

Impacts des tempêtes sur la morphologie d'un littoral microtidal : le site du Lido de Sète à Marseillan, Golfe du Lion

**Mathieu GERVAIS¹, Yann BALOUIN¹, Rémi BELON¹, Raphaël CERTAIN²,
Nicolas ROBIN², Serge BERNE²**

1. BRGM, Service Géologique du Languedoc-Roussillon, 1039 rue de Pinville,
34000 Montpellier, France.

m.gervais@brgm.fr

2. EA 4218 IMAGES, Université de Perpignan, 52 av Paul Alduy,
66860 Perpignan Cedex, France.

Résumé :

L'action des tempêtes marines entraîne souvent des réponses morphologiques rapides et des impacts importants sur les littoraux sableux : recul du trait de côte, submersion et érosion de la plage, franchissements et destruction des systèmes dunaires et parfois de l'ensemble du cordon littoral, mais provoque également une importante dynamique des barres sédimentaires d'avant-côte. Dans le cadre du projet européen MICORE (Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events), des campagnes de mesures sont menées depuis 2008 sur le Lido de Sète à Marseillan, afin de caractériser la dynamique des morphologies lors des événements énergétiques. L'objectif principal de ces campagnes était d'étudier de la variabilité des réponses morphologiques en fonction des différents facteurs de forçages hydrodynamiques (vagues, marée, surcote), atmosphériques (vent, dépression atmosphérique, précipitation) et sédimentaires (morphologie préexistante).

Deux secteurs de plage à morphologies différentes ont été suivis de manière intensive par des techniques conventionnelles de topo-bathymétrie et d'hydrodynamique afin de caractériser leurs réponses respectives aux tempêtes marines. Le secteur sud est caractérisé par la présence de deux barres d'avant-côte quasi-rectilignes et le secteur nord est caractérisé par des morphologies sous-marines fortement tridimensionnelles (deux barres festonnées).

Plusieurs tempêtes majeures se sont produites lors de ce suivi (celles du 26 décembre 2008 et du 21 octobre 2009 sont les plus importantes). Elles présentaient des caractéristiques très différentes en terme de hauteurs et périodes de la houle, mais également en terme de niveaux de surcote.

Au niveau de la plage émergée, la réponse morphologique est globalement identique et se traduit par des apports massifs de sable vers le haut de plage suite aux événements les plus extrêmes. En revanche, les morphologies sous-marines ont évolué très différemment. Si le schéma classique de recul des barres pendant les tempêtes est observé sur les deux secteurs, la réponse tridimensionnelle est très différente : au sud, la

barre interne reste rectiligne quelque soient les forçages ; au nord, le système alterne des situations rectilignes, en croissants, en festons rompus, avec des transitions très rapides. Les évolutions observées dans la zone nord semblent montrer que la cinétique des barres est principalement fonction de niveau d'agitation. Toutefois, la morphologie préexistante joue un rôle prédominant dans la transition entre les différents types de barres.

Les levés, réalisés après chaque coup de mer significatif ($H_s > 1.5$ m) au cours du premier hiver, permettent de caractériser des seuils morphogènes et mettent en évidence l'importance des processus inter-tempêtes. En effet, le rôle des événements de houle modérée, et des épisodes de forte tramontane se révèle fondamental dans le retour aux conditions "d'équilibre".

Mots-clés :

Tempêtes – Morphodynamique – Barres d'avant-côte – Paramètres de houle – Surcote – Erosion – Résilience de la plage – Dépôt

1. Introduction

L'action des tempêtes marines entraîne souvent des réponses morphologiques rapides et des impacts importants sur les littoraux sableux : recul du trait de côte, submersion et érosion de la plage, franchissements et destruction des systèmes dunaires et parfois de l'ensemble du cordon littoral, mais provoque également une importante dynamique des barres sédimentaires d'avant-côte. Dans le Golfe du Lion, où des phénomènes érosifs continus s'associent à une forte anthropisation du littoral, ces phénomènes peuvent entraîner des impacts importants sur le milieu et sur les infrastructures et activités humaines. Dans le cadre du projet européen MICORE (Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events), des campagnes de mesures sont menées depuis 2008 sur le Lido de Sète à Marseillan, afin de caractériser la dynamique des morphologies lors des événements énergétiques.

L'objectif principal de ce travail est de caractériser les réponses morphologiques associées à des événements énergétiques afin d'améliorer la compréhension des facteurs (hydrodynamiques, météorologiques, morphologiques) qui prédéterminent les évolutions lors des tempêtes.

2. Site d'étude et méthodologie

Le site d'étude est le lido de Sète à Marseillan, localisé en Languedoc-Roussillon, et séparant l'étang de Thau de la mer Méditerranée. Le marnage est microtidal (20 à 30 cm), et le régime de vagues relativement calme (plus de 80% des hauteurs significatives de vagues sont inférieures à 1 m). Deux vents locaux dominent : la tramontane, de direction O à NNO, et le marin généralement de S à SE. Ce vent marin génère les épisodes de forte houle, qui sont principalement de direction ESE, mais

peuvent également provenir du Sud. A Sète, la période de retour annuelle pour les vagues de tempêtes est environ de 4.63 m de hauteur significative au large (H_s) (GLOASGUEN, 1998). L'élévation locale du niveau de la mer (surcote atmosphérique, *set-up* des vagues) lors de ces événements peut atteindre 1 m sur la plage.

