



**HAL**  
open science

# Relations entre granularité des sédiments, pente des plages et déferlement des vagues

Carla Labarthe

► **To cite this version:**

Carla Labarthe. Relations entre granularité des sédiments, pente des plages et déferlement des vagues. Géomorphologie. Université de Bordeaux, 2023. Français. NNT : 2023BORD0191 . tel-04218017

**HAL Id: tel-04218017**

**<https://theses.hal.science/tel-04218017>**

Submitted on 26 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE**

**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences et Environnements (EDSE 304)

SPÉCIALITÉ : Physique de l'environnement

Par : **Carla LABARTHE**

---

**Relations entre granularité des sédiments,  
pente des plages et déferlement des vagues.**

---

Sous la direction de M. **Bruno CASTELLE** et M. **Thierry GARLAN** et l'encadrement  
de M. **Vincent MARIEU**

Soutenue le 11 juillet 2023

Membres du jury :

Mme. **Nadia SENECHAL**  
Mme. **France FLOC'H**  
M. **Alain TRENTESAUX**  
M. **Nicolas ROBIN**  
M. **Pierre WEILL**  
M. **Bruno CASTELLE**  
M. **Thierry GARLAN**  
M. **Vincent MARIEU**

Professeur, Université de Bordeaux  
MCF-HDR, Université de Bretagne Occidentale  
Professeur, Université de Lille  
MCF-HDR, Université de Perpignan  
MCF, Université de Caen Normandie  
DR CNRS, Université de Bordeaux  
DR, Shom de Brest  
IR CNRS, Université de Bordeaux

Examinatrice  
Rapporteur.e  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Directeur  
Co-Directeur  
Invité



## **Titre : Relations entre granularité des sédiments, pente des plages et déferlement des vagues.**

**Résumé :** La pente de plage est le plus souvent considérée comme constante dans le temps, et reliée à une taille de grain de sable homogène. L'étude couplée des pentes et des sédiments des plages sableuses exposées à l'action des vagues est complexe car leur modélisation et les techniques d'analyse à mettre en œuvre sont longues et fastidieuses, et par conséquent limitées en temps et en espace. Dans cette thèse, en s'appuyant sur une large base de données topographique sur la plage du Truc Vert et une approche de modélisation à complexité réduite, nous démontrons que la pente de plage répond à un comportement d'équilibre dynamique, avec des valeurs maximales et minimales respectivement en fin d'été et fin d'hiver. Nous avons réalisé sur trois ans des suivis intensifs *in situ* biannuels (fin d'été et fin d'hiver sur les périodes de pentes extrêmes) de la granularité 4D sur cinq plages représentatives de la diversité naturelle des plages en France métropolitaine, associés à des suivis topographiques. L'ensemble des données recueillies révèle une variabilité spatiale et temporelle importante de la granulométrie (en surface et en profondeur) et de la morphologie des plages sableuses concernées. Les motifs temporels et spatiaux observés dépendent fortement de l'état de plage (réflectif, intermédiaire, dissipatif). Ces recherches contribueront à affiner les modèles prédictifs utilisés en océanographie, en particulier sur les aspects morphodynamiques et sédimentaires.

**Mots clés :** granularité ; pente de plage ; modèle d'équilibre ; plages sableuses ; mesures *in situ*.

## **Title : Relationship between sediment grain size, beach slope and wave breaking.**

**Abstract :** Beach slope is often assumed constant in time and depending of a given median grain size. The coupled study of beach slope and beach sediments dominated by wave action is complex, because their numerical modelling and the analysis techniques involved are time-consuming and tedious, and consequently limited both in time and space. In the present PhD work, building a long-term dataset of bimonthly beach topography at Truc Vert beach, we demonstrate using a reduced-complexity modelling approach that beach slope shows an equilibrium response with maximum and minimum beach slope observed at the end of the summer and at the end of the winter, respectively. We conducted over three years an intensive *in situ* bi-yearly (end of summer and end of winter) monitoring of the 4D granularity on five representative beaches that showcase the natural diversity of the metropolitan France beaches, coupled with topographic surveys. The collected dataset reveals the large spatial and temporal variability of the granularity (both horizontally and vertically) and of the sandy beach morphology. The spatial and temporal patterns of beach slope and beach sediment variability are found to be linked with beach state (dissipative, intermediate, reflective). This research will contribute to improve oceanography predictive models, particularly in relation to morphodynamic and sedimentary aspects.

