

---

## Les types de temps associés aux risques d'inondations et d'érosions en Camargue : éléments de diagnostic et de prospectives pour le 21<sup>e</sup> siècle (1993-2100)

Albin Ullmann et François Sabatier

---



### Édition électronique

URL : <http://echogeo.revues.org/12190>  
DOI : 10.4000/echogeo.12190  
ISSN : 1963-1197

### Éditeur

Pôle de recherche pour l'organisation et la  
diffusion de l'information géographique  
(CNRS UMR 8586)

### Référence électronique

Albin Ullmann et François Sabatier, « Les types de temps associés aux risques d'inondations et d'érosions en Camargue : éléments de diagnostic et de prospectives pour le 21<sup>e</sup> siècle (1993-2100) », *EchoGéo* [En ligne], 14 | 2010, mis en ligne le 16 décembre 2010, consulté le 30 septembre 2016. URL : <http://echogeo.revues.org/12190> ; DOI : 10.4000/echogeo.12190

---

Ce document a été généré automatiquement le 30 septembre 2016.



EchoGéo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International

---

# *Les types de temps associés aux risques d'inondations et d'érosions en Camargue : éléments de diagnostic et de prospectives pour le 21<sup>e</sup> siècle (1993-2100)*

Albin Ullmann et François Sabatier

---

## Introduction

- <sup>1</sup> La Camargue est une des zones littorales françaises les plus fragiles face aux aléas climatiques. En effet, cet espace deltaïque littoral de 1500 km<sup>2</sup> (figure 1) présente une double vulnérabilité face à de potentielles attaques venant de la mer. Tout d'abord, la topographie basse et sableuse rend cet espace naturel protégé particulièrement vulnérable face aux risques d'érosion et de submersion (illustration 1, Ullmann A. ; Sabatier et Suanez, 2003 ; Sabatier et al., 2009). Ensuite, les nombreuses activités humaines (tourisme dans la partie occidentale et économie portuaire à l'extrémité orientale) donnent à la Camargue le statut de zone à forts enjeux économiques. Le principal aléa climatique qui affecte cet espace correspond aux surcotes marines, c'est-à-dire lorsque le niveau marin local s'élève brutalement au niveau de la côte sous l'effet des conditions météorologiques dites de tempêtes (Pirazzoli, 2000 ; Ullmann et al., 2008). De plus, les fortes vagues et houles qui peuvent déferler le long des côtes camarguaises sont autant d'événements pouvant engendrer des dégâts importants (illustration 1 ; Ruggiero et al., 2001). Le 8 novembre 1982, le quotidien « La Provence » titrait : « Vent fou sur la Provence, [...] bateaux brisés : tempête de sud-est, rafales entre 90 et 100 km/h ». Le lendemain, le quotidien titrait : « Tempêtes : 11 morts et des dégâts considérables ; la mer a envahi les Saintes-Maries » en référence à ce qui s'était déroulé la veille. Le 18 décembre

1997, le quotidien « La Provence » titrait : « Neige et tempête sur toute la région [...] à Salins de Giraud, une digue frontale a cédé [...] vents de 120 km/h ». Le lendemain : « Tempête : l'inondation est venue de la mer ».

- 2 L'objectif de ce travail, mené à plusieurs échelles spatiales, est d'évaluer l'influence des grands types de circulation atmosphérique extratropicale (dont le domaine d'action s'étend sur plusieurs dizaines de millions de km<sup>2</sup>) sur la probabilité du risque de fortes surcotes et de fortes vagues en Camargue. L'intérêt est de relier ces phénomènes hydrométéorologiques locaux à la circulation atmosphérique de vaste échelle spatiale, comblant ainsi le hiatus existant entre l'échelle de la simulation à long terme du climat par les modèles de circulation générale (les échelles vastes) et l'échelle des études d'impacts (l'échelle locale). L'article se propose également d'estimer comment la fréquence de ces grands types de circulation pourrait évoluer dans un climat futur afin d'apporter un premier élément de réponse sur l'évolution des conditions atmosphériques généralement associées aux tempêtes en Camargue face au changement climatique attendu au 21<sup>e</sup> siècle.