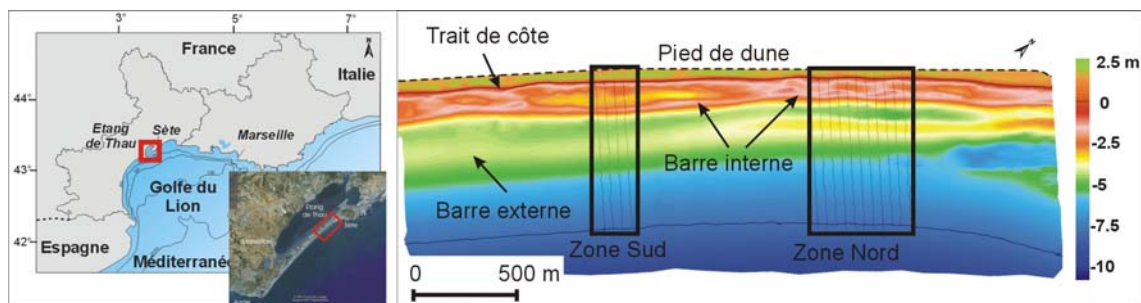


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (à gauche) et bathymétrie (à droite) illustrant les zones de suivi Nord et Sud et les morphologies d'avant-côte.

La morphologie de ce littoral est caractérisée par une plage étroite et basse et des morphologies de barres d'avant-côte interne et externe qui sont pseudo-rectilignes à rythmiques (CERTAIN, 2002). Les travaux d'aménagement en cours sur ce littoral (recul stratégique de la route) ont sensiblement modifié la morphologie du secteur NE par la reconstruction d'un cordon dunaire étroit et le rechargement de la plage qui a permis de réalimenter un système d'avant-côte décrit comme fortement déficitaire (CERTAIN, 2002).

Les études menées sur ce secteur (BARUSSEAU & SAINT-GUILY, 1981 ; AKOUANGO, 1997 ; CERTAIN, 2002 FERRER, 2006) ont mis en évidence des évolutions rapides et une dynamique des barres d'avant-côte très importante lors des tempêtes. Il est en effet décrit que les barres oscillent autour d'une position d'équilibre à fréquence saisonnière (modèle O.P.E, AKOUANGO, 1997). Dans un contexte temporel plus large, les tempêtes décennales, ou les hivers particulièrement riches en tempêtes, sont responsables d'un soudain recul de la barre externe qui conduira à sa disparition en quelques années (modèle N.O.M, observé par CERTAIN, 2002).

Les levés réalisés en 2008 ont permis de caractériser l'état initial du site avant les périodes hivernales. La morphologie était alors caractérisée par (figure 1) :

- Plage émergée : haut de plage à pente très faible (plateau), berme avec encoche/falaise d'érosion due à la tempête précédent l'étude, croissants de plage formés sur la zone de jet de rive en bas de plage. Sinuosités du trait de côte très marqués et reflétant les festons de la barre interne.
- barre interne : barre proche et croissants à l'extrême sud ; barre éloignée, profonde et quasi-linéaire au sud. ; barre proche et festons très marqués, et peu profonds, pour la moitié nord.

- barre externe : barre éloignée, profonde, pseudo-linéaire, et peu marqué pour la moitié sud. Barre plus marqué et plus proche pour toute la partie nord, avec une morphologie festonnée de grande ampleur.

Afin de mieux appréhender le rôle des morphologies sur les évolutions, deux secteurs contrastés ont été suivis (figure 1) : la zone Sud présentant 2 barres linéaires de faible amplitude (la barre externe semblant en forte dégénérescence) et la zone Nord, où les systèmes de barres sont bien développés, avec des morphologies en croissant bien formées sur la barre interne. De cette manière, la zone sud servira de zone témoin où les barres sont homogènes longitudinalement et où seront quantifiables les processus de mobilisation sédimentaire transverses à la plage, tandis que la zone nord, de part son caractère fortement tridimensionnel, permettra d'apprécier les changements morphologiques des motifs rythmiques de barres d'avant-côte.

3. Méthodologie

Les mesures topo-bathymétrique ont été réalisées sur les deux secteurs (Zone Sud et Zone Nord) après chaque épisode de houle important à l'aide d'un GPS cinématique centimétrique (DGPS) et un sondeur mono-faisceau. Les profils sont réalisés tous les 50 m. Ils couvrent l'avant-côte depuis la profondeur -10 m, jusqu'à la partie haute de la plage (arrière dune), sur les 2 zones évoquées, de 150 m et 500 m de large chacune le long du trait de côte. 13 levés ont ainsi été obtenus durant l'hiver 2008-2009 et le début de l'hiver 2009-2010. Certains de levés couvrent une zone plus large (4 km) et permettent d'analyser la représentativité des zones choisies.

