



HAL
open science

Surcotes marine à Monaco et Nice : variabilité contemporaine et future (1999-2100).

Albin Ullmann, L. Guyard

► **To cite this version:**

Albin Ullmann, L. Guyard. Surcotes marine à Monaco et Nice : variabilité contemporaine et future (1999-2100).. 31ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Jul 2018, Nice, France. pp.146-151. hal-01860681

HAL Id: hal-01860681

<https://hal.science/hal-01860681>

Submitted on 8 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SURCOTES MARINE A MONACO ET NICE : VARIABILITE CONTEMPORAINE ET FUTURE (1999-2100)

ULLMANN ALBIN¹, GUYARD LUC¹

¹ BIOGEOSCIENCES, CRC, UMR6282, Université de Bourgogne, 6 BVD Gabriel, 21000 Dijon.
albin.ullmann@u-bourgogne.fr

Résumé : *Les surcotes marines sont une élévation anormale et brutale du niveau marin sous l'effet des conditions atmosphériques pouvant entraîner un risque de submersion, notamment au niveau des principales agglomérations littorales de la côte d'Azur telles que Nice et Monaco. La variabilité interannuelle des fortes surcotes à Monaco est simulée de façon robuste grâce à une régression linéaire utilisant la pression atmosphérique de surface ([3-10°E]-[40-45°N]) comme prédicteur. Selon les principaux modèles numériques globaux du climat, la hauteur des fortes surcotes sur la Côte d'Azur pourrait rester stationnaire d'ici à 2100 selon la trajectoire optimiste (RCP4.5) et pessimiste (RCP8.5) du changement climatique.*

Mots-Clés : *Surcotes marines, changement climatique, risque de submersion, Côte d'Azur.*

Abstract: *Sea surges at Monaco and Nice: present-day and future variability (1998-2100). Sea surges are rapid increase of the level of the sea under atmospheric conditions that could lead to coastal submersion having strong impacts especially for coastal towns of the French Riviera such as Nice and the principality of Monaco. Interannual variability of the highest surges at Monaco is robustly simulated by a linear regression using barometric conditions over [3-10°E]-[40-45°N] as a predictor. According to 15 global circulation models, highest surges at Monaco could stay stationary for two different climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5).*

Keywords: *Sea surges, climate change, coastal submersion, French Riviera.*

Introduction

Les impacts d'une élévation du niveau marin dépendent de l'amplitude, de l'échelle de temps et aussi de la réponse humaine apportée face à ces aléas (Paskoff, 1993). Dans le contexte du changement climatique, les récentes projections prévoient une élévation du niveau marin pour le 21^{ème} siècle (IPCC, 2013). Cette augmentation est favorable à l'augmentation des risques de submersion et d'érosion des zones littorales. Cependant, la plupart de ces événements se produisent lors des tempêtes liées au passage d'une forte dépression. Ces épisodes météo-marins entraînent une élévation anormale et brutale du niveau marin, liée à la baisse de la pression atmosphérique et aux forts vents d'afflux qui accumulent la masse d'eau vers la côte (Pirazzoli et Tomasin, 2002; Ullmann *et al.*, 2008). Ce phénomène est appelé surcote marine, lorsque le niveau de la mer observé est supérieur à celui normalement atteint par la marée astronomique.

La Côte d'Azur est la partie orientale du littoral méditerranéen français et inclut la côte monégasque. Le littoral est principalement orienté sud-ouest nord-est et ouvert vers la Méditerranée vers le sud-est. Il est principalement constitué d'une côte rocheuse présentant de nombreux caps et baies sableuses. La densité de population y est forte avec en moyenne 726 hab/km² mais avec des concentrations beaucoup plus importantes autour des principales agglomérations telles que Nice (4763 hab/km²) et surtout Monaco (16 398 hab/km²). Ces agglomérations littorales, avec les populations et activités qu'elles concentrent, sont donc particulièrement vulnérables au risque de submersion marine comme ce fut le cas à Nice en 2010 et 2011 ou plus récemment à Monaco et Nice en 2017.

