



Étude expérimentale de la trajectoire du profil de plage vers l'équilibre sous l'action de la houle

Marius APARICIO¹, Laurent LACAZE¹, Rafael ALMAR²

1. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR 5502, 2 Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

marius.aparicio@imft.fr

2. Laboratoire d'Études en Géophysiques et Océanographie Spatiale, UMR 5566, 14 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France.

Résumé:

Il est désormais communément admis qu'une grande part de la variabilité de la pente de swash est liée aux paramètres de houle et aux caractéristiques des grains qui la composent. Cependant, les modèles de pente d'équilibre ne suffisent pas pour capturer l'ensemble des observations. Dans ce cadre, cette étude se penche sur le rôle de la dynamique de la plage (i.e. phase d'accrétion ou d'érosion) et du transport sédimentaire cross-shore en proche côtier dans l'adaptation de la pente. À cette fin, une régression multilinéaire est réalisée sur les pentes de deux plages naturelles à terrasse en y incorporant, en plus des paramètres hydrodynamiques, un terme lié à la morphodynamique. Les résultats du modèle suggèrent une nette amélioration de la prédiction de la pente à l'échelle mensuelle. En conséquence, un dispositif expérimental de plage à terrasse exposées à différents régimes de vague est utilisé afin de mettre en évidence le lien entre mouvements du trait de côte et chemin de la pente vers l'équilibre. Ce travail préliminaire suggère que l'adaptation de la pente, d'un équilibre à un autre, est reliée à la dynamique d'accrétion/d'érosion.

Mots-clefs :

Profil de plage, Pente de plage, Transport sédimentaire, Zone de swash, Plage à terrasse, Plage de laboratoire.

1. Introduction

Le littoral concentre aujourd'hui un très grand nombre de flux commerciaux, marchands et de personnes. Située à l'interface entre continent et océan, cette zone d'une grande richesse pour l'Homme et ses activités (fret, tourisme, agriculture) en fait l'un des endroits

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

les plus peuplés au monde ; au cœur des enjeux socio-économiques de notre siècle (DEFEO *et al.*, 2009). Les plages de sable s'inscrivent au sein de ce territoire tampon entre terre et mer (LUIJENDIJK *et al.*, 2018), et jouent le rôle de barrière naturelle face aux vagues. Ces systèmes complexes sont également des écotones pluriels qui permettent à de nombreuses espèces, marines comme terrestres, de s'y reproduire (McLACHLAN *et al.*, 2018).

À l'heure actuelle, l'existence d'états d'équilibre contrôlés par des nombres adimensionnels prenant en compte les caractéristiques de vague et la marée (WRIGHT & SHORT, 1984; MASSELINK & SHORT, 1993) est reconnue. La connaissance des processus plus fine échelle permettant de décrire le transport sédimentaire dans certaines régions de la zone littorale est également aujourd'hui bien plus étendue qu'auparavant (TURNER & MASSELINK, 1998; BALDOCK *et al.*, 2011; ALSINA *et al.*, 2012; SOUS *et al.*, 2013; DALLY, 2019). En revanche, ces processus de fine échelle restent difficiles à combiner pour définir un modèle prédictif des échanges grande échelle induits par ce transport. Ainsi, comme échelle intermédiaire, l'étude de la dynamique des plages et de ses caractéristiques se fait aujourd'hui sous le prisme du déséquilibre entraîné par le forçage lié à la houle sur le système (YATES *et al.*, 2009; DAVIDSON *et al.*, 2013; LEMOS *et al.*, 2018; LABARTHE *et al.*, 2023).