Sur la totalité des profils levés, un certains nombres d'indicateurs ont été déterminés pour l'étude des évolutions morphologiques. Ont ainsi été caractérisés : les positions (fronts interne et externe, crête) et formes des barres d'avant-côte, la position du trait de côte, les volumes des différents compartiments morphologiques : barres, plage émergée, plage immergée. Ces évolutions morphologiques sont confrontées aux forçages météo-marins. Les données de houle proviennent du houlographe directionnel (bouée datawell, DRE-LR) positionné au large de Sète (043°22,261'N, 003°46,777'E) à une profondeur de 30 m. L'évolution du niveau marin et les surcotes proviennent des relevés du marégraphe (SHOM) dans le port de Sète. Le niveau marin observé, intégrant la surcote, la marée, et le set-up des vagues sera nommé NM par la suite. Les données de vents proviennent d'une station météo proche du site (au niveau de Sète).

Ces données ont permis la caractérisation des épisodes de tempêtes, et d'inter-tempêtes, en terme d'intensité (hauteur des vagues, énergie déployée, niveau marin atteint, vitesse du vent), de direction, mais aussi de durée de l'événement.

4. Résultats

4.1 Conditions météo-marines et caractéristiques des tempêtes

Au cours de ce suivi, 5 événements très énergétiques ont eu lieu (cf. figure 3). Ces tempêtes sont définies ici par une houle de plus de 3 m de hauteur significatives (Hs) au pic de vagues, mesuré au large. Elles sont restées inférieures à la tempête annuelle définie par le CETMEF (GLOASGUEN, 1998). Ces événements sont séparés par 5 périodes de plus faible agitation, ou "calme" relatif, avec des houles comprises entre 1 et 3 m. Les caractéristiques hydrodynamiques des ces épisodes sont résumées dans deux tableaux, 1.A et 1.B, le premier concernant les périodes inter-tempêtes, et le second les périodes d'agitation forte. Les tempêtes sont surlignées en gris. Les valeurs écrites en vertes indiquent un fonctionnement partiel du houlographe et donc des données incomplètes (période estivale et montant de la tempête du 29 novembre 2009).

Chaque période de calme relatif ou tempête est énuméré, et séparé suivant l'ordre chronologique. L'énumération est la suivante : le "calme" 1 précède la tempête 1, le "calme" 2 précède la tempête 2, et ainsi de suite...

- caractéristiques des tempêtes majeures

La Tempête 1 a eu lieu le 26/12/2008. Elle était caractérisée par une houle d'ESE forte et longue, des brisants "propres" et un faible NM par rapport à la houle. Cette tempête a eu une période de tombant assez longue, avec un second pic de houle d'ESE courte et ventée. L'énergie cumulée lors de cet événement est très importante, avec une forte composante longitudinale.

La tempête 2 (+ 2 bis) a eu lieu le 01/02/2009. La houle était plus courte, ventée, de provenance ESE, tournant SE au pic, et le NM enregistré très important (+0.77 m). Cette tempête est suivie 2 jours après par un coup de mer, que nous incluons dans la tempête 2 (bis), bien qu'un relevé morphologique ait été réalisé entre les deux coups. Cette seconde houle de secteur sud est courte, ventée, et la surcote est encore très importante.

La tempête 3 a eu lieu le 26/04/2009. Il s'agissait d'une houle courte ventée d'ESE, qui a déployée une énergie avec une forte composante longitudinale. Le NM est resté modéré à faible.

La tempête 4 a eu lieu le 21/10/2009. Il s'agissait d'une houle très forte (Hs~4,5 m) mais de courte durée comparée à celle de décembre. La période des vagues est restée moyenne à courte. La provenance sud au montant a tourné à l'ESE au pic d'énergie, et de nouveau S sur le tombant. Le vent de secteur S-SE était très fort au pic. Le NM enregistré est le maximum de ce suivi (1,05m).

La tempête 5 a eu lieu le 29/11/2009. Il s'agissait d'une houle courte de sud, avec un vent fort de SSO et un NM modéré à faible. Malheureusement nous n'avons pu avoir les données du houlographe lors du montant de tempête. La durée de la tempête a été estimée très courte.

Tableau 1. A. Caractérisation hydrodynamique des périodes inter-tempête en considérant le nombre de jours depuis la dernière tempête, le nombre d'évènements de houles modérés, l'énergie de houle entrante cumulée depuis, ainsi que sa composante longitudinale (positive = houle de SO). Il est aussi indiqué l'énergie totale cumulée avant la tempête par la période plus calme, de même que sa composante transverse.