L'objectif de cette étude est d'appréhender la variabilité spatio-temporelle des plus fortes surcotes marines à Nice et à Monaco, d'en étudier les forçages atmosphériques associés et d'estimer l'évolution future des fortes surcotes marines à Nice et à Monaco suivant différentes projections du changement climatique d'ici à 2100.

1. Données et méthodes

1.1. Données

1.1.1. Données marégraphiques

Les données marégraphiques quotidiennes de Nice et Monaco sont issues du réseau de mesure du SHOM (service hydrographique et océanographique de la marine). Elles sont disponibles sur le site du système d'observation du niveau de la mer à long terme (www.sonel.org) sur la période 1998-2014 à Nice (port Lympia) et sur la période 1999-2010 à Monaco (port Fontvieille). Ces données quotidiennes de hauteur du niveau marin ont été filtrées par un filtre de Demerliac afin d'en extraire les variations cycliques, notamment celles liées à la marée astronomique (www.sonel.org). De plus, chaque année, le niveau marin annuel moyen est retranché aux valeurs quotidiennes afin de se prémunir de la variabilité lente du niveau marin et plus particulièrement de la hausse liée à l'effet stérique et à la fonte des glaces. Les hauteurs quotidiennes du niveau marin ainsi utilisées sont donc des hauteurs dont les variations sont uniquement forcées par les conditions atmosphériques.

1.1.2. Données atmosphériques

Les données quotidiennes de pression atmosphérique au niveau de la mer (PSM) sont issues des réanalyses européennes ERA-interim. Elles sont fournies par l'ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting; <http://www.ecmwf.int>). Ces données sont disponibles de 1979 à nos jours à une résolution native de $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$.

Les données quotidiennes de PSM des modèles climatiques globaux (MCG) sont issues du programme CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5). Les simulations historiques sont réalisées sur la période 1950-2006 avec comme forçage radiatif l'évolution observée de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Pour le futur (2006-2100), les trajectoires RCP4.5 et RCP8.5 seront utilisées (Wise *et al.*, 2009). **Tous les modèles utilisés sont des modèles globaux couplés océan-atmosphère dont la résolution native est variable et va de $1,25^{\circ}$ à $2,5^{\circ}$ selon les modèles. Les données ont donc toutes été préalablement interpolées sur une grille régulière de 1.5° de résolution pour permettre l'inter-comparaison avec les données ERA-interim.** Comme les différentes institutions du projet proposent parfois plusieurs simulations faites avec différents modèles, ou différentes versions du même modèle, un seul modèle par institution a été conservé afin d'analyser un jeu de simulation les plus indépendantes possibles (Pennell et Reichler, 2011). L'approche « one model one vote » est utilisée afin que chaque institution aient le même poids dans les analyses (Santer *et al.*, 2009; Ullmann *et al.*, 2014). Au total, 15 modèles ayant la même configuration (R1i1p1) sont conservés pour ce travail.

1.2. Méthode

Les surcotes à Monaco et Nice se produisent principalement sur la période d'août à avril (Guyard, 2017) appelée « saison » par la suite. L'ensemble des analyses seront effectuées sur cette période uniquement. Les analyses sont également toutes réalisées à partir de données désaisonnalisées (PSM et surcotes **quotidiennes – la moyenne mensuelle correspondante**) afin de se prémunir du poids du cycle saisonnier dans les résultats.

