



HAL
open science

Types de temps et risque d'inondation et d'érosion en Camargue : diagnostique et prévision au 21ème siècle (1993-2100)

Albin Ullmann, François Sabatier

► **To cite this version:**

Albin Ullmann, François Sabatier. Types de temps et risque d'inondation et d'érosion en Camargue : diagnostique et prévision au 21ème siècle (1993-2100). *EchoGéo*, 2010, 14, pp.1-5. <hal-00447097>

HAL Id: hal-00447097

<https://hal.science/hal-00447097v1>

Submitted on 14 Jan 2010

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.



HAL Authorization

Types de temps et risque d'inondation et d'érosion en Camargue : diagnostique et prévision au 21^{ème} siècle (1993-2100)

A. Ullmann ¹, F. Sabatier ²

¹ Centre de Recherches de Climatologie, Faculté des Sciences Gabriel, Université de Bourgogne, BP138, 21004 Dijon cedex, France. albin.ullmann@u-bourgogne.fr

² Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences et de l'Environnement, UMR CNRS 6635, Europôle de l'Arbois, B.P.80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04, France

Résumé

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 est généralement associée à une forte fréquence de très hautes vagues. Ces deux phénomènes locaux se produisent principalement durant le type de temps associé à une dépression autour du Golfe de Gascogne associé à des hautes pressions sur l'Europe Centrale. La fréquence mensuelle de ce type de temps nous renseigne de la probabilité d'occurrence de fortes surcotes et vagues en Camargue. Au 21^{ème} siècle, la fréquence du type de temps associé aux plus fortes surcotes et vagues en Camargue pourrait rester stationnaire dans le scénario A1b su changement climatique.

Mots-clés : type de temps, surcotes, vague, risque, Camargue, changement climatique

Abstract

High sea surges and waves are the two mains hydro-meteorological phenomenon associated with coastal flooding and erosion in Camargue. For the period 1993-2002, high monthly frequencies of strong surges are usually associated with high frequency of strong waves. These two phenomenons 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 21st century, the frequency of this specific weather regime could stay stationary for the A1b climate change scenario.

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

Introduction

La Camargue est une des zones littorales françaises les plus fragiles face aux aléas liés au climat. En effet, cet espace deltaïque littoral de 1500 km² (figure 1) présente une double vulnérabilité face à des potentielles attaques venant de la mer. Tout d'abord, la topographie basse et sableuse rend cet espace naturel protégé particulièrement vulnérable face au risque d'érosion et de submersion (Photo 1 ; 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 littoral local s'élève brutalement sous l'effet des 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 (photo 1). 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 ».

La problématique de ce travail propose tout d'abord de transcender les échelles d'espace et d'appréhender si les grands types de circulation atmosphérique extratropicale, dont le domaine d'action s'étend sur plusieurs dizaines de millions de km², nous renseignent 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 pertinente de la simulation et prévision à long-terme du climat par les modèles de circulation générale (les échelles vastes) et l'échelle pertinente des études d'impacts (l'échelle locale). La problématique propose alors 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 du risque d'inondation et d'érosion en Camargue face au changement climatique attendu au 21^{ème} siècle.

