



Circulation souterraine sous la zone de swash

Lise PETITJEAN^{1,2}, Damien SOUS^{1,2}, Frédéric BOUCHETTE³,
Vincent REY^{1,2}, Samuel MEULE⁴, François SABATIER⁴

1. Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 83041 Toulon Cedex 09, France.
2. Aix Marseille Université, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 13288 Marseille, France.
3. GEOSCIENCES-Montpellier, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
4. CEREGE, Aix-Marseille Université, CNRS UMR 6635, Aix en Provence, France.
*lise.petitjean@mio.osupytheas.fr ; sous@univ-tln.fr, bouchette@gm.univ-montp2.fr ;
rey@univ-tln.fr ; meule@cerege.fr ; sabatier@cerege.fr*

Résumé :

Les plages sableuses constituent une frontière mobile et poreuse entre l'océan ouvert et la terre. La compréhension de la circulation dans les nappes de plage est importante pour une variété de processus physiques, biologiques et chimiques.

On cherche à caractériser in-situ la dynamique souterraine sous la zone de swash. Le site atelier est la plage microtidale de Rousty (Camargue, France). L'étude, réalisée sur 48h les 13 et 14 décembre 2014, fait partie d'une plus grande campagne de mesure visant à caractériser la réponse hydro-morphologique de la plage de Rousty à une saison hivernale. La période présentée ici correspond à la phase de déclin d'une tempête modérée. La stratégie retenue dans le cadre de ce projet a été de déployer un réseau de 15 capteurs de pression enterrés sous la zone de swash. Les caractéristiques des vagues incidentes, à la fois au large et dans la zone de surf interne, ont été mesurées conjointement à l'utilisation d'un LiDAR terrestre haute fréquence permettant de suivre la surface libre et l'évolution du lit sableux à haute fréquence sur la zone de swash.

L'analyse des données moyennées dans le temps a mis en évidence la présence d'un schéma de circulation relativement robuste sous la zone de swash, qui se décale vers le large en suivant la descente du niveau moyen et la diminution de l'activité des vagues. La tendance dominante est un écoulement vers le large, avec une intensité maximale de l'ordre de 0.1mm/s modulé par des infiltrations et exfiltrations dans les parties hautes et basses de la zone de swash, respectivement. L'analyse haute fréquence à des événements de swash sélectionnés ont mis en évidence un cycle souterrain caractéristique.

Mots-clés : Nappe de plage, Swash, Hydrodynamique côtière.

1. Introduction

La dynamique souterraine des nappes de plage fait l'objet d'un intérêt croissant depuis les dernières décennies en raison de son application à de nombreux processus

physiques, biologiques ou chimiques. En effet, les plages sableuses constituent une barrière poreuse et mobile entre la terre et la mer. La connaissance des flux souterrains est essentielle pour analyser les échanges d'eau douce et salée entre l'océan, les aquifères côtiers et les lagons, la diffusion des matières dissoutes, telles que nutriments ou contaminants, ou encore les cycles biogéochimiques à l'intérieur même du milieu poreux. À plus petite échelle, les écoulements à travers le lit sableux peuvent affecter le transport sédimentaire en modifiant la structure de la couche limite et le poids relatif des sédiments (TURNER & NIELSEN, 1997 ; TURNER & MASSELINK, 1998).

La principale difficulté de la quantification des flux souterrains dans les nappes de plage réside dans l'impossibilité, considérant l'état actuel de la technologie, de mesurer directement les vitesses d'écoulement d'un fluide à l'intérieur du milieu poreux. L'estimation de l'écoulement souterrain dans les plages sableuses à assez grande échelle est basée sur des mesures de fluctuation de hauteur de la nappe de plage (NIELSEN, 1990). Des descriptions plus fines de la dynamique souterraine de plage sont fournies par des simulations numériques (LI & BARRY, 2000), des expériences en laboratoire (SOUS *et al.*, 2013), ou exceptionnellement des mesures de flux moyens pour les échelles de temps long (LOFI *et al.*, 2013).

L'objectif est ici de présenter une première caractérisation in-situ de la dynamique souterraine de la nappe de plage à l'échelle de la zone de swash. Nous étudions le champ de pression dans la nappe à une résolution et une emprise spatiale suffisantes pour identifier les écarts à l'hypothèse de distribution hydrostatique de la pression dans la nappe, cela afin de comprendre les flux entre la mer et la nappe de plage. Un dispositif expérimental dédié, principalement basé sur des capteurs de pression enterrés et un LiDAR terrestre, a été mis en place pour s'intégrer à la campagne de mesure Rousty201412 réalisée sur le profil de Rousty (Camargue, France) au cours de l'hiver 2014-2015.