Dans ce cadre, l'évolution de la pente de swash est une composante essentielle du proche côtier puisqu'elle assure la transition entre la partie aérienne et sous-marine de la plage. Elle est en partie responsable de la dissipation d'énergie de la houle incidente et s'adapte très rapidement (de quelques heures à quelques jours) aux variations de l'état de mer. Elle est également un proxy long terme de l'état d'équilibre du profil de plage. Récemment, une étude regroupant une large compilation d'inclinaisons de pente en fonction de la taille des grains (BUJAN *et al.*, 2019) a permis une cartographie détaillée des valeurs de pente en fonction du diamètre du sédiment. De nombreux modèles de pente d'équilibre, qui tiennent essentiellement compte des paramètres de vague et de la taille moyenne des grains (H_s , T_p et D_{50}), ont été testés sur cette base de données. Les résultats obtenus suggèrent une dépendance linéaire (ou en loi de puissance) de la pente avec H_s , T_p et D_{50} . Pourtant, une large gamme de pente peut être observée pour une taille moyenne de grain donnée. De plus, MINGO *et al.*, (2024) ont mis en évidence que cette pente dépendait également de la transformation des vagues au cours de leur propagation dans la zone de surf. Ainsi, la définition d'un nombre sans dimension tenant compte des caractéristiques hydrodynamiques au plus proche de la pente permet d'expliquer la disparité des inclinaisons de pente pour des plages de laboratoire idéalisées sur terrasse rigide.

L'ensemble des travaux sur la pente d'équilibre du haut de plage fournit le cadre de cette étude qui se focalise sur le rôle de la dynamique de plage (accrétion/érosion) sur l'adaptation de la pente. Pour cela, deux plages à terrasse naturelle sont utilisées comme référence et comparées aux expériences conduites en laboratoire afin de comprendre les corrélations entre pente et échanges sédimentaires perpendiculaires au trait de côte.

2. Méthodes et matériel

2.1 Dispositif expérimental

Le sédiment utilisé au cours des expériences est un sable de densité élevée ($\rho_{\text{sable}} = 2650 \text{ kg m}^{-3}$) et de diamètre moyen $D_{50} = 0.12 \text{ mm}$. Sa vitesse de sédimentation associée a été mesurée expérimentalement et vaut $w_s = 0.74 \text{ cm s}^{-1}$.

Les expériences ont été conduites dans un canal à houle unidirectionnel de 14 m de long, 0.3 m de haut et 0.14 m de large (Figure 1). En bout de canal, un batteur à houle génère une gamme contrôlée de régimes de vagues monochromatiques. À l'autre extrémité, une pente rigide, totalement immergée et non érodable ($\alpha = 0.06$) fixe les caractéristiques de zone de levée afin de contrôler la position initiale du point de déferlement (X_0). Cette zone de levée se termine par un plateau rigide, toujours immergé. L'ensemble, zone de levée et terrasse est initialement recouvert d'une épaisseur de sable fixe de 2 cm et se termine par un haut de plage uniquement composé de sable. La distance entre la plage et le batteur à houle est suffisamment conséquente pour que la houle réfléchi se trouve totalement atténuée avant son retour au batteur, limitant ainsi la génération de mode de bassin.

