distinguer la remontée tendancielle de la mer des mouvements de subsidence sur la marge deltaïque du Rhône. Par lissage et interpolation linéaire, les auteurs estiment l'élévation moyenne du niveau de la mer entre 1905 et 1993 au Grau de la Dent à 2,1 mm/an contre 1,1 mm/an à Marseille (Corniche), avec une forte variabilité interannuelle. L'écart (1 mm/an) est expliqué par les tassements à grande échelle des corps sédimentaires ou des mouvements subsidents correspondant à une surcharge sédimentaire sur la marge littorale deltaïque.

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 (CETE MEDITERRANEE, 2007), (PONS & ROUX, 2017) et des précautions d'exploitation du BRGM (PARIS *et al.*, 2017). Une valeur de subsidence de 1 mm/an en Camargue est d'ailleurs surprenante car correspondrait à 1km/million d'années (10^3 m/Ma) en géologie, ce qui n'a jamais été enregistré dans les archives sédimentaires régionales. L'architecture des dépôts, contrôlée par l'eustatisme et la subsidence, est pourtant bien décrite dans cette zone à forts apports sédimentaires (RAYNAL, 2008). Les plus fortes valeurs sont mesurées au large, en bordure de plateforme, à 70 km de la côte atteignant 250 m/Ma à l'époque du remplissage du bassin après le Messinien. Ce taux de subsidence observé dans le Golfe du Lion est d'ailleurs important (DUVAIL, 2008), induit notamment par le caractère juvénile de la marge (Oligocène).

Pour la période actuelle le portail SONEL fournit à Marseille (Corniche) l'amplitude de la subsidence par différence entre l'altimétrie satellitaire et le marégraphe côtier : -0.64 +/- 0.40 mm/an avec un coefficient de corrélation 0,83 (voir Figure 6) avec les vitesses d'élévation suivantes :

- par altimétrie satellitaire : 2.69 +/- 0.43 mm/an sur [1993-2015]
- par marégraphie : 3.70 +/- 0.71 mm/an sur [1993-2014].

Thème 6 – Risques côtiers

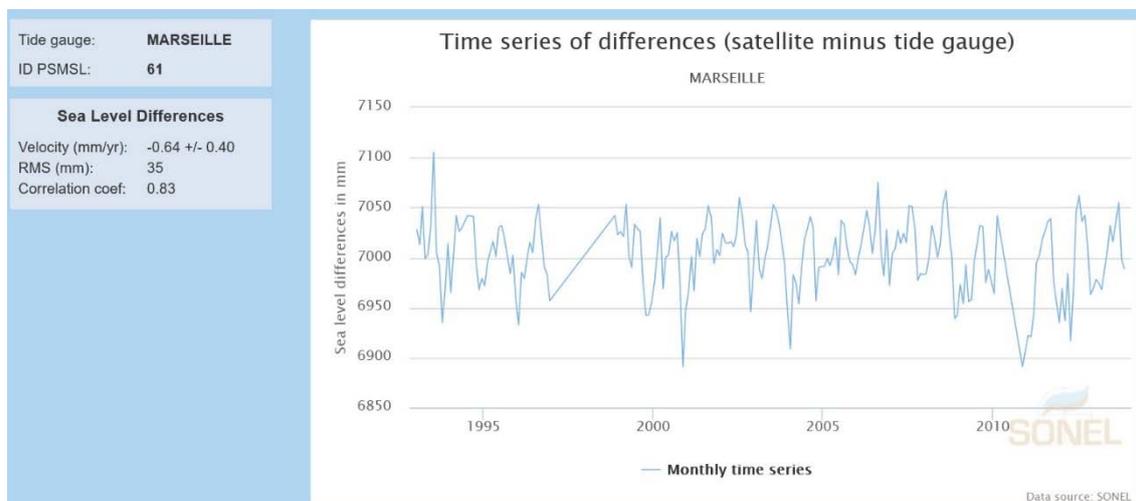


Figure 6. Valeurs mensuelles des différences de niveau marin mesuré par altimétrie satellitaire et marégraphie à Marseille – Source : SONEL.

Les projections du GIEC à Marseille utilisent - 0,011 m [-0,03 m – 0,01 m] à l'horizon 2100 comme valeur médiane des mouvements du sol à Marseille (FOX-KEMPER *et al.*, 2021).

Récemment, à l'aide du radar à synthèse d'ouverture interférométrique (InSAR) et des données GPS de haute précision, l'étude de la subsidence dans le cas de Brest a été réalisée (POITEVIN *et al.*, 2019). Les résultats montrent qu'au cours des dernières décennies, Brest et ses environs sont globalement stables, en accord avec le contexte géologique, à l'exception des zones de remblai des ports commerciaux et militaires.

Finalement, sauf résultant d'une compaction locale des sédiments pour la période récente (comme la plaine du Pô ou le delta du Nil par exemple), des valeurs de subsidence de l'ordre du millimètre annuel en Camargue sont contestables et doivent être vérifiées par d'autres approches.

