



Réponse d'une plage à terrasse face aux variations intra-saisonniers régionales du niveau de la mer

**Grégoire ABESSOLO ONDOA^{1,2}, Rafael ALMAR¹, Bruno CASTELLE³,
Magnus LARSON⁴, Julien JOUANNO¹**

1. LEGOS, OMP, UMR 5566 (CNES-CNRS-IRD-Université de Toulouse)
14 Avenue Edouard Belin, Toulouse, France.
gregsolo55@yahoo.fr ; rafael.almar@ird.fr ; julien.jouanno@legos.obs-mip.fr
2. Laboratoire d'Ecosystèmes et de Ressources Halieutiques, Université de Douala
BP 2701, Douala, Cameroun.
3. EPOC, OASU, UMR 5805 (CNRS - Université de Bordeaux)
Allée Geoffroy Saint-Hilaire – CS 50023 – 33615, Pessac Cedex, France.
bruno.castelle@u-bordeaux.fr
4. Department of Water Resources Engineering (DWRE), Lund University
John Ericssons väg 1, P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden.
magnus.larson@tvrl.lth.se

Résumé :

Les vagues et la marée constituent les deux principaux forçages utilisés dans la littérature pour comprendre la dynamique des plages à terrasse. Dans ce travail, l'influence des oscillations de niveau d'eau sur la réponse morphologique d'une plage à terrasse face aux événements de vagues est étudiée pour la première fois. Pour cela, les profils intertidaux et bathymétriques ont été extraits à partir de trois années et demie de données acquises par un système vidéo installé sur la plage à terrasse de Grand Popo au Bénin. Les variations intra-saisonniers régionales de niveau d'eau ont été extraites des données altimétriques de niveau de la mer en utilisant un filtre 21-91 jours. Les résultats montrent que l'impact des événements de vagues sur la morphologie de plage dépend de la hauteur d'eau sur la terrasse, donc des fluctuations intra-saisonniers de niveau, pouvant être associées aux ondes océaniques de Kelvin.

Mots-clés :

Profil intertidal, Bathymétrie, Sédiments, Marée, Vagues, Niveau d'eau océanique, Acquisition vidéo, Altimétrie, Morphologie.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

La synthèse sur la variabilité morpho-dynamique des plages (WRIGTH & SHORT, 1984) permet de classer les plages sableuses en six états caractérisés par des morphologies différentes: dissipatif, intermédiaire à barre sableuse longitudinale uniforme, intermédiaire à barre en croissant, intermédiaire à barres sableuses transverses, intermédiaire à terrasse et réfléchif. Cette classification est utilisée pour décrire les différents états d'une plage en réponse au forçage hydrodynamique. Les plages à terrasse représentent un cas très particulier où on peut observer les trois différents régimes hydrodynamiques (réflectif, intermédiaire et dissipatif) à différents niveaux de marée le long du profil (MILES & RUSSEL, 2004). Sur le site de Nha Trang au Vietnam, ALMEIDA *et al.* (2017) ont observé que des vagues énergétiques couplées à un niveau haut de marée conduisent à une érosion du haut de plage, tandis qu'une accumulation de sédiments au bas de plage est observée pour des vagues moins énergétiques couplées à un niveau bas de marée. La marée est donc un facteur clé de la variabilité morphologique des plages à terrasse.