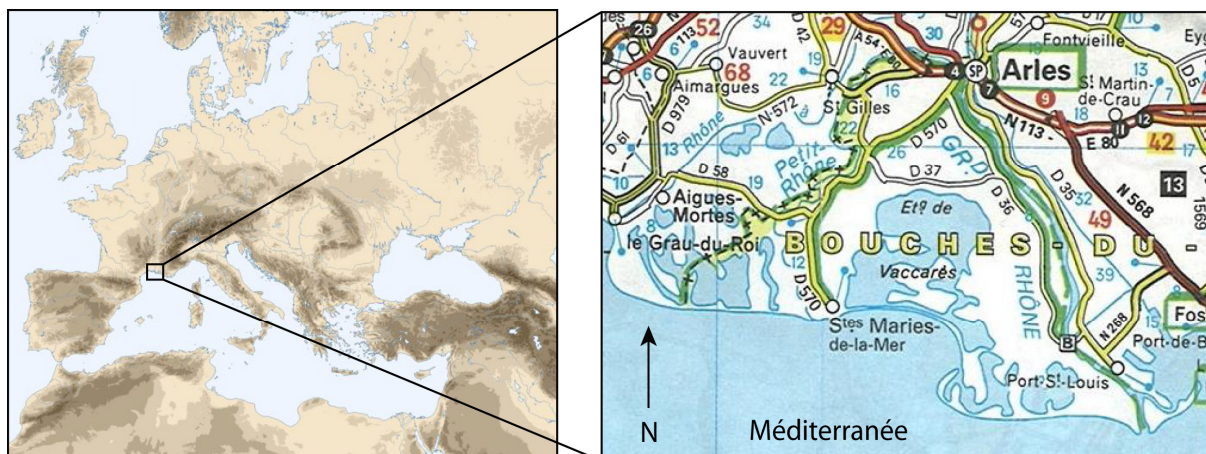


Figure 1. Localisation de la Camargue



Photo 1. (a) érosion 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 (Ullmann, 2003). Submersion marine dans l'Hérault lors de la tempête du 18/12/1997. Surcote de 80 cm (CETE Méditerranée, 1997).

2. Données et méthodes

2.1. Niveau marin et hauteur significative de vague

La série marégraphique quotidienne (12h TU) du Grau-de-la-Dent ($43,3^{\circ}\text{N} - 5,0^{\circ}\text{E}$) 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). 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 valeur de la marée astronomique des données marégraphiques brutes permet d'extraire la surcote marine uniquement, défini comme l'élévation anormale du plan d'eau par rapport à la hauteur normalement atteint par la marée astronomique. L'utilisation des séries de hauteurs de surcotes par rapport à celles des données marégraphiques brutes permet d'analyser aussi indépendamment que possible les variations du niveau marin uniquement forcé par les conditions météorologiques locales.

Les hauteurs significatives de vague (H_s) ont été mesurées par une bouée directionnelle localisée au large des Saintes-Maries-de-la-Mer ($43^{\circ}\text{N} - 4.30^{\circ}\text{E}$). Elles sont exprimées en mètres et nous indiquent l'amplitude entre le niveau du plan d'eau le plus bas et le bas mesurée durant une oscillation complète (la période est généralement comprise entre 3 et 6 secondes). Pour ce travail, nous analyserons la hauteur de vague mesurée à 12h TU uniquement (synchrone aux données marégraphiques) et sur la période de 1993 à 2002.

2.2. Pression atmosphérique de surface

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 $2,5^{\circ}$ 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 .

Les travaux se concentrent ensuite sur l'analyse du champ de pression atmosphérique simulée par le modèle de circulation générale ECHAM-MPI de l'institut Max Planck de Hambourg. Ce modèle a été choisi pour sa compétence dans la simulation de la dynamique atmosphérique des latitudes moyennes (Van Ulden and Van Oldenborgh, 2006). 17 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 17 expériences de simulations ont été effectuées par un modèle forcé par le scénario A1b 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 est forcé selon 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°).

2.3. Classification en type de temps

Les champs de pression atmosphérique observés et simulés 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 km² ; 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 certaines redondances dans les trajectoires et la circulation (Hufty, 2001). Une analyse en composante principale permet de « compresser » la matrice des pressions atmosphériques quotidiennes en points de grille 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 extra-tropicale (Plaut et Simonnet, 2002 ; Moron et Plaut, 2003). Ces 5 types de temps sont ensuite mis en relation (corrélations, composites) avec les surcotes Grau-de-la-Dent et les hauteurs de vague au large des Saintes-Maries-de-la-Mer afin d'appréhender la/les géographies barométriques associées aux événements les plus forts.