2. Site d'étude

Le profil de Rousty est localisé à l'Est des Saintes-Maries-de-la-Mer (Camargue, France), au nord du golfe de Beauduc, dans le delta du Rhône (figure 1A) sur une portion de littoral globalement orientée Est-Ouest. Ce profil est l'objet d'études hydro- et morphodynamiques depuis une quinzaine d'année (SABATIER, 2001). La figure 1B montre un profil typique de plage, avec des étangs en arrière dune, un cordon dunaire organisé en îlots culminants à +5 m, un bourrelet de plage au sommet de l'estran à +1m délimitant une dépression régulièrement ennoyée en hiver, une berme (ou barre de swash) généralement bien développée, et une plage sous-marine présentant plusieurs barres (généralement 2) parallèles au rivages et continues. La granulométrie moyenne est d'environ 200 μm , avec des grains plus grossiers au niveau du rivage. A ce jour la morphodynamique du swash demeure très mal connue et se limite à une approche empirique (SABATIER *et al.*, 2009) qui ignore les processus de circulation de nappe.

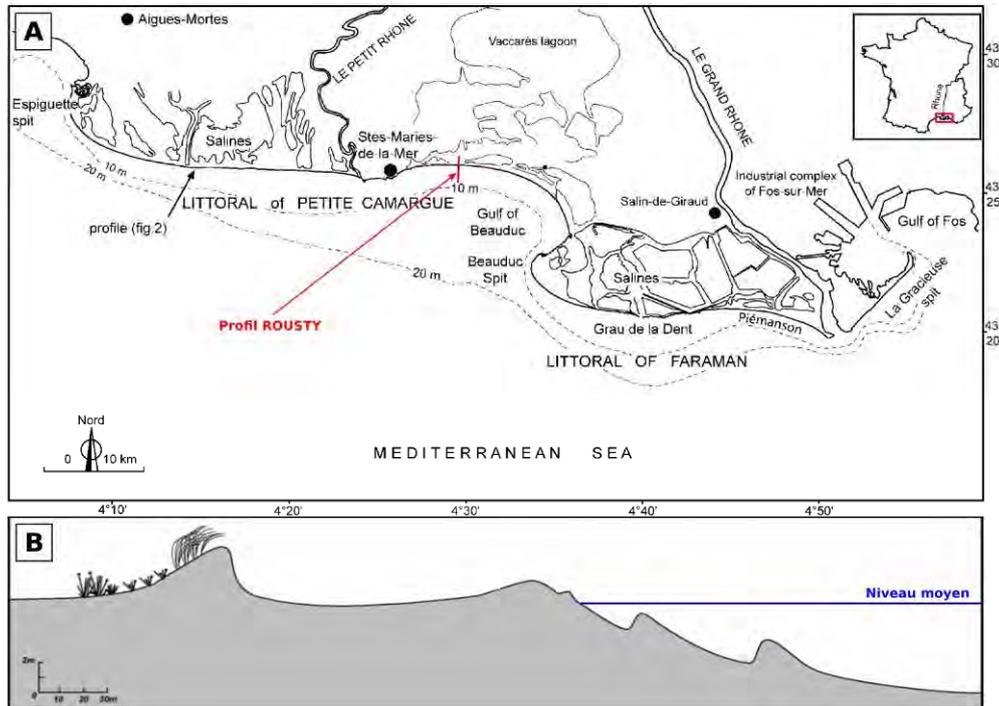


Figure 1. Localisation du site d'étude (A) et profil type de plage (B).

La marée est de type microtidal (de l'ordre de 0.3 m) mais le niveau marin enregistre des variations importantes, avec des surcotes supérieures à +1 m, ainsi que des décotes jusqu'à -0.5 m NGF. Les vents dominants sont caractérisés par deux secteurs principaux: les vents de secteur Nord-Ouest de Mistral et de Tramontane et les vents de secteur Sud (WSW et SE) associées aux tempêtes. Les vagues sont caractérisées par deux régimes principaux : les houles de beau temps, de secteur Sud-ouest associées aux vents de terre, sont les plus fréquentes mais de relativement faible énergie, et les houles de tempêtes, de secteur Sud-Est associées aux vents de mer, de plus forte énergie. La période présentée ici correspond à la phase de déclin d'une tempête modérée. L'apex de la tempête est caractérisé par des vents modérés (10 m/s) du secteur Sud-Est, des vagues de secteur Sud de hauteur 1.5 m et de période 8 s, pendant une période de surcote (+0.4 m NGF).