Contrairement aux levés classiques par DGPS, les systèmes d'acquisition vidéo formés d'une ou plusieurs caméras permettent de dériver à haute fréquence et de façon quasi-continue l'évolution de la morphologie de la plage sur des échelles temporelles relativement longues (interannuel à décennal). Les techniques d'acquisition vidéo ont été largement développées et permettent aujourd'hui d'acquérir un ensemble de paramètres morphologiques et hydrodynamiques du littoral. En utilisant 3 années et demi de données vidéo, ABESSOLO *et al.*, (2016) ont observé que, sur la plage à terrasse de Grand Popo, Bénin (Golfe de Guinée), la marée module l'évolution du trait de côte avec une contribution relative de 79 % par rapport aux vagues (hauteur significative H_s) à l'échelle journalière tandis qu'à l'échelle mensuelle, le trait de côte est modulé par les vagues (contribution relative de 72 % par rapport à la marée). Dans l'Atlantique tropical, DING *et al.*, (2009) ont étudié la variabilité du niveau d'eau océanique en utilisant des données altimétriques. Celle-ci est dominée par un cycle saisonnier caractérisé par des composantes annuelle et semi-annuelle. En utilisant un filtre passe-bande 21 - 91 jours, POLO *et al.* (2008) ont extrait des propagations horizontales de variation de niveau d'eau dont les caractéristiques sont similaires à celles des ondes de Kelvin, se propageant de l'équateur en suivant la côte dans le Golfe de Guinée (~ 2 m/s). Alors que l'effet des ondes de Kelvin sur les upwellings côtiers de cette région a déjà été démontré (POLO *et al.*, 2008), ces oscillations d'ondes de Kelvin, couplées à un forçage local (vent, pression, etc.) sur une plage à terrasse pourraient modifier la hauteur d'eau h_b dans la zone de déferlement, et donc l'impact des vagues sur la morphologie du littoral. Notamment, une augmentation de h_b entrainerait une augmentation de l'énergie des vagues proche du bord et donc une augmentation de l'intensité des processus hydro-sédimentaires dans la zone du jet de

rive. La fluctuation du niveau d'eau serait donc une composante active du forçage océanique.

Dans ce travail, alors que les vagues et la marée sont classiquement les deux seuls forçages étudiés pour appréhender la dynamique des plages à terrasse, nous proposons d'évaluer l'influence des oscillations de niveau d'eau sur la morphologie intertidale et bathymétrique d'une plage à terrasse dans un environnement à forte variabilité saisonnière de niveau d'eau (Golfe de Guinée). Cette influence est évaluée en étudiant l'impact des événements extrêmes de H_s sur la réponse morphologique de plage, à partir de trois années et demie de données vidéo (Février 2013 à Juin 2016), durant des anomalies positives et négatives de niveau d'eau.

2. Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude

La plage de Grand Popo (6,2°N – 1,7°E) au Bénin se trouve dans la Baie du Bénin du Golfe de Guinée (figures 1.a et 1.b) et est soumise à l'action de la houle provenant de l'hémisphère Sud (45°-60°) et du vent généré localement dans la zone tropicale (5°N – 15°S). Les valeurs moyennes annuelles sont $H_s \sim 1,4$ m, $T_p \sim 9,2$ s, avec une orientation S-SO et un marnage relatif RTR ~ 1 conformément aux données ERA-Interim (ALMAR *et al.*, 2014). Cette plage est du type intermédiaire à réfléchif avec une terrasse à marée basse uniforme le long de la côte et un haut de plage réfléchif avec une pente $\sim 0,15$. Ce site est micro-tidal : 0.3 à 1.8 m de marnage respectivement en mortes et vives eaux. POLO *et al.* (2008) ont montré la propagation d'ondes océaniques côtières intra-saisonnières qui remontent la côte de l'équateur jusqu'à 10°N – 15°N, via le Golfe de Guinée, avec des amplitudes crête à crête ~ 10 cm sur les côtes d'Afrique de l'Ouest. Cette côte est aussi caractérisée par une forte saisonnalité de l'anomalie du niveau d'eau océanique (DING *et al.*, 2009), en réponse à des modes de bassin forcé par le vent et impliquant propagation et réflexion d'ondes de Kelvin et de Rossby saisonnières.

2.2 Données morphologiques vidéo

En Février 2013, un système vidéo a été installé au sommet de la tour d'un bâtiment de la Marine Béninoise à Grand Popo (ALMAR *et al.*, 2014). Les lignes d'eau sont extraites des images moyennées en utilisant la méthode "Minimum Shoreline Variability" (ALMAR *et al.*, 2012). Les profils intertidaux journaliers sont obtenus en interpolant les positions moyennées des lignes d'eau à plusieurs niveaux de marée. Les données de marée ont été extraites du modèle FES2014 (LYARD *et al.*, 2016). Les profils bathymétriques ont été obtenus en appliquant la méthode d'inter-corrélation spatio-temporelle et d'inversion bathymétrique décrite dans ABESSOLO *et al.* (2017). Les profils vidéo obtenus en combinant les profils intertidaux et bathymétriques, ont été filtrés (moyenne glissante sur 30 jours) afin d'éliminer le bruit. La comparaison des

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

profils vidéo aux relevés de terrain (figure 1.c) montre que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 0,1 m sur la terrasse et croît jusqu'à 2 m au-delà (ABESSOLO *et al.*, 2017). L'erreur temporelle associée à ces profils reste cependant difficile à quantifier. L'enjeu est la définition d'un critère de sélection des images adéquates pour la minimisation de cette erreur.