3. Résultats

3.1. Surcotes et vagues : variabilité quotidienne à mensuelle

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 (tableau 1). En effet, la variabilité temporelle de 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 les surcotes marines, la variabilité quotidienne de la hauteur des surcotes dépend des conditions météorologiques locales et notamment de la pression atmosphérique et de la force et direction des vents d'afflux, capable de pousser localement la masse d'eau vers la côte. A l'échelle quotidienne, les vagues et les surcotes d'une 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.

En considérant la fréquence mensuelle des hauteurs significatives de vagues 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 (tableau 1). 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.

| | Hauteur quotidienne | | Fréquence mensuelle > P95% | |
|---------|---------------------|---------|----------------------------|---------|
| | Hs | Surcote | Hs | Surcote |
| Hs | 1 | 0,21 | 1 | 0,70* |
| Surcote | 0,21 | 1 | 0,70* | 1 |

Tableau 1. Corrélation entre la hauteur quotidienne des surcotes au Grau-de-la-Dent et de la hauteur significative des vagues aux Saintes-Maries-de-la-Mer sur la période 1993-2002 (colonnes 2 et 3). Corrélation entre la fréquence mensuelles des hauteurs significatives quotidiennes de vagues > 4 m aux Saintes-Maries-de-la-Mer et la fréquence mensuelle des surcotes > 50 cm au Grau-de-la-Dent sur la période 1993-2002. Les étoiles indiquent le seuil de significativité à 99% par un test en T de Student.

3.2. Types de temps et hauteur de vague et de surcote

3.2. Types de temps

Le premier type de temps (figure 2b) présente un anticyclone des Açores renforcé (figure 2a) et une dépression d'Islande plus creuse et décalée vers la Scandinavie (figure 2b). Ce type de temps montre une circulation atmosphérique de secteur sud-ouest sur la France et la méditerranée occidentale et s'apparente au type « Atlantic Ridge » montré 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).

