



Dynamique à haute fréquence des barres d'avant-côte en milieu microtidal : suivi vidéo du Lido de Sète, Golfe du Lion

Yann BALOUIN¹, Léo DESBIENDRAS¹, Mathieu GERVAIS^{1,2}, Jim TESSON¹

1. BRGM, Service Géologique Régional du Languedoc-Roussillon, 1039, rue de Pinville, 34000 Montpellier, France. y.balouin@brgm.fr

2. EA 4218 IMAGES, Université de Perpignan Via Domitia, 52 Av. Paul Alduy 66860 Perpignan, France.

Résumé :

Dans le cadre du projet européen MICORE (Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extreme storm events), des campagnes de mesures ont été menées pendant 3 hivers successifs sur le Lido de Sète à Marseillan, afin d'analyser les changements morphologiques lors des événements énergétiques. Depuis le mois d'avril 2011, un système vidéo est installé sur le littoral du Lido de Sète. Il permet de suivre un linéaire côtier (plage émergée et position des barres d'avant-côte) de 4 km à haute fréquence et résolution, et d'obtenir des informations sur les conditions de forçage (houle, courant de surface, jet de rive).

La succession de coups de mer de faible amplitude ($hs \sim 3$ m) et de directions variées, a été observée par vidéo durant l'automne 2011. Si les conditions hydrodynamiques sont restées relativement modérées, les changements morphologiques, notamment des barres pré-littorales, ont été importants, sans pour autant atteindre ceux observés lors des tempêtes les plus violentes. La migration longitudinale des barres en "feston" dont la morphologie générale est affectée par les formes rythmiques prenant l'allure de croissants peut atteindre près de 200 m pour des conditions de houle oblique, ce qui traduit la forte mobilité de ces systèmes et la difficulté de l'appréhender avec des techniques classiques de suivis. Le couplage des processus morphodynamiques entre les barres et la plage aérienne a également pu être constaté, avec un impact très fort de la position transversale de la barre sur la réponse morphologique de la plage aérienne. Les zones d'érosion constatées correspondent au secteur où la corne du croissant est la plus proche du trait de côte, soulignant l'important rôle d'atténuateur de houle de ces systèmes de barres d'avant-côte.

Mots-clés : Suivi vidéo – Tempêtes – Barres pré-littorales

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, mais provoque également une importante dynamique des barres sédimentaires d'avant-côte.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Cette dynamique a fait l'objet de nombreuses observations et est largement décrite dans la littérature (VAN ENCKEVORT & RUESSINK, 2003), et plus récemment par ALMAR *et al.* (2009) et FERRER *et al.* (2009). Sur les littoraux microtidaux, les observations sont rares et dans la majorité des cas basées sur des levés bathymétriques à plus ou moins long-terme ne permettant pas d'appréhender les relations directes entre les forçages et les évolutions morphologiques. Parmi les travaux réalisés en milieu microtidal, on peut citer les études de GOLDSMITH *et al.* (1982), GUILLEN et PALANQUES (1993), CERTAIN (2002), et CERTAIN et BARUSSEAU (2005). Plus récemment, des études basées sur l'observation à haute fréquence des barres d'avant-côte ont permis aux auteurs de proposer une classification des états des barres rythmique (ARMAROLI & CIAVOLA, 2011) et à dynamique rapide. Sur le littoral du Golfe du Lion, les barres d'avant-côte sont considérées comme relativement stables à moyen et long-terme, avec des formes et positions plus ou moins constantes sur les photographies aériennes disponibles depuis les années 1940. Leur dynamique à plus court-terme est généralement associée aux épisodes de tempêtes qui génèrent des migrations longitudinales ou transversales des barres, ou des changements de formes de barres en croissantes à barres en échelons (CERTAIN, 2002) ou barres transversales (GERVAIS *et al.*, 2011), voire à des barres longitudinales.

Le développement d'outils vidéo (HOLMAN & STANLEY, 2007) a permis d'améliorer la fréquence d'observation de ces systèmes et la compréhension de leur évolution en fonction de l'hydrodynamique. La mise en œuvre d'un système vidéo ARGUS sur le Lido de Sète dans le Golfe du Lion depuis le mois d'avril 2011 permet d'analyser les évolutions à haute fréquence des barres d'avant-côte. L'objectif de cet article est de présenter les évolutions observées lors de l'automne-hiver 2011-2012, et notamment les réponses du système de barres en croissant à des conditions hydrodynamiques modérées considérées comme ayant peu d'impact sur la mobilité des barres. Le rôle de la position des barres sur les phénomènes d'érosion de la plage émergée et de la dune est également analysé.