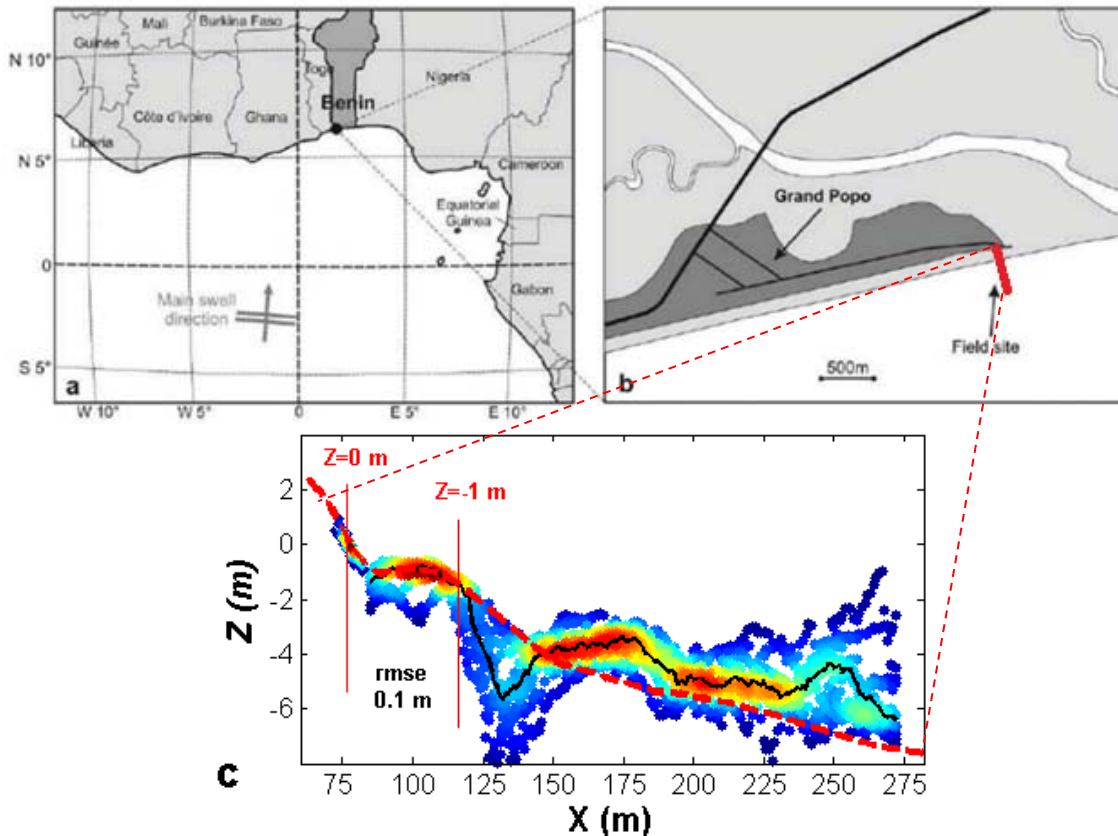


Figure 1 : (a) et (b) Site d'étude. (c) Profil de plage (trait rouge interrompu) obtenue durant la campagne Grand Popo 2014 et profil vidéo moyenné (trait noir). Les profils vidéo instantanés obtenus durant la campagne de mesure sont en densité de couleur. X et Z représentent respectivement la position par rapport à la caméra et la hauteur.

