



*IMPACT DES EVENEMENTS EXTREMES
(TEMPETES, SURCOTES) SUR LES
HYDROSYSTEMES DU LITTORAL
MEDITERRANEEN DANS LE CADRE DU
CHANGEMENT CLIMATIQUE*

*IMPACT OF STORMS AND SURGES ON
MEDITERRANEAN HYDRO-SYSTEMS
ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE*

Programme IMPLIT
Rapport de fin de contrat

CEREGE, UMR 6635 CNRS,
Europôle Méditerranéen de
l'Arbois, BP 80, 13545 Aix
en Provence



MORON Vincent
SABATIER François

Date : 31/05/2007
N° de contrat : XXXXXX
Date du contrat : 02/05/2007

Remarques concernant ce document

- ❖ La mise en forme de ce rapport, hormis sa partie scientifique et l'éventuelle partie confidentielle, doit être respectée.
- ❖ Merci de limiter la taille de votre document à 5Mo.
- ❖ Votre rapport doit nous parvenir sous forme électronique sur CD ainsi que sous format papier en 5 exemplaires au moins pour le responsable du programme et en 1 exemplaire pour son animateur scientifique, en recto-verso, interligne simple, sans couverture plastique ni spirales. Des exemplaires supplémentaires, à la charge du ou des bénéficiaire(s), seront éventuellement demandés.
- ❖ Les versions électroniques des résumés et du rapport de synthèse de votre rapport doivent impérativement nous parvenir au moins sous format modifiable rtf afin de pouvoir être réutilisés pour valorisation ou publiés (après relecture de votre part), ainsi que sous format pdf.
- ❖ Les documents de ce rapport, en dehors de l'éventuelle partie confidentielle, serviront aussi bien pour l'évaluation du projet que pour la valorisation des résultats.

Rapport de synthèse
(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

(Maximum 20 pages, hors liste des publications et autres valorisations)

Merci de rédiger l'ensemble de cette partie de manière à ce qu'elle soit aisément compréhensible par un utilisateur non spécialiste.

***IMPLIT (Impact des événements extrêmes (tempêtes,
surcotes) sur les hydro-systèmes du littoral
méditerranéen dans le cadre du changement climatique***

AO GICC-2

Coordination : Vincent Moron et François Sabatier

Partenaires

CEREGE (C. Brunel, S. Meulé, V. Moron, F. Sabatier, A. Ullmann)

CETMEF Aix en Provence (P. Gaufrière)

CETMEF Compiègne (P. Sergent et V. Laborie)

EID (H. Heurtefeux)

UTC (A. Ouashine)

Tour du Valat (P. Chauvelon et M. Pichaud)

Contexte général

Le niveau marin est conditionné par de multiples facteurs à de nombreuses échelles de temps. IMPLIT s'est focalisé sur **les variations du niveau marin sur les échelles de temps comprises entre quelques heures et une centaine d'années sur les côtes du Golfe du Lion avec une focalisation particulière sur le delta du Rhône**. A une échelle comprise entre quelques heures et quelques jours, le principal forçage des variations du niveau de la mer est lié à l'activité des perturbations extratropicales synoptiques¹. Ces perturbations entraînent une élévation du niveau de la mer en abaissant la pression atmosphérique et les vents de surface associés tendent à entraîner les eaux de surface selon leur direction et leur intensité. A une échelle comprise entre 10 et 100 ans, les apports sédimentaires par les fleuves mais aussi les variations thermiques régionales et globales² conditionnent le niveau de la mer. Ce dernier forçage apparaît particulièrement sensible dans le cadre du changement climatique associé avec les perturbations anthropiques de la composition chimique de l'atmosphère. L'érosion côtière contemporaine et future est conditionnée par l'élévation moyenne de la mer, associée en grande partie avec la hausse des températures, mais aussi par les tempêtes. En effet, les vagues sont alors particulièrement agressives et le transport sédimentaire est maximal. La hausse transitoire du niveau de la mer permet aux houles de se briser sur la plage et d'éroder le cordon dunaire. De plus, ces épisodes rares et violents s'accompagnent de submersions marines qui peuvent potentiellement causer des dégâts aux infrastructures humaines.

Objectifs généraux du projet

Le projet multi-disciplinaire IMPLIT s'est intéressé à **l'analyse des tempêtes et leurs conséquences géomorphologiques dans le Golfe du Lion**. Le volet climatologique (phase 1) s'est attaché à valider et analyser les enregistrements marégraphiques disponibles, et déterminer les conditions atmosphériques associées aux variations du niveau marin sur la période ~1900-2100. Les conditions de la réponse morphologique côtière (variations de la position du rivage, dépôts d'*overwash*, changements des profils de plages) face aux forçages physiques (vent, marégraphie, houle) sont d'abord analysées dans la phase 2 à différentes échelles spatio-temporelles. Plusieurs modélisations de l'évolution de profils durant les tempêtes ont été ensuite développées. Enfin, la modélisation de l'hydro-système du Vaccarès (phase 3) avait pour objectif de fournir une analyse des contraintes de gestion hydraulique de l'île de Camargue en conditions hydro-climatiques extrêmes, de développer un outil simplifié et évolutif de simulation du fonctionnement hydrologique et hydraulique du système lagunaire du Vaccarès pour l'aide à la décision dans la gestion de crue et la prospective.

Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)

Phase 1. Analyse marégraphique et climatique

- Analyse de la fréquence des niveaux marins bruts et des surcotes à Marseille-Endoume (depuis 1885)
- Analyse et validation des séries marégraphiques du Grau de la Dent (1974-1995), Port-Vendres (1983-1997) et Sète (1986-1999) grâce au logiciel NUNIEAU et production de séries horaires du niveau marin brut et de la surcote marine³ à ces stations. Il avait été prévu de traiter une période plus longue au Grau de la Dent mais il a été impossible de récupérer les marégrammes originaux pré-1974⁴.
- Analyse de la relation contemporaine entre les niveaux marins et les surcotes et la variabilité atmosphérique de l'échelle instantanée à l'échelle séculaire de 1904 à 2005.

¹ Extension horizontale de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres et durée de vie limitée à quelques jours.

² Une hausse de température entraîne une hausse du niveau marin par fonte des glaciers continentaux et surtout par l'expansion volumétrique de l'eau de mer.

³ La surcote (et sa contre-partie négative, la décote) correspond à la variation du niveau marin au pas de temps fins uniquement liée au forçage atmosphérique. Elle s'obtient en retirant la marée atmosphérique du niveau marin brut.

⁴ Les enregistrements de 1960 à 1974 ont été récemment récupérés et vont faire prochainement l'objet d'un traitement.

- Simulation des niveaux marins liés au forçage atmosphérique et à l'évolution thermique générale au cours du 21^{ème} siècle en fonction de scénarii A2 et B2⁵. Le modèle ARPEGE Climat de Météo France simulant les pressions atmosphériques de surface tous les jours à 0h, 6h, 12h et 18h TU de 1950 à 2099 sur une grille de résolutions spatiales de 2.8° x 2.8° a été utilisé.

Phase 2. Analyse du rivage et corrélations avec les tempêtes

- Analyse sous SIG des variations du rivage à l'échelle du Golfe du Lion (environ 250 km) entre 1842, 1895, 1944, 1977 et 2000. Le travail de recherche d'archives, de numérisation et de géo-référencement a été ralenti surtout pour les dates anciennes qui demandaient une précision particulière afin d'obtenir des données fiables. Ensuite, les lidos de Maguelone et de Petite Camargue ont été étudiés à travers l'étude des variations du rivage et des dépôts d'*overwash*.
- Analyse de la réponse morphologique de profils bathymétriques à deux types d'hivers (par exemple « tempêtes moyennes et fréquentes » et « tempêtes fortes et rares ») basée sur l'utilisation de données fournies par les Services Maritimes et de Navigation du Languedoc-Roussillon.
- Recherche des relations entre les données morphologiques avec des mesures *in situ* de vents, de marégraphie et de houle. En plus des difficultés techniques (délais, conventions...) pour obtenir ces données, il s'est avéré que des lacunes chronologiques et des erreurs de mesures existent (données de vents à Sète depuis 1995 par exemple). A ces incertitudes sur les données météorologiques s'ajoutent (1) la complexité naturelle des relations entre les forçages météorologiques et la réponse morphologique, (2) une périodicité disparate dans le temps des observations morphologiques essentiellement basées sur des photographies aériennes, et (3) des équipements côtiers dont les impacts évoluent souvent avec le temps.
- Modélisation des submersions marines durant les tempêtes basée sur des relevés fournis par l'EID ou réalisés pour cette étude durant les mois de juillet et août 2005. Les modèles utilisés pour simuler le franchissement du cordon dunaire par le *set-up* (Artemis, Telemac) ou l'érosion des dunes durant les tempêtes (Sbeach) sont généralement utilisés en ingénierie littorale. Par contre, un modèle en 3D a été développé pour simuler les écoulements sur et autour d'une dune dans le cas d'une submersion complète.

Phase 3 Modélisation hydrosystème Vaccarès

- Analyse des données hydro-climatiques existantes (précipitations, vent, débit de crue des bassins de drainage Camarguais et gestion hydraulique, crues du Rhône à Beaucaire, variations de niveau du plan d'eau des étangs sous l'effet du vent) permettant d'élaborer des scénarii de crise utilisés dans les simulations⁶.
- Simulation des variations de niveau selon un modèle conceptuel avec deux modalités de fonctionnement. En phase de remplissage, en plus de la pluie directe sur le plan d'eau, des hydrogrammes (séries de débit) correspondant à des pluies de périodes de retour annuelles ou décennales sont introduits en entrée du système comme apport du bassin versant « normal », combinés ou non à des hydrogrammes correspondant au drainage exceptionnel de zones inondées/saturées du nord de l'île de Camargue. L'effet du vent de secteur sud sur le plan

⁵ Ces scénarii sont issus de ceux élaborés dans le cadre du GIEC. Le scénario A2 (dénommé SA2 ici) est « pessimiste » dans l'optique de la hausse des gaz à effet de serre liée aux activités anthropiques alors que le scénario B2 (dénommé SG2 ici) est médian. Les scénarii les plus favorables (B1 par exemple) semblent de moins en moins probables compte tenu de la hausse observée depuis la fin des années 90s et l'échec partiel du protocole de Kyoto (Rahmstorf *et al.*, 2007).