Tableau 1.B. Caractérisation hydrodynamique des tempêtes ou de l'épisode de houle principal de la période de calme. Les paramètres de houles et NM (par rapport au 0 hydrographique) sont mesurés au pic d'énergie. L'énergie totale de l'évènement, quand $H_s > 1m$, est aussi indiqué par les composantes transverses et longitudinales à la côte.

date du levé	energie totale norm. Interlevé	energie totale long. Interlevé	nom période relevé	dern. Tempête	temps écoulé	nbre événmt post-T	nbre événmt pré-T	cumul energie post-T	cumul energie pré-T	cumul energie long post-T	cumul energie long pré-T
UNITES -->	W	W	date	date	jours	num	num	W	W	W	W
18/11/2008			effet non étudiée	02/11/2008 12:00	16 0	2		690 623		347 020	
22/12/2008	3 567 729	1 211 172	calme 1	02/11/2008 12:00	50 0	6		4 258 352		1 558 191	
06/01/2009	8 356 611	-1 332 472	tempête 1	26/12/2008 18:00	10 8	0	6	219 347	4265332	8 006	1558732
13/01/2009	791 390	-361 648	calme 2.1	26/12/2008 18:00	17 8	1		1 010 246		-353 214	
29/01/2009	781 539	384 295	calme 2.2	26/12/2008 18:00	33 8	2		1 791 406		31 454	-321758
04/02/2009	4 166 380	-486 549	tempête 2	01/02/2009 18:00	2 8	0	2	54 333	2803300	-1 094	
16/02/2009	2 058 681	-1 124 428	tempête 2 bis	01/02/2009 18:00	14 8	1		2 110 305		1 122 185	
12/03/2009	1 109 833	130 585	calme 3.1	01/02/2009 18:00	38 8	3		3 219 910		1 252 996	
21/04/2009	2 735 798	250 353	calme 3.2	01/02/2009 18:00	78 8	6		5 955 490		1 503 376	
30/04/2009	3 067 245	-970 493	tempête 3	26/04/2009 04:00	4 3	0	6	38 146		16 351	
03/11/2009	7 372 156	286 417	calme 4 + tempête 4	21/10/2009 09:00	13 1	0	6	183 959	7410170	70 438	-29264
04/12/2009	3 674 442	1 077 155	calme 5 + tempête 5	29/11/2009 12:00	5 0	1	3	263 099	2645007	-5 202	528909

A.

date du levé	événmt Hs max période inter-levés	nom période relevé	Hs max	Ts à Hs max	dir. à Hs max	dir. norm. à Hs max	durée événmt	NM à Hs max	energie événmt	energie long événmt
UNITES -->	date	date	m	s	°N	°	h	m	W	W
18/11/2008	02/11/2008 12:00	effet non étudiée	3.48	6	111	-27	110	0.9	5 257 698	1 084 589
22/12/2008	29/11/2008 16:00	calme 1	2.48	8	180	42	35	0.81	1 204 492	691 419
06/01/2009	26/12/2008 18:00	tempête 1	3.99	10	121.1	-16.88	140	0.65	8 014 329	-1 251 670
13/01/2009	09/01/2009 17:00	calme 2.1	2.06	7	116	-22	25	?	643 425	-270 694
29/01/2009	19/01/2009 17:00	calme 2.2	1.07	7	172	34	21	0.45	252 681	149 706
04/02/2009	01/02/2009 18:00	tempête 2	3.30	7	132.6	-5.43	87	0.77	4 062 135	-498 733
16/02/2009	05/02/2009 19:00	tempête 2 bis	2.73	6	181	43	51	0.85	1 762 695	1 084 583
12/03/2009	04/03/2009 12:00	calme 3.1	2.34	6	184	46	14	0.63	424 669	308 545
21/04/2009	15/04/2009 16:00	calme 3.2	2.45	6	147		9	0.52	921 233	181 400
30/04/2009	26/04/2009 04:00	tempête 3	3.41	8	119.7	-18.29	57	0.68	2 989 430	-1 010 971
03/11/2009	21/10/2009 09:00	calme 4 + tempête 4	4.50	8	121	-17	69	1.05	4 500 384	261 526
04/12/2009	29/11/2009 12:00	calme 5 + tempête 5	3.20	8	179	41	16	0.62	950 296	623 886

B.

• Périodes inter-tempêtes et épisodes de fortes tramontane

Afin de mieux comprendre les évolutions observées, les périodes inter-tempêtes ont également été analysées. Certains petits coups de mer, non considérés comme des tempêtes peuvent en effet entrainer des évolutions morphologiques importantes.

Le calme 1 du 18/11/2008 au 22/12/2008 (date des levés) a été caractérisé par des houles de faible amplitude peu ventés et à NM bas dans l'ensemble. Toutefois, 6 houles successives de SE, moyennes à faibles, ont été observées. 2 évènements se détachent car

ils ont des périodes de vagues anormalement importantes, respectivement de 10 s (E) et 8 s (S).

Le Calme 2.1 du levé du 06/01/2009 au levé du 13/01/2009, présente un épisode de houle d'E moyennement haute, longue et propre.

Le Calme 2.2 du levé du 13/01/2009 à celui du 29/01/2009 ne montre qu'un très petit épisode de houle significatif. Il est cependant caractérisé par un événement de tramontane intense le 24 janvier.

