

Erosion

Elévation du niveau de la mer

Evaluation de la sensibilité littorale à l'érosion en France méditerranéenne dans un contexte de changement climatique



Asimina Mavromatidi

Aix Marseille Université, IRD, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 – Marseille Cedex 3,
France
semimavr@gmail.com



Elodie Briche

Aix Marseille Université, IRD, LPED
3, place Victor Hugo, 13331 – Marseille Cedex 3,
France
elodie.briche@univ-amu.fr

MC3- Mediterranean Cities and Climate Change,
projet financé par les Investissements d'Avenir A*MIDEX

Ce chapitre est paru dans :
Briche E., Cantat O., Carrega P. (2017). Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée. Les Impromptus du LPED, n°3, Laboratoire Population-Environnement-Développement, UMR 151 (AMU – IRD), Marseille, 161 p.

Un tiers de la population française se concentre sur les zones côtières méditerranéennes (Eurostat, 2012), qui accueillent de grands centres urbains ainsi que des activités telles que le tourisme. Or, les villes densément peuplées du littoral méditerranéen français sont confrontées à des risques notamment en raison de l'élévation du niveau de la mer qui devrait augmenter entre 7 et 12 cm au cours du 21ème siècle (Gualdi et al., 2013). L'objectif principal de ce travail est donc de déterminer les zones côtières les plus sensibles à l'érosion à partir d'un indice de sensibilité (ISC) qui repose sur 6 variables : la géomorphologie, la pente côtière, l'élévation relative du niveau de mer, le changement du littoral, l'amplitude moyenne de la marée et la hauteur de vague significative (Shaw et al., 1998). Cette étude est réalisée à l'échelle régionale pour la France méditerranéenne à partir de données gratuites et/ou libres. La cartographie issue de nos travaux montre que 45,7 % de la zone d'étude appartient à la catégorie de sensibilité très élevée. Cette étude donne un aperçu de la sensibilité littorale à l'érosion en France méditerranéenne afin de mieux anticiper les changements à venir et les intégrer dans les aménagements des villes méditerranéennes.

A third of the French population is concentrated in the Mediterranean coastal areas (Eurostat, 2012) that host large urban centers, as well as activities such as tourism. The densely populated cities in the French Mediterranean coast face particular risks because of an anticipated sea level rise, that is expected to increase between 7 to 12 cm in the 21st century (Gualdi et al., 2013). The main objective of this work is to determine the most sensitive to erosion coastal regions from a Sensitivity Index (CSI) based on six variables: geomorphology, coastal slope, sea-level rise, shoreline displacement, mean tidal range and significant wave height (Shaw et al., 1998). This study was conducted at the regional level of Mediterranean France from free and / or open data. The outcome of our work shows that 45.7% of the study area belongs to the very high sensitivity category. This study provides an overview of sensitivity to coastal erosion in Mediterranean France in order to better anticipate to future changes and incorporate them into the amenities of the Mediterranean cities.

Impact du changement climatique

Introduction

Les effets du changement climatique sont déjà perceptibles et une des conséquences observée en Méditerranée est la hausse du niveau marin, principalement due à la dilatation thermique de l'océan qui se réchauffe et à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (NOAA, 2016, ONERC, 2015, GIEC, 2013). Le littoral français méditerranéen présente des enjeux forts tels que la démographie, l'urbanisation, les activités socio-économiques mais aussi l'environnement. Plus les zones côtières sont attractives et aménagées, plus leur sensibilité aux risques côtiers (érosion, inondation) s'aggrave du fait notamment de leur artificialisation. Les villes méditerranéennes, par leurs configurations spatiales et géographiques (proximité du littoral, forte dépendance à la ressource en eau, climat favorisant les sécheresses estivales et les événements météorologiques extrêmes, comme les pluies intenses) et par leur croissance, sont considérées comme des milieux particulièrement sensibles, "hot-spot" du changement climatique³ (GIEC, 2013). L'urbanisation du littoral méditerranéen a en effet progressé de façon spectaculaire, avec actuellement un taux d'urbanisation de près de 65%, qui pourrait augmenter jusqu'à 75% en 2025 (Plan bleu, 2015).