2. Site d'étude

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. La côte est orientée SO-NE (nord 48°). Le marnage est microtidal (20 à 40 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 ouest 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, les vagues de tempête d'une période de retour annuelle ont une hauteur significative (H_s) au large de l'ordre de 4.63 m (CETMEF, 1998). L'élévation locale du niveau de la mer (surcote atmosphérique et *set-up* des vagues) peut atteindre 1 m sur la plage.

La morphologie de ce littoral est caractérisée par une plage étroite et basse et par la présence de barres d'avant-côte interne et externe qui sont sub-rectilignes à rythmiques (CERTAIN, 2002). Les études menées sur ce secteur (BARUSSEAU & SAINT-GUILY, 1981 ; BARUSSEAU *et al.*, 1994) ont mis en évidence des évolutions rapides et une dynamique des barres d'avant-côte 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, CERTAIN & BARUSSEAU, 2005). Dans un contexte temporel plus large, les 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). GERVAIS *et al.* (2011) ont montré l'existence de seuils morphogènes dans ce secteur avec une mobilité des morphologies de barres dès lors que la hauteur significative au large atteint 3 m. La dynamique des barres devient plus marquée lorsque la houle au large atteint 4 m, entraînant, des reculs importants des barres, des ruptures de croissants ou le développement de croissants fortement asymétriques en cas de houles obliques.

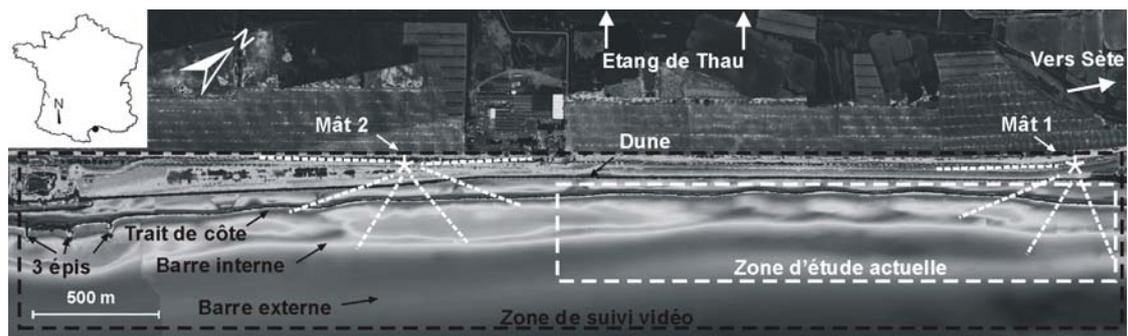


Figure 1. Localisation et caractéristiques de la zone d'étude. L'encadré blanc délimite la zone des barres tridimensionnelles analysées dans cette étude.

3. Méthodologie

Le site du Lido de Sète a fait l'objet, dans le cadre du projet européen MICORE, d'un suivi topo-bathymétrique intensif de 2008 à 2010. Ce suivi était focalisé sur les évolutions morphologiques lors des tempêtes, incluant des levés pré- et post-tempêtes, des mesures hydrodynamiques au large et à la côte. Depuis 2011, ce site fait l'objet d'un suivi vidéo utilisant le système ARGUS.

3.1 Le système ARGUS sur le Lido de Sète

Le système ARGUS de 3^{ème} génération (HOLMAN & STANLEY, 2007) a été installé sur le Lido de Sète à Marseillan en avril 2011 dans le cadre d'un partenariat Thau Agglo – BRGM pour le suivi des défenses maritimes du littoral. Il est composé de 2 stations comportant 8 caméras, qui permettent un suivi continu du littoral allant du triangle de Villeroy aux 3 digues, soit un peu plus de 4 km (figure 1). Le système de coordonnées a pour origine la station ouest, l'axe des x étant perpendiculaire à la côte et

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

l'axe des y parallèle, les deux étant positifs respectivement vers le SE et le NE. Les images ARGUS sont des images instantanées, moyennées sur 10 min et de variance. Les images sont acquises simultanément par les 8 caméras toutes les 30 min. La résolution des images est très bonne dans la direction transversale (de 0,1 à 4 m à plus de 1000 m de la station). La résolution longitudinale est inférieure à 1 m à proximité de la station et à 30 m à 1500 m de la station. Les images obliques obtenues sont rectifiées et géoréférencées pour former des images verticales qui sont par la suite analysées pour étudier la position des barres d'avant-côte. La barre externe sur le Lido de Sète présente une morphologie en feston de grande longueur d'onde. Cette barre étant relativement stable, cette étude s'intéresse essentiellement au système de barre interne, très mobile et détectable pour des conditions hydrodynamiques plus fréquentes.