⁶ Nous avons préféré différer le développement de la nouvelle version du modèle hydrodynamique. Le calage du modèle réalisé dans le cadre de ce travail ne présente donc qu'une version provisoire et simplifiée. La raison étant relative à l'attente de nouvelles données topo-bathymétriques sur le système Vaccarès (prévues dans le projet LITEAU II), que nous avons pensé pouvoir compléter par des données topographiques haute résolution provenant du Plan Rhône (dont la disponibilité initialement espérée pour fin 2006, a été finalement, courant été 2006, reportée à une date non définie). Compte tenu de cela, une nouvelle stratégie de modélisation a été suivie.

d'eau n'est pas pris en compte, la communication avec la mer est fermée, ce qui est toujours le cas lors des surcotes marines, afin d'éviter les entrées d'eau de mer. C'est pour la gestion de la vidange du système que nous faisons intervenir le vent. La relation hauteur/volume pour la zone des étangs et leur zone de débordement permet de déterminer le niveau obtenu dans les étangs suite aux apports de crues. A partir de ce niveau horizontal du plan d'eau calculé par le modèle, la vitesse moyenne journalière du vent de secteur N au sens large (N, NW, NE) est utilisée pour évaluer la surcote au sud de l'étang, donc pour estimer le niveau de l'étang juste en amont de la digue aux Saintes Maries de la Mer. La décote moyenne journalière mer – étang permet de calculer le débit de sortie vers le milieu marin. Après calage et validation sur des périodes des automne-hiver (septembre à mars) 2003-2004 et 2005 ; des simulations ont été réalisées en combinant séries réelles observées (vent, pluie, évaporation, niveau marin) et forçage par des hydrogrammes de drainage de la zone inondée du nord de l'Ile de Camargue (du type de 1993 ou 1994). Les impacts d'aménagements complémentaires : stations de drainage vers le Rhône sur le bassin versant ; augmentation des capacités d'écoulement gravitaire vers la mer, avec augmentation du niveau marin, ont également été simulés, en utilisant des scénarii basés sur les séries de données des périodes 1996-97, 2002 et 2003 correspondant aux dernières crues importantes du Rhône.

Résultats obtenus

Phase 1 : Analyse marégraphique et climatique (CEREGE & CETMEF Aix)

Les marégrammes⁷ correspondent à la source fondamentale de documentation des variations du niveau marin avant les enregistrements satellitaires. Les plus anciens dans le Golfe du Lion sont ceux de Marseille-Endoume –MA– (depuis 1885) et du Grau-de-la-Dent –GdD– (depuis 1904). La validation et l'analyse de ces enregistrements constituent le préalable de toute analyse prospective des variations des niveaux marins. L'analyse fréquentielle de l'enregistrement de MA a notamment permis de montrer la pertinence du seuil de 38 cm pour l'extraction des évènements extrêmes, reconnus comme géomorphologiquement actifs (Figure 1).

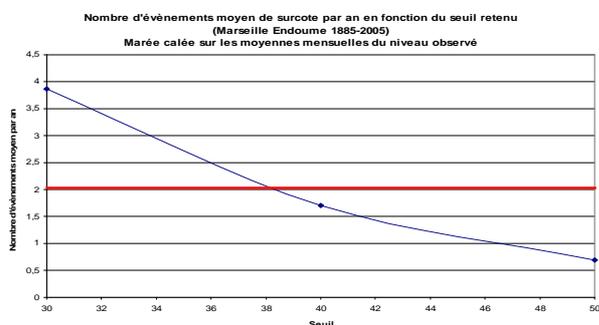


Figure 1 : Nombre moyen d'évènements annuels pour différents seuils de surcote à MA.

Divers ajustements fréquentiels ont été testé. Cela permet d'estimer les temps de retour des évènements dépassant un certain seuil ou, au contraire, la hauteur atteinte sur un certain laps de temps. La figure 2 présente ainsi la surcote atteinte 1 fois tous les 100 ans dans un cadre stationnaire. Les différences entre les différentes lois sont assez faibles.

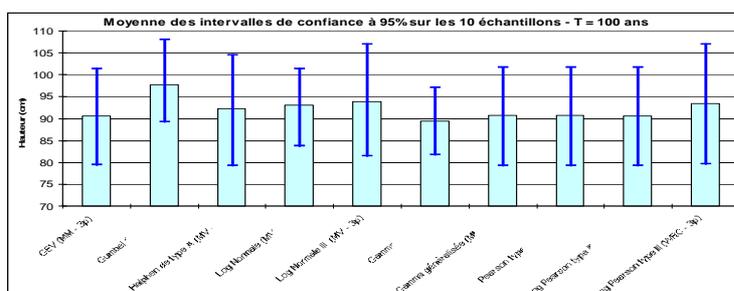


Figure 2 : Moyenne des intervalles de confiance sur les 10 échantillons - T = 100 ans.

⁷

Un stylo encreur entraîné par un flotteur trace en continu les variations du niveau marin sur un papier millimétré placé sur un rouleau, résultant en un marégramme.

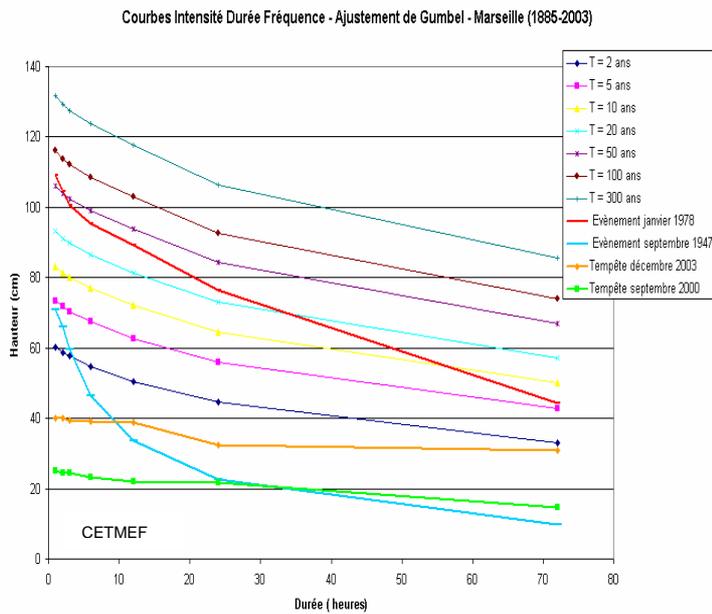


Figure 3 : Courbe synthétique Intensité Durée Fréquence (ajustement selon la loi de Gumbel) pour les surcotes à MA.

L'analyse fréquentielle permet également de comparer des évènements du point de vue de leur position dans la distribution en fonction des seuils de dépassements et de leur durée. La figure 3 compare ainsi 4 évènements.

Dans le Golfe du Lion, 900 marégrammes originaux issus du marégraphe du GdD (1974 à 1995) ont pu être récupéré dans les archives de la Compagnie Nationale des Salins du Midi et de l'Est (CNSME). 650 marégrammes enregistrés dans le port de Sète –SE– (43.10°N – 3.40°E) de 1986 à 1999 et 680 enregistrés à Port-Vendres –PV– (43.01°N – 3.02°E) de 1983 à 1997 ont été récupérés au Service Maritime et de la Navigation du Languedoc Roussillon (SMNLR). Les marégrammes ont été digitalisés, numérisés et validés grâce à un programme informatique appelé NUNIEAU (NUMérisation des Niveaux d'EAU), développé sous environnement MATLAB (Ullmann *et al.*, 2006). La validation repose sur l'inter-comparaison entre les séries marégraphiques numérisées (Figure 4). Les décalages anormaux en temps et en hauteur peuvent être facilement décelés et corrigés (Figure 4). Cette étape technique de récupération des données historiques nous a permis de **produire une série marégraphique continue et validée au pas de temps horaire au Grau-de-la-Dent (1974 à 1995), à Sète (1986 à 1999) et à Port-Vendres (1983 à 1997)**⁸

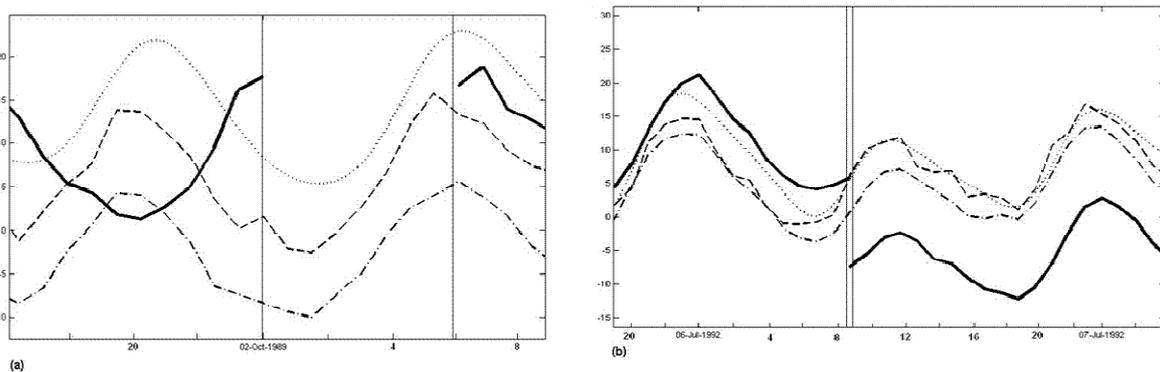


Figure 4: (a) Un exemple de décalage en temps et (b) en hauteur entre les séries marégraphiques du Grau-de-la-Dent (ligne continue graissée) de Sète (ligne tiretée), de Port-Vendres (ligne tiretée-pointillée). La ligne en pointillé représente les variations de la marée astronomique calculée au Grau-de-la-Dent (Ullmann *et al.*, 2006).

⁸

La numérisation et validation des données historique se poursuit actuellement avec la récupération récente des marégrammes couvrant la période 1960-1974 au Grau-de-la-Dent qui n'ont été disponibles que très récemment. Les marégrammes plus anciens semblent perdus.

La comparaison entre les différentes stations permet de quantifier la cohérence spatiale des surcotes dans le Golfe du Lion. L'analyse des 10 plus importantes surcotes au GdD montre ainsi une surcote en phase et d'amplitude du même ordre de grandeur à SE et à PV (Figure 5). Cette cohérence spatiale suggère que le forçage atmosphérique est au moins d'échelle régionale (Figure 6). Cela n'empêche pas cependant que les conditions locales n'aient aucune importance. Ainsi PV et MA peuvent également connaître des surcotes d'échelle locale par vent de nord, en liaison avec l'orientation de la côte et la localisation exacte de la station de mesure (Ullmann et Moron, 2007 ; Ullmann *et al.*, 2007).

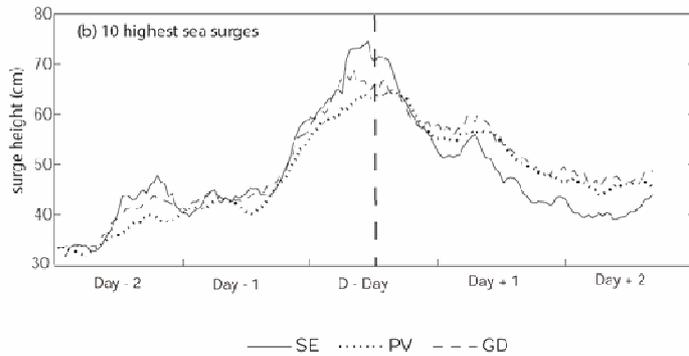


Figure 5: Variations horaires moyennes du niveau des surcotes (cm) à GdD (GD), Sète (SE) et Port-Vendres (PV) de deux jours avant à deux jours après les 10 plus fortes surcotes à GD sur la période 1986-1995 (Ullmann et Moron, 2007).

Les surcotes régionales sont associées à des épisodes de vent de sud eux-mêmes induits par les perturbations tempérées transitant depuis l'Atlantique Nord. La figure 6 présente ainsi les conditions barométriques moyennes lors des plus hauts niveaux marins enregistrés au GdD entre 1974 et 2001.