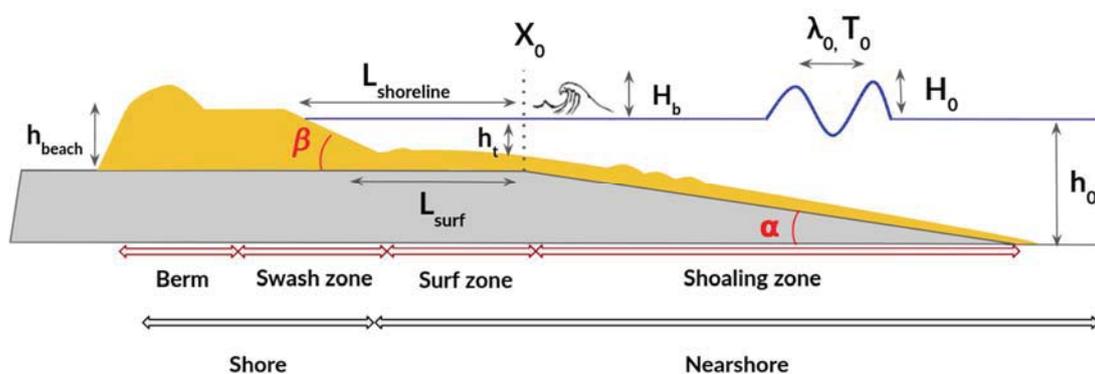


Figure 1. Vue schématique de la région proche côtière du laboratoire. Les flèches rouges mettent en évidence les zones définies par la géométrie du laboratoire. Les flèches noires représentent les zones du littoral comme définies par DINGLER (2019).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Sur la Figure 1, les ondes générées se propagent de droite à gauche. La hauteur d'eau au large est maintenue constante au cours des expériences ($h_0 = 0.16$ m et 0.17 m). Les caractéristiques des ondes “au large”, l'amplitude (H_0), la période (T_0) et la longueur d'onde (λ_0) sont contrôlées par une série de sondes à vague d'une fréquence d'acquisition de 500 Hz, placées à égale distance les unes des autres jusqu'au bas de la zone de levée. La zone de surf peut-être plus ou moins large en fonction de la dynamique de la plage. Elle est définie par une longueur de dissipation L_{surf} , estimée entre le pied de la pente de haut de plage et le point de brisure ($X_0(t)$). On notera que $X_0(t)$, $L_{surf}(t)$ et la hauteur d'eau sur la terrasse $h_t(t)$ peuvent évoluer au cours d'une même expérience avec le transport de sable mais sur une échelle qui reste petite par rapport aux dimensions du système (zone de levée et distance au batteur). L'amplitude et la période des bores (H_b, T_b) générés par le déferlement à l'entrée de la zone de surf est mesurée, à la fois par une sonde placée en X_0 et par suivi vidéo de la surface libre, en l'absence de sable sur la terrasse rigide. Enfin, l'évolution morphologique du profil de plage et l'hydrodynamique des vagues sont contrôlées par ombroscopie à une fréquence de 0.02Hz et 60 Hz, respectivement.

Les paramètres de houle ainsi que les nombres sans dimensions associés à la campagne expérimentale sont définis et compilés dans le Tableau 1. Les grandeurs caractérisant l'évolution morphologique de la plage, comme la position du trait de côte relativement à sa valeur moyenne (Msl) et la distance du trait de côte au point de brisure ($L_{shoreline}$) sont extraites des profils de plage et estimées par rapport au niveau d'eau au repos. La zone de swash est quant à elle caractérisée par sa pente, *i.e.* la pente de haut de plage d'angle β .

Tableau 1. Paramètres hydrodynamiques des régimes de houle pour $h_0 = 16$ cm. $s_0 = H_0/\lambda_0$ étant la cambrure des vagues au large, $\Omega_0 = H_0/(T_0 w_s)$ le nombre de Dean et $\epsilon = \tan\alpha/\sqrt{(H_0/\lambda_0)}$ le nombre d'Iribarren (BATTJES, 1974) qui caractérise le type déferlement. Ici, ϵ correspond au déferlement des vagues entraîné par la pente de la zone de levée ($\alpha = 0.06$).

Régime de vague	T_0 (s)	H_0 (m)	λ_0	Ω_0	s_0	E_{vague} (J/m ²)	ϵ
Régime F	1.8	0.019	2.1	1.4	0.009	0.44	gonflant
Régime G	2.55	0.020	3.1	1	0.006	0.49	gonflant

3. Résultats et discussion

3.1 Sites d'étude : Nha Trang et Grand Popo

Intensivement étudiés depuis le début de leur surveillance (ALMAR *et al.*, 2015, 2016, 2017; DALY *et al.*, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2020; MINGO *et al.*, 2021), ces deux sites présentent la particularité de présenter le même profil d'équilibre saisonnier en dépit de conditions hydrodynamiques très différentes. Cette similarité permet l'étude comparée de ces plages. Grand Popo (GPP) est une plage ouverte exposée à une houle régulière tout au long de l'année. Située au Bénin, elle est identifiée comme un environnement dominé par une dynamique de swash (MINGO *et al.*, 2024), au cœur duquel la majeure partie de l'énergie des vagues est dissipée par la zone de swash, dont la pente s'adapte en conséquence, suivant la classification des profils d'équilibre (i.e. une augmentation de l'énergie de la houle entraîne une diminution de la raideur de la pente et vice versa (CASTELLE & MASSELINK, 2023)). Nha Trang (NT) est une plage de baie du Sud-Vietnam exposée à un climat tropical. D'octobre à avril, la saison humide entraîne un renforcement des vents et une augmentation de l'intensité de la houle orientée nord-est. De mai à septembre, la saison sèche induit une diminution de la force des vents ainsi qu'une modification de leur direction, la houle résultante se veut alors plus calme et orientée sud-est, entraînant par la même occasion une rotation de plage au sein de la baie (TRAN *et al.*, 2021). NT peut être dominée par une dynamique de swash comme de surf en fonction de la houle et de son profil d'équilibre. En conditions dominées par le surf, la zone de déferlement joue un rôle suffisamment important dans la transformation des vagues pour décorrélérer la réponse de la pente de plage des caractéristiques de la houle au large et donc, de Ω_0 . Toutes deux soumises à des conditions micro-tidales et identifiées comme des plages à terrasse dans la classification des profils d'équilibre, ces plages sableuses présentent un haut de plage réfléchissant (pente abrupte) et un bas de plage dissipatif lié à la présence d'une terrasse sableuse qui peut jouer un rôle dans la transformation des vagues à l'approche de la côte en fonction d'un certain nombre de facteurs (état de la houle, niveau de la marée, anomalie du niveau de la mer). Le Tableau 2 compare les régimes de vagues et les caractéristiques de grain de NT, GPP et du laboratoire.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Tableau 2. Résumé des nombres adimensionnels et des caractéristiques de grain pour le terrain et le laboratoire.