Figure 1 - Localisation de la Camargue

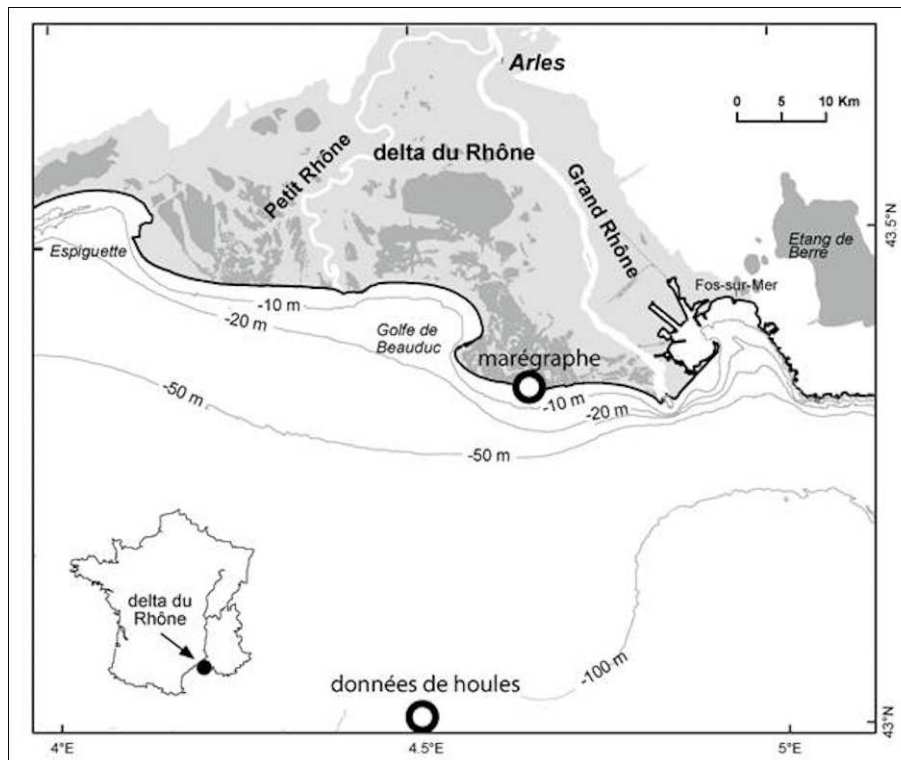


Illustration 1a - Erosion du cordon dunaire (98 cm) mesuré à l'est des Saintes-Maries-de-la-Mer le lendemain de la surcote de 80 cm du 04/12/2003 ; illustration 1b - Submersion marine dans l'Hérault lors de la tempête du 18/12/1997. Surcote de 80 cm



Les dynamiques de submersion et d'érosion étant quasiment similaires tout autour du Golfe du Lion, la photo 1b, prise dans l'Hérault, est une bonne illustration des submersions pouvant également se produire en Camargue.

Auteur : 1a : Ullmann, 2003 ; 1b : DREAL LR, 1997.

## Données et méthodes

- 3 Cette étude se base sur l'analyse des surcotes quotidiennes enregistrées au marégraphe du Grau-de-la-Dent et des hauteurs significatives de vague mesurées au large des Saintes-Maries-de-la-Mer en Camargue sur la période 1993-2002.

### Niveau marin et hauteur significative de vague

- 4 La série marégraphique quotidienne (12h TU) du Grau-de-la-Dent (43,3°N – 5,0°E) de 1993 à 2002 a été analysée dans cette étude. Les données proviennent de la Compagnie de Salins du Midi et de l'Est et sont exprimées par rapport au système altimétrique de référence du *Niveau Général Français* (NGF). Nous rappelons que les surcotes enregistrées au niveau des marégraphes ne témoignent pas finement des niveaux de tempête réellement atteints sur les plages. En effet, les marégraphes n'intègrent pas le basculement du niveau d'eau lié au déferlement (*set-up*) sauf durant les tempêtes extrêmes pendant lesquelles des vagues se brisent avant le marégraphe. Ensuite, les phénomènes d'élévation du niveau d'eau du jet de rive (*run-up*) ne sont pas mesurés (puisque'ils se produisent sur les plages et non pas au niveau des marégraphes). Les marégraphes procurent donc une estimation du niveau de la mer en un point sans véritablement intégrer les processus d'élévations directement liés au déferlement. Toutefois ces données sont les seules à fournir une chronologie à haute fréquence du niveau d'eau atteint par la mer près de côtes et elles peuvent donc être raisonnablement utilisées pour estimer les surcotes marines liées aux tempêtes. Pour chaque valeur quotidienne de hauteur d'eau enregistrée, la marée astronomique correspondante a été calculée à l'aide du logiciel POLIFEMO (Tomasin, 2005). La soustraction de la hauteur de la marée astronomique des données marégraphiques brutes permet d'extraire la surcote marine uniquement, définie comme l'élévation anormale du plan d'eau par rapport à la hauteur normalement atteinte par la marée astronomique au niveau des marégraphes. L'utilisation des surcotes par rapport aux données marégraphiques brutes permet ainsi d'analyser aussi indépendamment que possible les variations du niveau marin liées aux

conditions météorologiques locales. Les surcotes étant calculées au niveau du marégraphe, le terme de surcote utilisé dans le texte fera référence aux surcotes marégraphiques uniquement, c'est à dire à la surcote atteinte au niveau du marégraphe. En effet, les surcotes marégraphiques sous-estiment parfois les niveaux marins réellement atteints à la côte car elles ne prennent pas en compte l'action des houles dans la zone de déferlement. Néanmoins, les surcotes marégraphiques restent de bons indicateurs du niveau marin forcé par les conditions atmosphériques.