Le calme 3.1 va du levé du 16/02/2009 à celui du 12/03/2009. La période est caractérisée par 2 houles courtes et ventées de provenance S à SE pour des NM moyens, mais aussi par un épisode de tramontane très fort le 04 mars.

Le calme 3.2, du levé du 12/03/2009 au levé du 21/04/2009, est une longue période très calme. Cependant 3 épisodes de houles moyennes, courtes, et ventées ont eu lieu, avec des NM modérés.

Le calme 4, précède la tempête 4 d'octobre et comprend toute la période estivale où la bouée n'a pas fonctionné. Un levé lidar a été effectué en août, mais il n'a pas pu être utilisé ici. Les modèles de prévisions de houle supposeraient l'existence de 6 épisodes de houles faibles à modérés, majoritairement ventés avec un NM moyen à assez haut.

Le calme 5, précède la tempête 5. Il n'y a là aussi pas de levé pré-tempête. La période décrit 2 houles courtes de SSE pour des NM moyens, à l'instar de la tempête.

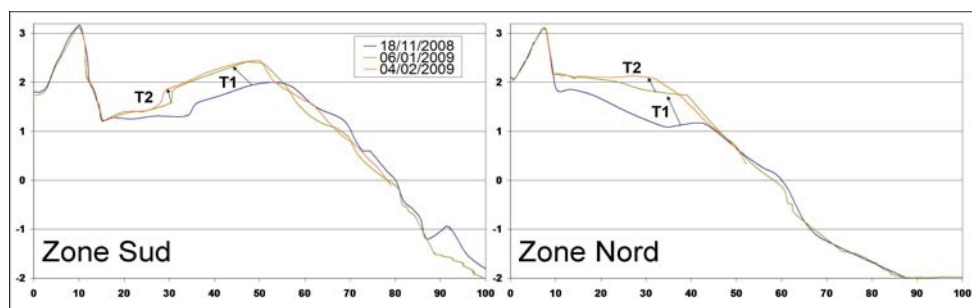


Figure 2. Dépôt massif de sable en haut de plage lors des événements de tempêtes de décembre 2008(T1) et février 2009 (T2).

4.2 Réponse morphologique aux événements de tempête

De manière générale, les tempêtes les plus importantes se caractérisent par un dépôt massif de sable en haut de plage. Dès que Hs atteint le seuil de 3 m environ, ce qui est variable selon la surcote, le jet de rive surpasse la berme pourtant très haute sur la zone sud, et atteint le front dunaire. Ce phénomène a été observé sur les deux secteurs (Nord et Sud, selon profils de la figure 2). La figure 4 (en bas) fait clairement apparaître un seuil, dans la hauteur significative de la houle, à partir duquel la plage est engraisée. Ce seuil semble être situé à environ 2.9-3 m, même si l'effet de la surcote reste à estimer. A l'inverse, les périodes plus calme de petites houles semblent, en moyenne, plutôt

érosives pour le front de plage (figure 4). Ces apports peuvent-êtres très importants (des dépôts atteignant près de un mètre ont été observés en pied de dune) et surpassent apparemment l'érosion du bas de plage qui peut parfois se produire.