	Ω_0	D_{50} (μm)	w_s (m/s)
Laboratoire	[1 - 7]	120	7.4×10^{-3}
NT	[1.7 - 5]	600	0.6×10^{-3}
GPP	[1.7 - 2.4]	600	0.6×10^{-3}

3.2 Le rôle de la dynamique de plage dans l'adaptation de la pente de swash

Cette étude se penche sur le rôle du transfert sédimentaire dans la zone de surf et en particulier, sur la dynamique du profil de plage (*i.e.* phase d'accrétion ou d'érosion) dans l'évolution de la pente de swash. Pour cela, une régression multilinéaire (RML) est réalisée sur la pente de plage β en utilisant quatre paramètres reliés à la dynamique proche littoral de GPP et NT, à savoir : Ω_0 , s_0 , $L = L_{surf}/h_t$ le rapport de la longueur de la zone de surf sur la hauteur d'eau moyenne sur la terrasse et $S = Msl/h_t$ le rapport de la position du trait de côte relativement à sa valeur moyenne sur la hauteur d'eau sur la terrasse. Ces hauteurs moyennes ont été déterminées par MINGO *et al.* (2021) et valent $h_t^{GPP} = 1.1$ m et $h_t^{NT} = 0.75$ m. L'évolution de la pente s'écrit :

$$\beta(t) = \underbrace{a(t)\Omega_0(t) + b(t)s_0(t)}_W + \underbrace{c(t)L(t) + d(t)S(t)}_Q \quad (1)$$

L'équation (1) rend compte de la combinaison des caractéristiques de la vague au large ainsi que l'influence de la zone de surf sur sa transformation, regroupés sous le terme W et des proxies d'échange sédimentaire entre la zone de swash et de surf, regroupés sous un terme de transport de sable Q . À titre de comparaison, une deuxième RML est réalisée. N'incluant que les paramètres de vague au large (Ω_0 , s_0) et nommé modèle- Ω , cette seconde RML fait office de référence afin d'identifier le rôle de la morphologie de plage (terme Q) sur la dynamique de haut de plage dans le modèle- β (Figure 2). À noter que le rôle de L et S dans une telle régression correspond à un mécanisme plus complexe que la simple dissipation des vagues, MINGO *et al.*, (2024). De plus, bien que la RML soit un outil statistique puissant pour obtenir un premier aperçu du comportement du système, il demeure insensible aux corrélations physiques entre les variables et aux interdépendances qui peuvent affecter ses performances. En revanche, elle permet de vérifier le lien, ou non, des différents paramètres caractérisant le modèle de plage choisi et est utilisée ici pour étayer la discussion, puisque les prédicteurs sont tous liés à la dynamique de la plage. Les résultats statistiques du modèle- β réalisé à NT et GPP sont regroupés dans le Tableau 3.