Une analyse composite est utilisée afin d'appréhender les conditions atmosphériques associées aux plus fortes surcotes à Nice et Monaco, c'est-à-dire celles dépassant le percentile à 90% (P90) des surcotes quotidiennes de chaque station. L'objectif est de déterminer le meilleur prédicteur possibles afin de simuler de façon robuste la variabilité interannuelle de la hauteur et de la fréquence des fortes surcotes à Nice et Monaco. Pour cela, une régression

linéaire est utilisé avec la pression atmosphérique quotidienne moyenne sur l'espace [3-10°E]-[40-45°N] comme prédicteur de la hauteur quotidienne des surcotes à Monaco et Nice:

$$\text{Surcotes quotidiennes} = a * \text{PSM quotidiennes ([3-10°E]-[40-45°N])} + b$$

Le modèle de régression est testé sur toute la période 1999-2010. Afin de tester sa performance prédictive, la régression a également été testée en validation croisée en utilisant deux sous périodes équivalentes de (1999-2004 et 2005-2010) devenant chacune à leur tour la période d'apprentissage puis la période de vérification. La robustesse des résultats est mesurée grâce à la corrélation linéaire (r), l'écart type (STD) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les coefficients de la régression appris sur toute la période 1999-2010 sont ensuite utilisés avec les PSM quotidiennes moyenne sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N] simulées par les MCG afin d'estimer la variabilité future des plus fortes surcotes selon deux trajectoires du changement climatique.

2. Résultats

Sur la période commune de 1999-2010, le coefficient de corrélation entre les surcotes quotidiennes à Monaco et Nice est de 0.96. Le P90 des surcotes à Monaco et Nice est presque similaire (141 mm à Nice et 137 mm à Monaco). De plus, les écart-types sont semblables (87 mm). Les surcotes à Monaco et Nice sont donc des phénomènes synchrones et d'amplitude similaire. Il n'y a pas de spécificités locales dans la formations des surcotes à Nice ou Monaco et **le phénomène est à l'échelle d'au moins la Côte d'Azur**. Tous les résultats seront présentés pour Monaco uniquement et sont similaires pour Nice.

2.1. Conditions atmosphériques des plus fortes surcotes à Monaco

A l'échelle quotidienne, les variations du niveau des surcotes à Monaco sont corrélées significativement ($r=0,7$) avec les variations de la pression centrée sur la côte méditerranéenne française autour de [3-10° E]-[40-45°N] (figure 1) témoignant de l'effet barométrique inverse sur le plan d'eau.

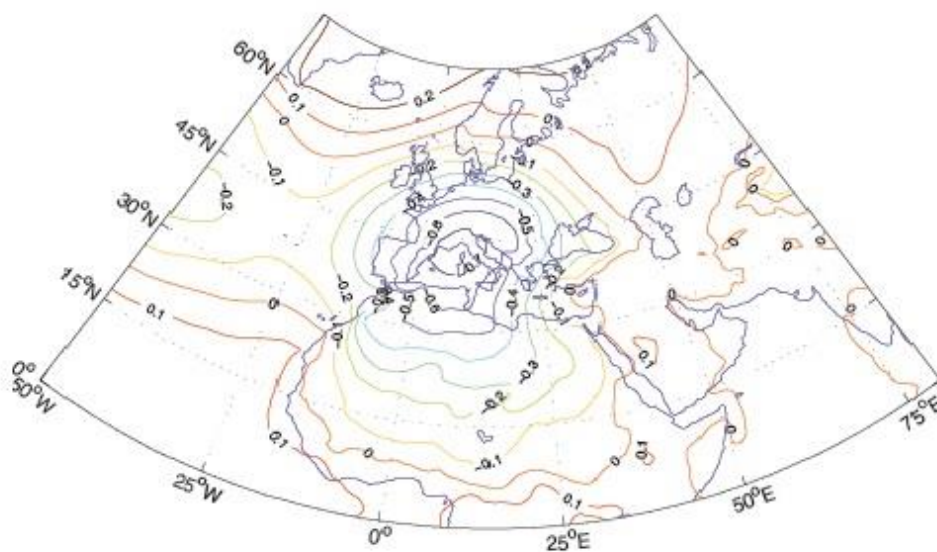


Figure 1. Corrélation entre la pression atmosphérique de surface et la hauteur quotidienne des surcotes à Monaco de 1999 à 2010.