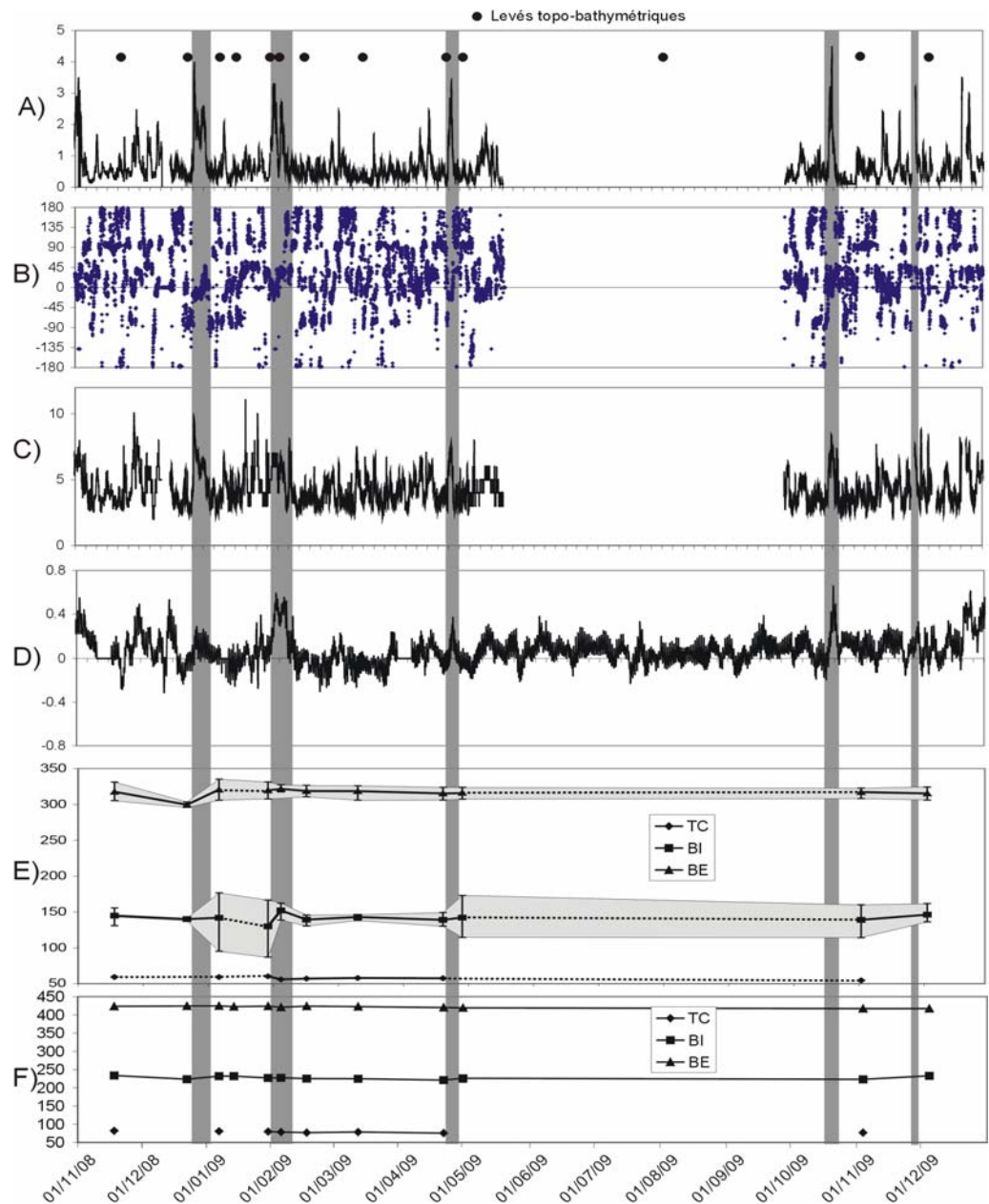


Figure 3. Hydrodynamique et évolutions morphologiques lors de la période de mesures. A) Hauteur significative de la houle (en m) ; B) Angle d'incidence de la houle au large (positif côté NE) (en deg) ; C) Période significative (en s) ; D) niveau marin (en m par rapport au zéro hydrographique) ; E) Zone Nord : position moyenne et déviation standard du trait de côte (TC), de la barre interne (BI) et de la barre externe (BE) ; F) Zone Sud : position moyenne et déviation standard du trait de côte, de la barre interne et de la barre externe.

Les épisodes de fortes tramontanes provoquent à l'inverse, en l'absence totale de houle, des décapages de la plage vers le talus de plage immergé, à des vitesses verticales d'érosions qui atteindraient d'après nos mesures 1 cm par heure sur le haut de plage. Lors des ces événements de tempêtes, on observe également un recul de la barre interne (cf. figure 3-E et F). A l'instar du volume de la plage il semblerait aussi que les déplacements transverses de la barre d'avant-côte interne dans son ensemble soient conditionnés par la hauteur de houle atteinte lors des événements entre les levés. La barre recule lorsque la houle dépasse un seuil de l'ordre de 2.7-3 m, de Hs au pic, et ce sur les deux zones (figure 4). Dans ces situations la barre externe semble aussi s'affaïssir.

Ces évolutions (recul de la barre et dépôt en haut de plage) sont observées sur les deux secteurs, malgré des morphologies d'avant-côte très différentes. Les vitesses de migration et les ampleurs de variations de volume semblent directement corrélées avec la hauteur significative atteinte pendant la tempête.

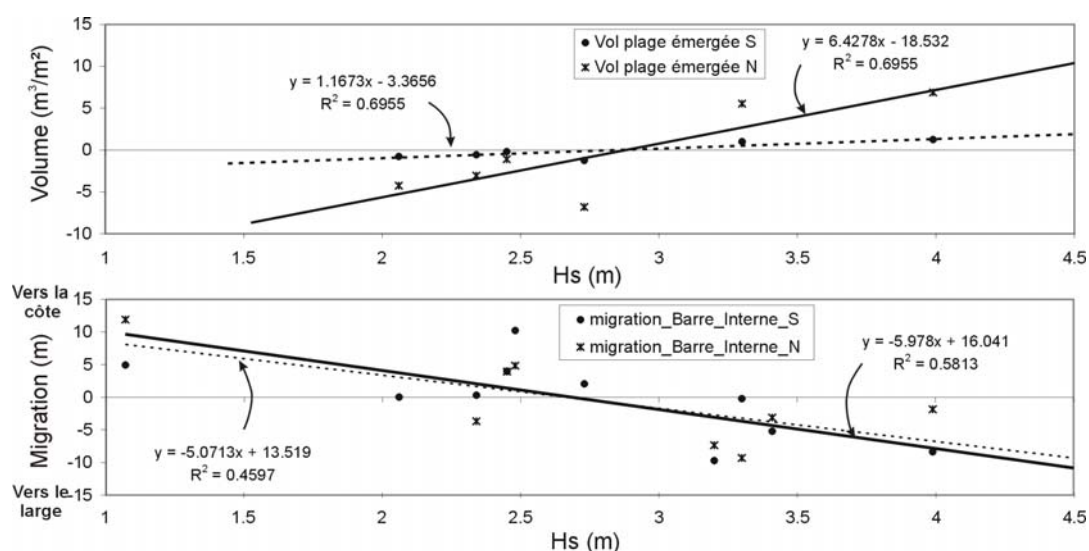


Figure 4. Variation de volume de la plage émergée (en haut) et migration de la barre interne (en bas) en fonction de la hauteur significative de la houle au pic de la tempête.