**Keywords :** grain size ; beach slope ; equilibrium model ; sandy beaches ; field measurements.



## Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers mes encadrants, Bruno Castelle, Thierry Garlan et Vincent Marieu, qui ont rendu possible ce parcours doctoral. Leur partage de connaissances, leurs conseils avisés et leur bienveillance ont été d'une inestimable valeur pour moi, et je leur en suis profondément reconnaissante. Je tiens également à exprimer mes remerciements envers tous les membres dévoués de l'équipe METHYS à l'Université de Bordeaux et de l'équipe SEDIM au Shom de Brest. Qu'ils aient contribué de près ou de loin à mes travaux, leur soutien constant et leur gentillesse ont été des sources d'inspiration inestimables tout au long de cette aventure extrêmement enrichissante. Je remercie également l'ensemble des membres du jury qui ont joué un rôle essentiel dans la validation de cette thèse. Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de ce projet. Leur encouragement et leur amour ont été le moteur qui m'a poussée à donner le meilleur de moi-même. Pour clore ces remerciements de manière imagée :



*« Un tsunami de remerciements envers toutes les personnes qui ont été mes phares et mes bouées de flottaison pour naviguer dans cet océan de doutes et de défis. Grâce à vous, j'ai pu surfer dans ces vagues tumultueuses avec humour et ténacité, transformant cette aventure en une odysée mémorable et inoubliable. Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont cru en moi, comme un marin croit en l'étoile polaire, m'offrant leur soutien inestimable. Cette traversée, aussi enrichissante sur le plan professionnel qu'humain est un véritable trésor. Ce n'est qu'après avoir navigué à travers les tempêtes que l'on peut véritablement savourer la quiétude de l'océan, bercée par la douce mélodie des étoiles scintillantes. » Carla*



# Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre 1. Introduction.....</b>	<b>10</b>
1.1. Contexte général.....	10
1.2. Problématiques et objectifs de la thèse .....	12
1.3. Organisation de la thèse .....	13
<b>Chapitre 2. Etat de l'art.....</b>	<b>15</b>
2.1. Etat de plage.....	15
2.1.1. Morphologie des plages sableuses .....	15
2.1.2. Transport sédimentaire et échelles de temps caractéristiques des évolutions morphologiques.....	19
2.1.3. Modèle d'équilibre des états de plage.....	21
2.2. Approche méthodologique pour le suivi des pentes de plage et de la granularité ....	23
2.2.1. Pente des plages .....	23
a) Définitions du profil de plage .....	24
b) Calcul de la pente de la plage.....	25
c) Méthodes d'acquisition .....	26
2.2.2. Granularité des sédiments .....	28
a) Origine des sédiments et composition.....	29
b) Classification granulométrique des sédiments.....	29
c) Variabilité spatiale et temporelle de la granularité.....	31
d) Méthode de prélèvement et d'analyse.....	32
2.3. Lien entre la granularité et la pente de la plage .....	33
<b>Chapitre 3. Modèle d'équilibre .....</b>	<b>37</b>
3.1. Préambule.....	37
3.2. Introduction .....	38
3.3. Study Site and Data.....	40
3.3.1. Truc Vert Beach .....	40
3.3.2. Beach Slope Data .....	41
3.3.3. Wave Data.....	42
3.4. Equilibrium Profile Model .....	42
3.4.1. Equilibrium Model.....	42
3.4.2. Model Parameter Optimization.....	44
3.5. Results.....	44
3.5.1. Beach Profile Change in Time and Space.....	44
3.5.2. Equilibrium Beach Slope Response .....	46
3.6. Discussion .....	48
3.7. Conclusions .....	50