3.2 Identification des barres sur les images

La zone retenue dans cette étude est la zone NE dans laquelle la barre interne présente des formes rythmiques. La première étape pour l'analyse de ces morphologies est la sélection des images. Celles-ci doivent avoir une définition et un contraste suffisant pour l'analyse, mais elles doivent également avoir été prises durant des conditions hydrodynamiques optimales pour identifier et positionner les barres le plus précisément possible. La position du déferlement qui est utilisé pour l'analyse dépend évidemment des caractéristiques de la houle au large. Pour cette analyse de la barre interne, les conditions optimales correspondent à des hauteurs significatives au large inférieure à 1,8-2 m et des niveaux de surcote faibles (0,1-0,2 m). Les données utilisées ici proviennent de la bouée de la DREAL LR située à 5 km au large de Sète à -30 m, et du marégraphe du port de Sète.

La détection de la barre sur les images est réalisée à l'aide de la boîte à outils BLIM (POPE, 2008). Les images obliques obtenues sont rectifiées et géoréférencées pour former des images verticales qui sont par la suite analysées pour extraire le maximum d'intensité de pixel longitudinalement (LIPPMANN & HOLMAN, 1989). Ce maximum est associé à la crête de la barre (ARMAROLI & CIAVOLA, 2011). L'erreur de positionnement de la crête de barre (comparée à la bathymétrie réelle) est de quelques mètres en longitudinal, et de l'ordre de 10 m en transversal.

4. Résultats

4.1 Conditions hydrodynamiques

La figure 2 présente les conditions hydrodynamiques enregistrées au large de la zone d'étude d'octobre à décembre 2011. Cette période présente des conditions de houle relativement modérées, avec des hauteurs significatives des vagues atteignant au maximum 3,6 m (très inférieur à la houle de tempête annuelle estimée à 4,6 m). On

observe cependant plusieurs coups de mer successifs atteignant 2,5 m à 3 m, de périodes de 7 à 8 s et de directions variées (ESE à SSE), avec une incidence parfois importante. La quasi-totalité des coups de mer provient de l'ESE. Seul la « tempête » du 2-4 novembre provient du sud. Cet événement présente des vagues modérées, mais une forte incidence et une durée importante par rapport aux autres tempêtes.

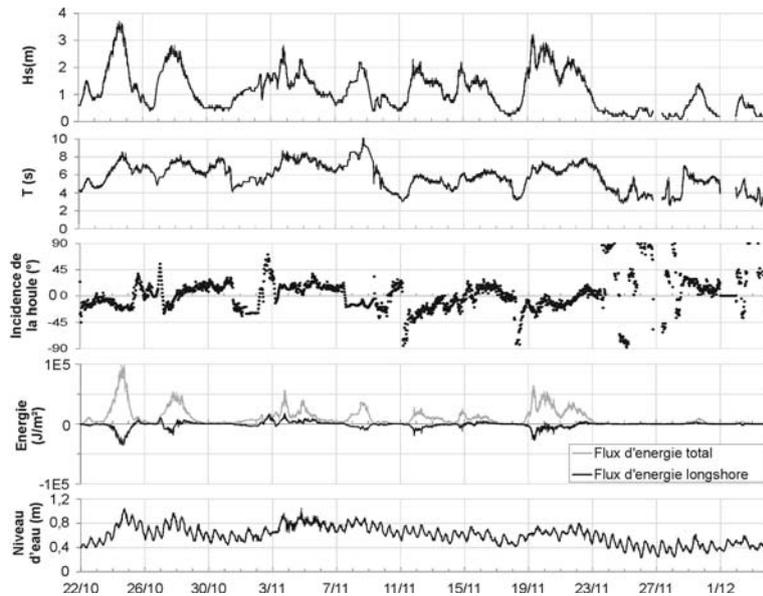


Figure 2. Conditions hydrodynamiques au large de Sète (30 m de profondeur): hauteur significative H_s , période T , incidence de la houle I , Flux d'énergie et niveaux d'eaux mesurés au marégraphe de Sète. Données DREAL-LR.