- 5 Des hauteurs significatives de vague ( $H_s$ , en mètre) entre 1993 et 2002 ont été utilisées dans ce travail. Ces données sont issues de sorties d'un modèle de propagation à l'échelle de la Méditerranée (Wave Watch III). Les données ont été validées avec des mesures de houles et les mesures satellitales de Topex-Poseidon, Ers-1 and Ers-2 et Geosat Follow-On (GlobOcéan, 2007). Le point d'extraction des caractéristiques de la houle est localisé au large des Saintes-Maries-de-la-Mer (43°N – 4.30°E). Pour ce travail, nous analyserons la hauteur de vague mesurée à 12h TU uniquement (synchrone aux données marégraphiques).

## Pression atmosphérique de surface

- 6 Cette étude se base tout d'abord sur l'analyse du champ de pression atmosphérique quotidienne observée de 1993 à 2002 (réanalyses ERA-40). Ces données, exprimées en hectopascals (hPa), ont une résolution spatiale de 2,5° en longitude et latitude et couvrent l'ensemble du globe. Elles ont été extraites sur la fenêtre spatiale de 40°W à 40°E et de 30°N à 70°N.
- 7 L'analyse du champ de pression atmosphérique a été simulée par le modèle de circulation générale ECHAM-MPI de l'institut Max Planck de Hambourg. Ce modèle a été choisi pour sa bonne compétence dans la simulation de la dynamique atmosphérique des latitudes moyennes (Van Ulden and Van Oldenborgh, 2006). Dix-sept simulations de pression atmosphérique quotidienne de surface ont été réalisées pour la période 1950-2100, chacune avec une légère variation des conditions initiales afin d'appréhender la sensibilité du modèle climatique. Les dix-sept expériences de simulation ont été effectuées par un modèle forcé par le scénario A1b (scénario médian du changement climatique) de l'évolution de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (IPCC, 2007). Sur la période contemporaine (1950-2000), le modèle est forcé par les observations de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Pour le futur, le modèle prend en considération l'augmentation projetée pour le scénario A1b jusqu'en 2100. Les données sont extraites sur la fenêtre spatiale de 40°W à 40°E et de 30°N à 70°N et ont été extrapolées sur la même grille régulière que les réanalyses ERA-40 (2,5° \* 2,5°).

## Classification en type de temps

- 8 Les champs de pression atmosphérique observée et simulée ont été classés en grands types de temps selon la méthode des nuées dynamiques ou « k-means ». Un type de temps représente une géographie barométrique récurrente et persistante agissant sur une vaste échelle spatiale (> 30 000 km<sup>2</sup> ; Vautard, 1990 ; Plaut et Simonnet, 2002). La classification du champ barométrique de surface en type de temps permet ainsi de synthétiser la circulation atmosphérique extratropicale. En effet, même si les conditions atmosphériques sont chaque jour uniques, il existe une certaine redondance dans les

trajectoires et la circulation (Hufty, 2001). Une analyse en composante principale permet de « compresser » la matrice spatio-temporelle des pressions atmosphériques quotidiennes en 11 composantes principales qui représentent 90 % de la variance totale. La méthode des nuées dynamiques ou « k-means » (Diday et Simon, 1976) est appliquée aux 11 composantes principales pour extraire 5 classes qui offrent une bonne représentation des types de circulation atmosphérique dans la zone extratropicale (figure 2 ; Plaut et Simmonet, 2002 ; Moron et Plaut, 2003). Ces 5 types de temps sont ensuite mis en relation (corrélations, composites) avec les surcotes au Grau-de-la-Dent et les hauteurs de vague au large des Saintes-Maries-de-la-Mer afin d'appréhender la ou les configurations barométriques associées aux événements les plus forts.