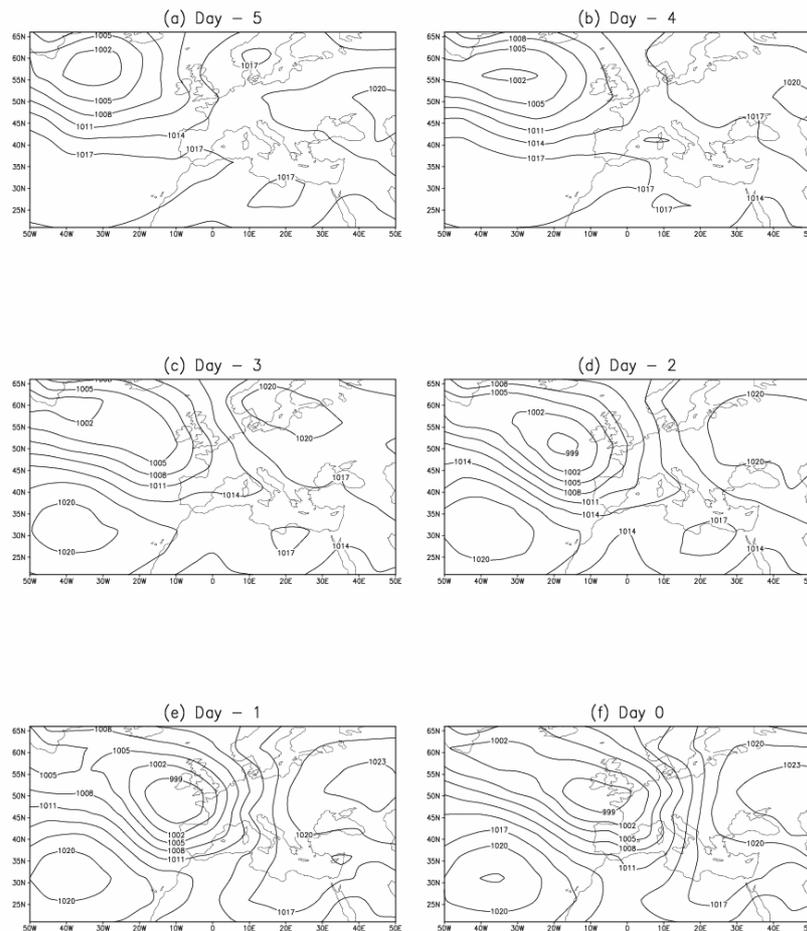


Figure 6 : conditions barométriques brutes (en hPa) moyennes entre 5 jours avant et le jour d'un niveau marin > 40 cm NGF au Grau de la Dent (Moron et Ullmann, 2005).

Cette configuration se caractérise par **une dépression nord-atlantique transitant sur une trajectoire relativement méridionale entre le centre de l'Atlantique Nord et l'Europe occidentale** (Figure 6). Le gradient zonal génère des vents de secteur sud sur la Méditerranée occidentale ce qui tend à

pousser les eaux de surface vers les côtes du Golfe du Lion. Cette approche peut être synthétisée via l'analyse des *types de temps* qui correspondent à une échelle intermédiaire entre celle des perturbations tempérées et celle des centres d'action semi-permanents que sont la dépression d'Islande et l'Anticyclone des Açores (Ullmann et Moron, 2007). Les types de temps impliqués dans les surcotes sont principalement ceux associés à la phase négative de l'oscillation nord-atlantique⁹.

Quand on s'intéresse non pas aux conditions instantanées mais aux statistiques saisonnières, les pressions moyennes enregistrées au niveau du proche océan Atlantique, autour du Golfe de Gascogne sont très fortement reliées aux percentiles du niveau de la mer au GdD. La figure 7 montre ainsi la reconstruction des percentiles mensuels 75% et 90%¹⁰ par les pressions enregistrées sur le secteur du proche Atlantique. Le modèle statistique est une régression linéaire en validation croisée. **La corrélation entre l'estimation via les pressions de surface et l'observation est de 0.80 environ sur les 162 mois de l'échantillon d'octobre 1974 à mars 2001.** Cela ouvre des perspectives quant à l'estimation future des percentiles à partir des champs de pression dans le futur.

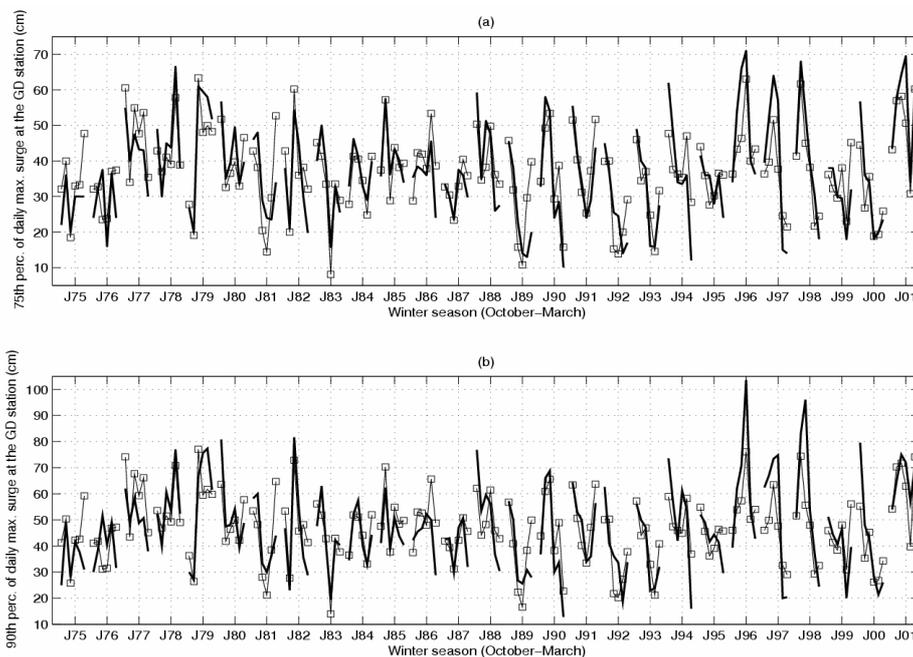


Figure 7 : Simulation du percentile 75% et 90% mensuels à partir des conditions barométriques moyennes sur $[-10^{\circ}\text{W} - 0^{\circ}\text{W}]$, $[40^{\circ}\text{N} - 45^{\circ}\text{N}]$. Les estimations sont les traits en gras et les simulations sont les traits fins avec des carrés pour les 6 mois de chaque semestre octobre-mars. Le modèle statistique est une régression linéaire en validation croisée (6 mois d'un hiver sont prévus indépendamment par la régression calculée avec les mois restants) (Moron et Ullmann, 2005).

Une analyse sur les relations à long terme a montré que **la relation entre les surcotes à GdD et les types de temps caractéristiques associés a augmenté au fil du 20^{ème} siècle** (Ullmann et Moron, 2007). Cela peut être due à l'imbrication de plusieurs facteurs, pas nécessairement climatiques comme l'amaigrissement de la plage au droit de l'enregistrement du GdD, mais aussi la hausse du niveau marin lié au moins partiellement à la hausse thermique enregistrée au cours du 20^{ème} siècle.

⁹ L'oscillation nord-atlantique correspond au principal mode de variation au-dessus de l'Atlantique Nord et l'Europe et associe les variations barométriques des deux centres d'action, la dépression d'Islande au nord et l'anticyclone des Açores au sud. La phase positive correspond à une intensification des deux centres d'action et donc une accélération des vents d'ouest et une trajectoire tendue W-E des perturbations tempérées. La phase négative correspond à un affaiblissement des deux centres d'action et un ralentissement de la circulation d'ouest. Les trajectoires des dépressions sont alors plus variables et la configuration de la figure 6 est alors anormalement fréquente. Les deux types de temps particulièrement favorisés dans ce cas sont dénommés « Greenland Above » -GA- et « Blocking » -BL- (Ullmann *et al.*, 2007).

¹⁰ C'est-à-dire le niveau marin quotidien maximal atteint dans 25% et 10% des jours respectivement.

Plusieurs éléments conditionnent l'évolution future des niveaux marins mais deux principaux peuvent être isolés à l'échelle qui nous intéresse : (i) la fréquence et l'amplitude des perturbations tempérées et/ou des types de temps impliqués dans la génération des surcotes marines au niveau du Golfe du Lion (Figure 6) et (ii) la réponse hydrostatique de la mer à l'élévation générale et régionale des températures. A partir de ce constat, on peut construire des *scénarii* tenant compte des deux aspects. Il faut notamment essayer de prévoir **dans quelle mesure le forçage atmosphérique va interagir avec les modifications d'échelle plus vaste et si il est susceptible d'atténuer ou au contraire renforcer les impacts liés à une hausse moyenne quasiment inéluctable.**

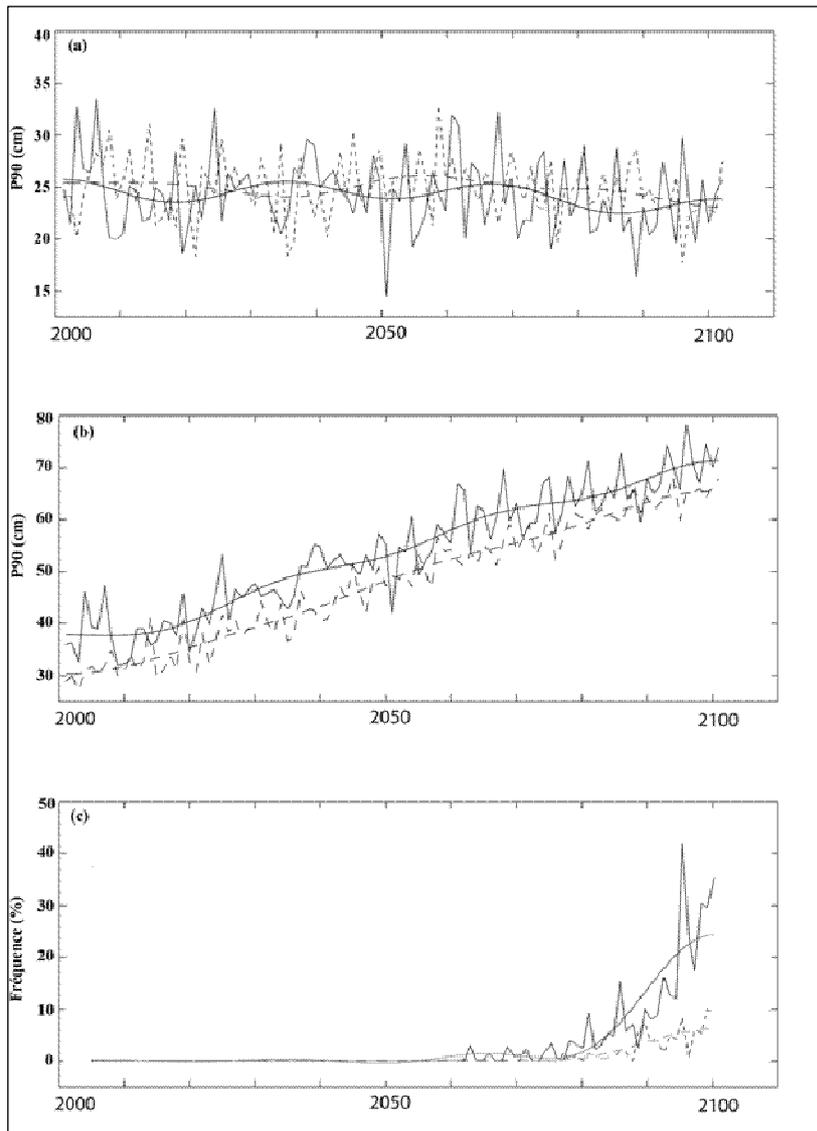


Figure 8 : (a) Percentiles 90% du niveau marin forcé uniquement par la pression de surface sur le très proche Atlantique pour le scénario SA2 (trait plein) et SG2 (trait discontinu) avec les variations lentes ($< 1/30$ cycle/an) en courbe superposées. (b) Idem pour les percentiles 90% du niveau marin forcé par l'atmosphère + une remontée du niveau marin moyen de 4 mm/an pour SA2 et de +3 mm/an pour SG2. (c) Fréquence des niveaux marins forcés par l'atmosphère + la remontée du niveau moyen de +4 mm/an pour SA2 et +3 mm/an pour SG2 dépassant les 100 cm.