3.8.	Implications.....	51
<b>Chapitre 4. Mesures <i>in situ</i>.....</b>		<b>54</b>
4.1.	Introduction.....	54
4.2.	Sites d'étude.....	55
4.2.1.	Plage Du Truc Vert (Lège Cap-Ferret).....	58
4.2.2.	Anglet : Plage de la Petite Chambre D'Amour.....	59
4.2.3.	Saint-Trojan-les-Bains : Plage de la Giraudière ou Grande Plage.....	60
4.2.4.	Saint-Malo : Plage de la Hoguette.....	61
4.2.5.	Saint-Aygulf : Plage de Saint-Aygulf et Plage de Fréjus.....	63
4.3.	Campagnes de mesures.....	64
4.4.	Stratégie d'échantillonnage des données de granularité.....	65
4.4.1.	Distribution spatiale des points de prélèvements.....	65
	a) <i>Stratégie pour les plages à barre/avec chenal</i> .....	66
	b) <i>Stratégie appliquée aux plages sans barre émergentes/sans chenal</i> .....	68
4.4.2.	Profondeur d'échantillonnage.....	69
4.4.3.	Techniques de prélèvement.....	70
	a) <i>Prélèvement sur sable sec</i> .....	70
	b) <i>Prélèvement sur sable saturé en eau</i> .....	71
4.5.	Acquisition et traitement des données topographiques.....	72
4.5.1.	Système GNSS.....	73
4.5.2.	Photogrammétrie par drone.....	74
4.6.	Traitement des données de granularité.....	76
4.6.1.	Tamissage par voie sèche.....	76
4.6.2.	Traitements statistiques.....	77
4.7.	Besoins humains et matériels.....	78
4.7.1.	Granularité.....	78
4.7.2.	Topographie.....	78
<b>Chapitre 5. Analyse 4D de la granularité.....</b>		<b>79</b>
5.1.	Comparaison intersites annuelle.....	80
5.1.1.	Pente.....	80
5.1.2.	Granularité.....	81
	a) <i>Variabilité générale</i> .....	81
	b) <i>Variabilité sur la profondeur</i> .....	82
	c) <i>Variabilité sur la profondeur, par radiales</i> .....	84
5.1.3.	Relation entre pente et granularité.....	86
5.2.	Variabilité intrasite saisonnière.....	87
5.2.1.	Pente.....	87
5.2.2.	Granularité.....	90
	a) <i>Variabilité générale</i> .....	90
	b) <i>Variabilité générale, par radiales</i> .....	91
	c) <i>Variabilité sur la profondeur</i> .....	93
	d) <i>Variabilité sur la profondeur, par radiales</i> .....	98
5.2.3.	Relation entre la pente et la granularité.....	102
5.3.	Variabilité horizontale des sédiments.....	104

5.3.1. Plage du Truc Vert .....	105
5.4. Discussion .....	106
<b>Chapitre 6. Conclusion générale et perspective.....</b>	<b>110</b>
6.1. Conclusion générale .....	110
6.2. Perspectives de recherche .....	114
<b>Articles publiés .....</b>	<b>118</b>
<b>Présentation en conférence .....</b>	<b>118</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>119</b>
<b>Annexe A .....</b>	<b>133</b>
<b>Annexe B .....</b>	<b>134</b>
<b>Annexe C .....</b>	<b>171</b>
<b>Annexe D .....</b>	<b>173</b>
<b>Annexe E .....</b>	<b>177</b>