2.3 Données altimétriques de niveau d'eau

Les données journalières d'anomalie de niveau d'eau ont été extraites des produits "SSALTO/DUACS multimission gridded and delayed-time products", à $1/4^\circ$ au large de la côte de Grand Popo, suffisamment loin pour minimiser les valeurs manquantes et suffisamment près pour que le signal soit cohérent avec le niveau d'eau à la côte. Les variations intra-saisonniers d'anomalie du niveau de la mer (SLA_i) sont obtenues en utilisant un filtre passe-bande 21–91 jours (POLO *et al.*, 2008). Dans cette étude, on ne fera pas de discrimination entre les variations de niveau d'eau correspondantes aux ondes de Kelvin, celles dues à un forçage local (vent) ou celles dues à une activité

tourbillonnaire méso-échelle. Le quantile 70% a été utilisé pour la détection des évènements de niveau d'eau positifs et négatifs.

2.4 Données hydrodynamiques

Les données de vagues ont été extraites de février 2013 à juin 2016 des produits de ré-analyses ERAInterim (1979 à nos jours) au point 6.25°N, 1.75°E. Celles-ci ont été ramenées empiriquement au point de déferlement (LARSON *et al.*, 2010). Le quantile 95% est généralement utilisé pour la détection des évènements extrêmes de H_s (ANGNUURENG *et al.*, 2017). En appliquant ce seuil ($H_{s0} = 1,85$ m), les évènements extrêmes sur la plage de Grand Popo ($H_s > H_{s0}$) ont une durée moyenne de 1,6 jour (ABESSOLO *et al.*, 2017). Cependant, dans notre étude, les données morphologiques vidéo et altimétriques de niveau d'eau sont journalières. Afin d'avoir une durée moyenne d'évènements de H_s de l'ordre de quelques jours, un seuil de détection a été fixé au quantile 70 %. Seuls les évènements d'une durée supérieure à deux jours, survenant durant un évènement de niveau d'eau positif, respectivement négatif, ont été moyennés pour obtenir un évènement d'ensemble, à comparer à la variation d'ensemble de la morphologie (analyse d'ensemble : ANGNUURENG *et al.*, 2017) durant des niveaux d'eau haut et bas. Le potentiel des vagues (H_s) sur la morphologie (Y) a été estimé par $\Delta H_s / \Delta Y$.

3. Résultats

3.1 Evolution du profil vidéo intertidal et bathymétrique

Les positions de ligne d'eau et de fin de la terrasse (profondeur à 1 m) journalières montrent une variabilité saisonnière (figures 2.c et 2.d). La terrasse étant considérée comme la partie du profil entre la ligne d'eau et la profondeur à 1 m, la largeur de la terrasse est respectivement maximale et minimale en Juillet-Aout et Janvier-Février. La figure 2.e montre les variations relatives au profil initial. On y observe une tendance érosive : ~ -1 m/an pour la fin de la terrasse et ~ -0.3 m/an pour la ligne d'eau. Une corrélation $r \sim -0,74$ est obtenue pour des séries temporelles de ligne d'eau et de fin de terrasse, dans lesquelles les tendances respectives ont été retirées.

3.2 Détection des évènements de niveau d'eau et de H_s associés

Les figures 2.a et 2.b montrent les séries temporelles de H_s et de fluctuations intra-saisonnières de niveau d'eau. La durée moyenne des évènements détectés de H_s est de 3,8 jours pour un seuil de 1,58 m. Seuls les évènements de H_s correspondants à des oscillations significatives (quantile 70 % de niveau haut et bas) de SLA ont été pris en compte. On dénombre 19 évènements de H_s durant des oscillations positives (anomalie $\sim + 3$ cm) et 20 durant des oscillations négatives (anomalie $\sim - 3$ cm). A cause des

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

données vidéo manquantes, seuls 11 et 10 évènements de H_s respectivement ont été considérés.