Le modèle de régression linéaire qui permet de reconstruire de façon robuste les percentiles mensuels 75% et 90% du niveau marin à partir du champ de pression atmosphérique de surface sur le proche océan Atlantique (Figure 7) a été appliqué aux pressions simulées pour le semestre hivernal (octobre à mars) au 21^{ème} siècle dans les deux scénarios climatiques. La variabilité des percentiles saisonniers du niveau marin uniquement induit par le forçage atmosphérique montre **une stabilité, voire même une légère diminution au 21^{ème} siècle dans les deux scénarios** (figure 8a). La hausse du niveau marin moyen au 21^{ème} siècle pour le scénario SA2 (SG2) est estimée entre un minimum de + 1.5 mm/an (+ 1 mm/an), une moyenne de + 4 mm/an (+ 3 mm/an) et un maximum de + 7.5 mm/an (+ 6.5 mm/an). En intégrant la remontée du niveau marin moyen aux hauteurs d'eau uniquement induites par l'atmosphère, **les percentiles 90% montrent une hausse très forte au 21^{ème} siècle dans les deux**

scénarios envisagés (figure 8b). En terme de fréquence de niveaux marins extrêmes, une différence d'amplitude de remontée du niveau marin moyen de +1 mm/an entre l'estimation moyenne dans SA2 et SG2 entraîne une différence très importante dans la fréquence annuelle des niveaux ≥ 100 cm correspondant aujourd'hui au niveau centennal (figure 8c).

Phase 2.1: Rôle des tempêtes sur le recul du rivage à long terme (CEREGE)

Les variations du rivage à long terme (1842-1895-1944-1977 et 2000) se font dans un contexte général de diminution des apports sédimentaires fluviaux, de lente montée de la mer, d'artificialisation du rivage depuis les années 60 et d'une augmentation sensible des tempêtes depuis les années 70. A l'échelle du Golfe du Lion, les surfaces perdues suite aux variations du rivage augmentent, malgré les ouvrages de « protection » côtière qui se sont généralisés depuis 30 ans environ (Figure 9). Compte tenu du fait que les valeurs des secteurs en gains sont relativement stables durant la période d'étude, **le bilan net, qui était largement positif entre 1842 et 1895, a diminué d'un facteur 6 en 150 ans.** L'impact du changement climatique est difficile à appréhender du fait du rôle important de la diminution des apports fluviaux et des ouvrages de défense côtière qui perturbent les dynamiques naturelles. Cependant cette évolution est évidemment influencée par l'augmentation de l'intensité des tempêtes depuis le milieu du 20^{ème} siècle (Phase 1), mais aussi par la lente montée de la mer qui permet aux houles de tempêtes d'attaquer le profil de plage de plus en plus haut (Phase 2.2).

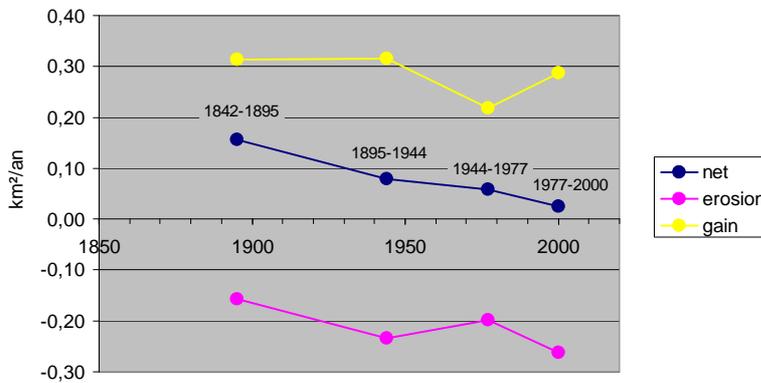


Figure 9 : Evolution annuelle des surfaces gagnées, perdues et de leur bilan entre chaque date

Nous mettons ensuite en évidence une différenciation entre les plages du Languedoc-Roussillon, à faibles variations et sans tendance évidente durant la période d'étude, et celles du delta du Rhône, à forte mobilité où les secteurs en avancées et en gains sont spatialement bien identifiés (Figure 10). En Camargue, le secteur de Petite Camargue indique un recul plus élevé sur les 30 dernières années qui peut s'expliquer en partie par une augmentation des forçages météorologiques mais d'autres facteurs (ouvrages) brisent l'analyse.

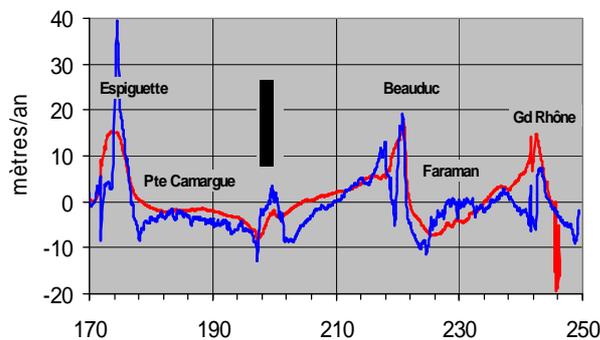


Figure 10 : Evolution du rivage de Camargue. En rouge : tendances linéaires des variations du rivage (m/an) entre 1842 et 1977. En bleu : tendance entre 1977-2000 (l'axe des abscisses est exprimé en kilomètres et représente la distance entre le début et la fin de la zone d'étude. Le Languedoc-Roussillon n'est pas représenté car aucune tendance séculaire évidente n'a été démontrée.

Compte tenu de la diminution des apports fluviaux, de l'efficacité relative des ouvrages en enrochement à stabiliser le rivage, une augmentation des forçages climatiques ne fera qu'accroître la vulnérabilité des plages du Golfe du Lion.

Phase 2.2: Recul du rivage, overwashes et tempêtes à moyen terme (CEREGE et EID)

Ensuite, nous avons cherché à définir si l'évolution à moyen terme des lidos de Maguelone et de Petite Camargue montre des relations simples avec les forçages climatiques. Nous montrons que deux lidos qui reçoivent les mêmes tempêtes ne se comportent pas systématiquement de manière identique (Figure 11), ce qui rend difficile une modélisation conceptuelle générale. Par exemple, sur le lido de Maguelone, les dépôts d'*overwash* ne se produisent qu'après la tempête de 1982 (Figure 12). A partir de cette date, des tempêtes moyennes sont capables de transférer des sédiments depuis la plage et la dune vers l'étang tandis que durant les décennies précédentes, aucun dépôt n'est observé pour des tempêtes de même intensité. Sur les deux lidos, les tempêtes extrêmes jouent un rôle d'accélérateur et/ou de déstabilisateur de l'érosion chronique des lidos mais la force des tempêtes sur le recul du rivage ou les dépôts d'*overwash* n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. En effet, nous suggérons aussi que la morphologie ante-tempête et le rééquilibrage du prisme littoral interviennent aussi largement sur l'évolution du rivage ou des dépôts de tempêtes. Cette dernière relation est probablement composée de relations non-linéaires dont la durée est encore inconnue. Elle explique l'absence de corrélations entre recul du rivage et dépôts d'*overwash* avec les forçages (force et fréquence des vents et des haut niveaux marins). A l'avenir, une augmentation des tempêtes, quelque soit sa forme, se traduira par des érosions plus importantes que celles déjà mesurées et cette augmentation interviendra sur des systèmes déjà fragilisés. **Compte tenu des résultats mitigés des enrochements déjà déployés sur la Petite Camargue, les techniques des protections futures qui chercheraient à ralentir le recul du rivage devront intégrer le comportement « type » des lidos et autoriser les dépôts d'*overwash* pour permettre une translation du cordon littoral sans augmenter artificiellement l'érosion.**

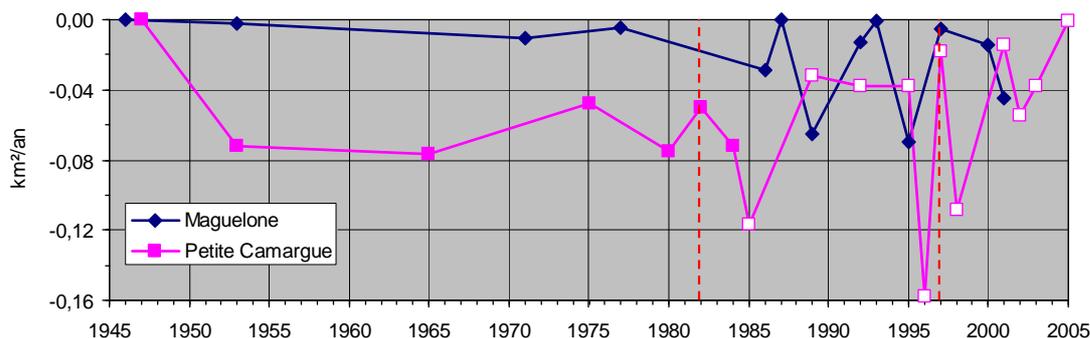


Figure 11 : Surfaces perdues moyennées par an des lidos de Maguelone et de Petite Camargue. Les tirets rouges localisent les tempêtes extrêmes de 1982 et 1997. Les carrés violets à fonds blancs représentent les périodes où le littoral de Petite Camargue est équipé d'enrochements barrant le transit *longshore* (épis).

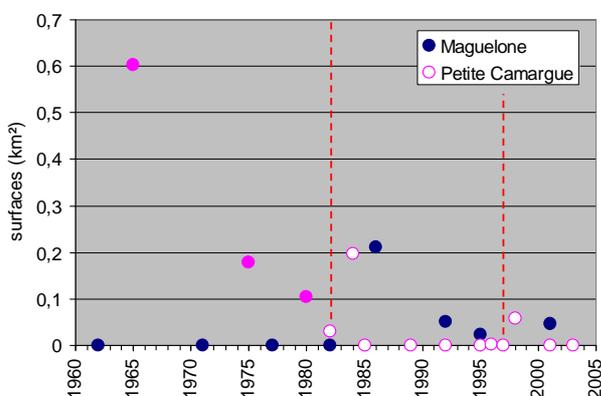


Figure 12 : Surface des dépôts d'*overwash* par périodes sur les lidos de Maguelone et de Petite Camargue (les ronds blancs indiquent les périodes durant lesquelles des ouvrages limitent les submersions marines-digues-). Les traits rouges représentent les tempêtes exceptionnelles de 1982 et 1997. A Maguelone, les processus d'*overwash* sont présents à partir de la tempête de 1982 qui a déstabilisé le système tandis qu'en Petite Camargue, les digues construites au début des années 80 limitent les dépôts d'*overwash*. Par contre, ces ouvrages ne parviennent pas à résister à la tempête de 1997.