Une élévation anticipée du niveau de la mer devrait accélérer la dynamique côtière (NOAA, 2016 ; GIEC, 2013). Pour la Méditerranée, Marcos et Tsimplis (2008) montrent, à partir des données marégraphiques couvrant l'ensemble du XXe siècle, que pour la première moitié du siècle, le taux d'élévation est compris entre 0,12 et 0,15 ± 0,01 cm/an, ce

qui correspond au même ordre de grandeur que celui observé à l'échelle du globe. Pour la seconde moitié du XXe siècle (1960- 2000), ils indiquent un taux d'élévation plus faible en Méditerranée qu'en moyenne globale, et en particulier plus faible que celui observé sur la côte Atlantique, compris entre + 0,15 ± 0,04 cm/an et + 0,03 ± 0,03 cm/an (Fenoglio-Marc 2001 ; Somot et al., 2006). Calafat et Gomis (2009), en utilisant des données altimétriques et à l'aide de techniques d'interpolation, estiment le taux d'élévation de la mer Méditerranée à +0,06 ± 0,01 cm/an sur la période 1961-2000, un chiffre plus élevé que celui donné par Marcos et Tsimplis (2008). Selon Letetrel (2009), le taux de variation du niveau de la mer, estimé à partir de données du marégraphe de Marseille, est de +0,11 ± 0,01 cm/an (1885-2007). Finalement, les taux exacts d'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale mais aussi régionale présents et futurs sont incertains.

Le risque provenant du croisement d'un aléa naturel et d'une vulnérabilité dans un secteur à fort enjeu, la France méditerranéenne est considérée comme très exposée au risque d'érosion côtière, en raison de la présence de zones industrielles, d'espaces à haute valeur écologique et cela en conjonction avec le développement urbain sur son littoral entre 1975 et 1990 (Sabatier, 2001; Samat, 2007 ; Suanez, 1997 ; Certain, 2002 ; Durand, 1998). Il est donc nécessaire d'examiner les alternatives possibles pour la planification et le développement urbain durable (EM-DAT, 2012) afin d'augmenter la capacité d'adaptation dans le contexte de changement climatique (Houghton et al.,

2001). La première étape réside généralement dans la compréhension et la détermination des régions et des zones urbanisées sensibles à une élévation potentielle du niveau de la mer. En effet, déterminer les franges littorales sensibles à l'érosion, dans le cas d'une élévation potentielle du niveau de la mer, permet d'identifier les zones où il faudra probablement penser ou repenser les aménagements urbains littoraux. Diverses approches existent, sous la forme d'indices, et ont été proposées afin de prédire le processus physique de la zone côtière sous l'influence de l'élévation potentielle du niveau de la mer aux échelles nationales et régionales (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008 ; Diez et al., 2007 ; Pendleton et al., 2004 ; Thieler et Hammar-Klose, 1999 ; Shaw et al., 1998 ; Gornitz, 1991). Une première tentative de créer un indice de vulnérabilité du littoral au changement climatique – l'indice de vulnérabilité côtier, comme une mesure relative de la sensibilité physique du système à l'effet de l'élévation du niveau de la mer – a été proposé par Gornitz et Kanciruk (1989) en ce qui concerne les inondations et la sensibilité à l'érosion (Jeftic et al., 1992). Cet indice a été largement utilisé pour évaluer la sensibilité des côtes en Grèce (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008), au Brésil (Szlafsztein et Sterr, 2007), en Europe (Doukakis, 2005), en Inde (Diez et al., 2007), en Argentine (Diez et al., 2007), au Canada (Shaw et al., 1998) et aux Etats-Unis (Pendleton et al., 2004, Thieler et Hammar-Klose, 1999).

Notre étude a donc pour objectif l'évaluation de la sensibilité littorale à l'érosion en France Méditerranéenne dans un contexte de changement climatique, en utilisant au maximum des données gratuites, voire

libres. Elle est réalisée à partir de l'indice de sensibilité côtière (ISC) (Shaw et al., 1998). La cartographie résultante permet de déterminer quel paramètre de l'indice influe le plus sur la sensibilité à l'érosion mais également de régionaliser la frange littorale en cinq catégories de sensibilité (de très faible à très élevée). Le résultat de cet indice permet de réfléchir à l'adaptation côtière au changement climatique grâce à l'identification non seulement de l'ampleur mais aussi de la cause du problème. Cette étude amorce également un discours critique quant à une utilisation plus fréquente des données ouvertes, afin d'examiner leur potentiel dans les études des effets du changement climatique et des adaptations possibles.