4.2 Dynamique de la barre interne en croissant

Le suivi de la ligne de crête sur cette période permet d'analyser l'évolution de la position et de la forme de la barre interne à partir de 23 images, soit, en moyenne, un suivi de la barre tous les 3 jours. La figure 3 présente l'évolution de la ligne de crête au cours du temps. La position transversale de la barre par rapport à une position moyenne est estimée tous les mètres. L'évolution temporelle de cette ligne de crête montre une très nette migration longitudinale des croissants avec des déplacements des cornes pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'un jour à l'autre. L'évolution transversale reste limitée à quelques dizaines de mètres et n'est donc pas considérée comme significative en raison de l'erreur de positionnement de la crête estimée à plus ou moins 10 m. L'évolution de la forme générale de la barre est relativement limitée, la forme des croissants restant constante sur la quasi-totalité de la période d'observation.

Du 23 au 28/10, on observe nettement deux cornes dans la zone d'étude, appelées corne est et ouest (figure 3). Elles migrent de façon similaire vers le sud-ouest sur 200 m. La période du 28 au 1/11 présente une stabilité de la position des cornes, suivi par une brève migration de la corne est vers le SO de 80 m. Entre le 3 et le 4/11, les cornes

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

migrent rapidement vers le NE de 230 m (et 120 m). On observe ainsi une augmentation de la distance entre les deux cornes tandis qu'une nouvelle corne apparaît au milieu. Le 5/11 la tendance s'inverse. Les trois cornes migrent progressivement de 200 m vers le SO jusqu'au 18/11. La migration s'accélère entre le 19 et le 22/11 avec un décalage de 100 m dans la même direction. La période du 23 au 29/11 présente peu de mouvement. La corne est présente un léger décalage de 30 m vers le SO, entraînant une diminution de la longueur d'onde des croissants. Entre le 29/11 et le 2/12, les cornes est et ouest se déplacent respectivement de 90 m et de 25 m vers les NE.

Lors du coup de mer du 24 octobre 2011, la variabilité longitudinale du niveau d'eau maximal atteint sur la plage dépend fortement de la position de la barre d'avant-côte (figure 4). L'analyse des profils d'intensité de pixel montre que la distance entre le déferlement de bas de plage et la limite supérieure du jet de rive est supérieure d'environ 15 m pour un profil situé sur la corne de la barre, atteignant près de 45 m alors qu'elle n'atteint que 30 m sur un profil situé sur le creux de la barre.

5. Discussion

5.1 Mobilité longitudinale des barres en croissant

Lors de la période de suivi, les conditions énergétiques sont restées modérées à fortes, n'atteignant pas les seuils habituellement considérés comme morphogènes dans ce secteur (GERVAIS *et al.*, 2011). Toutefois, les résultats ont montré une dynamique importante des barres d'avant-côte avec des migrations longitudinales pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette migration dépend essentiellement de l'incidence de la houle et du flux d'énergie longitudinale. Les résultats semblent montrer que la vitesse de migration présente une bonne corrélation ($r^2=60\%$ pour la corne est et 80% pour la corne ouest) avec l'énergie longitudinale au pic de la tempête, ce qui sous-entend que la mobilité des barres se produit essentiellement au pic des tempêtes. Toutefois, on observe lors de la tempête du 3-4 novembre, une migration importante par rapport au flux d'énergie observé pendant cet événement. Ceci pourrait s'expliquer par la durée du pic, plus importante pour cet événement, ce qui contribue à un flux d'énergie plus important sur la durée de l'événement. Cette migration liée à l'énergie de la houle a déjà été observée dans d'autres environnements (VAN ENCKEVORT & RUESSINK, 2003), toutefois, c'est la première fois que l'on observe des mobilités aussi importantes sur un site microtidal soumis à des houles relativement modérées. Cette mobilité est importante car elle induit une rétroaction de la plage émergée. Si la réponse morphologique des barres d'avant-côte pour des conditions plus énergétiques est plus complexe, les déplacements observés lors de conditions d'agitation modérées posent la question de la représentativité des levés bathymétriques classiques qui sont généralement réalisés plusieurs jours après un événement de tempête.

5.2 Impact de la position des barres sur l'érosion du front dunaire

Les barres d'avant-côte sont généralement considérées comme des atténuateurs de l'énergie des houles de tempête (BALOUIN *et al.*, 2005). Plus la morphologie est développée et dans une faible profondeur d'eau (donc proche de la côte), plus l'énergie dissipée lors du déferlement sera importante. Les observations réalisées sur le lido de Sète fin octobre – début novembre montrent que si l'impact du déferlement à la côte est atténué par la barre, les niveaux de *set-up* et de *run-up* sont accentués. Comme le montre la figure 4, le jet de rive est beaucoup plus long en face des cornes de la barre qui sont presque accolées à la plage. C'est ce jet de rive qui vient attaquer le pied de dune, érodant le front dunaire (disparition de tout le flanc marin).