---

# Chapitre 1. Introduction

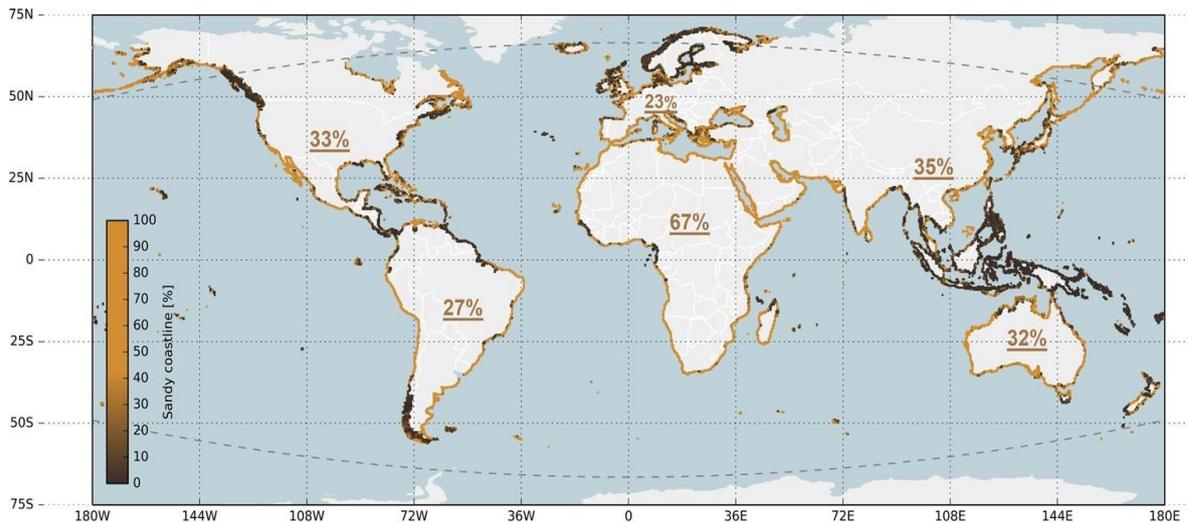
---

## 1.1. Contexte général

Les plages sableuses occupent un tiers du littoral mondial (Figure 1.1) libre de glace (Luijendijk et al., 2018) et offrent de précieuses ressources naturelles, structurelles et socio-économiques aux communautés côtières (Nunes and Ghermandi, 2013; Poumadère et al., 2015). Contribuant significativement aux économies locales, régionales et même nationales (Garola et al., 2022; Houston, 2018), elles constituent en outre des protections naturelles contre les vagues de tempête et la submersion marine. La conservation de la plage est donc un point d'attention important pour les gestionnaires, qui cherchent aussi à obtenir une morphologie de plage perçue positivement par les usagers et les touristes (Valdemoro and Jiménez, 2006).

Les plages comptent parmi les environnements les plus dynamiques sur Terre. Leur évolution est contrôlée par une variété de facteurs naturels et anthropiques, qui agissent à différentes échelles temporelles, ainsi que par l'héritage géologique local (Stive et al., 2002). Les forçages naturels incluent notamment les vagues, les variations du niveau de la mer (marée, surcote), les courants liés à la marée et les vents qui jouent un rôle important dans la formation et l'évolution des dunes. Sur le long terme, les plages sont aussi menacées par l'élévation du niveau de la mer résultant du changement climatique (Cooper et al., 2020; Voudoukas et al., 2020), en combinaison avec d'autres facteurs tels que la pénurie naturelle de sédiments et les activités humaines interférant avec les processus naturels (Luijendijk et al., 2018).

Les plages peuvent aussi être des environnements à risque pour les usagers, notamment en raison de la présence de courants d'arrachement (Castelle et al., 2016) qui causent de nombreuses noyades (Brighton et al., 2013; Ménard et al., 2018) ou encore les vagues de bord (Castelle et al., 2018a; Puleo et al., 2016). En effet, un lien direct existe entre le type de plage et le niveau de danger associé (Scott et al., 2011).



*Figure 1.1 Répartition mondiale des littoraux sableux; les points colorés le long du littoral mondial représentent le pourcentage local de littoraux sableux (le jaune correspond au sable, le brun foncé au non sable), les pourcentages soulignés indiquant les pourcentages de littoraux sableux en moyenne par continent. Figure tirée de (Luijendijk et al., 2018).*

Récemment reconnues pour abriter une faune diversifiée (McLachlan et al., 2018), les plages sableuses offrent par exemple des zones de déferlement propices à la reproduction de nombreuses espèces de poissons (Ciotti et al., 2013).

Les zones littorales sont des environnements complexes dont les évolutions sont contrôlées par de nombreux processus hydro-sédimentaires qui interagissent entre eux sur une vaste gamme d'échelles temporelles et spatiales. La pente et la morphologie de la plage tentent continuellement d'atteindre un équilibre avec les conditions hydrodynamiques qui changent à l'échelle des changements de régimes de vague. La morphodynamique des plages englobe les interactions entre la morphologie des plages et les processus hydrodynamiques (tels que les vagues, les marées et les courants induits par les vagues), qui impliquent le mouvement des sédiments. Sur une plage donnée, les variations temporelles de la morphologie peuvent être influencées par des fluctuations des conditions hydrodynamiques agissant à diverses échelles de temps. Étant donné l'importance des fonctions qu'elles remplissent, il est essentiel de déterminer l'état des plages et de comprendre leur comportement pour une gestion optimale.