3. Dispositif expérimental

L'étude de la dynamique souterraine de la zone de swash se fait à l'aide d'un réseau de cinq piquets espacés de 2.5 m horizontalement, sur lesquels sont répartis quinze capteurs de pression nommés G1t à G5b (figure 2). Le chiffre indique la position cross-shore du piquet et la lettre indique la position verticale (t, m et b pour top, middle et bottom respectivement). Les capteurs sont équipés d'un système de protection composé d'une toile filtrante de maille 80 μ m recouverte d'un grillage plastique de maille 5mm qui les préserve de l'infiltration de sédiment et des chocs sur la membrane. Tous les

capteurs sont connectés à un ordinateur situé sur un échafaudage, ce qui permet une synchronisation robuste des enregistrements. Les capteurs ont été positionnés au DGPS à la mise en place et au retrait, et calibrés en laboratoire avant et après le déploiement in-situ.

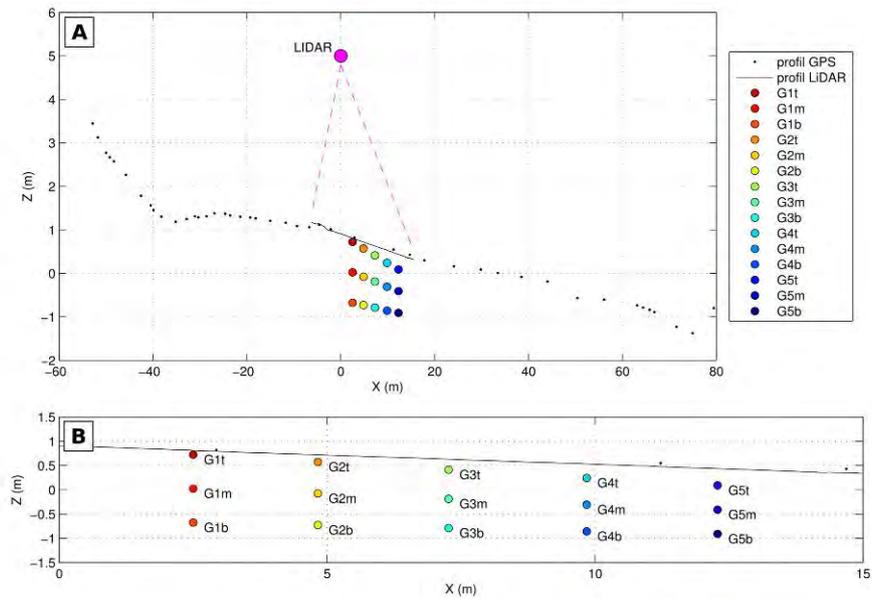


Figure 2. Profil de plage et disposition des appareils dans le dispositif expérimental (A) et détail du réseau de capteurs de pression (B).

Les mesures de pression relative (directement compensée de la pression atmosphérique) sont acquises à une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz et varient dans une gamme de 0 à $4 \cdot 10^4$ Pa avec une résolution de l'ordre de 10 Pa. Pour chaque capteur on calcule la hauteur de pression relative $h = P/\rho g + Z_c$ (GILES, 1984) avec P la pression relative, ρ la masse volumique de l'eau de mer et Z_c la position verticale du capteur dans le référentiel altimétrique RGF93. Cette hauteur de pression sera égale à la position du toit de la nappe de plage si et seulement si la distribution de la pression dans le massif poreux est purement hydrostatique. Or nos mesures mettent précisément en évidence la présence de gradients de hauteur de pression, à la fois horizontaux et verticaux, qui ne permettent pas d'assimiler la hauteur de pression mesurée à l'élévation du toit de la nappe. Ces gradients induisent un écoulement dans le milieu poreux dont la vitesse peut être calculée selon la loi de Darcy :

$$\vec{V} = -K \vec{\nabla} P \quad (1)$$

Avec \vec{V} le champ de vitesse 2D (selon un plan vertical) et K la conductivité hydraulique estimée à 0.066 cm/s (BEAR, 1972).

L'interface entre l'air et le milieu étudié (alternativement le swash ou le lit sableux lors des cycles uprush/backwash) est capturée par un scanner laser 2D (LiDAR) installé à

5m sur l'échafaudage (figure 2A). La position du lit sableux peut être extraite en chaque point du profil en raison du fait que, lorsqu'il est découvert, le lit renvoie un signal quasi-constant. L'installation et le traitement des données sont détaillés dans les travaux de MARTINS *et al.* (2016).