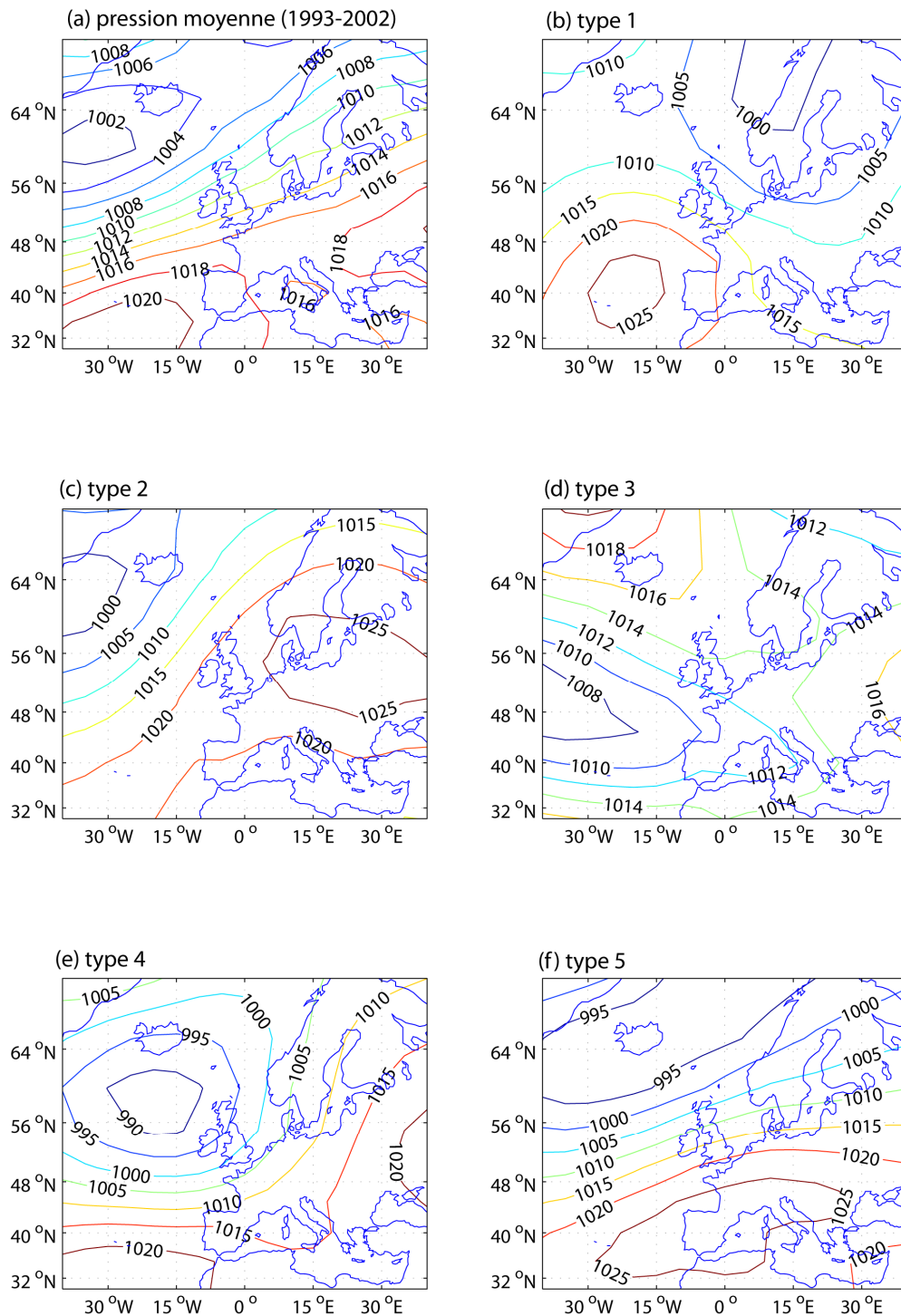


Figure 2. (a) Champ de pression atmosphérique de surface moyen sur la période 1993-2002. (b à f) Champ de pression atmosphérique de surface moyen durant les jours de type de temps 1 à 5 sur la période 1993-2002.

3.3. Surcotes, vagues et types de temps : relation moyenne

La moyenne des hauteurs quotidiennes de vague et de surcote a été calculé pour chaque type de temps (tableau 2). Les hauteurs atteintes durant les jours de type 3 sont généralement très supérieures à celle atteintes durant les autres types de temps (tableau 2). Par ailleurs, l'amplitude moyenne des surcotes et des vagues est également légèrement plus importante durant le type de temps 4 que durant les autres types de circulation atmosphérique (tableau 2). 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 2). 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 la plupart d'entre elles se produisent durant ce type de temps. La formation de ces événements météo-marin extrêmes est donc principalement associée au type de temps supposant un décalage importants vers le sud des principaux rails de trajectoire des perturbations tempérées (cf. figure 2).

| | 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 |
| Climatologie | 2,6 | 0,79 | 16,7 | 17,3 |

Tableau 2. Moyenne et écart-type des hauteurs significatives de vagues (Hs) et des surcotes calculés sur l'ensemble de la période de 1993 à 2002 (climatologie) et pour respectivement chaque type de temps de 1 à 5

Les corrélations ont été calculées entre la fréquence mensuelle des jours de chaque type de temps et la fréquence mensuelle des hauteurs quotidiennes de vagues > 4 m (= percentile à 95% de la période 1993-2002) d'une part et la fréquence mensuelle des surcotes quotidiennes > 50 cm (= percentile à 95% de la période 1993-2002) d'autre part. La variabilité interannuelle de la fréquence des fortes surcotes et vagues en Camargue est significativement corrélée à celle du type de temps 3 et 4 (tableau 3). Cependant, le seuil de significativité est nettement plus élevé avec le type de temps 3 (99%) qu'avec le type de temps 4 (90%) (tableau 3). 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 3). 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 méridionale des trajectoires des perturbations tempérées, pouvant ainsi transiter sur le bassin méditerranéen occidentale.