La figure 2 montre les conditions barométriques moyennes (figure 2a) et les anomalies barométriques correspondantes (figure 2b) pour les jours où les surcotes à Monaco dépassent le P90. Il apparaît clairement que les plus fortes surcotes à Monaco se produisent quand une forte anomalie barométrique est centrée sur la France et couvre la côte méditerranéenne française (figure 2b).

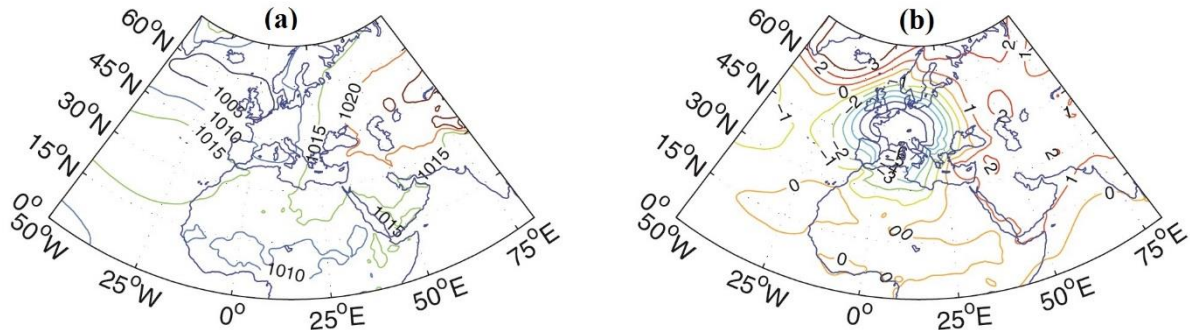


Figure 2. Pression atmosphérique moyenne (hPa) des jours de surcotes > P90 à Monaco (a) et en anomalies (hPa) par rapport aux conditions moyennes (b) sur la période 1999-2010.

2.2. Modélisation statistique de la variabilité des surcotes à Monaco (1999-2010)

La régression linéaire est testée afin de simuler la hauteur quotidienne des surcotes à Monaco à partir de la pression quotidiennes moyenne sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N]. La corrélation entre les surcotes quotidiennes observées de 1999 à 2010 et celles simulées par la régression est forte et significative ($r=0.78$). Le P90 mensuel observé est ensuite comparé à celui calculé à partir des surcotes quotidiennes simulées par la régression (figure 3). La corrélation est également forte et significative ($r = 0.81$). En termes d'amplitudes, observations et simulations sont presque similaires (figure 3). L'écart-type (RMSE) des observations et simulations sont respectivement de 6.4 cm et 5 cm (10 cm et 9 cm). Les scores statistiques sont presque similaires lorsque la régression est testée en validation croisée. Pour résumer, la variabilité interannuelle des fortes surcotes est simulée de façon robuste par la régression linéaire utilisant la pression atmosphérique de surface sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N] comme prédicteur.