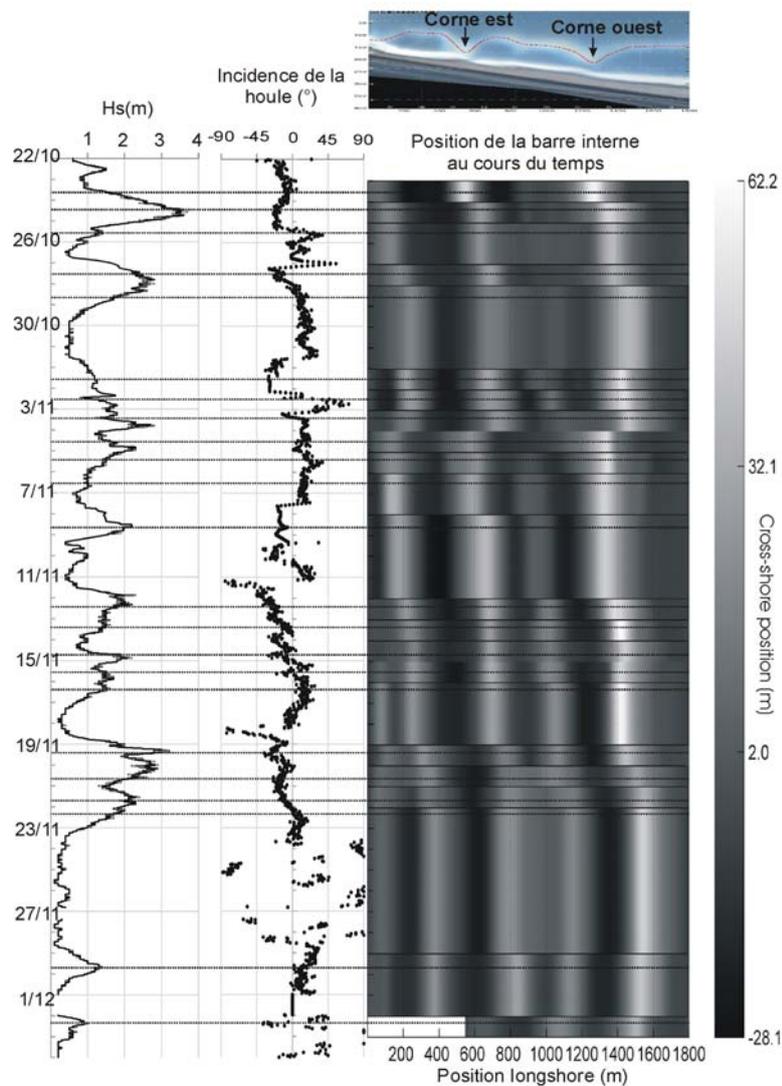


Figure 3. Evolution de la position de la barre interne au cours de suivi. Les zones claires indiquent les zones proches de la côte (cornes) et les zones sombres les plus éloignées (creux). La série temporelle de conditions de houle est indiquée sur la gauche.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Cette observation correspond bien-entendu à des conditions de houle et de surcote très spécifiques. Toutefois, ce phénomène d'augmentation locale du niveau d'eau a un impact non négligeable sur l'évolution de la zone supralittorale et augmente la possibilité d'ouverture de brèches dans cordon dunaire. Les observations à venir sur le site de Sète permettront d'affiner ces analyses et de préciser les conditions hydrodynamiques ayant un impact morphogène majeur.

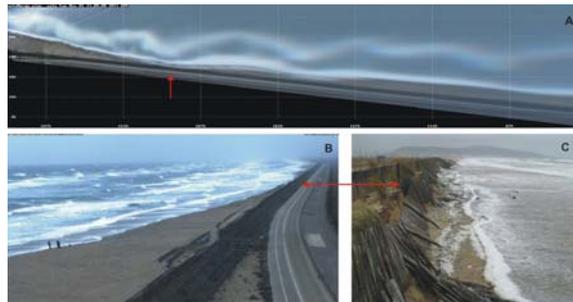


Figure 4. Impact du coup de mer du 24/10: a) Image moyennée et rectifiée ; b) image oblique ; c) photographie de l'impact sur le cordon dunaire. La flèche rouge indique le point d'impact sur les différentes photographies.