³ Une région est qualifiée de « hot-spot » du changement climatique lorsque les effets attendus de ce changement sont particulièrement marqués ou bien que ses impacts sur l'environnement ou différents secteurs d'activité risquent d'être très prononcés. La Méditerranée cumule ces deux caractéristiques.
Source : CNRS, Météo-France. <http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/mediterranee.pdf>

I. Données et méthodes

I.1 Zone d'étude

La zone d'étude (figure 1) comprend la côte méditerranéenne française (1703 km). Elle est principalement rocheuse à l'Est, avec une séquence de petites baies et des promontoires. Dans cette région, les problèmes d'érosion existent depuis 1961 (Pranzini et Williams, 2013) où les efforts pour l'alimentation artificielle des plages ont été mis en place afin de résoudre le problème (Cannes). Les cailloux, dans les plages comme Cannes et Nice, ont été remplacés à plusieurs reprises au cours des trente dernières années et, aujourd'hui, le niveau de la plage est généralement

sous contrôle (Pranzini et Williams, 2013). La côte est sédimentaire à l'Ouest (Golfe du Lion), avec également la présence de grandes zones humides (Camargue et les lagunes de Languedoc-Roussillon). Au voisinage de la frontière espagnole, la côte est à nouveau rocheuse, avec une succession de baies et de promontoires. Toute la façade méditerranéenne française a été fortement aménagée par l'homme avec notamment dans les dernières décennies une pression anthropique très élevée due à une urbanisation extrême et à l'aménagement de ports, marinas, aéroports, digues plages privées (Bellan - Santini et al., 1994).

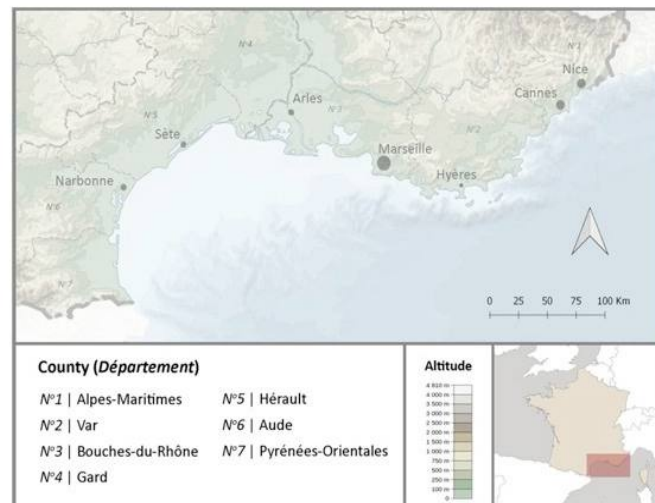


Figure 1. Situation géographique et topographique de la zone d'étude. Source des données cartographiques: INSEE (2012), la NASA SRTM (2014), Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

I.2. L'indice de sensibilité côtière (ISC)

L'Indice de Sensibilité Côtière (ISC) - proposé par Shaw et al. (1998) a été appliqué à la zone d'étude à partir de bases de données de terrain et topographiques existantes (tableau 1), ainsi qu'à partir d'informations géo-environnementales. L'ISC est calculé comme la racine carrée du produit de six variables, lesquelles sont classées en catégories de sensibilité à l'érosion (de 1= Très Faible à 5 Très Élevée), et divisées par leur nombre total (équation 1) :

Équation 1. Formule de calcul de l'ISC

$$(CSI) = \sqrt{\frac{(a * b * c * d * e * f)}{6}}$$

Où:

(a) : la géomorphologie exprime l'érodabilité relative combinée avec les différents types de relief côtier. Les données ont été obtenues à partir de photographies aériennes récentes, d'images Google Earth et de cartes géologiques nationales à l'échelle 1 : 50 000, qui comprennent l'identification, l'enregistrement et la cartographie des reliefs côtiers, mais également les formations géologiques. Le classement de la côte en 5 classes de sensibilité dépend du comportement futur des reliefs côtiers, de leur lithologie dans une élévation potentielle du niveau de la mer.

(b) : la pente côtière, permet d'identifier la sensibilité relative à l'inondation et la rapidité potentielle du retrait littoral : les côtes en pente douce devraient reculer plus vite que les côtes

rocheuses et escarpées (Pilkey et Davis, 1987). La pente côtière est généralement calculée en utilisant le modèle numérique de terrain (MNT) de la zone. Le MNT utilisé est le SRTM à 90 m et les données SRTM, fournies par le consortium pour l'information spatiale (CGIAR-CSI), ont été traitées pour combler les lacunes de données.