**La taille des sédiments et la pente des plages** sont des éléments géomorphologiques essentiels pour caractériser les plages, car ils sont interconnectés et liés aux conditions océanographiques (Bascom, 1951; Carter, 2013; Wright et Short, 1984). De nombreuses études ont essayé de relier la taille des grains des sédiments à la pente de la plage (Bujan et

al., 2019; Dean, 1973; Flemming, 2011; Kim et al., 2014; McLean and Kirk, 1969; Rector, 1954; Reis and Gama, 2010; Soares, 2003; Sunamura, 1975), toutefois ces études montrent qu'il n'y a pas de relation générique. Une des principales raisons est que ces études ont systématiquement fait l'hypothèse d'une pente de plage constante dans le temps et homogène sur tout le profil, et/ou d'une taille de grain constante dans l'espace (horizontalement et verticalement) et dans le temps. Le travail décrit dans ce manuscrit tente d'aborder ces variabilités spatiales et temporelles, en combinant la modélisation à complexité réduite (basée sur des principes généraux et des lois de comportement, par oppositions aux modèles dits « process-based » qui s'appuient sur des lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement), les données d'observation, et la mise en place d'un protocole expérimental *in situ* innovant.

## **1.2. Problématiques et objectifs de la thèse**

Cette recherche a été réalisée à la fois au Shom (Service Hydrographique) basé à Brest et au laboratoire UMR CNRS EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux) de l'Université de Bordeaux dans l'équipe METHYS (Modélisation, Expérimentation et Télédétection en HYdrodynamique Sédimentaire). Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet d'études amont MEPELS (Modèle d'Évolution des Plages et Environnements Littoraux Sableux) développé par le Shom.

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre l'évolution 4D (i.e., temporelle en 3D) de la granularité des sédiments des plages pour une large gamme d'environnements (exposition aux vagues, marnage, granularité moyenne, degré d'anthropisation, etc.), en relation avec les pentes de plage dans le but, à terme, d'améliorer la modélisation et la prévision de l'évolution des plages. Pour atteindre cet objectif, une première étape a consisté à étudier la dynamique des pentes de la plage du Truc Vert à partir de 9 ans de levés topographiques bimensuels. Parallèlement, un protocole de mesures biannuel a été mis en place et appliqué sur une période de 3 ans, afin de collecter *in situ* des données topographiques et des échantillons sédimentaires sur cinq plages situées en France métropolitaine. Ces cinq plages ont été choisies pour représenter au mieux la diversité des plages sableuses le long des côtes de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée. La même méthode d'échantillonnage (en surface et en profondeur) et d'analyse a été appliquée pour les cinq plages sélectionnées. Une analyse statistique a ensuite permis d'identifier les

principales tendances de l'évolution 4D (i.e., 3D en espace, et avec la dimension temporelle) de la granularité des sédiments, en lien avec la morphologie et la pente des plages.

Les principales questions abordées dans cette thèse sont :

***Question 1 :** La pente de la plage du Truc Vert répond-elle à un équilibre dynamique ? Est-ce que l'adaptation d'un modèle d'équilibre peut expliquer/reproduire cette dynamique ? Quelles sont les limitations de cette approche de modélisation ?*

***Question 2 :** Quand, à l'échelle saisonnière, les pentes des plages présentent-elles leur minimum et maximum, et cela permet-il de déterminer les périodes optimales pour les suivis biannuels de pente/granularité ?*

***Question 3 :** A l'échelle intersite est-ce que la granularité moyenne et les pentes moyennes sont corrélées, et est-ce que cette corrélation/relation varie suivant la saison ?*

***Question 4 :** Est-ce que l'état de plage (dissipatif - intermédiaire - réfléchif) contrôle la distribution verticale de la granularité des sédiments ?*

***Question 5 :** Est-ce que la présence de corps sédimentaires contrôle la variabilité horizontale des sédiments ?*

***Question 6 :** Quels sont les paramètres permettant d'expliquer les incertitudes des relations existantes entre granularité et pente de plage ?*

### **1.3. Organisation de la thèse**

La suite de ce manuscrit de thèse est structurée en cinq chapitres. Le **Chapitre 2** présente l'état actuel des connaissances sur la granularité des sédiments en lien avec la morphologie et les pentes de plage. Les **Chapitres 3 à 5** concernent les résultats de ce travail de thèse en abordant les questions de recherche énumérées dans la section 1.2. Le **Chapitre 6** dresse les principales conclusions et propose des perspectives pour les recherches. Le contenu des **Chapitres 2 à 6** est détaillé ci-dessous :

Le **Chapitre 2** expose une synthèse bibliographique sur l'état actuel des connaissances sur la granularité des sédiments en lien avec la morphologie et les pentes de plage. Les principaux verrous scientifiques et techniques sont identifiés.