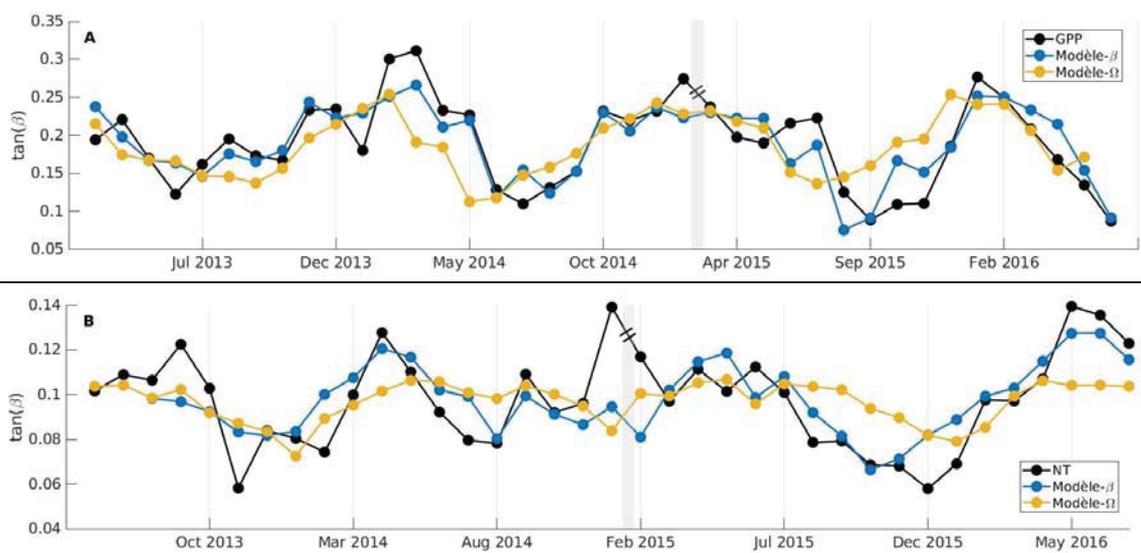


Figure 2. Moyennes mensuelles de la pente de plage (en noir) par rapport au modèle- β (bleu) et au modèle- Ω (jaune) prédits par la régression multilinéaire pour GPP (A) et NT (B). Les coefficients de corrélation entre le terrain et le modèle- β sont les suivants : $R^2_{GPP} = 0.7$ and $R^2_{NT} = 0.5$. L'une des valeurs mensuelles de pente est ignorée afin d'augmenter la prédiction du modèle (panneau gris clair) Pour NT, ce mois correspond à une variation brutale de la valeur de pente liée à un pic intense de l'énergie des vagues.

La prise en compte de la dynamique sédimentaire cross-shore et de son influence sur la transformation des vagues révèle une nette amélioration de la prédiction de β à l'échelle mensuelle, en particulier pour NT, où la corrélation entre les observations et modèle- β atteint 0.5. (contre 0,18 pour le modèle- Ω). Pour GPP la corrélation passe de 0.5 à 0.7. L'évolution des pentes de swash à NT et GPP semblent être contrôlée, en partie, par l'échange cross-shore de sédiment et la dynamique de la plage (terme Q). Comme précédemment discuté, NT présente un comportement beaucoup plus complexe que GPP, sa marche sableuse étant beaucoup plus dynamique, modifiant ainsi la hauteur d'eau sur la terrasse et la réponse de la pente. De plus, NT est régulièrement exposée aux typhons durant la saison humide, ce qui peut perturber la dynamique saisonnière de la plage sur une période suffisamment longue pour être visible à l'échelle temporelle de l'étude. L'amélioration du modèle de pente liée à la prise en compte des paramètres de plage reliés aux échanges sédimentaires perpendiculaires au trait de côte (terme Q dans (1)) est clairement visible pour le cas de NT. Ce résultat semble encore appuyer une différence majeure entre ces deux sites: GPP est contrôlé par le swash et l'impact direct des vagues

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

au larges sur le haut de plage, alors que NT est un système plus complexe évoluant d'un contrôle par la zone de surf à un contrôle par la zone de swash selon les saisons.

Tableau 3. Erreur standard et *p*-value pour les quatre paramètres inclus dans le modèle □.