Phase 2.3: Impact morphologique des tempêtes sur des profils de plage dans le Languedoc (CEREGE)

Dans cette partie, nous avons analysé les impacts morphologiques des différentes tempêtes sur le littoral du Languedoc, en comparant l'impact d'une série de tempêtes moyennes mais nombreuses durant l'hiver 1995-1996, à l'hiver 1997-1998 pourvu de la tempête exceptionnelle de décembre 1997. L'interaction entre les tempêtes et la morphologie des profils a été analysée, sur la base de 32 profils relevés par le Service Maritime du Languedoc Roussillon (SMNLR) (Figure 13).

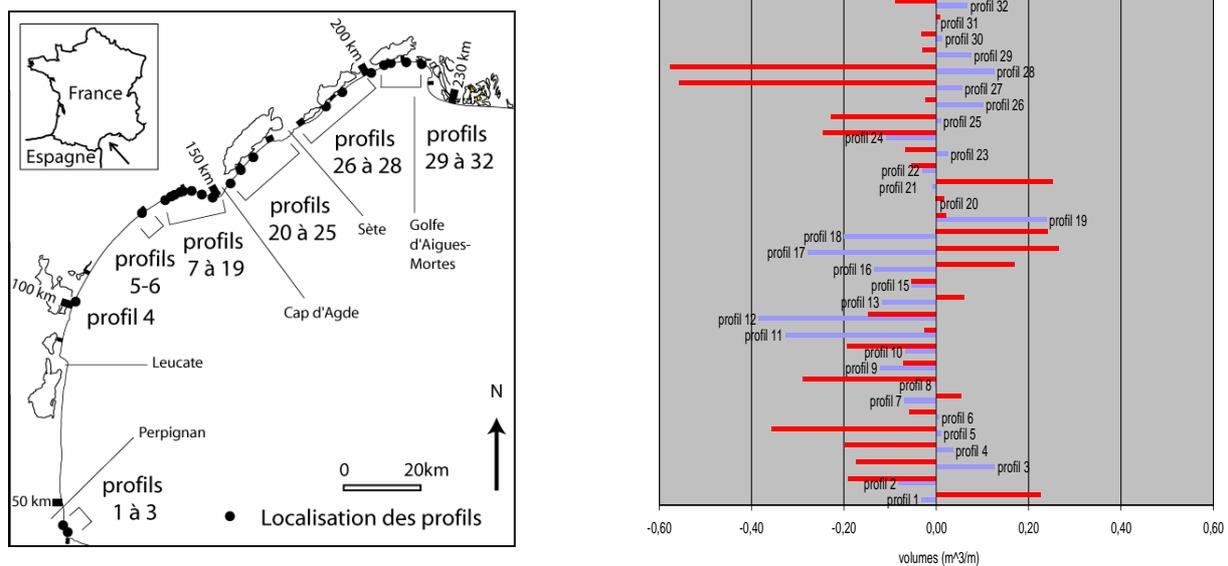


Figure 13 : Evolution du volume des 32 profils étudiés entre 1995-1996 (bleue) et 1997-1998 (rouge)

Les deux types d'hivers aux tempêtes différentes, moyennes mais fréquentes (1995-1996), ou extrêmes et rares (1997-1998) entraînent des impacts sédimentaires variables. La réponse morphologique des profils face à ces deux événements se traduit par 4 types différents : des profils en gains ou en érosion constants, des profils qui évoluent peu et des profils à tendances inversées (Figure 13). La présence de sables disponibles aux embouchures ou non, et enfin la morphologie du profil anté-tempêtes sont des éléments qui influencent largement la réponse morphologique des profils face aux tempêtes. Les ouvrages et le rechargement artificiel contrôlent aussi partiellement la réponse morphologique des profils mais leur importance n'a pu être clairement déterminée à cause d'une absence de chronologie précise des travaux. Des tempêtes isolées mais très fortes comme la tempête de 1997, entraînent une importante érosion du littoral, mais peuvent s'accompagner de fortes crues qui viennent compenser les pertes sédimentaires (ex : crues de l'Hérault et de l'Orb). Des tempêtes fréquentes comme durant l'hiver 1995-1996, peuvent favoriser l'accrétion de profils pour peu que des sédiments soient disponibles. Par contre, il n'a pas été possible de distinguer lequel des deux types d'hiver est le plus érosif compte tenu des différences de réponses des profils pour lesquels la morphologie anté-tempête et les apports fluviaux jouent un rôle déterminant. **Le forçage climatique ne doit donc pas être considéré comme le seul paramètre qui contrôle la morphodynamique du profil ce qui complexifie l'analyse de l'impact du changement climatique sur les phénomènes érosifs du littoral.**

Phase 2.4 : Modélisation hydrodynamique du franchissement du lido de Maguelone (CETMEF Compiègne et UTC)

Nous avons testé les possibilités de modélisation hydrodynamique du franchissement du lido de Maguelone par *set-up* en utilisant les courants de houle calculés par ARTEMIS ré injectés ensuite dans le code courantologique bidimensionnel TELEMAC2D. Ces tests sont basés sur des relevés de terrain de l'EID sur le lido de Maguelone (tempête du 3 et 4 décembre 2003). Le modèle calcule bien une

décroissance de la houle au passage de la barre externe et interne ce qui permet aussi de calculer les forces de radiation dont les deux premiers pics sont utilisés lors du calcul courantologique. La cote de la surface libre calculée par TELEMAC un peu en amont de la crête de la dune est de 2.06 m. Le *setup* de houle avoisinerait donc 1.10 m. Ce résultat est en accord avec les observations de terrain (Figure 14). En effet, le profil modélisé est celui pris dans le point dépressionnaire ou point faible de la dune, là où s'est produit une brèche. Cette cote calculée implique un écoulement dans la brèche dont la hauteur d'eau atteindrait 55 cm et un écoulement transcritique sur la pente côté lagune dont les vitesses seraient comprises donc entre 1.5 m/s et 2.3 m/s. Nous concluons que c'est la précision sur le calcul des forces de radiation liées à la houle dans la zone la plus proche du rivage qui détermine le franchissement du cordon dunaire. Cependant, c'est aussi dans cette zone que, du fait des hauteurs d'eau les plus faibles, l'imprécision sur la contrainte de radiation est la plus forte. Il convient donc de rester prudent sur les interprétations des résultats obtenus avec ce modèle.

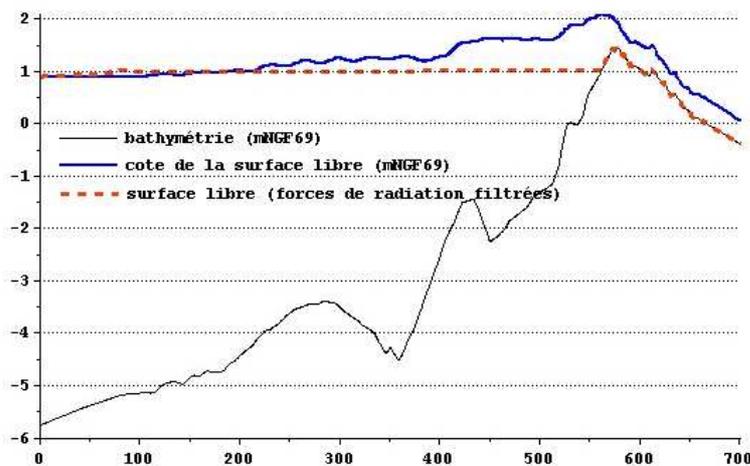


Figure 14 : Profil transversal de la surface libre calculée par TELEMAC (en bleu) (en rouge en filtrant les contraintes de radiation lorsque la hauteur d'eau est inférieure à 1m)

Phase 2.5. Modélisation de l'érosion des dunes durant les tempêtes en relation avec le changement climatique (CEREGE)

Dans cette partie nous avons modélisé l'érosion de dunes de Camargue (Figure 15) sur la base de 31 profils localisés dans les secteurs où le rivage recule depuis au moins 150 ans (phase 2.2). Les modélisations sont basées sur la tempête exceptionnelle de 1997 en définissant 15 cas d'augmentation de la force et/ou de la durée des tempêtes. Les simulations choisies visent d'abord à déterminer lequel des deux forçages, hauteur du plan d'eau et intensité de la houle, joue un rôle prépondérant sur l'érosion de la dune (cas 2 et 3) ainsi qu'à évaluer leur importance lorsqu'ils sont couplés (cas 4). Ensuite, une simulation sur la durée des événements de tempête est proposée (cas 5). Puis les simulations couplent des augmentations d'intensité du niveau de la mer et/ou de la force des tempêtes avec leur durée (cas 6 et 7). Enfin, le dernier cas de simulation (cas 8) considère une augmentation générale de l'intensité et de la durée des forçages. Les augmentations futures des tempêtes n'étant pas encore définies par les météorologues et les climatologues, nous avons arbitrairement augmentés de + 5, + 10 et + 20 % les forçages mesurés lors de la tempête extrême de 1997. Au total, nous avons donc réalisés 20 simulations par profils, soit 620 simulations

Nous montrons que :

- une tempête de type « 1997 » suffirait pour finir de détruire la majorité des dunes encore présente sur les secteurs en érosion de Camargue,
- le niveau d'eau joue un rôle plus important que la hauteur des vagues sur l'érosion des dunes,
- la durée de la tempête, au delà des 4 jours simulés, ne semble pas significative sur l'érosion de la dune,
- une augmentation simultanée de la force et de la durée des forçages se traduit par l'érosion la plus forte,

- la force et la durée des forçages entretiennent des relations complexes qui se traduisent par des relations non linéaires sur l'érosion du cordon dunaire,
- de faibles augmentations dans la force et/ou la durée des forçages se traduiraient par des érosions significativement plus importantes que celles que nous connaissons aujourd'hui. Par exemple dans l'hypothèse d'une augmentation de 5, 10 et 20% de l'intensité et de la durée des forçages (cas 8) l'érosion de la dune serait en moyenne amplifiée respectivement d'environ 130, 170 et 400 %.

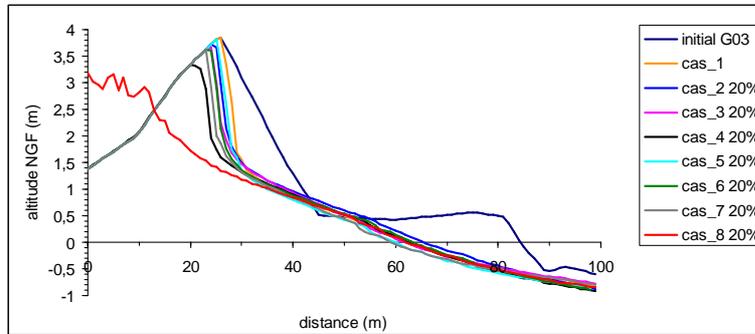


Figure 15 : Exemple des sorties du modèle (profils G03). « initial G03 » représente le profil de plage mesuré en 2005 ; cas_1 correspond à l'érosion calculée à partir des données de la tempête de 1997 si elle se produisait sur la dune actuelle. Les dépôts simulés pour le cas_8 en arrière de la dune ne sont pas réalistes. Ils sont causés par des problèmes de frontières du modèle mais ils suggèrent que la dune est complètement érodée avec ce scénario.