Dans le **Chapitre 3**, nous appliquons un modèle d'équilibre afin de simuler, de la tempête aux échelle pluri-annuelles, l'évolution des pentes de plage du Truc Vert pendant 9 ans. Nous analysons les performances sur deux secteurs du profil (sous et au-dessus de la crête de la berme) et la variabilité saisonnière liée à la dynamique de la berme. Ce travail permet de mieux comprendre, modéliser et prévoir les pentes de plage. Ces résultats permettent d'identifier les périodes optimales pour effectuer des suivis *in situ* biannuels de ce paramètre en fonction de la morphologie des plages.

Le **Chapitre 4** décrit les cinq sites d'étude sélectionnés, le matériel et les méthodes utilisés sur le terrain pour collecter les données topographiques et les échantillons sédimentaires réalisés en surface et en profondeur. Le protocole expérimental est détaillé, en faisant la distinction entre les plages avec des systèmes barre/chenal et celles sans système barre/chenal. Les principaux outils statistiques utilisés pour l'analyse 4D de la granularité sont ensuite décrits, ainsi que la méthode de calcul des pentes de plage basées sur les levés topographiques.

Le **Chapitre 5** décrit l'étude 4D de la granularité des cinq plages analysées. Les résultats révèlent une variabilité temporelle et spatiale significative, tant sur le plan annuel et saisonnier qu'en termes de variations *cross-shore* et *longshore*, tant qu'en surface et en profondeur. Cette analyse détaillée permet d'améliorer la description, la compréhension et la prédiction des processus liés à la granularité en fonction de la morphologie spécifique de chaque plage étudiée. De plus, une corrélation est identifiée entre la granularité et la pente moyenne de la plage.

Le **Chapitre 6** synthétise les résultats obtenus et met en évidence l'importance d'adapter les études futures aux différents types de plages, en prenant en compte la variabilité spatiale et temporelle de la pente des plages et de la taille des grains des sédiments. Des perspectives de recherche sont ensuite proposées, comme la nécessité de se focaliser sur la collecte de données supplémentaires à long terme et sur divers sites. Cette approche multidimensionnelle favorisera une meilleure compréhension et gestion des zones côtières en tenant compte de leur diversité.

---

# Chapitre 2. Etat de l'art

---

Ce chapitre se divise en plusieurs parties. La première (2.1) se concentre sur la description des phénomènes et processus contrôlant les évolutions morphologiques des plages en s'appuyant sur des classifications conceptuelles d'état de plage développées au cours de ces dernières décennies. Dans cette section, je prends le soin de relier les états de plage avec la pente de plage et la granularité des sédiments. Puis (2.2), ce chapitre se penche sur les principales méthodologies permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle de la pente des plages, et de leur granularité. Les principaux avantages et inconvénients de ces approches sont rapidement donnés. Finalement (2.3), ce chapitre se focalise sur le lien existant entre la granularité des sédiments et la pente de la plage, faisant le lien entre les différents aspects explorés précédemment.

## 2.1. Etat de plage

### 2.1.1. Morphologie des plages sableuses

La nature sédimentaire des formes du littoral varie en fonction de son héritage géologique et des forçages hydrodynamiques (vagues, marée). La diversité morphologique des plages se manifeste par une large gamme de formes et de positions des barres sableuses qui résulte du forçage induit par les vagues et des caractéristiques sédimentaires (comme la granularité ou la porosité). Le travail de Wright et Short (1984), basé sur des études antérieures (Short, 1979; Wright et al., 1979), a classé conceptuellement différents états de plage, allant d'un état dissipatif sans barre à un état réfléchissant sans barre, en passant par des états intermédiaires présentant une barre sableuse en s'appuyant sur des observations qualitatives de plages de la côte est australienne. Ils ont aussi montré que le sens des transitions entre ces états est contrôlé par le déséquilibre de l'état de la plage et le forçage hydrodynamique, impliquant un comportement d'équilibre dynamique des états de plage et, vraisemblablement, de la pente de la plage (cf. 2.1.3). Dans un premier temps, Wright et Short (1984) se sont basés sur les travaux de Gourlay et Meulen (1968) pour proposer une

relation simple entre l'état de plage et un nombre adimensionné (souvent appelé « nombre de Dean » exprimé comme suit :  $\Omega = H_b / (W_s T_p)$ , où  $W_s$  représente la vitesse de chute des sédiments et  $H_b$  et  $T_p$  désignent respectivement la hauteur et la période significative des vagues au point de déferlement (Figure 2.1).