Un profileur de courant RDI 600kHz ADCP, situé dans environ 6m d'eau, nous donne les forçages de vague au large (H_s et T_p), et deux capteurs de pression autonomes nous permettent de suivre l'évolution du niveau moyen dans la zone de surf interne et plus au large (dans environ 4 m d'eau).

4. Aperçu des données obtenues

La figure 3A présente la série temporelle de la hauteur de pression pour le capteur G3t (milieu de la zone, haut du piquet) ainsi que la position du lit sableux mesurée par le LiDAR. La tendance générale sur la période de mesure est une décote progressive du niveau moyen (de l'ordre de 25 cm sur 24h) et une diminution de l'activité des vagues (H_s passe de 1.7 à 0.9 m). Les figures 3B-D correspondent à des fenêtres de 10 minutes caractéristiques de différents cas de mesure. Le LiDAR renvoie la position du lit sableux lorsque celui-ci est découvert, soit entre deux swash. Sur les trois cas B-C-D présentés, on note, lorsque le sable est découvert et que la plage reste saturée (le toit de la nappe de plage coïncide avec la position du lit), le bon accord entre les mesures par LiDAR et celles par capteurs de pression : les paliers observés dans le signal de pression correspondent à la position du lit.

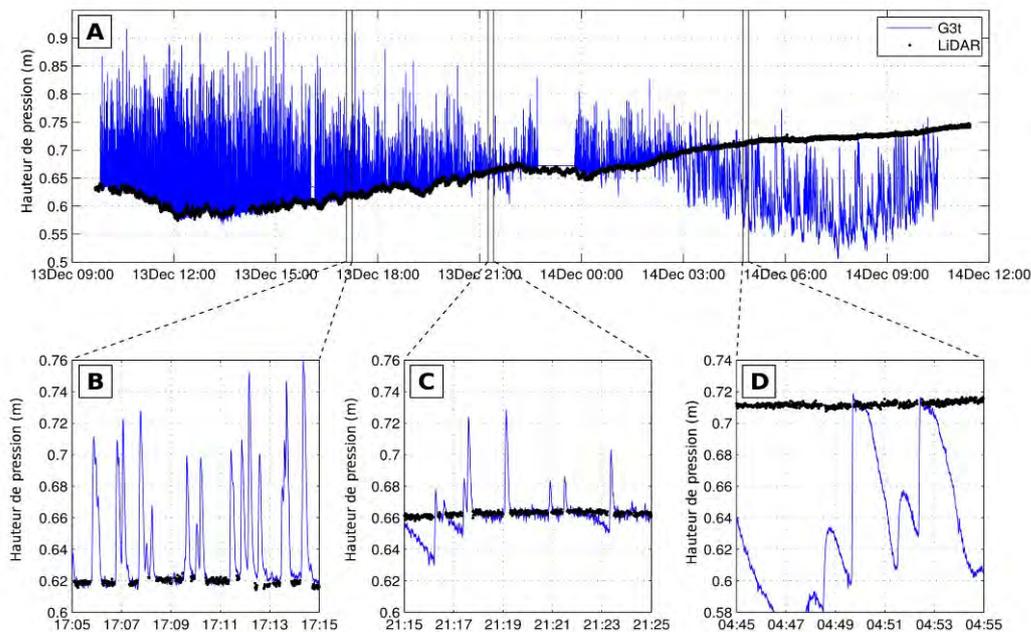


Figure 3. Hauteur de pression instantanée au capteur G3t et position du lit sableux donnée par le LiDAR (A), zooms sur différentes phases caractéristiques (B, C et D).

Dans le cas B, le niveau moyen est encore haut, les swash sont très rapprochés et, lorsque le lit est découvert, la plage reste saturée. Dans le cas C, les swash atteignant le capteur sont moins nombreux. Les temps séparant deux swashes consécutifs sont plus longs, ce qui peut permettre à la nappe de décrocher du lit sableux : la surface à pression atmosphérique mesurée par le capteur de pression enfoui ne coïncide plus avec la surface du sable mesurée par le LiDAR et descend progressivement sous celle-ci jusqu'à l'arrivée d'un nouvel événement de swash. Notons ici que, en accord avec la description de TURNER et NIELSEN (1997), on ne discute que de la position du sommet de la nappe entendu comme l'isosurface de pression atmosphérique, les effets de saturation/désaturation du sable ne sont peut-être pas détaillés ici. Dans le cas D, les swash n'atteignent plus le capteur qu'épisodiquement et le lit sableux reste découvert sur de longues périodes. La correspondance entre le sommet de la nappe (mesure par capteur de pression) et le lit sableux (mesure LiDAR) n'est observée que brièvement après les gros événements de swash.