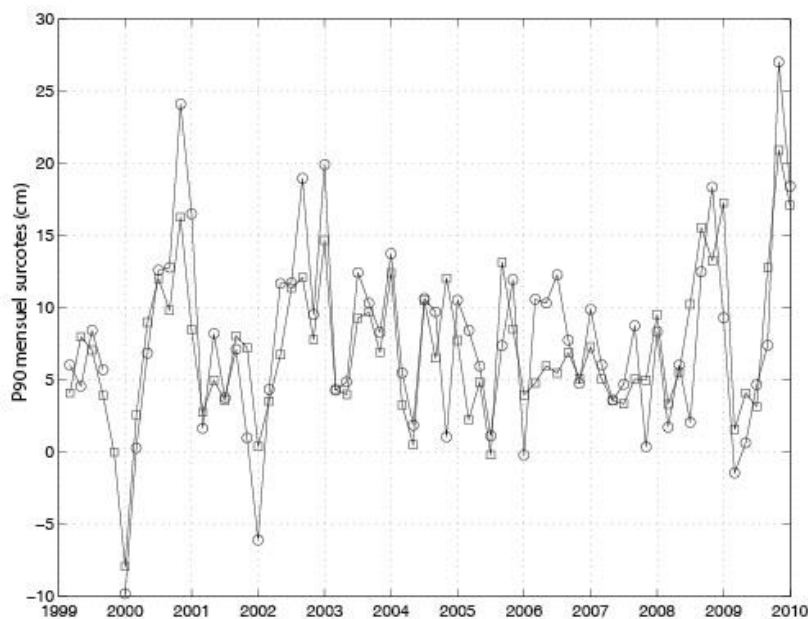


Figure 3. P90 mensuels des surcotes à Monaco issus des observations (trait avec cercles) et des simulations quotidiennes par la régression linéaire avec les PSM sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N] comme prédicteur (trait avec carrés) sur la période 1999-2010.

2.3. Variabilité future des surcotes à Monaco (2006-2100)

Les coefficients de la régression appris à partir des surcotes et PSM quotidiennes observées sur la période 1999-2010 sont utilisés avec la pression quotidienne sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N] simulée par les 15 MCG sur la période historique commune aux observations et de 2006 à 2100 pour deux trajectoires du changement climatique (RCP4.5 et RCP8.5). Sur la période historique, les P90 mensuels observés et simulés ont des distributions très proches pour les 15 MCG utilisés avec des moyennes, médiane et écart-types qui ne présentent pas de différences significatives (non montré). La pression atmosphérique est en effet particulièrement bien simulée par les modèles climatiques avec peu de biais.

Pour les deux trajectoires du changement climatique, la hauteur des fortes surcotes (P90 mensuels) pourraient rester stationnaires (figure 4). Plus de 2/3 des 15 modèles montrent cette stationnarité conférant une robustesse statistique à ce résultat. Les résultats sont similaires pour la fréquence mensuelles des surcotes dépassant le P90 (non montré). Cette stationnarité est cohérente avec d'autres travaux issus des modèles globaux du climat montrant une stabilité des conditions barométriques hivernale sur la France et la Méditerranée d'ici à 2100 (Ullmann *et al.*, 2014).