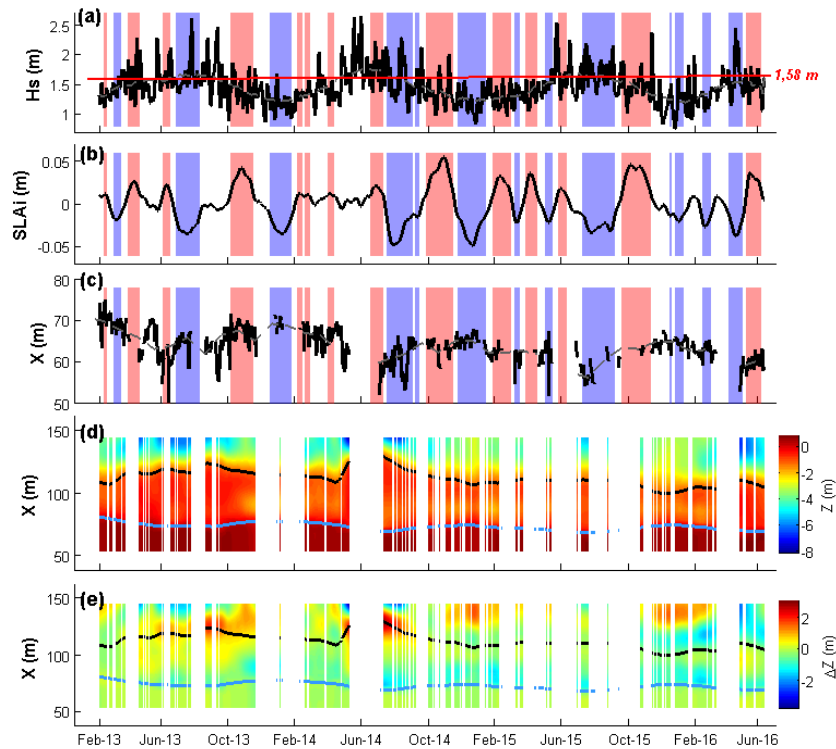


Figure 2. Séries temporelles de (a) H_s (ligne rouge : seuil de détection à 1,58 m), (b) variations intra-saisonniers du niveau de la mer au large, (c) ligne d'eau, (d) profils vidéo journaliers de plage et (e) perturbations calculées en retirant de chaque profil journalier le profil initial. Les bandes rouges et bleues correspondent respectivement aux variations intra-saisonniers positives et négatives du niveau d'eau (quantile 70 %). Les lignes bleue et noire représentent la ligne d'eau et la position à 1 mètre de profondeur, lissées avec une moyenne mobile sur 30 jours.

Les variations intra-saisonniers (~ 10 cm) devraient être plus fortes au bord du talus continental et notamment à la côte, avec un plateau très étroit dans le Golfe de Guinée (~ 30 km). La compréhension de la propagation de l'anomalie de niveau d'eau du large vers la côte reste cependant un enjeu scientifique (MELET *et al.*, 2016).

Le tableau 1 montre que la ligne d'eau et les évènements de H_s sont négativement corrélés durant des oscillations positives et positivement corrélés durant des oscillations négatives (tableau 1). Sur la figure 3, pour un niveau d'eau haut $SLA_i > 0$, on observe pour une variation événementielle $\Delta H_s \sim 0,3m$ une érosion du haut de plage $\Delta Y_0 \sim -3m$ et un engraissement de la terrasse $\Delta Y_{-1} \sim +2m$. Pour un niveau d'eau bas $SLA_i < 0$, une variation événementielle $\Delta H_s \sim 0,3m$ conduit à un engraissement du haut de plage $\Delta Y_0 \sim +5m$ et un recul de la fin de terrasse à 1 mètre de profondeur $\Delta Y_{-1} \sim -5m$. La terrasse

présente des variations avec un engraissement de la terrasse et du bas de plage lorsque H_s diminue pour des oscillations positives ou lorsque H_s croît durant des oscillations négatives. Lorsque H_s croît durant des oscillations positives, on note une forte érosion du haut de plage avec une accumulation de sédiments à la fin de la terrasse tandis tout le profil change très peu pour H_s et SLA_i faibles.

La figure 3 montre aussi que les événements détectés de H_s sont plus intenses lorsque le niveau d'eau est bas, alors qu'ils sont moins intenses lorsque le niveau d'eau est haut.

Tableau 1. Corrélation entre H_s et morphologie durant des oscillations de niveau d'eau (SLA_i) positives et négatives.