4.3 Dynamique tridimensionnelle des barres lors des tempêtes

Sur la figure 3-E et F, la zone grisée présente l'écart entre la position des crêtes sur les différents profils, et la position moyenne de la crête. Ceci traduit donc une variabilité latérale de la position de la crête et constitue donc un bon indicateur de la tridimensionnalité ou de l'obliquité de la barre. On observe donc, et en particulier dans la zone Nord, une forte variabilité de la tridimensionnalité de la barre, et un changement rapide d'un état à un autre (d'une barre longitudinale à une barre en croissant ou inversement.). Ainsi, la barre interne devient fortement tri-dimensionnelle lors des tempêtes de décembre 2008 et avril 2009, alors qu'elle se linéarise lors de la tempête de

février 2009. La figure 5 présente les bathymétries pré- et post-tempête dans la zone Nord pour les 5 événements majeurs observés lors de la campagne de mesures.

Lors de la tempête 1, la barre en festons très bien formés s'est rompue au niveau du point bas (ventre), et les points hauts (cornes) ont migré vers la côte. L'un des deux se trouve maintenant soudé à la plage. La morphologie de la fosse, oblique, suggère un chenal transverse d'évacuation de l'eau dans le sens préférentiel de la dérive. Lors de la tempête 2, d'incidence plus frontale, les points hauts s'émousent et une barre ainsi qu'une fosse linéaire se reforment. La barre est globalement linéaire, même si la présence de points hauts est toujours marquée. Lors de la tempête 3, cette barre linéaire à 2 points hauts est modifiée en un système dissymétrique de barre en festons de grandes ampleurs, fortement asymétriques. La fosse est creusée préférentiellement du côté SO de la corne, tandis qu'à son extrémité la ligne de crête de la barre est basse (ventre). Cette réponse morphologique serait semblable aux observations de Certain d'après les campagnes 1994 et 1999 sur le même site. Lors de la tempête 4, après la période estivale, la réaction est similaire à celle de la tempête 1. La barre en feston est percée au niveau de son ventre, tandis la corne du feston avance et s'attache à la côte sous forme d'un point haut à morphologie complexe, où l'on devine l'enracinement de la fosse au niveau de l'attache de ce point. Pour finir, la tempête 5 en provenance du Sud, modifie totalement la morphologie car une barre linéaire est de nouveau créée.

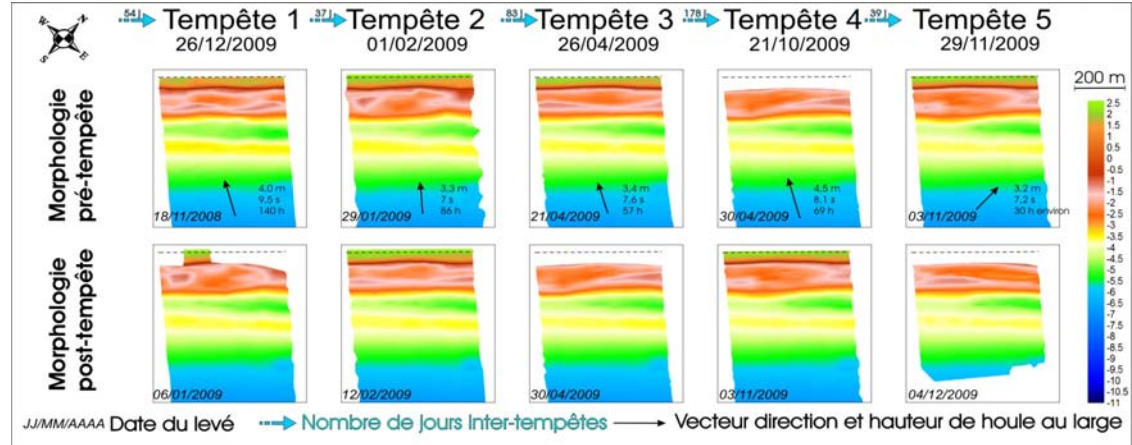


Figure 5. Bathymétries pré- et post-tempêtes dans la zone nord.