<i>Grand Popo</i>				
	Ω_0	s_0	L	S
<i>SE</i>	5×10^{-2}	7.8	10^{-3}	3×10^{-3}
<i>p-value</i>	2.7×10^{-6}	5.6×10^{-4}	1.8×10^{-4}	4.8×10^{-6}
<i>Nha Trang</i>				
	Ω_0	s_0	L	S
<i>SE</i>	5×10^{-3}	4×10^{-1}	5×10^{-4}	4×10^{-4}
<i>p-value</i>	1.3×10^{-3}	10^{-2}	3×10^{-2}	1.5×10^{-4}

3.3 Le laboratoire: corrélation entre l'évolution du trait de côte et la pente

L'amélioration des performances du modèle de pente a conduit à une campagne d'expériences de laboratoire afin d'identifier le lien entre adaptation dynamique de la pente au changement de houle couplée à un échange sédimentaire entre zone de surf et zone de swash. Afin de recréer les conditions d'une transition entre deux équilibres de pente, une plage modèle est construite dans le canal (Figure 1). La pente initiale et la longueur de surf sont fixées. La plage est ensuite exposée au régime G (Tableau 1, régime peu énergétique) jusqu'à ce que le profil d'équilibre soit atteint. Une fois ce dernier en place, la plage est soumise à un second régime (F), à Dean plus grand mais pas plus énergétique, durant 20 minutes (temps suffisant pour observer la dynamique de pente ainsi que sa mise à l'équilibre) puis, la houle est à nouveau modifiée afin de ramener le profil à son équilibre initial (G). L'expérience est réalisée pour deux hauteurs d'eau sur la terrasse (h_t) différente, à savoir $h_t = 4$ cm et $h_t = 5$ cm, afin de tester leur influence sur la co-évolution de la pente et du trait de côte (Figure 3, $h_t = 5$ cm A.1-3 et $h_t = 4$ cm B.1-3). Les résultats suggèrent une forte corrélation entre □ et S au cours des transitions d'équilibre de la pente pour ces deux conditions de hauteur d'eau ($h_t = 4$ cm et $h_t = 5$ cm). En revanche, les signes de corrélation s'inversent. Pour $h_t = 4$ cm la pente s'abaisse (se raidit) lorsque la plage progresse vers le large (érode) (Figure 3.B.1). Ce comportement va à l'encontre de l'évolution de la pente prédite par la classification d'équilibre établie par WRIGHT & SHORT (1984). Pour des conditions de plus grande hauteur d'eau ($h_t =$

5 cm), la coévolution entre la pente et le trait de côte s'inverse (Figure 3.A.1). Dans ces conditions et pour une même houle au large, l'accrétion/érosion se fait préférentiellement en haut de pente (Figure 3.A.2). Cette dernière s'abaisse lorsque la plage s'érode et se raidit lorsqu'elle accrète du sédiment. Dans un contexte hors équilibre, les variations temporelles de β , $\Delta\beta$ en fonction de la variation temporelle de S , ΔS (Figure 3.A.3 & 3.B.3) rendent compte des phases transitoires entre deux équilibres et met en évidence l'existence de deux modes de coévolution entre la pente et le trait de côte en fonction de h_t .