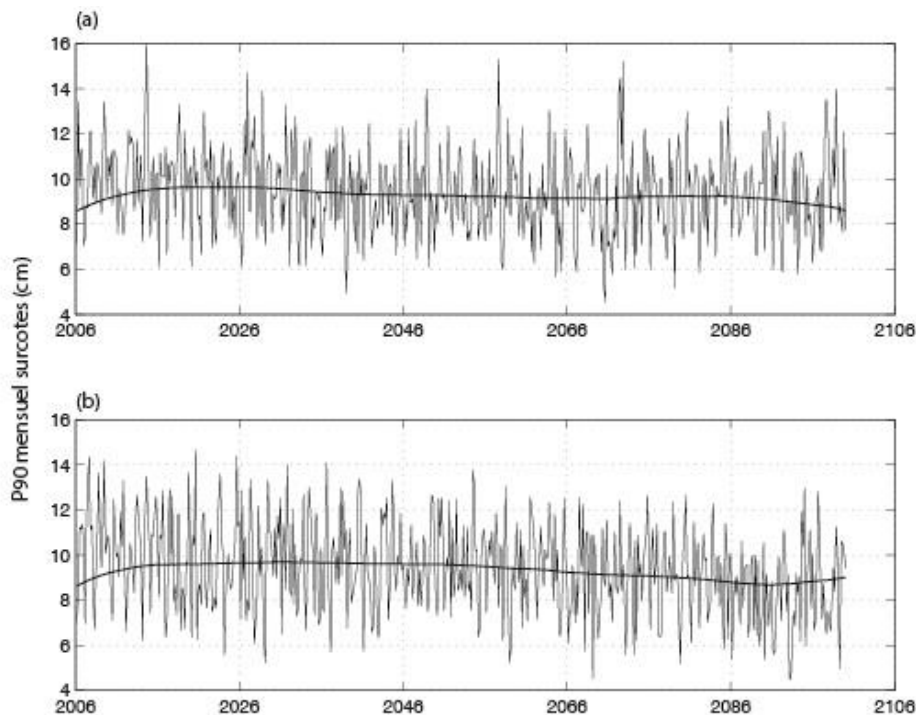


Figure 4. Moyenne multi-modèle (des 15 MCG) du P90 mensuel des surcotes à Monaco issu de la simulation quotidienne des surcotes par la régression linéaire avec les PSM sur la fenêtre [3-10°E]-[40-45°N] comme prédicteurs pour (a) la trajectoire RCP4.5 et (b) la trajectoire RCP8.5. Le trait plein représente les P90 mensuels filtrés par un filtre de Butterworth passe-bas ne conservant que les cycles > 30 ans.

Conclusion

Les variations quotidiennes des surcotes à Monaco sont corrélées avec les variations de la pression atmosphérique centrées sur les côtes méditerranéennes françaises ([3-10°E]-[40-45°N]). Un modèle de régression linéaire avec la pression quotidienne moyenne sur ce secteur comme prédicteur des surcotes quotidiennes à Monaco permet de simuler de façon robuste la variabilité interannuelle des plus fortes surcotes. Celles-ci pourraient rester stationnaires d'ici à 2100 selon deux trajectoires du changement climatique (RCP4.5 et RCP8.5). Cependant,

l'inéluctable hausse du niveau marin moyen de la Méditerranée liée à l'effet stérique (et à la fonte des glaces) va relever le niveau de base sur lequel se produiront ces phénomènes météorologiques intenses ce qui pourrait malgré tout augmenter le risque de submersion le long du littoral de la Côte d'Azur

Remerciement : Remerciement à la Principauté de Monaco pour le contrat d'étude qui a permis la réalisation de ce travail de recherche.

Bibliographie

Guyard L., 2017. *Surcotes marines et risque de submersion à Monaco : variabilité contemporaine et future (1998-2100)*. Mémoire de Master 2 SEME. Université de Bourgogne, 49p.

IPCC., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.32. Jacobsen SE, Jensen CR, Liu F (2012) Improving crop

Paskoff R., 1993. *Côtes en Danger. Pratiques de la Géographie*. Masson: Paris

Pennell C, Reichler T., 2011. On the effective number of climate models. *Journal of Climate*, **24**: 2358–2367, DOI: 10.1175/2010JCLI3814.1.

Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., 2002. Recent evolution of surges-related events in the northern Adriatic area. *Journal of Coastal Research*, **18**, 537–554.

Santer B.D., Taylor K.E., Gleckler P.J., Bonfils C., Barnett T.P., Pierce D.W., Wigley T.M.L., Mears C., Wentz F.J., Bruggemann W., Gillett N.P., Klein S.A., Solomon S., Stott P.A., Wehner M.F., 2009. Incorporating model quality information in climate change detection and attribution studies. *Proceeding of the National Academy of Sciences USA*, **106**: 14778–14783.

Ullmann A., Moron V., 2008. Weather regimes and sea surges variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20th century. *International Journal of Climatology*, **28**, 159-171, DOI: 10.1002/joc.1527

Ullmann A., Fontaine B., Roucou P., 2014. Euro-Atlantic weather regimes and Mediterranean rainfall patterns: present-day and expected changes under CMIP5 projection. *International Journal of Climatology*, **34**, 2634-2650, DOI: 10.1002/joc.3864

Wise M., Calvin K., Thomson A., Clarke L., Bond-Lamberty B., Sands R., Smith S.J., Janetos A., Edmonds J., 2009. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, **324**: 1183–1186, DOI: 10.1126/science.1168475.