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 associées aux fortes surcotes et vagues en Camargue. Ces dernières sont en effet principalement associées aux à la force et à la direction des vents soufflant à l'échelle du Golfe du Lion et aux 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.

| | Freq. vagues | Freq. 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* |

Tableau 3. Corrélacion 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. Les étoiles (*, **, ***) représente la significativité par un test en T de Student (90%, 95%, 99%)

La fréquence mensuelle des surcotes > 50 cm et des vagues > 4 m a été calculé par classe de fréquence mensuelle des 5 types de temps. Le type de temps 3 est nettement associé aux plus fortes surcotes et vagues en Camargue (figure 3). En effet, 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 importante. Une fréquence mensuelle du type de temps 3 nous renseigne donc de la probabilité du risque de fortes surcotes et vagues à l'échelle locale en Camargue.

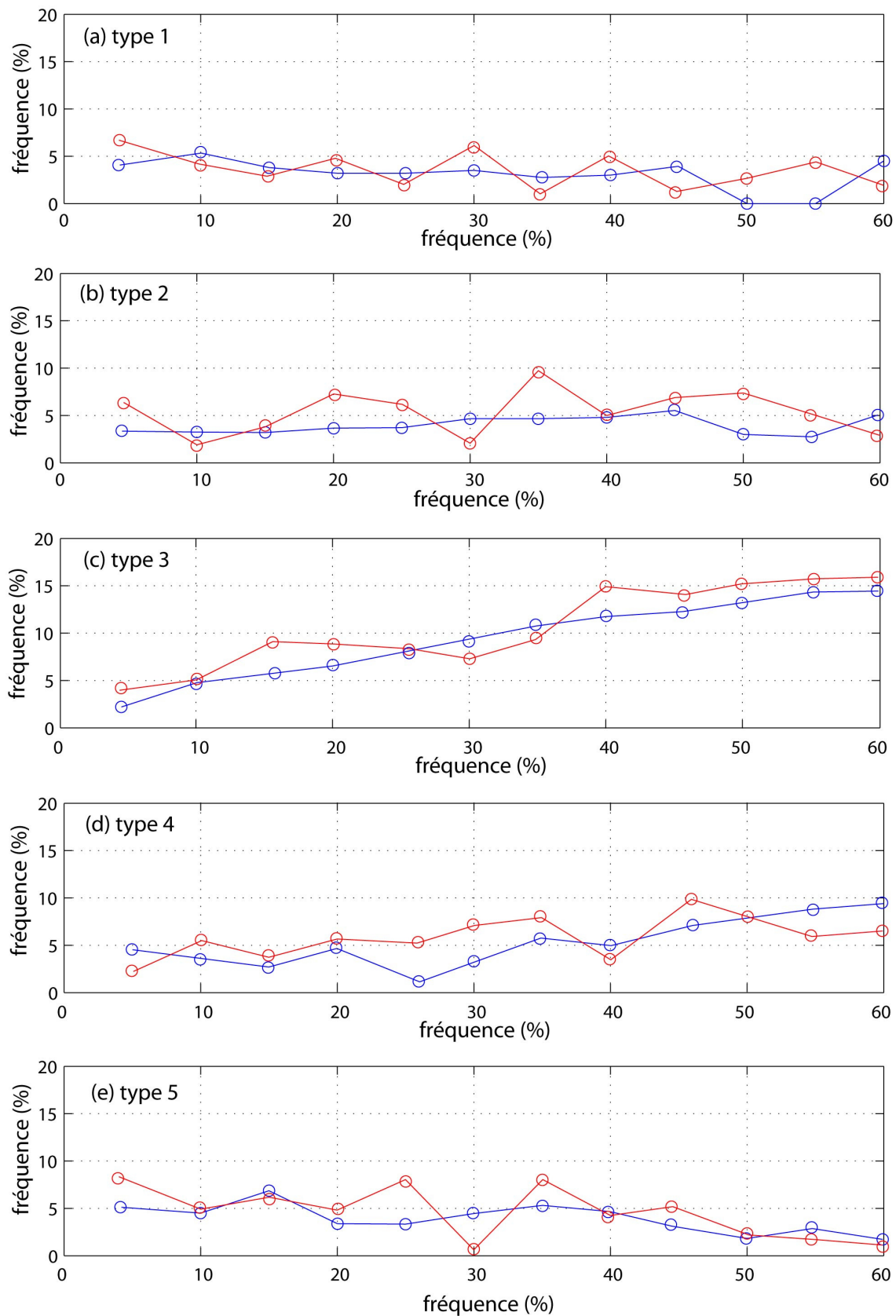


Figure 3. Fréquence mensuelle (en %) des surcotes > 50 cm (en rouge) et des vagues > 4 m (en bleu) par classe de fréquence mensuelle de type de temps 1 à 5 (a-e).

3.3. Types de temps et risque de fortes surcotes et vagues au 21^{ème} siècle

Les 5 types de temps ont été extraits du champ de pression atmosphérique quotidien simulé par le modèle ECHAM-MPI sur la période de 1950 à 2100 et pour chacune des 17 expériences de simulation. 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 quasi-similaires à celle extraites à partir des données observées (non montré). Le modèle ECHAM-MPI de climat permet donc de simuler de façon robuste les grands types de circulation atmosphérique sur le domaine extratropical (Van Ulden and Van Oldenborgh, 2006). Ensuite, à l'échelle du 21^{ème} 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 pourrait ne pas évoluer significativement d'ici à 2100 dans le scénario médian du changement climatique (A1b). La fréquence de ce type de géographie barométrique associé à la présence d'une dépression autour du Golfe de Gascogne pourrait également rester stationnaire dans le scénario B2 (optimiste) et A2 (pessimiste) d'émission de gaz à effet de serre pour le 21^{ème} siècle (Ullmann, 2008). Le changement climatique à venir pourrait donc ne pas modifier significativement le risque de fortes surcotes et vagues en Camargue.