5. Dynamique moyenne

La figure 4 montre l'évolution de la hauteur de pression moyennée sur 30 minutes pour chaque capteur de pression du réseau. La tendance principale montre une décroissance de la hauteur de pression au cours du temps, associée au recul de la zone de swash pendant le tombant de tempête du 13 et 14 décembre. Si la nappe de plage était horizontale et la pression répartie de manière hydrostatique, on aurait la même hauteur de pression à tous les capteurs. Les écarts observés entre les capteurs d'un même piquet et entre les piquets induisent des gradients de pression verticaux et horizontaux. Ces gradients de pression traduisent une circulation dans la nappe plage à l'échelle de la zone de swash.

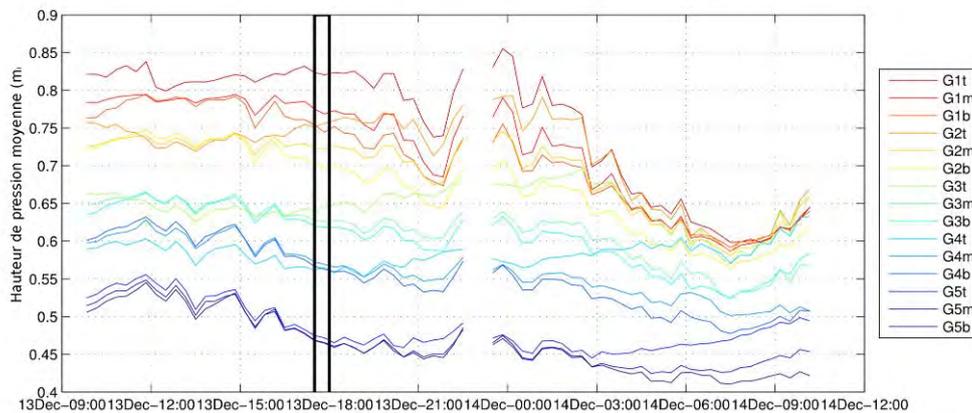


Figure 4. Hauteur de pression moyennée sur 30 minutes.

Afin d'illustrer cette circulation moyenne, nous avons choisi de nous focaliser sur une période de 30 minutes lorsque la zone de swash est située encore assez haut par rapport au réseau de capteurs de pression, soit le 13 décembre de 17h30 à 18h (encadrée en noir sur la figure 4).

La figure 5 représente la hauteur de pression moyennée ainsi que le champ de vitesses correspondant aux gradients de pression qui en découle. Le champ de pression dans la nappe a été linéairement interpolé à partir des données discrètes de capteurs de pression (triangulation). Les vitesses d'écoulement ont ensuite été estimées à l'aide de la loi de Darcy (équation 1). La vitesse maximale pour cet exemple est de $4.3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La circulation moyenne est clairement bi-dimensionnelle, ce qui correspond à la présence de gradients de pression horizontaux et verticaux. La tendance dominante est un écoulement vers le large. On note également la présence d'une cellule de circulation avec une forte infiltration dans le haut de la zone de swash au niveau des piquets G1 et G2 et une tendance plus faible à l'exfiltration dans la partie inférieure de la zone de swash au niveau du piquet G4.