6. Conclusions

Les observations par vidéo du Lido de Sète ont permis d'analyser les réponses morphologiques de la barre d'avant-côte lors d'une succession de coups de mer relativement modérés en octobre et novembre 2011. Les résultats mettent en évidence une dynamique très importante des barres en croissant, qui se déplacent longitudinalement en fonction du flux d'énergie de la houle, et ce, pour des conditions considérées jusqu'à présent comme ayant un impact négligeable sur la position et la forme des barres. Ces résultats soulignent l'idée que les mesures bathymétriques classiques effectuées après les événements tempétueux sont inadaptées à la fréquence de mobilité des barres. L'acquisition de données quantitatives à haute fréquence lors des événements de tempête, inaccessibles par les systèmes d'observation classiques permet d'améliorer la compréhension des processus hydrosédimentaires en jeu. Ces résultats préliminaires restent à confirmer et seront analysés sur un échantillon de tempêtes plus important grâce au dispositif ARGUS.

Remerciements :

Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du projet FP7 MICORE n°202798, et dans le cadre de la convention Thau Agglo – BRGM pour le suivi de l'évolution du littoral du Lido de Sète.

7. Références bibliographiques

- ALMAR R., CASTELLE B., RUESSINK G., SENECHAL N., BONNETON P., MARIEU V. (2009). *High-frequency video observation of a double sandbar system under high-energy wave forcing*. J. of Coastal Res. SI 56, pp 1706-1710.
- ARMAROLI C., CIAVOLA P. (2011). *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification*. Geomorphology, Vol. 126(1-2), pp 201-216.
- BARUSSEAU J.P., SAINT-GUILY B. (1981). *Disposition, caractères et mode de formation des barres d'avant-côte festonnées du littoral du Languedoc-Roussillon*. Ocea. Acta, Vol. 4(3), pp 297-304.
- BARUSSEAU J.P., RADULESCU M., DESCAMPS C., AKOUANGO E., GERBE A. 1994 – *Morphosedimentary multiyear changes on barred coast (Golfe du Lion, Mediterranean sea, France)*, Marine Geology, Vol. 122, 47-62.
- CERTAIN R. (2002). *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le Golfe du Lion*. Thèse de 3^{ème} Cycle, Univ. Perpignan, 109 p.
- CERTAIN R., BARUSSEAU J.-P. (2005). *Conceptual modelling of sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Sete, France)*. Bull.Soc.Geol France, Vol. 176(4), pp 343-354. doi:10.2113/176.4.343
- CETMEF (1998). *Estimation de la période de retour de la tempête du 16 déc.1997 à Sète*. Rapport STNMTE, 10 p.
- FERRER P., CERTAIN R., BARUSSEAU J.P., GERVAIS M. (2009). *Conceptual modelling of a double crescentic barred coast (Leucate-Plage)*. 6th Int Conf of Coastal Dynamics, Tokyo, Japan, paper n° 51.
- GERVAIS M., BALOUIN Y., BELON R. (2011). *Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions coastline, France*. Geomorphology. GEOMOR-03744; 12 p.
- GOLDSMITH V., BOWMAN D., KILEY K. (1982). *Sequential stage development of crescentic bars: hahoterim beach, Southeastern Mediterranean*. J. of Sed Petrol, Vol. 52(1), pp 233-249.
- GUILLEN J., PALANQUES A. (1993). *Longshore bar and trough systems in a microtidal, storm-wave dominated coast: The Ebro Delta*. Mar. Geol., Vol. 115(3-4), pp 239-252. doi:10.1016/0025-3227(93)90053-X
- HOLMAN R.A., STANLEY J. (2007). *The history and technical capability of Argus*. Coastal Eng., Vol. 54, pp 477-491. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.003
- LIPPMANN T.C., HOLMAN R.A. (1989). *Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation*. J. of Geophys. Res., Vol. 94, pp 995-1011. doi:10.1029/JC094iC01p00995
- POPE L. (2008). *BLIM Toolbox Manual*. Report R08-02 IMAR Utrecht, Nov. 2008. 41 p.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

VAN ENCKEVORT I.M.J., RUESSINK B.G. (2003). *Video observations of nearshore bar behavior. Part 1: alongshore uniform variability*. Cont. Shelf Res., Vol. 23(5), pp 513-532. doi:10.1016/S0278-4343(02)00235-2