## Résultats

### Surcotes marégraphiques et vagues : variabilité quotidienne à mensuelle

- 9 A l'échelle quotidienne, la variabilité de la hauteur significative des vagues aux Saintes-Maries-de-la-Mer et des surcotes au Grau-de-la-Dent ne présente pas de corrélation significative sur la période 1993-2002 ( $r = 0,21$ ). La hauteur des vagues à un endroit donné est certes en partie associée aux conditions météorologiques locales et instantanées, mais dépend aussi des conditions agissant au niveau des aires génératrices. Ces dernières, généralement appelées « mer du vent », sont situées très au large des côtes, là où des vents forts soufflent à la surface de la mer. Les vagues s'y forment de manière chaotique, mais à mesure de leur propagation hors de la mer du vent, elles se regroupent dans des trains de vagues à l'aspect plus régulier et viennent déferler au niveau du littoral. La hauteur significative de vague va donc surtout dépendre de la force du vent dans l'aire génératrice, de sa durée d'action mais aussi du « fetch », c'est-à-dire de la distance sur laquelle le vent souffle au dessus de la mer sans changer notablement de vitesse et de direction. Pour la hauteur des surcotes, la variabilité quotidienne dépend principalement des conditions météorologiques locales et notamment de la pression atmosphérique et de la force et direction des vents. A l'échelle quotidienne, les vagues et les surcotes sur la même zone géographique locale sont donc associées à des processus hydrodynamiques différents, purement locaux pour les surcotes et dépassant l'échelle locale pour les vagues.
- 10 En considérant la fréquence mensuelle des hauteurs significatives de vague supérieures à 4 m et des surcotes supérieures à 50 cm (c'est-à-dire supérieures au percentile à 95 % calculé sur les séries quotidiennes de 1993 à 2002), la corrélation est significative à plus de 99 % selon un test en T de Student ( $r = 0,70$ ). Autrement dit, les mois à forte (faible) fréquence de fortes surcotes sont associés à une forte (faible) fréquence de fortes vagues. Cette corrélation semble donc indiquer un lien entre la variabilité interannuelle des conditions atmosphériques associées aux fortes vagues et celle associées aux fortes surcotes en Camargue.

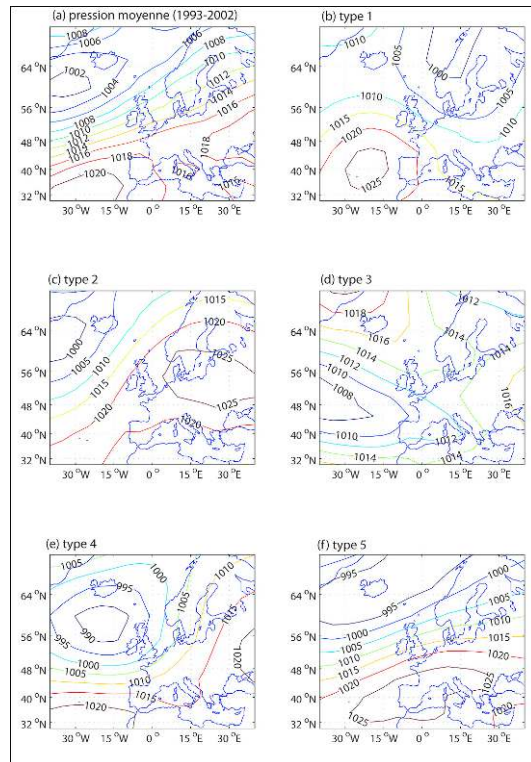
## Types de temps et hauteur de vague et de surcote marégraphique

### Types de temps

- 11 Le premier type de temps (figure 2b) présente un anticyclone des Açores renforcé et une dépression d'Islande plus creuse et décalée vers la Scandinavie. Ce type de temps se traduit par une circulation atmosphérique de secteur sud-ouest sur la France et la Méditerranée occidentale et s'apparente au type « Atlantic Ridge » étudié dans des travaux précédents (Plaut et Simonnet, 2002 ; Moron et Plaut, 2003 ; Ullmann et Moron, 2008). Le deuxième type de temps (figure 2c) présente des pressions anormalement élevées sur le continent européen et s'apparente au type « East-Atlantic » (Plaut et Simonnet, 2002). La configuration suivante (figure 2d) montre une forte dépression sur l'Atlantique en position particulièrement méridionale (40°-55°N). Les conditions de pression sont anticycloniques au niveau de l'Islande et la circulation atmosphérique favorise le passage des perturbations tempérées plus au sud que la normale, notamment sur les régions méditerranéennes (Ullmann et Moron, 2008). Ce type de temps s'apparente au type « Greenland Above » (Plaut et Simonnet, 2002). Pour le quatrième type de temps (figure 2e), la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores sont décalés vers le sud. Cette géographie barométrique favorise les trajectoires méridionales des perturbations tempérées épargnant néanmoins le domaine méditerranéen. La configuration barométrique du dernier type de temps (figure 2f) est proche des conditions moyennes (figure 2a). L'anticyclone des Açores est néanmoins décalé vers le nord-est et la dépression d'Islande est légèrement plus creuse (figure 2f). Le flux d'ouest est alors accéléré correspondant au type de temps dit « zonal » (Plaut et Simonnet, 2002).



Figure 2 - (a) Champ de pression atmosphérique de surface moyen sur la période 1993-2002. (b à f) Champ de pression atmosphérique de surface moyen durant les jours de type de temps 1 à 5 sur la période 1993-2002.