Phase 2.6. Cas idéal de modélisation 3D des submersions marines d'une dune (CETMEF Compiègne et UTC)

Les objectifs visés dans cette phase concernent :

- la connaissance des sollicitations hydrodynamiques subies par la dune. A cet effet, il convient de choisir un modèle d'écoulement à surface libre approprié qui permet de modéliser les paramètres hydrodynamiques nécessaires au calcul des sollicitations ou des contraintes exercées par le fluide sur la structure (dune);
- la mise en œuvre d'une modélisation numérique 3D pour simuler la déformation de la dune selon différents scénarii de sollicitations hydrodynamiques (pression et vitesse hydraulique initiales).

Une modélisation numérique 3D a donc été mise en œuvre pour simuler la déformation d'une dune selon différents scénarii de sollicitations hydrodynamiques (pression et vitesse hydraulique initiales). Il s'agit ici d'un problème de couplage fluide-structure, où la structure se déforme lorsque les contraintes exercées par le fluide dépassent des seuils critiques. Les présentes simulations tiennent compte de la turbulence et du contact fluide-structure. Le modèle de turbulence utilisé est de type longueur de mélange. Ces simulations numériques innovantes en milieu côtier sont réalisées en régime transitoire sur un cas test académique. Nous montrons que :

- lors du franchissement de la dune un ressaut hydraulique persiste en aval de celle-ci, ceci pendant plusieurs itérations (Figure 16),
- le problème de franchissement d'une dune demeure un problème bidimensionnel et les contraintes exercées le long de l'ouvrage sont quasiment négligeables devant les contraintes transversales,
- les contraintes de cisaillement subies par la dune sont maximales sur la face amont et en haut de la dune, ce qui a pour conséquences d'augmenter son érosion et de générer le transport solide d'*overwash*. La déformation de la dune plus visible à la crête de la dune (Figure 17), suggère que les phénomènes d'érosion et de rupture de cette structure s'enclenche tout d'abord à ce niveau.

Toutefois, ces simulations ont été réalisées en considérant un écoulement d'entrée uniforme, et le forçage du modèle s'effectue par la pression atmosphérique imposée à la surface libre en contact avec l'atmosphère.

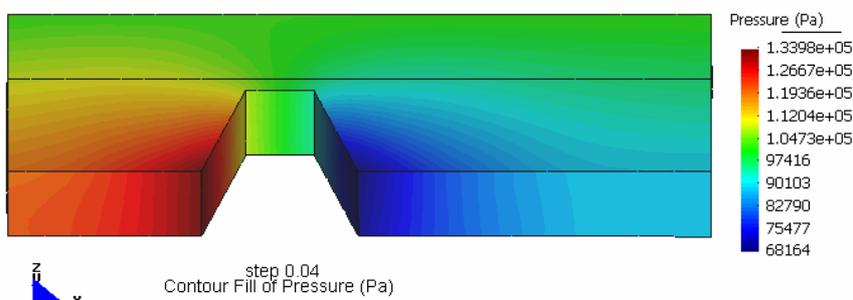


Figure 16 : Champs de pression au pas $t=0.02s$. La

pression est considérée non-hydrostatique et à l'état initial le forçage du modèle est effectué par une vitesse d'entrée $u=1.5$ m/s (de la gauche vers la droite) et une pression de 1bar est imposée au niveau de la surface libre.

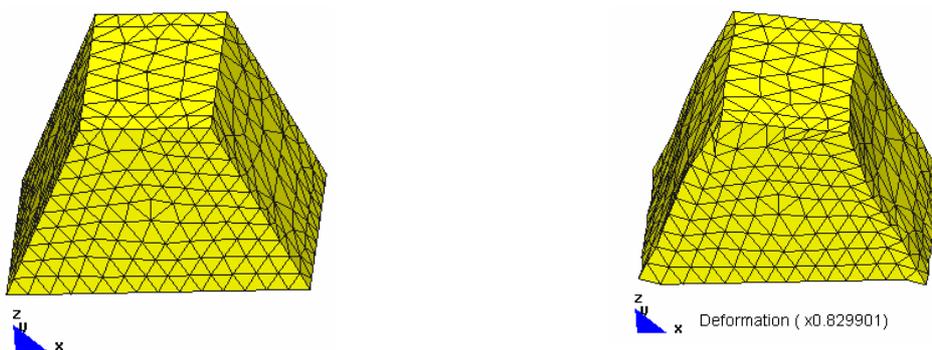


Figure 17 : Etat initial avant déformation de la dune (gauche) et déformation de la dune après plusieurs itérations (droite)

Phase 3. Modélisation hydro-système Vaccarès (Tour du Valat)

Il est important de noter la tendance à une augmentation de la variabilité des précipitations mensuelles entre la période 1963-1990 et les 15 dernières années, traduisant une plus grande irrégularité du climat. La tendance à l'augmentation des températures maximales annuelles n'aura d'effet que sur une augmentation de l'évaporation estivale, donc *a priori* un niveau des étangs à la fin de l'été en moyenne plus bas permettant de stocker une plus grande partie des pluies de l'automne. Les calculs statistiques effectués sur les valeurs maximales annuelles de débits horaires du Rhône à Beaucaire sur la période 1977-2005, avec les réserves attachées à ce genre d'approche, indiquent qu'**un débit de pointe tel que celui estimé pour décembre 2003 (11500 m³/s) aurait une période de retour de l'ordre de 50 ans.**

Les simulations réalisées, correspondant à des situations de crises combinant crues du Rhône (et brèches supposées dans les digues sur le Petit Rhône), surcotes marines et fortes précipitations montrent qu'il est possible d'atteindre dans tous les cas simulés un niveau des étangs « acceptable » à la fin du mois de mars (inférieur à 0.2 voire 0.1 m NGF), même avec un scénario incluant deux crues importantes successives (cas de septembre et novembre 2002) avec ruptures de digue et transfert massif d'eau vers les étangs.

En revanche, **le maintien du niveau de l'étang à une cote ne dépassant pas 0.5 m NGF sauf de manière transitoire, suite à des apports massifs, ne peut être obtenu sans modification des règles et capacités de gestion hydraulique actuelles du système.**

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

Recommandations pour les gestionnaires

Phase 1. Analyse marégraphique et climatique

Le forçage principal des surcotes régionales (c'est-à-dire enregistrées dans l'ensemble du Golfe du Lion) est associé à des perturbations tempérées transitant sur un rail méridional (c'est-à-dire au sud de 55°N, approximativement entre les Iles Britanniques et la Péninsule Ibérique) qui induisent des conditions dépressionnaires sur le golfe du Lion et surtout des épisodes de vent de secteur S qui tendent à diriger les eaux de surface vers la côte. Ces perturbations sont anormalement fréquentes lors que l'oscillation nord-atlantique est en phase négative. La sensibilité des surcotes enregistrées au Grau de la Dent aux conditions barométriques semble augmenter au cours du 20^{ème} siècle et l'amaigrissement de la plage à cet endroit semble être un des facteurs explicatifs. Au cours du 21^{ème} siècle, dans le cadre des scénarii tenant compte des perturbations anthropiques, la baisse de la fréquence des perturbations transitant sur un rail sud est au mieux faible et ne compense pas la hausse

du niveau marin associée au réchauffement attendu. En conséquence, des surcotes exceptionnelles au 20^{ème} siècle (> 1 m NGF) pourraient devenir fréquentes (fréquence > 30% dans le cadre du scénario A2) à la fin du 21^{ème} siècle.

Phase 2. Analyse du rivage et relations avec les tempêtes

S'il a été difficile de démontrer sur l'ensemble du Golfe du Lion des relations évidentes et simples entre les tempêtes et le recul du rivage, l'érosion sous marine des profils ou les dépôts de tempêtes, nous avons cependant proposé des bilans sédimentaires qui soulignent la **fragilité des plages** de cette zone. Il est fortement probable que **les 30 dernières années aient enregistré des reculs plus importants** que durant les décennies précédentes à cause d'une diminution des apports sédimentaires des cours d'eau, de travaux d'enrochements lourds et d'une augmentation des forçages climatologiques. Par conséquent, les aménageurs doivent considérer que **la situation actuelle ne pourra que s'aggraver** si les tendances passées observées continuent. Pour faire face à cette situation, une des solutions consisterait à **laisser se produire, lorsque c'est possible, les processus naturels d'overwash** qui, s'ils présentent les inconvénient majeurs de s'associer à un recul du rivage et de se manifester par des inondations marines, permettent un déplacement sédimentaire qui assure une préservation (partielle) du stock sableux. L'expérience des digues en Petite Camargue démontre aussi qu'à moyen terme ces ouvrages ne résistent pas aux tempêtes extrêmes et ne remplissent donc pas leur rôle. A long terme, il serait donc illusoire d'espérer que ces structures en enrochements puissent « protéger » les plages et les activités socio-économiques situées en arrière. Le rechargement artificiel des plages présenterait peut être une alternative rentable pour lutter contre le recul du rivage des plages du Golfe du Lion où les enjeux socio-économiques sont élevés. **Compte tenu des incertitudes de l'ampleur du changement climatique et de la réponse morphologique à attendre, la prudence consisterait à limiter le développement des activités humaines « trop près » du littoral.** Cette recommandation s'oppose cependant aux modes de développements urbains et touristiques développés dans le Golfe du Lion depuis plusieurs décennies.

Phase 3. Modélisation hydrosystème Vaccarès

Concernant les précipitations et leur impact sur les apports du bassin versant : un épisode pluvieux totalisant 100 mm (pluie décennale journalière) sature les capacités de drainage mécanique du delta. Dans l'état actuel, en cas d'intrusion massive d'eau dans le nord de l'île de Camargue et de drainage gravitaire vers l'étang, on estime qu'il y a un rapport de 1 à 3 entre les capacités d'évacuation à la mer du système gravitaire et les débits maxima en entrée du système d'étang. Une augmentation du nombre de vannes du pertuis des Saintes Maries de la Mer, ne résoudra pas pour autant le problème de l'impossibilité de drainer gravitairement vers la mer pendant les surcotes marines. Les niveaux atteints pour un débit du Rhône d'une période de retour de 5 ans font que le risque de brèches persiste, surtout dans la phase de consolidation et d'aménagement du système de digue existant qui sera réalisé dans le cadre du Plan Rhône.