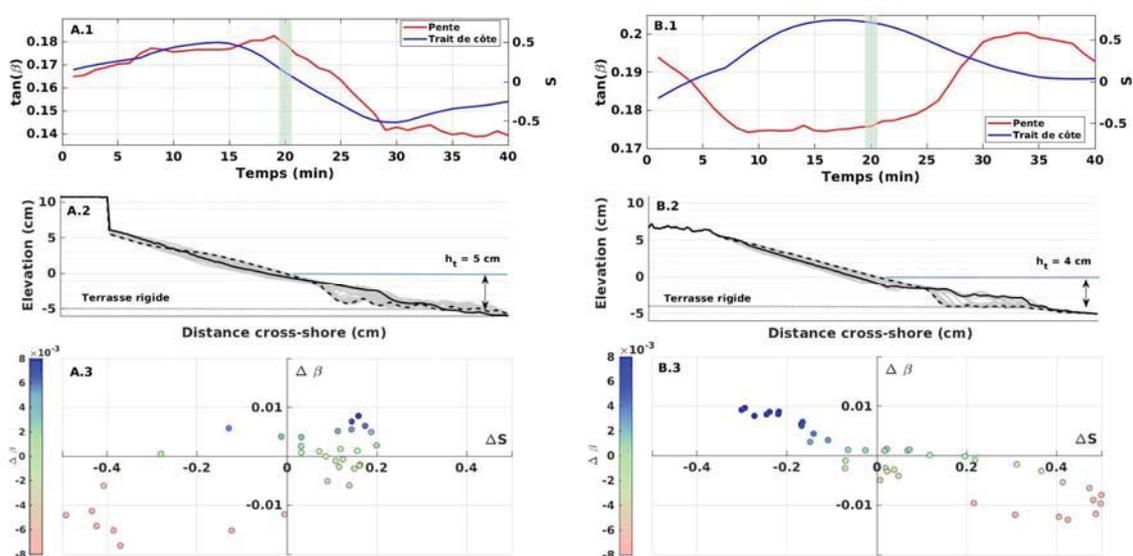


Figure 3. Suivi de l'évolution du trait de côte et la pente pour $h_t = 5$ cm (A.1) et $h_t = 4$ cm (B.1). Le changement de régime de houle au cours des expériences est marqué par le rectangle vert. Profils d'équilibre pour le régime G (noir continu) et le régime F (noir pointillé) accompagnés des profils transitoires (gris) (A.2 & B.2). Variation temporelle de β , $\Delta\beta$ en fonction de la variation temporelle de S , ΔS (A.3 & B.3). Pour $h_t = 4$ cm, plage de laboratoire accrète systématiquement à pente faible et érode toujours à pente forte afin de rejoindre ses valeurs d'équilibre.

4. Conclusion

Les modèles statistiques réalisés à NT et GPP indiquent que la prise en compte des paramètres liés à l'évolution sédimentaire du système (L et S) raffine la prédiction du modèle. L'étude expérimentale de l'influence de la dynamique de plage (accrétion/érosion) sur l'adaptation de la pente de swash suggère que ce couplage est dépendant de la hauteur d'eau sur la terrasse, en laboratoire du moins. Une campagne de mesure de laboratoire étendue à de plus nombreuses houles sera réalisée afin de cartographier les paramètres de contrôle des modes d'accrétions/érosion. Enfin, ce travail

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

insiste sur le caractère dynamique d'un profil de plage qui, même s'il arbore des équilibres statistiques (liés aux temps longs), n'en demeure pas moins un système constamment forcé à ses frontières. Il semble donc opportun de se focaliser sur la dynamique des profils transitoires.

5 Références bibliographiques

- ALMAR R., KESTENARE E., REYNS J., JOUANNO J., ANTHONY E.J., LAIBI R., HEMER M., DU PENHOAT Y., RANASINGHE R. (2015). *Response of the Bight of Benin (Gulf of Guinea, West Africa) coastline to anthropogenic and natural forcing, Part1: Wave climate variability and impacts on the longshore sediment transport*, Continental Shelf Research, 110, pp. 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.020>
- ALMAR R., ALMEIDA P., BLENKINSOPP C., CATALAN P. (2016). *Surf-swash interactions on a low-tide terraced beach*, Journal of Coastal Research, 75(sp1), pp. 348–352. <https://doi.org/10.2112/SI75-070.1>
- ALMAR R., MARCHESIELLO P., ALMEIDA L.P., THUAN D.H., TANAKA H., VIET N.T. (2017). *Shoreline response to a sequence of typhoon and monsoon events*, Water, 9(6), 364. <https://doi.org/10.3390/w9060364>
- ALMEIDA L.P., ALMAR R., BLENKINSOPP C., SENECHAL N., BERGSMAN E., FLOCH F., CAULET C., BIAUSQUE M., MARCHESIELLO P., GRANDJEAN P., *et al.* (2020). *Lidar observations of the swash zone of a low-tide terraced tropical beach under variable wave conditions: The Nha Trang (Vietnam) COASTVAR experiment*, Journal of Marine Science and Engineering, 8(5), 302. <https://doi.org/10.3390/jmse8050302>
- ALSINA J.M., CÁCERES I., BROCCINI M., BALDOCK T.E. (2012). *An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions*, Coastal Engineering, 68, pp. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.008>
- BALDOCK T.E., ALSINA J.A., CÁCERES I., VICINANZA D., CONTESTABILE P., POWER H., SANCHEZ-ARCILLA A. (2011). *Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves*, Coastal Engineering, 58(2), pp. 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.10.006>
- BATTJES J.A. (1974). *Surf similarity*, Coastal Engineering Proceedings, 1(14), p. 26. <https://doi.org/10.9753/icce.v14.26>
- BUJAN N., COX R., MASSELINK G. (2019). *From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size*, Marine Geology, 417, p. 106012. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012>