### Surcotes marégraphiques, vagues et types de temps : relation moyenne

- 12 La moyenne des hauteurs quotidiennes de vague et de surcote a été calculée pour chaque type de temps (tableau 1). Les hauteurs atteintes durant les jours de type 3 sont généralement supérieures à celles atteintes durant les autres types de temps (tableau 1). Par ailleurs, l'amplitude moyenne des surcotes et des vagues est très légèrement plus importante durant le type de temps 4 (tableau 1). Un test en T de Student révèle que la moyenne des surcotes et des vagues durant le type de temps 3 est significativement (> 99 %) supérieure à la moyenne calculée sur toute la période de 1993 à 2002. Cependant, l'écart-type reste fort (tableau 1). En d'autres termes, tous les jours où la circulation atmosphérique est associée au type de temps 3 ne sont pas obligatoirement associés à des fortes surcotes ou vagues en Camargue, mais celles-ci se produisent principalement durant ce type de temps. La formation de ces événements météo-marins extrêmes est donc principalement associée au type de temps supposant un décalage méridional important des principaux rails de trajectoire des perturbations tempérées (cf. figure 2).

Tableau 1 - Moyenne et écart-type des hauteurs significatives de vague (Hs) et des surcotes calculés sur l'ensemble de la période de 1993 à 2002 et pour chaque type de temps.

	Hs (m)		Surcote (cm)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type



Type 1	2,5	0,73	9,1	15,2
Type 2	2,6	0,76	14,6	15,4
Type 3	3,1	0,9	29,2	22,3
Type 4	2,7	0,74	18,6	19,5
Type 5	2,6	0,77	12,7	18,3
Moyenne 1993-2002	2,6	0,79	16,7	17,3

- 13 Les coefficients de corrélations ont été calculés entre la fréquence mensuelle des jours de chaque type de temps et, d'une part la fréquence mensuelle des hauteurs quotidiennes de vagues > 4 m (= percentile à 95 % de la période 1993-2002), d'autre part, la fréquence mensuelle des surcotes quotidiennes > 50 cm (= percentile à 95 % de la période 1993-2002). La variabilité interannuelle de la fréquence des fortes surcotes et vagues en Camargue est significativement corrélée à celle des types de temps 3 et dans une moindre mesure à celle des types de temps 4 (tableau 2). Cependant, le seuil de significativité calculé avec un test de Student est nettement plus élevé avec le type de temps 3 (99 %) qu'avec le type de temps 4 (90 %) (tableau 2). De plus, la part de variance interannuelle commune entre la fréquence des jours de fortes surcotes et fortes vagues en Camargue et la fréquence des jours de type de temps 4 ne dépasse pas 16 % contre plus de 30 % si on considère le type de temps 3 (tableau 2). La variabilité interannuelle de la fréquence des fortes surcotes et des fortes vagues est donc principalement associée à la variabilité interannuelle du type de temps 3 qui favorise un net décalage méridional des trajectoires des perturbations tempérées, pouvant ainsi transiter sur l'ouest du bassin méditerranéen.
- 14 Il est toutefois important de discuter la relative faiblesse de variance interannuelle commune entre la fréquence du type de temps 3 et la fréquence des fortes vagues et surcotes en Camargue. En effet, les types de temps sont des constructions conceptuelles de la réalité (constructions statistiques) qui ne renseignent qu'une partie des conditions météorologiques réelles aux échelles plus fines. Les fortes surcotes et vagues en Camargue sont en effet principalement associées à la force et à la direction des vents soufflant à l'échelle du Golfe du Lion qui sont des phénomènes atmosphériques bien plus variables et transitoires que les types de temps (Pirazzoli, 2000 ; Ullmann *et al.*, 2008). Les configurations barométriques de large échelle spatiale ne peuvent donc pas intégrer toute l'information sur les surcotes et les vagues à l'échelle de la Camargue.

Tableau 2 - Corrélation entre la fréquence mensuelle des jours de chaque type de temps et la fréquence mensuelle des jours où la hauteur de vague (colonne 2) et de surcote (colonne 3) est supérieure au percentile 95 % calculé sur la période 1993-2002.

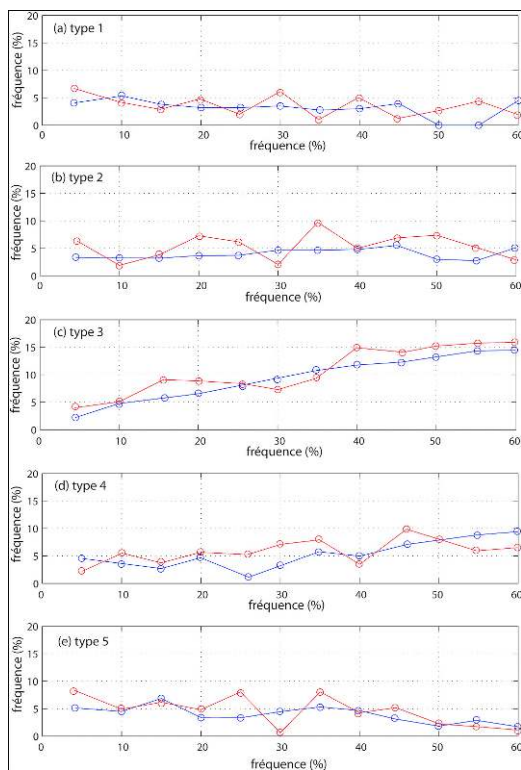
	Fréquence vagues	Fréquence surcotes
Freq. Type 1	0.11	0.01
Freq. Type 2	-0.10	-0.12