(c) : le taux d'élévation relative du niveau de la mer est acquis à partir de l'augmentation (ou diminution) du niveau moyen annuel de l'eau au fil du temps, évalué aux stations marégraphiques le long de la côte, lorsque les données sont disponibles. Cette variable est la combinaison de l'élévation globale du niveau de la mer et de l'isostasie locale et/ou des mouvements de terrain tectoniques. Dans les zones qui s'affaissent et où l'élévation du niveau de la mer augmente, le risque d'inondation est plus élevé. En Méditerranée, nous avons deux types d'observations du niveau de la mer moyen : les mesures locales avec les marégraphes depuis la fin du XIXe siècle, et l'altimétrie par satellite, disponible depuis 1992 (Gualdi et al, 2013). Les données altimétriques par satellite fournissent des mesures précises de la région au niveau local pour un intervalle de temps limité. Dans le cas de la Méditerranée, cet intervalle est de 20 ans. La tendance d'élévation du niveau de la mer en Europe a été obtenue à partir de la base de mesures satellitaires (1992-2013) de l'Agence européenne pour l'environnement (2014).

(d) : le taux d'érosion / accrétion du littoral tente d'évaluer la tendance historique des changements côtiers. L'érosion du rivage où les taux d'accrétion d'une zone côtière peuvent être obtenus par l'observation comparative de photographies aériennes ou d'images satellites multi-temporelles. Le

changement du littoral est une des variables plus complexes parce que la tendance varie considérablement dans le temps (Pendleton *et al.*, 2010). Le taux d'érosion ou d'accrétion du littoral a été dérivé en utilisant de photographies aériennes d'échelle 1 : 68 244 de 1977 et d'images *Google Earth* de 2015. Après la numérisation des côtes de deux périodes différentes, elles ont été superposées afin de détecter les changements du littoral pendant la période 1977-2015.

(e) : l'amplitude moyenne de la marée participe aux risques d'inondation permanente et/ou épisodique. Pour le calcul de cette variable spécifique, les mesures marégraphiques peuvent être utilisées. En général, la Méditerranée est associée à de faibles marées. Cependant, elles génèrent une variation moyenne d'environ 40 centimètres (SHOM, 2016).

et (f) : la hauteur de vague significative moyenne est utilisée comme un indicateur de l'énergie des vagues qui contrôle le budget des sédiments côtiers. Les données moyennes de la hauteur de vague peuvent être obtenues à partir des résultats de simulation de vagues le long du rivage. Les côtes qui reçoivent une grande quantité d'énergie de vagues sont considérées à haut risque, contrairement aux côtes protégées des vagues. Les données ont été obtenues par la base nationale de données de mesure de vague CANDHIS (collaboration entre le port de Nantes St Nazaire, École Centrale de Nantes et CEREMA).

relative du niveau de la mer, amplitude des marées et hauteur significative des vagues). Les variables géologiques décrivent les caractéristiques physiques de la côte et représentent la résistance à l'érosion relative du littoral, sa sensibilité aux inondations et la tendance à long terme de l'érosion. Les variables de processus physiques sont celles relatives aux aléas susceptibles d'engendrer des inondations sur une section particulière de la côte au fil des heures, voire des siècles. Les variables géologiques et physiques sont aussi bien quantitatives que qualitatives (Karymbalis et Gaki-Papanastassiou, 2008).

L'indice comporte cinq classes reposant sur la combinaison des différentes variables prises en compte (Pendleton *et al.*, 2004) et correspondent à des catégories de sensibilité (tableau 1).

Paramètres	Classes de sensibilité côtière					Description / Source
	Très faible Classe 1	Faible Classe 2	Moderée Classe 3	Elevée Classe 4	Très élevée Classe 5	
a	Rochers, côtes aménagées artificiellement	Falaises moyennes, côtes dentelées	Falaises basses, plaines alluviales	Plages de galets	deltas, plages	Images de Google Earth et cartes géologiques nationales (1 : 50 000) (http://portail.cnageology.org)
b (%)	> 12	12 - 9	9 - 6	6 - 3	< 3	SRTM par le Consortium pour l'information spatiale (CGIAR-CSI) (résolution de 90m à l'équateur, et en tuiles de 5° x 5° mosaïquées).
c (mm/an)	< 1,8	1,8 - 2,5	2,5 - 3,0	3,0 - 3,4	> 3,4	La tendance au niveau de la mer absolue dans les mers européennes sur la base de mesures satellitaires (1992-2013) par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA), 2014
d (m/an)	> 2,0	1,0 - 2,0	-1,0 - 1,0	-2,0 - -1,0	< -2,0	érosion /accrétion taux littoraux, obtenus par des photographies aériennes d'échelle 1 : 68,244 de 1977 et de <i>Google Earth</i> de 2015. Base de données: http://www.geoportail.gouv.fr
e (m)	> 6,0	4,0 - 6,0	2,0 - 4,0	1,0 - 2,0	< 1,0	Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), 2016
f (m)	< 0,55	0,55 - 0,85	0,85 - 1,05	1,05 - 1,25	> 1,25	Base nationale de données de mesure de vague - CANDHIS (collaboration entre le port de Nantes St Nazaire, Ecole Centrale de Nantes et CEREMA).