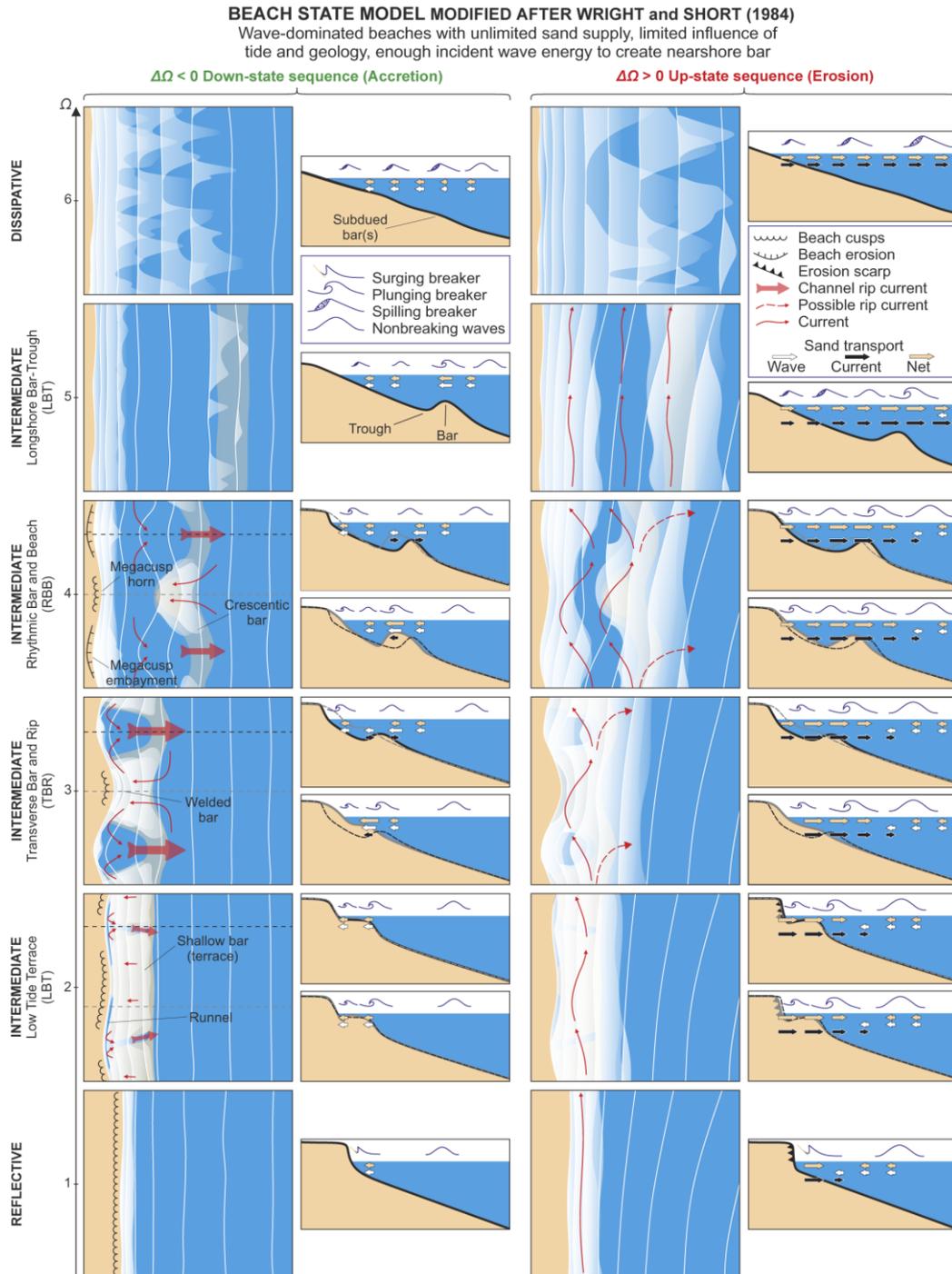


Figure 2.1 Modèle d'état de plage modifié d'après Wright et Short (1984), extrait de Castelle et Masselink (2023), avec (panneaux de gauche) des séquences d'accrétion et (panneaux de droite) des séquences érosives. Les flèches représentent l'ampleur et la direction du transport sédimentaire indicatif, avec les contributions relatives des vagues et des courants.