- CASTELLE B., MASSELINK G. (2023). *Morphodynamics of wave-dominated beaches*, Cambridge Prisms: Coastal Futures, 1, p. e1. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.2>
- DALLY W.R. (2019). *Surf zone processes*, in C.W. Finkl and C. Makowski (eds) Encyclopedia of Coastal Science. Cham: Springer International Publishing, pp. 1654–1663. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_306
- DALY C., FLOC'H F., ALMEIDA L.P., ALMAR R. (2017). *Modelling accretion at Nha Trang beach, Vietnam*, Coastal Dynamics, [Preprint], (170).
- DAVIDSON M.A., SPLINTER K.D., TURNER I.L. (2013). *A simple equilibrium model for predicting shoreline change*, Coastal Engineering, 73, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002>
- DEFEO O., MCLACHLAN A., SCHOEMAN D.S., SCHLACHER T.A., DUGAN J., JONES A., LASTRA M., SCAPINI F. (2009). *Threats to sandy beach ecosystems: A review*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 81(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>
- DINGLER J.R. (2019). *Beach Processes*, in C.W. Finkl and C. Makowski (eds) Encyclopedia of Coastal Science. Cham: Springer International Publishing, pp. 275–285. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_36.
- LABARTHE C., CASTELLE B., MARIEU V., GARLAN T., BUJAN S. (2023) *Observation and modeling of the equilibrium slope response of a high-energy meso-macrotidal sandy beach*, Journal of Marine Science and Engineering, 11(3), p. 584. <https://doi.org/10.3390/jmse11030584>
- LEMOIS C., FLOC'H F., YATES M., LE DANTEC N., MARIEU V., HAMON K., CUQ V., SUANEZ S., DELACOURT C. (2018) *Equilibrium modeling of the beach profile on a macrotidal embayed low tide terrace beach*, Ocean Dynamics, 68(9), pp. 1207–1220. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1185-1>
- LUDKA B.C., GUZA R.T., O'REILLY W.C., YATES M.L. (2015) *Field evidence of beach profile evolution toward equilibrium*, Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(11), pp. 7574–7597. <https://doi.org/10.1002/2015JC010893>
- LUIJENDIJK A., HAGENAARS G., RANASINGHE R., BAART F., DONCHYTS G., AARNINKHOF S. (2018). *The state of the world's beaches*, Scientific Reports, 8(1), p. 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MASSELINK G., SHORT A.D. (1993). *The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model*, Journal of Coastal Research, 9(3). <https://www.jstor.org/stable/4298129>
- MCLACHLAN A., DEFEO O., SHORT A.D. (2018). *Characterising sandy beaches into major types and states: Implications for ecologists and managers*, Estuarine, Coastal and

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Shelf Science, 215, pp. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.027>

MINGO I.M., ALMAR R., LACAZE L. (2021). *Surf and swash dynamics on low tide terrace beaches*, *Coasts*, 1(1), pp. 73–89. <https://doi.org/10.3390/coasts1010005>

MINGO I.M., LACAZE L., ALMAR R. (2024). *A semi-empirical formula of beach slope on flat lower platforms*, *Coastal Engineering*, 190, p. 104506. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104506>

SOUS D., LAMBERT A., REY V., MICHALLET H. (2013). *Swash–groundwater dynamics in a sandy beach laboratory experiment*, *Coastal Engineering*, 80, pp. 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.05.006>

TRAN Y.H., MARCHESIELLO P., ALMAR R., HO D.T., NGUYEN T., THUAN D.H., BARTHÉLEMY E. (2021). *Combined longshore and cross-shore modeling for low-energy embayed sandy beaches*, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 979. <https://doi.org/10.3390/jmse9090979>

TURNER I.L., MASSELINK G. (1998). *Swash infiltration-exfiltration and sediment transport*, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C13), pp. 30813–30824. <https://doi.org/10.1029/98JC02606>

WRIGHT L.D., SHORT A.D. (1984). *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis*. *Marine Geology*, Volume 56, Issues 1–4, pp. 93-118, [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)

YATES M.L., GUZA R.T., O'REILLY W.C. (2009). *Equilibrium shoreline response: Observations and modeling*, *Journal of Geophysical Research*, 114(C9), p. C09014. <https://doi.org/10.1029/2009JC005359>