S'il nous apparaît normal que le système lagunaire serve de zone d'expansion pour les eaux d'inondation du delta, il convient toutefois de prévoir de mieux réguler leurs apports, dans la perspective d'un régime hydro – climatique plus intense en automne hiver. La poldérisation partielle du bassin versant des étangs; la limitation des eaux de transfert du bassin Nord en cas d'inondation à celles transitant par le canal de Rousty (Nord Vaccarès); la possibilité pour les stations de drainage existantes de fonctionner quelle que soit la cote du Rhône ; l'évacuation totale des eaux de drainage des Saintes Maries vers la mer ; ainsi que l'augmentation des capacités d'évacuation gravitaires des étangs vers la mer permettront de limiter les risques de débordement des étangs au-delà de la cote 0.5 m NGF.

Les simulations réalisées dans le cas du scénario le plus défavorable indiquent qu'avec les conditions ci-dessus réunies, une station d'assainissement supplémentaire de 10 m³ /s sur le bassin versant et dix vannes supplémentaires (de 1.2 x 1 m) au pertuis maritime, la cote de 0.5 m NGF ne serait plus

dépassée que 18 jours (38 avec l'hypothèse d'un niveau marin plus haut de 10 cm) contre 69 dans la situation actuelle.

Recommandations scientifiques

Phase 1. Analyse marégraphique et climatique

Au moins deux pistes sont possibles

- Récupération et validation des données marégraphiques du GdD sur la période 1960-1974.
- Analyse des réanalyses atmosphériques régionales REMO (disponibles depuis les années 1950) afin de reconstruire éventuellement les conditions de houle et la hauteur du niveau marin à des pas de temps fins (toutes les 6 heures). Cela permettrait d'éclairer un thème crucial en morphodynamique côtière, à savoir la réponse de la morphodynamique littorale au forçage climatique. Un recours à une modélisation historique des champs de pression, de vent et de la propagation de la houle à l'échelle du Golfe du Lion peut (doit) donc être envisagé.

Phase 2. Analyse du rivage et relations avec les tempêtes

Ce programme scientifique nous permet de proposer plusieurs perspectives de recherches :

- Sur les variations du rivage à long terme, il existe des clichés aériens ou des images satellitaires précises (Spot 5, QuickBird) dont l'utilisation permettraient d'augmenter la résolution temporelle depuis le milieu des années 70 afin de mieux définir le rôle des forçages (apports sédimentaires, ouvrages, climats) sur l'évolution du rivage.
- Les dépôts d'*overwashes* et l'évolution morphologique du prisme littoral pourront être évalués en volume grâce à l'exploitation de campagnes Lidar prévues par la Région Languedoc-Roussillon. Cette méthode demande à être développée en Camargue.
- Les relations suggérées de relaxation morphologique du prisme littoral qui se ré-adapte à la suite de contraintes imposées par une tempête extrême ne pourront être investies qu'à partir d'un suivi morphologique dense. Cette analyse devra être conduite sur des sites ateliers car les différenciations spatiales sont probablement importantes pour espérer avoir les moyens de généraliser ce comportement.
- Si la modélisation visant à simuler l'érosion des dunes à partir de modèles existants (Artemis, Telemac, Sbeach) donne des résultats acceptables, des développements en 3D doivent être envisagés. Pour pouvoir simuler les phénomènes physiques et de donner une représentation réaliste, il convient d'introduire un signal réel de la houle et de considérer un couplage houle-courant dans le modèle 3D développé dans le cadre de ce programme. Cette démarche permettra ensuite de décider d'un couplage interne ou externe approprié pour la modélisation des courants et de la houle au passage des cordons dunaires.

Phase 3 Modélisation hydrosystème Vaccarès

La modélisation de l'hydrosystème Vaccarès permet de proposer les pistes de recherche suivantes :

- Il serait utile, au moins pour la simulation des vidanges gravitaires, de fonctionner au pas de temps horaire pour gérer au mieux les décotes du plan d'eau sur un épisode de vent. Pour élargir le domaine d'utilisation prospective, il sera nécessaire d'utiliser des scénarii basés sur des séries cohérentes de vent, de marée et de surcote marines synthétisées, provenant des résultats obtenus par les autres équipes dans le cadre de ce projet.
- Une modélisation hydro-saline prenant en compte la compartimentation en sous-unités lagunaire et la remobilisation de sel sur les secteurs temporairement inondés (en cours dans le cadre du projet Liteau II GIZCAM).
- d'autres options de propositions d'aménagements en prenant en compte l'aspect économique (investissement, fonctionnement) et en s'appuyant sur des analyses hydrauliques plus fines : drainage gravitaire des zones inondées par des ouvrages dans les digues du Rhône, utilisation des stations de pompage des bassins versant pour participer à la vidange des étangs.
- des modélisations hydrodynamiques bi-dimensionnelles simulant la propagation de l'eau (niveau, vitesse) pour des scénarii de rupture de digue (Rhône et maritimes) et de

déversements contrôlés des digues du Petit Rhône (perspectives du Plan Rhône) permettraient de mieux cerner les contraintes et les risques en termes de sécurité publique. La condition nécessaire de la réalisation de telles modélisations sont dépendantes d'une topographie de qualité (Lidar).

Valorisation

La Tour du Vallat a participé à toutes les réunions des commissions de gestion de l'eau et milieux aquatiques, du PNRC, ainsi qu'à la Commission Exécutive de l'Eau (CEDE), avec information sur les travaux de recherche en cours et avis critique sur les propositions d'aménagement et de gestion. Une démonstration de l'outil de simulation n'a pas encore pu être présentée à la CEDE, mais sera réalisée dès l'été 2005. Il est prévu une présentation pour les prochaines journées de la science et la journée mondiale des Zones Humides.

Partenariats mis en place, projetés, envisagés

Le projet GIZCAM du programme LITEAU 2, dans lequel des partenaires du projet sont impliqués (Tour du Valat, CEREGE, CETMEF) va permettre de continuer la démarche de modélisation hydrologique et d'élargir la problématique à la gestion hydro saline de l'écosystème lagunaire en relation avec les impacts de la riziculture et du changement climatique.

Le programme IPGC-UNESCO (*Vulnerability and resilience assessment of coastal zone in Mediterranean and Black Sea areas related to the forecast sea level rise for management purposes*) dans lequel le CEREGE est partenaire, va permettre de valoriser les résultats obtenus par IMPLIT auprès de plusieurs pays de la côte méditerranéenne.

Liste des publications scientifiques, participations à des colloques, thèses, actions de valorisation, participation à des formations, actions médiatiques

Thèses (3)

Brunel C. (depuis 2005). Morphodynamique à long terme et impact du changement climatique sur les littoraux sableux microtidaux. Thèse, UFR de Géographie et de l'Aménagement, Université de Provence 1

Laborie V. (depuis 2005) Modélisation de la dynamique des ouvrages fluviaux et côtiers soumis à des submersions de crues ou de tempêtes. Ecole Nationale des Ponts et Chaussée.

Ullmann A. (depuis 2004, soutenance prévue fin 2007). Relations entre les niveaux marins dans le Golfe du Lion et la variabilité atmosphérique (1900-2100). Thèse, UFR de Géographie et de l'Aménagement, Université de Provence 1

liste des publications de rang A (internationales à comité de lecture, parus, sous presse et soumis) (9)

Brunel C., Sabatier F., 2007. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, soumis.

Moron V., Ullmann A., 2005. Relationship between sea-level pressure and sea-level height in the Camargue (French Mediterranean coast), *International Journal of Climatology*, **25**, 1531-1540.

Sabatier F., 2007. Modélisation de l'impact du changement climatique sur l'érosion des dunes. Application à la Camargue. *La Houille Blanche*, sous presse.

Sabatier F., Samat O., Ullmann A., Suanez S., 2007. Connecting large-scale coastal behaviour with coastal management of the Rhone delta. *Geomorphology*, sous presse.

Sabatier F., Provansal M., Fleury T., 2005. Discussion of: PASKOFF, R., 2004. Potential Implications of Sea-Level Rise for France. *Journal of Coastal Research*, **21**, 860-864

Ullmann A., Pons F., Moron V., 2005. Tool kit helps digitize tide gauge records, *EOS transactions of the AGU*, **86**, 342.

Ullmann A., Pirazolli P.A., Tomasin A., 2007. Weather regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean Coast) during the 20th century *Continental Shelf Research*, **27**, 922-934.

Ullmann A., Moron V., 2007. Weather regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean Coast) during the 20th century, *International Journal of Climatology*, **28**, sous presse.

Ullmann A., Pirazolli P.A., Moron V., 2007. Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions, *Global and Planetary Change*, en révision.

liste des publications de rang B (nationales à comité de lecture, parus, sous presse et soumis) (4)

Pirazolli P.A., Tomasin A., Ullmann A., 2007. Niveaux marins extrêmes dans deux aires méditerranéennes. *Méditerranée*. sous presse.

Ullmann A., Pirazzoli P.A., 2007. Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes dans le Golfe du Lion. *Cybergéo*, **36**, 18/01/2007.

Ullmann A., Moron V., 2007. Configurations barométriques à grande échelle et variabilité des surcotes dans le Golfe du Lion. *Cybergéo*, soumis.

Ullmann A., Pirazzoli P.A., 2007. Evolution récente des conditions météorologiques associées aux surcotes et au risque de submersion dans le Golfe du Lion. *La Méditerranée*, sous presse.

Colloques (24)

Chauvelon, P., Sandoz, A., Pichaud, M., 2005. Major driving forces affecting water, salt, and suspended solid fluxes in the central part of the Rhône river delta. In: *LAGOONS AND COASTAL WETLANDS in the Global Change Context: Impacts and Management Issues*. Proceedings of the International Conference, Venice, 26-28 April 2004. Edited by: Pierre Lasserre, Pierluigi Viaroli and Pierpaolo Campostrini, IOC *Integrated Coastal Area Management (ICAM)*, Dossier N°3, UNESCO, p 70-75.

Chauvelon, P., Sandoz, A., Pichaud, M., 2005. Impact de la gestion de l'eau et des inondations sur les bilans de sels et de sédiments dans l'hydrosystème central du delta du Rhône. (CD ROM) ; Actes de la conférence WATMED 2, Ressources en Eau en Méditerranée, Marrakech, 14-17 Novembre 2005.

Chauvelon, P., Pichaud, M., Gaufres, P., Ullmann, A., Sandoz A., 2007. A modelling tool for hydraulic management of the Rhone delta central hydro - system under flood and sea surge conditions. Poster presented at EFRM 2007 - European Symposium on Flood Risk Management Research, Dresden, Germany, 6-7 feb 2007.

Chauvelon, P., Pichaud, M., Gaufres, P., Sandoz A., 2007. Impact of meteorological and hydrological extreme events (floods and droughts) on the Rhone delta hydraulic management. Poster presentation at the EGU General Assembly 2007, Vienna, 16-20 April 2007.