Tableau 1. Classification des paramètres de l'Indice de Sensibilité Côtière (ISC) à partir des cinq catégories de sensibilité côtière de Pendleton *et al.* (2004) et les sources de données.

II. Résultats

1.3. Mise en place de la classification de l'ISC par la méthode des valeurs

La classification des valeurs de l'ISC a été réalisée avec la méthode des valeurs Z - *Z-normalisation* des scores (équation 2). Cette méthode a l'avantage de définir plus facilement la classe moyenne, puisque toutes les valeurs des paramètres de l'indice sont exprimées par le biais de leur distance par rapport à la valeur moyenne.

$$(Z) = \frac{(x - \mu)}{sd}$$

Équation 2. Z- normalisation des scores

Où: (x) : valeurs des paramètres initiales ; (μ) : la valeur moyenne des valeurs des paramètres ; (sd) : l'écart type des valeurs des paramètres

L'ISC contribue à l'identification des paramètres qui affectent plus l'évolution côtière (figure 2). Les valeurs de l'ISC calculées le long du littoral de la France Méditerranéenne varient entre 1,82 et 23,72. Les valeurs sont spatialement orientées en ayant une limite relativement stricte : le sud de notre zone d'étude concentre les valeurs avec une très grande sensibilité à l'érosion, par rapport à l'est où les niveaux de sensibilité sont modérés à faibles. Une grande partie de la côte de la zone d'étude, d'une longueur de 747,7 km (45,7%), est classée comme ayant une très grande sensibilité (figure 3) due à la pente régionale faible, la sensibilité des reliefs côtiers, la lithologie très érodable et l'amplitude

moyenne de la marée. Cette zone comprend la quasi-totalité de la région de Languedoc-Roussillon, ainsi que la partie Ouest de la région Provence-Alpes-Côte-D'azur (PACA), et plus précisément le département des Bouches-du-Rhône. Certaines zones plus petites de sensibilité très grande sont situées dans la région du Var, sur la ville d'Hyères et dans la région des Alpes- Maritimes (villes de Cannes et de Nice). Respectivement 4,6%, c'est-à-dire une longueur totale de 75,3 km sont classés comme ayant une sensibilité grande (La Londe-les-Maures) et 13,4% (correspondant à une longueur de côte de 219,2 km) sont désignés comme de sensibilité modérée (Cassis, La Ciotat, Saint-Cyr-sur-