Freq. Type 3	0.57***	0.68***
Freq. Type 4	0.24*	0.40**
Freq. Type 5	-0.23*	-0.26*

Les étoiles (\*, \*\*, \*\*\*) représentent la significativité par un test en T de Student (90 %, 95 %, 99 %)

- 15 La fréquence mensuelle des surcotes > 50 cm et des vagues > 4 m a été calculée par classe de fréquence mensuelle des 5 types de temps. Plus la fréquence mensuelle du type de temps 3 augmente, plus la fréquence des surcotes > 50 cm et des vagues > 4 m est importante (figure 3). En d'autres termes, plus il y a de configurations barométriques associées à la présence d'une dépression autour du Golfe de Gascogne, plus le risque de fortes surcotes et fortes vagues en Camargue est important. En effet, la géographie barométrique du type de temps 3 est caractérisée par un fort gradient barométrique zonal entre une dépression autour du Golfe de Gascogne et des hautes pressions sur l'Europe Centrale. Cette configuration favorise l'occurrence des forts vents d'afflux de secteur sud dans le Golfe du Lion générant les fortes vagues et surcotes (Ullmann, 2008). Plus l'occurrence du type 3 est importante, plus la probabilité d'occurrence des forts vents de tempête en Camargue est donc importante. En résumé, une fréquence mensuelle du type de temps 3 nous renseigne sur la probabilité du risque de fortes surcotes et vagues à l'échelle locale en Camargue.

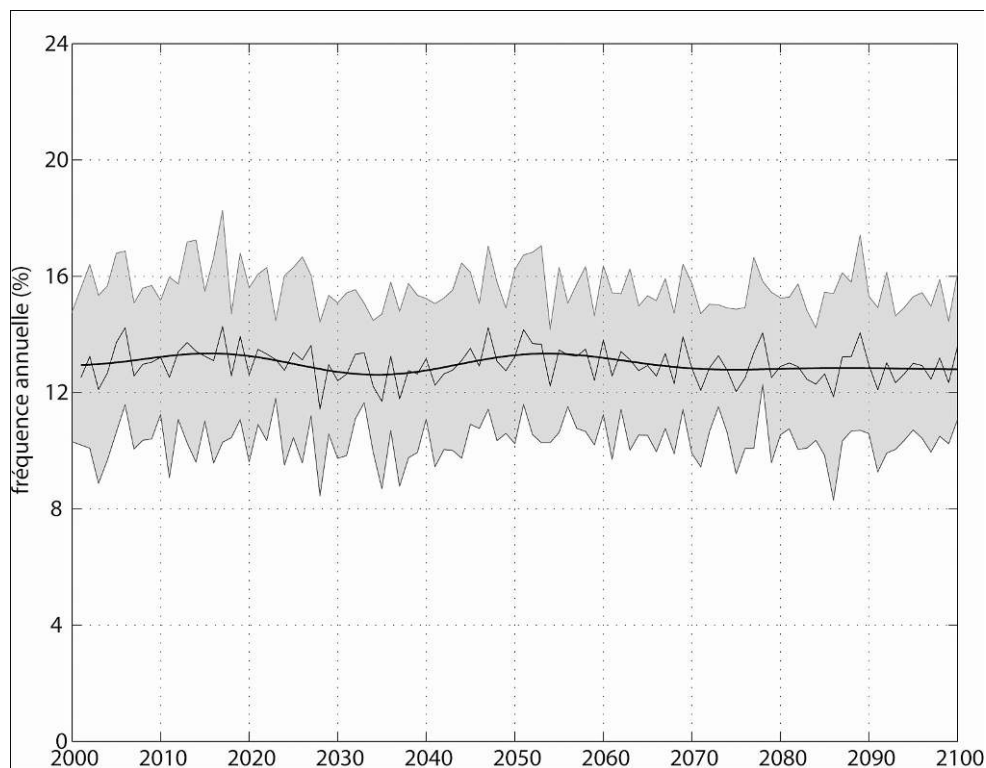
Figure 3 - Fréquence mensuelle (en %) des surcotes > 50 cm (en rouge) et des vagues > 4 m (en bleu) par classe de fréquence mensuelle de type de temps 1 à 5 (a-e).