5. Discussion : impacts des facteurs de forçages sur la réponse morphologique

Les résultats obtenus sur plus d'un an d'observation des réponses morphologiques aux coups de mer mettent en évidence la relation entre l'intensité des forçages météo-marins et les évolutions. De manière générale, la barre interne recule dès lors que la hauteur significative de la houle augmente, à l'exception de la tempête 2. Lors de cette tempête, la surcote (NM) était très importante (0.99 m), et la modification du comportement peut sans doute s'expliquer par la diminution de la hauteur relative H_s/d , où d est la hauteur

d'eau au dessus de la barre. Par ailleurs, la durée entre les deux épisodes (tempêtes 1 et 2) est très courte (37 j), avec très peu de houles constructives, et il est probable que la tempête de février soit survenue sur un système toujours en "déséquilibre".

Dans la zone sud les évolutions sont moins contrastées que dans la zone nord. Dans ce secteur, rappelons "témoin", car les barres y sont linéaires, on observe une migration vers le large lors des événements les plus importants, mais pour des événements d'énergie plus modérée, la barre migre vers la plage très rapidement. En comparant l'impact des périodes de calme 1 et 3 avec la période de calme 2, L'effet des épisodes de "petites" houles à longues périodes, par rapports à ceux à courtes périodes, entrainerait un retour plus rapide aux conditions pré-tempêtes, ce qui n'est pas observé avec autant de clarté dans le secteur nord.

Les résultats obtenus montrent qu'il semble exister un seuil à partir duquel les comportements changent. Ce seuil est principalement associé à la hauteur significative de la houle lors du pic de tempête. Ainsi, on obtient une relation directe entre la hauteur des vagues et la migration des barres vers le large, et la hauteur des vagues et les gains volumétriques sur la plage. Les tempêtes entraineraient aussi une perte de volume des barres, bien que cela soit plus difficile à montrer sur la zone au nord où les morphologies 3D peuvent migrer longitudinalement avec la dérive. Il existe donc une relation bien établie entre l'intensité des forçages et les réponses morphologiques en termes de mobilité sédimentaire (variations de volumes, et intensité des déplacements sableux).

En revanche, les motifs de barres, en particulier dans la zone nord, ne semblent pas répondre directement aux forçages météo-marins. En effet, les tempêtes 2 et 3, qui sont relativement similaires en termes de hauteur de vagues et de direction, ont eu des réponses morphologiques très distinctes : de festons détruits vers une barre linéaire pour la tempête 2 ; d'une barre linéaire vers des festons très marqués pour le tempête 3.

Les épisodes de tramontane semblent jouer un rôle prépondérant en l'absence de vagues comme il a été montré par DURAND (1999) plus au sud du Golfe du Lion.

6. Conclusions

Les campagnes de terrain réalisées depuis Novembre 2008 ont permis d'obtenir une base de données inédite et des informations quantitatives sur les réponses morphologiques lors d'événements énergétiques successifs. Ces levés ont été réalisés à chaque coup de mer, permettant d'analyser la contribution spécifique de chacun des événements, mais également celle des phases de reconstruction.

Les résultats semblent démontrer le fait que les différents forçages jouent un rôle direct sur la dynamique sédimentaire (mobilité des fonds, volumes, ...), mais ne semblent pas jouer un rôle prédominant sur les motifs des barres. La dynamique des barres paraît fortement influencée par la morphologie préexistante avant la tempête.

Même si l'échantillonnage reste limité, les résultats obtenus semblent démontrer l'importance de la morphologie pré-tempête sur la dynamique des barres d'avant-côte lors des épisodes extrêmes, et démontre aussi le rôle essentiel des périodes de plus faibles houles.

7. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet FP7 MICORE n°202798. Le premier auteur bénéficie d'une allocation doctorale de la Région Languedoc-Roussillon et du BRGM. Merci à Gwenaëlle Bodéré, Cécile Godon et Pierre Ferrer pour leur contribution aux mesures de terrain.

8. Références bibliographiques

- AKOUCO E. (1997). *Morphodynamique et dynamique sédimentaire dans le Golfe du Lion. Contribution à l'étude de la zone côtière dans l'actuelle et le quaternaire récent*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Perpignan, 200 p.
- BARUSSEAU J.P, SAINT-GUILY B. (1981). *Disposition, caractères et mode de formation des barres d'avant-côte festonnées du littoral du Languedoc-Roussillon (France)*. Ocea. Acta., 4, 3, pp 297-304.
- CERTAIN R. (2002). *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le Golfe du Lion (Languedoc-Roussillon)*. Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Perpignan, 109 p.
- GLOASGUEN G. (1998). *Estimation de la période de retour de la tempête du 16 décembre 1997 à Sète*. Rapport STNMTE, CETMEF, 10 p.
- DURAND P. (1999). *L'évolution des plages de l'ouest du Golfe du Lion au XX^{ème} siècle*. Thèse de doctorat en géographie physique, Université Lumière Lyon 2, 462 p.
- FERRER P., REY V., CERTAIN R., ADLOFF F., MEULÉ S. (2006). *Les ondes infragravitaires et leur rôle éventuel dans la formation de croissants de plage : cas de la plage de Sète*. IX^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Brest, pp 187-194.