<i>Corrélation</i>	<i>H_s</i>	
	<i>SLA_i > 0</i>	<i>SLA_i < 0</i>
<i>Ligne d'eau Y₀</i>	<i>- 0.80</i>	<i>0.59</i>
<i>1 m – profondeur Y₋₁</i>	<i>0.76</i>	<i>0.40</i>

Pour des niveaux haut et bas de SLA_i , le potentiel d'action des vagues sur la morphologie $\Delta H_s/\Delta Y$ vaut respectivement -0,15 et 0,08, soit une forte dissipation des vagues sur la terrasse lorsque le niveau d'eau est bas. Sur la terrasse, l'action des vagues dépend quasiment du niveau d'eau : SLA et marée. La quantification de l'erreur temporelle associée au profil vidéo reste nécessaire pour valider ces observations.

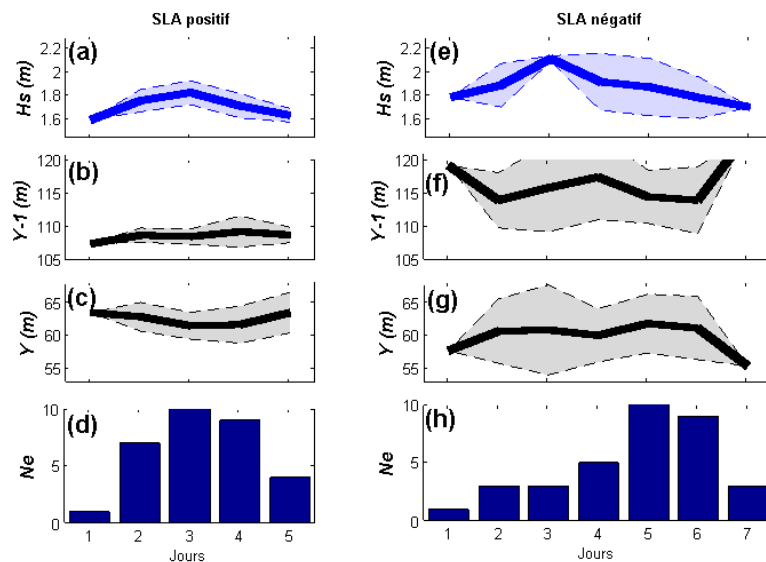


Figure 3. Analyse d'ensemble respectivement pour des oscillations positives et négatives de variations intra-saisonnières de niveau d'eau : (a)-(e) : Evènements de H_s , (b)-(f) : Ligne d'eau Y (m), (c)-(g) : Position à 1 mètre de profondeur, (d)-(h) : Nombre d'évènements détectés Ne.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Les résultats de cette étude montrent qu'une variation de quelques centimètres de la hauteur d'eau sur la terrasse pendant quelques jours peut modifier l'impact des vagues sur la morphologie de la plage.

4. Conclusions

Dans ce travail, l'influence des fluctuations intra-saisonnières de la mer sur l'évolution de la morphologie d'une plage à terrasse durant des événements de H_s a été étudiée. 21 événements de H_s (quantile 70% : $H_s > 1,58$ m) ont été identifiés, dont 11 et 10 respectivement pour des oscillations positives (anomalie $\sim + 3$ cm) et négatives (anomalie $\sim - 3$ cm) de niveau d'eau. Les résultats obtenus montrent que la hauteur d'eau sur la terrasse est un facteur clé de la dynamique d'une plage à terrasse : (i) lorsque H_s croît durant des oscillations positives, le haut de plage s'érode tandis que les sédiments se déposent sur le bas de la terrasse, (ii) lorsque H_s croît durant les oscillations négatives ou lorsque H_s décroît durant les oscillations positives, les sédiments se déposent en bas de plage, (iii) lorsque H_s décroît pendant des oscillations négatives, la morphologie varie très peu. Cette étude suggère que sur ce type de littoral, en plus des conditions de vagues et de marée, les fluctuations de niveau d'eau, doivent être prises en compte pour diagnostiquer les évolutions morphologiques.