## Types de temps des fortes surcotes marégraphiques et vagues en Camargue : variabilité au 21<sup>e</sup> siècle

- 16 Les 5 types de temps ont été extraits des 17 champs de pression atmosphérique quotidienne simulée par le modèle ECHAM-MPI sur la période de 1950 à 2100. Tout d'abord, sur la période contemporaine commune entre données observées et simulées (1993-2002), les 5 configurations barométriques obtenues via la pression atmosphérique simulée sont quasiment similaires à celle obtenues à partir des données observées (non montré). Le modèle climatique ECHAM-MPI permet donc de simuler de façon fiable les grands types de circulation atmosphérique sur le domaine extratropical (Van Ulden and Van Oldenborgh, 2006). Ensuite, à l'échelle du 21<sup>e</sup> siècle, la fréquence annuelle du type de temps montrant une dépression autour du Golfe de Gascogne associée à des hautes pressions sur l'Europe Centrale (équivalent au type 3 observé) reste presque stationnaire (figure 4). Autrement dit, la fréquence du type de temps associé au risque de fortes surcotes et vagues en Camargue sur la période 1993-2002 pourrait ne pas évoluer significativement d'ici à 2100 dans le scénario médian du changement climatique (A1b). Si la relation moyenne entre les types de temps et la fréquence / hauteur des fortes surcotes en Camargue reste identique à celle observée sur la période 1993-2002, le changement climatique à venir pourrait donc ne pas modifier significativement le risque de fortes surcotes et vagues en Camargue.

Figure 4 - Fréquence annuelle du type de temps montrant une dépression autour du Golfe de Gascogne associée à des hautes pressions sur l'Europe Centrale.



Moyenne des 17 simulations (trait noir) et variations lentes retenant uniquement les périodes plus longues que 30 ans (trait gras ; filtre butterworth passe-bas). En grisé : variabilité annuelle au sein des 17 simulations (+/- 1 écart-type). Les années sont indiquées en ordonnées de 2000 à 2100 par intervalles de 10 ans.

## Discussion et conclusion

- 17 Les fortes surcotes marines et vagues font partie des principaux aléas météo-marins associés aux risques de submersion et d'érosion du littoral camarguais. A l'échelle mensuelle, la fréquence des fortes surcotes (> 50 cm) est corrélée à celle des fortes vagues (> 4 m). La classification du champ de pression atmosphérique en types de temps permet de synthétiser la circulation atmosphérique et de déterminer ainsi les vastes géographies barométriques persistantes et récurrentes sur le domaine Europe / Nord-atlantique. Les plus fortes surcotes et vagues en Camargue sont associées au type de temps montrant une dépression autour du Golfe de Gascogne associée à des hautes pressions sur l'Europe Centrale. Cette configuration barométrique entraîne la présence d'un fort gradient barométrique zonal sur le bassin méditerranéen générant des forts vents d'afflux de secteur sud dans le bassin méditerranéen occidental. Par ailleurs, plus la fréquence mensuelle de ce type de temps est importante, plus l'occurrence des fortes vagues et surcotes augmente. Même si les types de temps n'intègrent pas toute l'information sur les conditions météo-marines locales, la fréquence d'un type de temps particulier peut néanmoins nous renseigner sur la probabilité du risque associé aux fortes surcotes et vagues à l'échelle de la Camargue. Au 21<sup>e</sup> siècle, la fréquence annuelle du type de temps associé aux plus fortes surcotes et vagues en Camargue (observation sur la période 1993-2002) pourrait rester stationnaire dans le scénario A1b du changement climatique. En considérant ce scénario qui apparaît aujourd'hui comme le plus vraisemblable pour le 21<sup>e</sup> siècle (IPPC, 2007), et si la relation moyenne observée entre les types de temps et les surcotes et les vagues en Camargue reste identique à celle observée sur la période 1993-2002, le risque de fortes surcotes et vagues en Camargue pourrait ne pas évoluer significativement.
- 18 Différents points sont cependant à discuter. Tout d'abord, les analyses basées sur 10 ans d'observations permettent certes de montrer une relation moyenne entre les types de temps et les surcotes et vagues en Camargue mais ne permettent pas d'appréhender d'éventuels changements dans cette relation moyenne. Ce point est bien sûr une limite aux prévisions pour le 21<sup>e</sup> siècle. Cependant, la disponibilité des données de vague empêche d'avoir un recul temporel plus important. Ensuite, les modèles de circulation générale ont une résolution spatiale trop large pour simuler les phénomènes météorologiques locaux. La cyclogenèse locale sur la rive nord de la Méditerranée ne peut donc pas être appréhendée. La hausse des températures de surface de la Méditerranée attendue pour le siècle à venir pourrait intensifier la cyclogenèse intra-méditerranéenne et ainsi augmenter localement le risque de tempêtes, mais également accentuer l'effet stérique et accélérer la hausse du niveau marin moyen qui pourrait augmenter la hauteur des surcotes durant les épisodes de tempête. Enfin, la notion de risque climatique fait appel à la combinaison entre l'aléa climatique et la vulnérabilité de la société. La possible stationnarité du type de temps associé à l'aléa de surcotes et fortes vagues en Camargue ne signifie donc pas obligatoirement une stationnarité du risque. En effet, l'urbanisation et l'aménagement de certains secteurs littoraux et le développement des activités socio-économiques pourraient fortement augmenter la vulnérabilité de la Camargue face à ces aléas météo-marins. La prise en compte de la vulnérabilité est donc un élément important dans les études prospectives de l'impact du changement climatique.