Gaufres, P., Sabatier F., 2005. Extreme storm surges distributions at Marseilles, Proceedings of the Seventh International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 05, 25-29 October 2005, Kusadasi, Turkey Water Level Changes, Vol. 2, 1235-1246

Gaufres P., Woppelmann G., Sabatier F., 2005. Analyse fréquentielle des niveaux marins pour l'estimation des surcotes extrêmes et des tendances sur le long terme (changement climatique), Colloque International Incertitude et Environnement, Arles 23-25 Novembre 2005 (sous presse)

Gaufres P., Sabatier F., 2006. Frequency distributions of storm surge for coastal prevention at Marseilles, Fifth International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation Risk Analysis 2006, 19-21 June 2006 Malta (sous presse)

Gaufres P., Sabatier F., Woppelmann G., 2006. Extreme storm surge distributions and practical applications at Marseilles (France), EMEC7- ECSA 40's, Caen, May 2006 (sous presse)

Gaufres P., Sabatier F., 2006. Extreme storm surge distributions and practical applications at Marseilles (France), 7th International Conference on Hydroinformatics 2006, Advanced applications of modelling, Vol III, p 1601-1608, Acropolis, Nice

Gaufres P., Sabatier F., 2007. Extreme storm surge distributions and practical applications at Marseilles (France), European Symposium on Flood Risk Management Research (EFRM 2007), 6-7 February 2007, Dresden, Germany

Gaufrès P., Sabatier F., 2007. Coastal observations correlated with extreme storm surge distributions on Rhône delta, Continental Shelf Research, Gulf of Lions special issue (sous presse).

Heurtefeux H., Sabatier F., 2006. Storm control on overwash processes and shoreline retreat on a microtidal littoral barrier, *International Conference of Coastal Engineering 2006*, American Society of Civil Engineering.

L'Her J., Gaufrès P., 2006. Analyse fréquentielle des états de mer et surcotes marines extrêmes, Journées scientifiques et Techniques du CETMEF/SHF, Décembre 2006, La Houille Blanche (sous presse)

Sabatier F., 2007. Evolution des plages du Golfe du Lion depuis le milieu du 19^{ème} siècle. *Colloque Zone Atelier du CNRS ORME*, Montpellier.

Sabatier F., 2006. Impact du changement climatique sur les plages du Golfe du Lion. *Journée Scientifiques du CETMEF*, 4-5 décembre 2006, Paris. Conférence invité

Sabatier F., 2005. Large scale sandy spit behaviour. *International Coastal Symposium*, Höf, Iceland, 5-8 june 2005.

Ullmann A., 2007. La mesure du niveau en Camargue : Analyses spatio-temporelles et modélisation. *Les journées de la climatologie de la commission « climat et société » du comité national français de géographie*. Grenoble, 23 mars 2007

Chauvelon P., Gauffres P., Ullmann A., 2007. A modelling tool for hydraulic management of the Rhone delta central hydro-system under flood and sea surge conditions. *European Flood Management 2007*. Dresde, fevrier. 2007.

Ullmann A., Moron V., 2006. Weather regimes and sea-level variations over the Gulf of Lions. *European Geophysical Union*. Vienne, avril 2006.

Ullmann A., Pirazzoli P.A, Tomasin A., 2006. Sea-surges in Camargue : trends over the 20th century. *European Geophysical Union*. Vienne, avril 2006.

Ullmann A., Moron V., 2006. Relation entre la pression atmosphérique et les niveaux marins extrêmes en Camargue : analyse spatiale et évolution au 20^{ème} siècle. *XIX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Epernay 2006.

Ullmann A., Moron V., 2006. Seal-level changes in the Gulf of Lions and atmospheric conditions. "Seal'Aix: Sea-level changing". Giens, septembre 2006.

Ullmann A., 2006. Surcotes en Camargue: analyses statistiques et évolution au 20^{ème} siècle. *Colloque SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales*. La Rochelle 2006.

Ullmann A., Pons F., 2006. NUNIEAU : digitalisation des données marégraphiques. *Colloque SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales*. La Rochelle 2006.

Vulgarisation scientifique

Sabatier F., in press. Modélisation de l'érosion des dunes de Camargue en relation avec le changement climatique. In : *Entre Terre et Mer : la Zone Atelier Orme*. Pour une approche intégrée de la zone

côtière du golfe du Lion. Eds. André Monaco, Wolfgang Ludwig, Mireille Provansal et Bernard Picon. Éditions CNRS.

Provansal M., Sabatier F., Vella C., Antonelli C, Maillet, G. (2005) Impacts of the fluvial sediment inputs and channel morphology in the mobility of the Rhône delta coast during the holocene and recent periods., *LOICZ Newsletter*. 4-7.

Emissions télévisuelles : *Thalassa, France 3*, vendredi 25 mai 2007 interview de François Sabatier sur l'impact du changement climatique sur l'érosion des plages de Camargue

Emissions radiophoniques : interview de François Sabatier sur l'avenir des côtes de Camargue en fonction du changement climatique diffusé sur France-Info le 25 avril 2007 et sur France-Inter le 12 mai 2007

Interview Sabatier sur le Changement Climatique sur le web : <http://www.myfreesport.fr/loisirs/outdoor/0/rechauffement-climatique-quand-mer-monte-11884.html>

Résumé

Le programme IMPLIT proposait d'analyser, à l'échelle régionale du Golfe du Lion, les relations entre les tempêtes et leurs impacts géomorphologiques et hydrologiques sur les hydro-systèmes littoraux. La production et l'analyse des marégrammes validés du Grau-de-la-Dent, de Sète et de Port-Vendres sur la période commune 1986-1995 au pas de temps horaire ont montré une grande cohérence spatiale des surcotes entre les différents sites : l'élévation anormale du niveau de la mer au-dessus de la marée astronomique, par ailleurs faible ici, est généralement associée à une perturbation transitant sur une trajectoire méridionale du centre de l'Atlantique Nord vers le Proche Atlantique et la Péninsule Ibérique et générant des vents de secteur sud sur le NW de la Méditerranée. Des particularités locales comme l'orientation de la côte peuvent engendrer également une sensibilité aux vents de nord (comme à Port Vendres et à Marseille), mais il s'agit alors d'élévation marine d'échelle locale. La configuration barométrique associée aux surcotes est donc représentative de la phase négative de l'oscillation nord-atlantique et des modèles statistiques simples permettent de simuler correctement les propriétés statistiques mensuelles et saisonnières, comme les seuils seulement dépassés dans 25% ou 10% des cas à partir des champs barométriques. L'évolution future des conditions atmosphériques favorables à une surcote marine est globalement stable au 21^{ème} siècle selon plusieurs scénarios A2 (forte hausse des gaz à effet de serre) et B2 (hausse modérée des gaz à effet de serre). Cette stabilité associée à la hausse moyenne du niveau de la mer devrait donc entraîner une augmentation de la fréquence d'occurrence des surcotes considérées aujourd'hui comme extrêmement rares. Ainsi les surcotes supérieures à 1 m, exceptionnelles au cours du 20^{ème} siècle, pourraient se produire entre 10% et 30% des jours du semestre hivernal à la fin du 21^{ème} siècle. A l'échelle du Golfe du Lion, les variations du rivage entre 1842, 1895, 1944, 1977 et 2000 indiquent un bilan (gain-perte) positif mais en diminution d'un facteur 6 sur l'ensemble de la période. L'impact du changement climatique est difficile à appréhender dans cette évolution du fait du rôle important de la diminution des apports fluviaux et des ouvrages de défense côtière qui perturbent les dynamiques naturelles. Cependant cette évolution est évidemment influencée par l'augmentation de l'intensité des tempêtes observées depuis la troisième partie du 20^{ème} siècle. L'évolution des lidos de Maguelone et de Petite Camargue (recul du rivage et dépôts d'*overwash*) ainsi que celle des profils bathymétriques du Languedoc-Roussillon dévoile les liaisons non-linéaires entre morphologie et forçages dont nous avons difficilement pu quantifier les relations. Le forçage climatique ne doit donc pas être considéré comme le seul paramètre qui contrôle la morphodynamique littorale ce qui en complexifie l'analyse. Compte tenu des résultats mitigés des enrochements déjà déployés sur la Petite Camargue, les techniques des protections futures qui chercheraient à ralentir le recul du rivage devront intégrer le comportement « type » des lidos et autoriser les dépôts d'*overwash* pour permettre une translation du cordon littoral sans augmenter artificiellement l'érosion. La modélisation 2DV de l'érosion des dunes durant les tempêtes indique qu'un événement exceptionnel de type « 1997 » suffirait à détruire la majorité des dunes encore présente sur les secteurs en érosion de Camargue. Le niveau d'eau joue un rôle plus important que la hauteur des vagues sur l'érosion des dunes et dans le cas d'un changement climatique, de faibles augmentations dans la force et/ou la durée des forçages se traduiront par des érosions significativement plus importantes que celles que nous connaissons aujourd'hui. Une modélisation numérique 3D a été mise en œuvre pour simuler la déformation d'une dune selon différents scénarii de sollicitations hydrodynamiques (pression et vitesse hydraulique initiales) en résolvant un problème de couplage fluide-structure. La modélisation des contraintes de cisaillement subies par la dune suggère que les phénomènes d'érosion et de rupture de dune s'enclenchent tout d'abord sur la face amont et en haut de la dune. Pour l'île de Camargue, un épisode pluvieux totalisant 100 mm (pluie décennale journalière) sature les capacités de drainage mécanique du delta. Dans l'état actuel, en cas d'intrusion massive d'eau dans le Nord de l'île de Camargue (précipitations et brèches du Rhône) le drainage gravitaire vers l'étang serait incapables d'évacuer les eaux vers la mer, surtout en cas de surcotes marines. Les simulations réalisées dans le cas du scénario le plus défavorable indiquent que pour des conditions climatiques extrêmes, une station d'assainissement supplémentaire de 10 m³/s sur le bassin versant et dix vannes supplémentaires (de 1.2 x 1 m) au pertuis maritime, la cote de 0.5 m NGF ne serait plus dépassée que 18 jours (38 avec l'hypothèse d'un niveau marin plus haut de 10 cm) contre 69 dans la situation actuelle.

MOTS-CLES : CHANGEMENT CLIMATIQUE, TEMPETES, SURCOTES, GOLFE DU LION

Abstract

IMPLIT analyzed the relationships between storm, sea surges and their geomorphological and hydrological impacts around Gulf of Lions. Numerical time series of tide-gauge variations have been produced through an automated toolkit on the 1986-1995 period at Grau-de-la-Dent, Sète and Port-Vendres. Regional sea surges, recorded from Port-Vendres to Marseilles are induced by extratropical storms travelling from central North Atlantic on a southern track and leading to 2-5 days of onshore southerly winds. This pattern occurs more frequently during negative phase of the North Atlantic Oscillation. This relationship allows to reproduce accurately the interannual variations of seasonal-monthly properties from sea level pressure averaged over the western Europe and Eastern North Atlantic. The frequency of the sea level pressure pattern associated with sea surges is quite stable during the 21th century using climatic simulation including the increase of greenhouse gases associated with human emissions but the mean sea level rise increases dramatically the frequency of extreme sea surges > 1 m from < than 1% to 10-30% at the end of the 21th century. Shoreline variation displays a decreased positive balance during the 20th century. This behaviour is induced by decreasing of river sediments input, coastal engineering constructions and a small increase of the frequency of onshore winds since 70s. Modelling of dune erosion indicates that an extreme storm, like the 1997 one, is able to destroy all the dunes. Consequently, an increase of this kind of event potentially caused by climatic change could be very harmful around the Gulf of Lions, particularly the Camargue. The Camargue could be flooded by intense rainfall and/or river flooding. This could be more harmful if a sea surge is concomitant with this water continental inputs.

Key words: Climatic change, storms, sea surges, Gulf of Lions