5. Références bibliographiques

- ABESSOLO O. G., ALMAR R., CASTELLE B., LARSON M., TOMEDI EYANGO, M. BONOU F., DU PENHOAT Y., CAMARA I., SALL M., ONGUENE R., ALORY G. (2017). *Development of a West and Central Africa regional video camera network to monitor coastal response to multiscale ocean forcing*. Proceedings of Coastal Dynamics, 11 – 16 June 2017, Helsingør, Danemark, pp 1540-1550.
- ABESSOLO O. G., ALMAR R., KESTENARE E., BAHINI A., HOUNGUE G.-H., JOUANNO J., DU PENHOAT Y., CASTELLE B., MELET A., MEYSSIGNAC B., ANTHONY E. J., LAIBI R., ALORY G., RANASINGHE W. M. R. J. B. R. (2016). *Potential of video cameras in assessing event and seasonal coastline behaviour: Grand Popo, Benin (Gulf of Guinea)*. J. Coast. Res. pp 442–446. <https://doi.org/10.2112/SI75-089.1>
- ALMAR R., HONKONNOU N., ANTHONY E. J., CASTELLE B., SENECHAL N., LAIBI R., MENSAH-SENOO T., DEGEBE G., QUENUM M., DOREL M., CHUCHLA R., LEFEBVRE J.-P., DU PENHOAT Y., LARYEA W. S., ZODEHOUGAN G., SOHOU Z., ADDO K. A., IBACETA R., KESTENARE E. (2014). *The Grand Popo beach 2013 experiment, Benin, West Africa: from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution*. Journal of Coastal Research, SI 70, pp 651-656. <https://doi.org/10.2112/SI70-110.1>
- ALMAR R., RANASINGHE R., CATALAN P. A., SENECHAL N., BONNETON P., ROELVINK D., BRYAN K. R., MARIEU V., PARISOT J. P. (2012). *Video-based*

XV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
La Rochelle, 29 au 31 mai 2018

- detection of shorelines at complex meso-macro tidal beaches.* Journal of Coastal Research, Vol. 28(5), pp 1040-1048. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00149.1>
- ALMEIDA L. P., ALMAR R., BLENKINSOPP C., MARTINS K., BENSHILA R., DALY C. (2017). *Swash dynamics of a sandy beach with low tide terrace.* Proceedings of Coastal Dynamics, 11 – 16 June 2017, Helsingør, Danemark, pp 258-267.
- ANGNUURENG D. B., ALMAR R., SENECHAL N., CASTELLE B., ADDO K. A., MARIEU V., RANASINGHE R. (2017). *Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach.* Geomorphology, Vol. 290, pp 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.007>
- DING H., KEENLYSIDE N. S., LATIF M., (2009). *Seasonal cycle in the upper equatorial Atlantic Ocean.* Journal of Geophysical Research, Vol. 114, c09016, <https://doi.org/10.1029/2009jc005418>
- LARSON M., HOAN L.X., HANSON H. (2010). *Direct formula to compute wave height and angle at incipient breaking.* J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng, 136, pp 119-122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000030)
- LYARD F. H., CARRERE L., CANCELET M., BOY J. P., GEGOUT P., LEMOINE J. M. (2016). *The FES2014 tidal atlas, accuracy assessment for satellite altimetry and other geophysical applications.* Journal of Geophysical Research, Vol. 18, EGU2016-17693.
- MELET A., ALMAR R., MEYSSIGNAC B. (2016). *What dominates sea level at the coast: a case study for the Gulf of Guinea.* Ocean Dynamics, Vol. 66, pp 623–636. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0942-2>
- MILES J., RUSSEL P. (2004). *Dynamics of a reflective beach with low tide terrace.* Continental Shelf Research, Vol. 24(11), pp 1219-1247. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.004>
- POLO I., LAZAR A., RODRIGUEZ-FONSECA B., ARNAULT S. (2008). *Oceanic Kelvin waves and tropical Atlantic intraseasonal variability: 1. Kelvin wave characterization.* J. Geophys. Res., Vol. 113, C07009. <https://doi.org/10.1029/2007JC004495>
- WRIGHT L.D., SHORT A.D. (1984). *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis.* Marine Geology, Vol. 56, pp 93-118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)

Thème 2 – Dynamique sédimentaire