4. Conclusion

Les niveaux marins de projet pour le pont du Barcarin peuvent être estimés avec un bon degré de confiance pour la durée d'utilisation de l'ouvrage à partir des données marégraphiques et d'altimétrie spatiale régionales, selon les scénarii du GIEC. Concernant la subsidence, aucune estimation récente à proximité du site du projet en Camargue n'a été réalisée pour confirmer les résultats disponibles dans la littérature.

Le phénomène est à ce jour et à notre connaissance insuffisamment quantifié et doit être vérifié par d'autres approches pour s'affranchir notamment des limites locales de l'analyse GNSS.

Remerciements

Mme Martine VASSAL, Présidente du Conseil Département 13; Mme Marie-Pierre CALLET, Vice-Présidente du Département Déléguée aux Routes, Direction des Routes et des Ports, Conseil Département 13 ; David CRIADO, Chef du groupe Risques inondations et littoraux, CEREMA DTerMed/DRN.

5. Références bibliographiques

- AFNOR (2003). *Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures*.
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1990/eurocodes-structuraux-bases-de-calcul-des-structures/fa102408/21211>
- BOYER J., DUVAIL C., LE STRAT P. (2003). *Le delta du Rhône : géodynamique postglaciaire*. Rapport BRGM RP/5279. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52179-FR>
- 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.
- DUVAIL C. (2008). *Expression des facteurs régionaux et locaux dans l'enregistrement sédimentaire d'une marge passive. Exemple de la marge du Golfe du Lion, étudiée selon un continuum terre-mer*. Minéralogie. Université de Montpellier 2.
<https://theses.hal.science/tel-00438146/file/theseduvail.pdf>
- ELINEAU S., PEDREROS R., PARIS F., STEPANIAN A., BULTEAU T. (2019). *Modélisation de la submersion marine en Camargue – Simulations complémentaires pour le SYMADREM*. Rapport final. BRGM/RP-68619-FR
- FAY S. (2013). *Analyse des concomitances entre crues et submersions marines sur le littoral Méditerranéen : mise en place d'une méthodologie*. Sciences de l'ingénieur [physics]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01652233>
- FOX-KEMPER B., HEWITT H.T., XIAO C., *et al.* (2021). *Ocean, cryosphere and sea level change*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Chapter 9, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, MASSON-DELMOTTE, V. *et al.*, (eds.), Cambridge University Press. IPCC. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- GAUFRES P., LAMBLIN R. (2008). *Analyse de l'aléa couplé surcote marine / crue en Camargue*, Nouvelles Approches sur les risques côtiers, SHF, Paris.
- GAUFRES P., SABATIER F. (2006). *Extreme storm surge distributions and practical applications at Marseilles (France)*, 7th International Conference on Hydroinformatics 2006, Advanced applications of modelling, Nice, Vol III, pp.1601-1608.
- GERVAIS M. (2012). *Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen*. Université Perpignan Via Domitia. 399 p.
- JOUET G., HUTTON E., SYVITSKI J., BERNÉ S. (2008). *Response of the Rhône deltaic margin to loading and subsidence during the last climatic cycle*. *Computers & Geosciences*. Volume 34, (10), pp. 1338-1357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.003>

Thème 6 – Risques côtiers

- PARIS F., PEDREROS R., STÉPANIAN A., BULTEAU T., LECACHEUX S. (2017). *Modélisation de la submersion marine en Camargue*. Rapport BRGM RP 66904. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66804-FR.pdf>
- POITEVIN C., WÖPPELMANN G., RAUCOULES D., LE COZANNET G., MARCOS M. et TESTUT L. (2019). *Vertical land motion and relative sea level changes along the coastline of Brest (France) from combined space-borne geodetic methods*. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 222, pp. 10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.035>
- PONS, F., ROUX, I. (2017). *Numérisation des données Grau de la Dent avec NUNIEAU de 1996 à 2015*. CEREMA
- PLANTON S., LE COZANNET G., CAZENAVE A., COSTA S., DOUEZ Olivier, GAUFRÈS P., HISSEL F., IDIER D., LABORIE V., PETIT V., SERGENT P. (2015). *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises*. ONERC.: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_5_VF_revisee_27fevrier2015.pdf
- RAYNAL O. (2008). *Architectures de dépôts et facteurs de contrôle d'un système côtier à faibles apports sédimentaires - le littoral languedocien (Golfe du Lion, Sud de la France)*. Minéralogie. Université de Montpellier 2. <https://elmusca.files.wordpress.com/2015/06/these-olivier-raynal-2008.pdf>
- SUANEZ S., PROSPER-LAGET V., PROVANSAL M. (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 G., MARCOS M., COULOMB A., MIGUEZ B., BONNETAIN P., BOUCHER C., GRAVELLE M., SIMON B., TIPHANEAU P. (2014). *Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851*. *Journal of Geodesy*, Vol.88, pp. 869–885. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0728-6>
- YATES-MICHELIN M., LE COZANNET G., BALOUIN Y. (2011). *Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en Languedoc-Roussillon*. Rapport BRGM/RP-58872-FR. 83 p., 2 annexes. <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/rapport-final-etat-des-connaissances-sur-les-effets-potentiels-du-changement-climatique-sur-les-alea0>