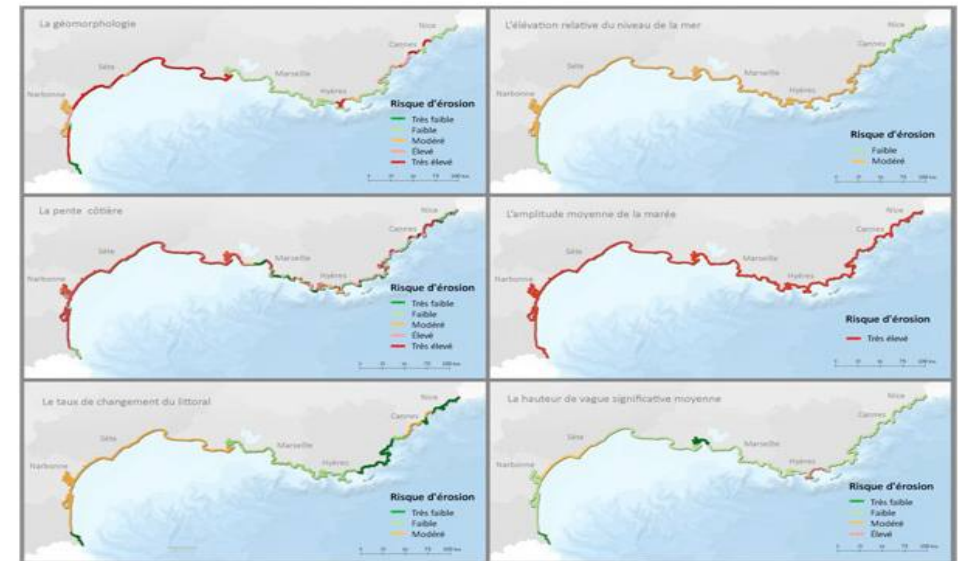


Figure 2. Risque d'érosion pour chaque paramètre de l'indice de la sensibilité côtière
Source des données cartographiques: INSEE, Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

Mer, Bandol, Sanary-sur-Mer, Six-Fours-les-Plages). Le pourcentage de sensibilité faible équivaut à 30,1% (492,7 km) et comprend les régions à l'ouest de Marseille (Port-Saint-Louis-du-Rhône, Fos-sur-Mer, Port-de-Bouc, Martigues, Sausset-les-Pins, Carry-le-Rouet), ainsi que les régions entre Hyères et Cannes (Le Lavandou, Saint-Tropez, Fréjus). Enfin, 6,2% (correspondant à 101,33 km du littoral) ont été caractérisés comme de sensibilité très faible à l'Est de Nice (Èze) et dans une partie proche de la frontière italienne (Menton).

En matière d'implications socio-économiques liées à la hausse anticipée du niveau de la mer, la plupart des zones urbaines sont concentrées dans les segments côtiers ayant une très grande (catégorie 5) et une grande (catégorie 4) sensibilité (Figure 3). Cela se produit principalement en raison du fait que de nombreuses villes en France ont été développées dans des endroits avec de longues plages de sable fin qui ont attiré des touristes de toute l'Europe. Ces zones, cependant, sont sujettes à l'érosion en raison de leurs segments côtiers (alluviaux). De plus, les interventions anthropiques sur la plage sous forme de ports, digues, etc. aggravent les phénomènes d'érosion. Afin d'avoir une information à l'échelle départementale, le tableau 2 présente le pourcentage côtier de chaque département qui appartient à chaque catégorie de la sensibilité des côtes (de 1 = très faible à 5 = très élevé). On peut observer que le département le plus vulnérable physiquement est l'Hérault : il se caractérise

par des niveaux très élevés de sensibilité côtière à l'érosion⁴ (classe 5 de 100%), tandis que l'Aude et les Pyrénées-Orientales suivent avec 90,43% et 62,5%. Cela se produit lorsque la pente régionale est faible, et lorsqu'il existe une sensibilité des reliefs côtiers avec principalement une lithologie très érodable.

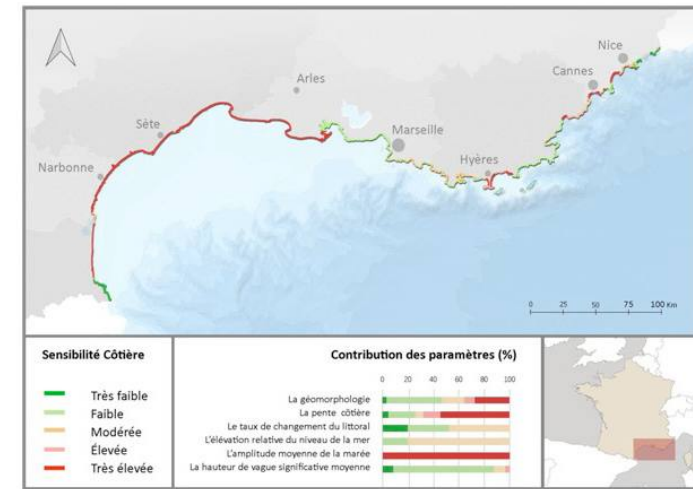


Figure 3. Indice de Sensibilité Côtière (ISC) de la France Méditerranéenne
Source des données cartographiques: INSEE, Amante et Eakins NGDC ETOPO1 (2009), modifié par les auteurs.