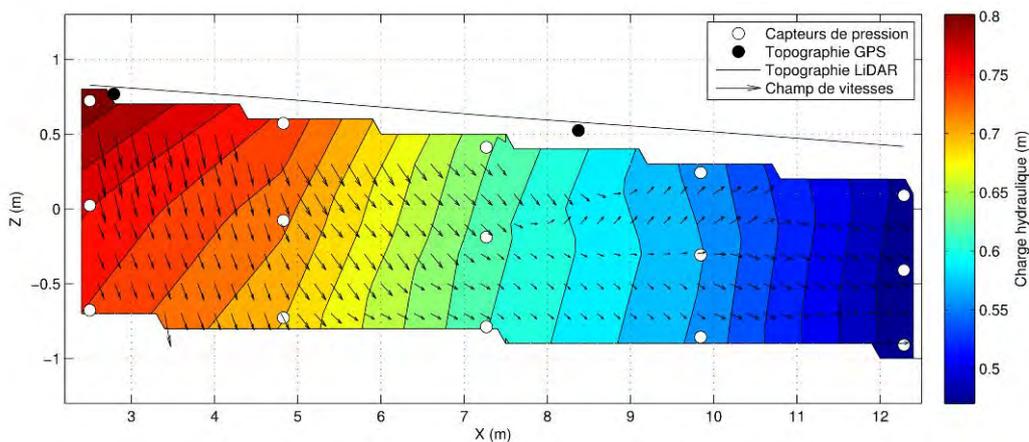


Figure 5. Représentation 2D de la répartition de la hauteur de pression moyennée sur 30 minutes et champ de vitesses estimé pour cette période.

6. Conclusion

Cette communication présente des données de terrain originales visant à caractériser la dynamique souterraine in-situ de la nappe de plage sous la zone de swash. La période étudiée ici correspond à la phase de déclin d'une tempête modérée caractérisée par des vents du secteur Sud-Est, des vagues de secteurs Sud, ainsi qu'une surcote qui permet la submersion de l'ensemble de la zone d'étude par les swash successifs.

Les écarts de hauteur de pression observés entre les capteurs de pression induisent des gradients de pressions horizontaux et verticaux qui traduisent une circulation dans la nappe de plage sous la zone de swash. La circulation moyenne a été étudiée pour une période de 30 minutes lorsque la zone de swash était située assez haut par rapport au

dispositif mis en place. La tendance dominante de cette circulation est un écoulement vers le large, modulé par des flux verticaux plus ou moins importants. On observe notamment une forte infiltration dans le haut de la zone de swash et une exfiltration de moindre amplitude dans la partie inférieure de la zone de swash, qui marque la présence d'une cellule de circulation sous la zone de swash.

La poursuite des travaux concerne la caractérisation de l'évolution de cette circulation moyenne sur l'ensemble de la période en suivant le déplacement de la zone de swash vers le large en réponse à la diminution du niveau moyen et de l'énergie des vagues ainsi que la circulation instantanée en réponse au passage d'un événement de swash.

7. Références bibliographiques

- BEAR J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover publication, New York.
- GILES, R. V. (1984). *Mécanique des fluides et hydraulique*, série Schaum, Mc Graw-Hill, New York.
- LI L., BARRY D.A. (2000). *Wave-induced beach groundwater flow*. *Advances in Water Resources*, Vol. 23, pp 325-337. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(99\)00032-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00032-9)
- LOFI J., PEZARD P., BOUCHETTE F., RAYNAL O., SABATIER P., DENCHIK N., LEVANNIER A., DEZILEAU L., CERTAIN R. (2013). *Integrated onshore-offshore investigation of a mediterranean layered coastal aquifer*. *Groundwater*, Vol. 51, pp 550-561. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.01011.x>
- MARTINS K., BLENKINSOPP C.E., ZANG J. (2016). *Monitoring Individual Wave Characteristics in the Inner Surf with a 2- Dimensional Laser Scanner (LiDAR)*. *Journal of Sensors*, Article ID 7965431, 11 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7965431>
- NIELSEN P. (1990). *Tidal dynamics of the water table in beaches*. *Water Resources Research*, Vol. 26, pp 2127-2134. <http://dx.doi.org/10.1029/WR026i009p02127>
- TURNER I.L., MASSELINK G. (1998). *Swash infiltration-exfiltration and sediment transport*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, pp 30813-30824. <http://dx.doi.org/10.1029/98JC02606>
- TURNER I.L., NIELSEN P. (1997). *Rapid water table fluctuations within the beach face : Implications for swash zone sediment mobility ?* *Coastal Engineering*, Vol. 32, pp 45-59. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(97\)00015-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00015-X)
- SABATIER F. (2001). *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaire du littoral du delta du Rhône*. Thèse Université d'Aix-Marseille III.
- SABATIER, F. ANTHONY, E.J., HEQUETTE, A., SUANEZ, S., MUSEREAU, J., RUZ, M.H., REGNAULD, H. (2009). *Morphodynamics of beach/dune systems : examples from the coast of France*. *Géomorphologie : relief, processus et environnement*, Vol. 15(1), p. 3-22. <http://dx.doi.org/10.4000/geomorphologie.7461>
- SOUS D., LAMBERT A., REY V., MICHALLET H. (2013). *Swash-groundwater dynamics in a sandy beach laboratory experiment*. *Coastal Engineering*, Vol. 80, pp 122-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.05.006>