## BIBLIOGRAPHIE

- Diday E., Simon J.C., 1976. Clustering analysis. *Communication and Cybernetics*, 10:47-94, Digital pattern recognition.
- GlobOcean, 2007. *Climat de houle au large des Saintes Maries de la mer (Bouches du Rhône)*. Rapport pour le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digue du Delta du Rhône et de la Mer, réf : R07-080, 8 p.
- Hufty A., 2001. *Introduction à la Climatologie*. De Boeck Université Press, Bruxelles, 542 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 881 p.
- Moron V., Plaut G., 2003. The impact of El Nino southern oscillation upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter. *International Journal of Climatology*, 23, p. 363-379.
- Pirazzoli P.-A., 2000. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta*, 23, p. 643-661.
- Plaut G., Simonnet E., 2002. Large-scale circulation classification, weather regimes and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, 17, p. 303-324.
- Ruggerio P., Komar P.D., McDouglas W.G., Marra J.J., Reggie A., 2001. Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17, p. 407-419.
- Sabatier F., Samat O., Ullmann A., Suanez S., 2009. Connecting large-scale behavior with coastal management of the Rhône delta. *Geomorphology*, 107, p. 79-89.
- Sabatier F., Suanez S., 2003. Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19th century. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4, p. 283-300.
- Tomasin A., 2005. The Software "Polifemo" for tidal Analysis. *Tech. Note 202*, ISMAR-CNR, Venice, Italy.
- Ullmann A., Moron V., 2008. Weather regimes and sea surges variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20<sup>th</sup> century. *International Journal of Climatology*, 28, p. 159-171.
- Ullmann A., Pirazzoli P.-A., Moron V., 2008. Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions. *Global and Planetary Change*, 63, p. 203-214.
- Ullmann A., 2008. Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100). Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 250 p.
- Vautard R., 1990. Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*, 118, p. 2056-2081.
- Van Ulden A., Van Oldenborgh G.V., 2006. Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for regional climate scenarios: a case study for West-Central Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, p. 863-881.

## RÉSUMÉS

Les fortes surcotes marines et les fortes vagues sont les principaux aléas météo-marins associés aux risques de submersion et d'érosion du littoral camarguais. Sur la période 1993-2002, une forte fréquence mensuelle de très hautes surcotes marégraphiques est généralement associée à une forte fréquence de très hautes vagues. Ces deux phénomènes locaux se produisent principalement lorsqu'une dépression autour du Golfe de Gascogne est associée à des hautes pressions sur l'Europe Centrale. La fréquence mensuelle de ce type de temps nous renseigne sur la probabilité d'occurrence de fortes surcotes marégraphiques et vagues en Camargue. Au 21<sup>e</sup> siècle, la fréquence du type de temps associé aux plus fortes surcotes marégraphiques et vagues en Camargue pourrait rester stationnaire dans le scénario A1b du changement climatique.

High sea surges and waves are the two main hydro-meteorological phenomenon associated with coastal flooding and erosion in Camargue. For the period 1993-2002, high monthly frequencies of strong surges (recorded at the tide-gauge station) are usually associated with high frequency of strong waves. These two phenomena mainly occur during weather type showing a deep low pressure system over the Bay of Biscay associated with high pressure over Central Europe. The monthly frequency of such weather regime indicates the probability of occurrence of high surges and waves along Camargue's coast. During the 21<sup>st</sup> century, the frequency of this specific weather regime could stay stationary for the A1b climate change scenario.

## INDEX

**Mots-clés :** Camargue, changement climatique, risque, surcote marégraphique, type de temps, vagues

**Keywords :** Camargue coast, climate change, sea surges, waves, weather regimes

## AUTEURS

### ALBIN ULLMANN

Centre de Recherches de Climatologie, Faculté des Sciences Gabriel, Université de Bourgogne, Dijon. albin.ullmann@u-bourgogne.fr

### FRANÇOIS SABATIER

Aix-Marseille Université, CEREGE UMR 6635. sabatier@cerege.fr