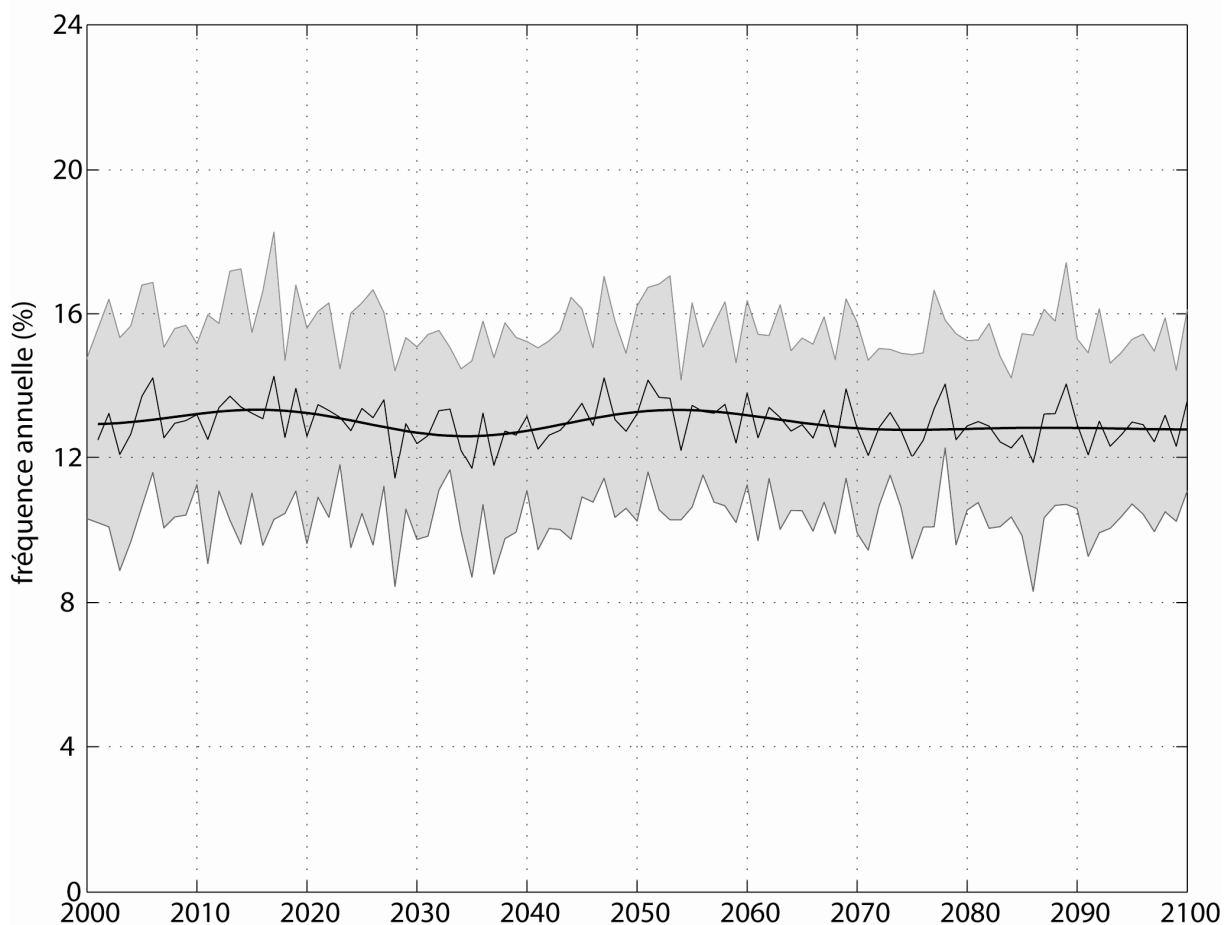


Figure 4. Fréquence annuelle du type de temps montrant une dépression autour du Golfe de Gascogne associée à des hautes pressions sur l'Europe Centrale. Moyenne des 17 simulations (trait noir) et variations lentes retenant uniquement les périodes plus longues que 30 ans (trait gras). En grisée : variabilité annuelle au sein des 17 simulations (+/- 1 écart-type).

Discussion et conclusion

Les fortes surcotes marines et vagues sont les 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. De plus, 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 de la probabilité du risque associé aux fortes surcotes et vagues à l'échelle de la Camargue. Au 21^{ème} siècle, la fréquence annuelle du type de temps associé aux plus fortes surcotes et vagues en Camargue pourrait rester stationnaire dans le scénario A1b du changement climatique. Le changement climatique à venir le plus vraisemblable (celui associé au scénario A1b ; IPCC, 2007) pourrait donc ne pas modifier significativement les risques liés aux surcotes et vagues en Camargue.

Différents points sont cependant à discuter. Tout d'abord, 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 océanique de la méditerranée attendue pour le siècle à venir pourrait intensifier la cyclogenèse intra-méditerranéenne et ainsi augmenter localement le risque de tempêtes. Ensuite, 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 aux 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.

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.

Moron V, Plaut G. 2003. The impact of El Niño southern oscillation upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter. *International Journal of Climatology* **23**: 363–379.

- Pirazzoli PA. 2000. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta* **23**: 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**: 303–324.
- Sabatier F., Samat O., Ullmann A., Suanez S., 2009. Connecting larg-scale behaviour with coastal management of the Rhône delta. *Geomorphology* **107**: 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**: 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 20th century. *International Journal of Climatology* **28**: 159–171.
- Ullmann A, Pirazzoli PA, Moron V. 2008. Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions. *Global and Planetary Change* **63**: 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 successros. *Monthly Weather Review* **118**: 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**: 863-881.