Région	Département	Catégories de sensibilité (%)				
		Très Faible Classe 1	Faible Classe 2	Modérée Classe 3	Élevée Classe 4	Très Élevée Classe 5
Languedoc-Roussillon	Pyrénées-Orientales	37,5	0	0	0	62,5
	Aude	0	0	9,57	0	90,43
	Hérault	0	0	0	0	100
	Gard	0	0	0	0	100
Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)	Bouches-du-Rhône	0	47,27	13,62	0	39,11
	Var	0	43,66	23,7	22,58	10,06
	Alpes Maritimes	36,47	28,84	9,77	0	24,92

Tableau 2. Catégories et pourcentages d'ISC du littoral de chaque département

⁴ Le département du Gard n'est pas caractérisé comme le plus vulnérable car il ne dispose que d'une municipalité côtière

Conclusion

Bien que l'élévation du niveau de la mer ne soit pas le seul facteur de changement du littoral, elle pourrait modifier radicalement les conditions de vie et la prospérité des communautés côtières dans les décennies à venir. Cela pourrait entraîner une série d'impacts qui ont été évalués de diverses manières. Les évaluations intégrées, à partir d'indices empiriques, les plus utiles aux décideurs politiques, sont moins développées. Pour estimer la sensibilité des zones côtières à une élévation potentielle du niveau de la mer, l'élaboration d'indicateurs (expressions mathématiques), pour quantifier la sensibilité côtière est indispensable. Parmi les indicateurs empiriques, le plus souvent utilisé est l'indice de sensibilité des zones côtières (ISC) qui évalue les caractéristiques géomorphologiques et océanographiques des zones côtières. L'estimation de cet indicateur pour la côte méditerranéenne française a montré que près de la moitié de sa longueur totale appartient à la catégorie de risque très élevé, tandis que le reste de la côte est caractérisée par la sensibilité faible et modérée. Ces résultats rendent impérative la nécessité d'études centrées sur les zones particulièrement sensibles de France méditerranéenne côtière à une échelle plus détaillée, au moins pour les zones avec des valeurs élevées de l'ISC qui se caractérisent par des activités socio-économiques importantes (zones urbaines, terres agricoles, côtes exploitées touristiquement) mais aussi par des côtes écologiquement importantes, comme les zones humides côtières.

Dans la présente étude, la recherche appliquée a été volontairement menée à l'échelle régionale en raison de la disponibilité des données nécessaires à l'analyse. Bien que l'utilisation de données ouvertes « *open*

data » permette de nouvelles approches et analyses, il faut toutefois toujours faire preuve de prudence et de recul quant à ces données d'un nouveau genre en matière de précision, d'exhaustivité ou de formalisme. De plus, tous les facteurs n'étaient pas disponibles en « *open data* » et un travail de cohérence spatiale et temporelle a été réalisé au préalable. Cette étude contribue en effet à la réflexion sur les villes littorales méditerranéennes dans le but de prioriser les efforts visant à améliorer la résilience naturelle de la côte, mais aussi à s'adapter au changement climatique en réfléchissant à des aménagements durables prenant en compte les variables qui contribuent le plus à la sensibilité côtière.

Le développement d'une base de données SIG spatiale, qui recueille et élabore les variables impliquées dans le calcul de l'indice à différentes échelles, est considéré comme nécessaire. En outre, de nouveaux paramètres pourraient être mis en œuvre dans la procédure afin d'aider les planificateurs à mettre en évidence les municipalités côtières sensibles. L'ISC pourrait être renouvelé et élargi afin d'intégrer de nouvelles données disponibles, telles que les données d'altitude, des ondes de tempête, de budget des sédiments. En outre, étant donné que la sensibilité de la côte est affectée par les hommes dans une large mesure, de nouvelles variables tenant compte des actions anthropiques, telles que les structures de contrôle de plage (épaves et digues), les utilisations des terres (routes, bâtiments, services publics), pourraient également être mises en œuvre. Enfin, la précision de la méthode peut être améliorée avec l'attribution de poids à certaines variables.

Bellan-Santini, D., Lacaze, J.C., Poizat, C., 1994 : Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives. *Patrimoine Naturels*, 19, pp. 1-246.

Calafat, F.M. & Gomis, D. (2009) : Reconstruction of Mediterranean Sea level fields for the period 1945-2000. *Global Planet. Change*, 66 (3-4), 225-234.

Certain R., (2002) : *Morphodynamique d'une côte sableuse micro-tidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc-Roussillon)*. Thèse, Université de Perpignan, France, 189p.

Diez, P.G., Perillo, G.M.E. & Piccolo, C.M. (2007) : Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province. *Journal Coastal Research*, 23, 19-126.

Doukakis, E. (2005) : Coastal vulnerability and sensitivity parameters. *European Water*, 2005, 11, 3-7.

Durand P., (1998). Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès plage à Saint Cyprien (Roussillon, France), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 155-166.

EEA. 2006 : *The Changing Faces of Europe's Coastal Areas*. European Environment Agency, Copenhagen.

EM-DAT, 2012 : *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium).

Eurostat, 2012 : Products Statistics in Focus. Nearly half of the population of EU countries with a sea border is located in coastal regions - Issue number 47/2009. Available in: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistics-in-focus/-/KS-SF-09-047>

Fenoglio-Marc, L. 2001 : Analysis and representation of regional sea-level variability from altimetry and atmospheric-oceanic data. *Geophysical Journal International*, 145, 1-18.

GIEC / IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013 : Summary for policy-makers. In *Climate change: The physical science basis*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf [Last access 9/2015].

Gornitz, V. & Kanciruk, P., 1989 : Assessment of global coastal hazards from sea-level rise: Coastal Zone'89. In *Proceedings of Sixth Symposium on Coastal and Ocean Management*, ASCE, Charleston, South Carolina, 1345-1359.

Gornitz, V., 1991 : Global coastal hazards from future sea-level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), 89, 379-398.

Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W. & Birdwell, K.R., 1994 : The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 12, 327-338.

Gualdi, S. et al., 2013 : **Future Climate Projections. Chapter 3. Volume 1:** Air, Sea and Precipitation and Water. *Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean*. Antonio Navarra and Laurence Tubiana Editors.

Houghton JT et al. (eds), 2001 : *The scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. *Climate Change*, Cambridge University Press, 525-582.

Jeftic, L., Milliman, J. & Sestini, G., 1992 : *Climatic Change and the Mediterranean*. UNEP, 645p.

Karymbalis, E. & Gaki-Papanastassiou, K., 2008 : Geomorphological study of the river Peneus, Kalama, Evinos and Mornos (in greek). *Proceedings of the 4th National Conference for Management and Improvement of Coastal Zones*. Edition of the Laboratory for Harbour Works, NTUA, 86-94.

Letetrel C., 2009 : **The Marseille tide gauge** : recovery and analysis of high frequency sea level data from 1885. Final report for MedCLIVAR - Exchange Grant 1928.

Marcos, M. & Tsimplis, M.N., 2008 : *Coastal sea-level trends in Southern Europe*. *Geophysical Journal International*, 175, 70-82.

A -National Centers for Environmental Information, 2016 : *State of the Climate: Global Analysis for February*. Published online March 2016, retrieved on May 10, 2016 from <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201602>.

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique – ONERC, 2015 : *Le littoral dans le contexte du changement climatique*. Rapport au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

Pendleton, E.A., Thieler, E.R. & Williams, S.J., 2004 : *Coastal vulnerability assessment of Cape Hattaras National Seashore (CAHA) to sea-level rise*. USGS Open File Report 1064.

Plan bleu, 2015 : *Climate risk management tools: Towards a multi-scale coastal risk index for the Mediterranean*. http://planbleu.org/sites/default/files/publications/notes28_en.pdf / Accessed 04.07.2016.

Pilkey OH, Davis TW, 1987 : An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: Nummedal D, Pilkey OH, Howard JD (eds) *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) *Special Publication*, 41, Tulsa, Oklahoma, pp 59–68

Pranzini, E. and Williams, A., 2013 : *Coastal Erosion and Protection in Europe*. London:Routledge

Sabatier F., 2001 : *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du Delta du Rhône*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 273p.

Samat S., 2007 : *Impact des aménagements en enrochement sur la morphogénèse côtière : quelques cas dans le Golfe du Lion*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 341p..

Suarez S., 1997 : *Dynamiques sédimentaires récentes et actuelles de la frange littorale du delta du Rhône*. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, 284p.

Shaw J., Taylor R.B., Forbes D.L., Ruz M.H., Solomon S., 1998 : Sensitivity of the Canadian Coast to Sea-Level Rise. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 505, 114

Somot, S., Sevault, F., Déqué, M., 2006 : Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. *Clim. Dyn.*, 27 (7–8), 851–879. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z>

Szlafsztein, C. & Sterr, H., 2007 : A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará Brazil. *J. Coast. Conserv.*, 11, 53-66.

Thieler, E.R. & Hammar-Klose, E.S., 1999 : *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise*, U.S. Atlantic Coast, U.S. Geological Survey, Open-File Report, 99-593.