Cette équation permet de classer l'ensemble des plages sableuses en trois grands groupes (réflectives, intermédiaires et dissipatives), en fonction de la granularité du site et du forçage moyen des vagues (Figure 2.1).

Bien que certaines morphologies de plage soient plus stables que d'autres, en milieu naturel, les flux sédimentaires ne sont jamais à l'équilibre. Ainsi, une même plage peut évoluer d'une morphologie à une autre en fonction des conditions hydrodynamiques et du transport sédimentaire associé. La Figure 2.1 illustre de manière schématique les différents états de plage rencontrés en milieu naturel sur les plages ouvertes comprenant une barre sableuse.

Pour  $\Omega > 6$ , la plage sera **dissipative** (Figure 2.1), relativement plate, et potentiellement caractérisée par la présence de plusieurs barres sableuses peu développées qui définiront une zone de *surf* étendue. Le déferlement s'effectue en plusieurs points, il est multiple et de type glissant. Contrairement aux plages réflectives, celles-ci sont exposées à des vagues plutôt courtes et énergétiques et sont composées de sédiments fins, c'est le cas par exemple des plages situées en Normandie.

Les plages dites **intermédiaires** (Figure 2.1) sont observées pour  $6 > \Omega > 1$ . Ces plages sont les plus répandues et les plus dynamiques. Ces types de plages couvrent une grande gamme de classes granulométriques des sédiments et de climatologie de houle. Elles sont caractérisées par la présence d'une barre sédimentaire, le plus souvent tridimensionnelle se traduisant visuellement par la présence de zones de déferlement discontinues le long de la côte, qui génèrent fréquemment des cellules de circulation plus ou moins intenses et des courants d'arrachement. Devant la diversité des morphologies de barres sableuses rencontrées sur les plages intermédiaires, on peut distinguer quatre sous-classes de plage (Figure 2.1). La barre peut être déconnectée du haut de plage (*LBT = Longshore Bar-Trough*, avec  $\Omega \approx 5$  et *RBB = Rhythmic Bar & Beach*, avec  $\Omega \approx 4$ ) ou partiellement connectée (*TBR = Transverse Bar-Rip*, où  $\Omega \approx 3$  et *LTT = Low Tide Terrace*, où  $\Omega \approx 2$ ).

Pour des sites présentant des valeurs  $\Omega < 1$ , la plage est qualifiée de **réflective** (Figure 2.1), caractérisée par un haut de plage très pentu. La zone de *surf* est étroite, confinée sur le haut de plage et caractérisée par un déferlement plongeant. Ces types de plages sont généralement exposés à des houles longues, de faible amplitude, et sont composés d'un sédiment grossier.

Puis, les travaux de Masselink et Short (1993) ont étendu ce modèle conceptuel en prenant en compte l'impact de la marée avec le paramètre *RTR* (*Relative Tide Range*), pour quantifier l'importance de cette dernière dans la formation de la morphologie des plages (Figure 2.2). En effet, la marée provoque des fluctuations du niveau d'eau, entraînant une modulation spatiale des processus hydrodynamiques dominants. Ainsi dans les environnements méso à macrotidaux, les barres sableuses intertidales peuvent être exposées alternativement aux processus de *shoaling* (e.g., marée haute), de zone de *surf* (e.g., mi-marée), et de *swash* (e.g., marée basse). Par conséquent, le temps de réponse de la plage et des barres sableuses de l'avant-côte augmentent typiquement avec la marée. Un plus grand marnage a aussi souvent pour effet de diminuer l'amplitude des barres et diminuer la pente moyenne de la plage. Enfin, la marée peut faire apparaître, notamment sur les états les plus réfléchissants, des ruptures de pente avec, typiquement, la partie supérieure du profil intertidal beaucoup plus pentue que sa partie basse (Figure 2.2).

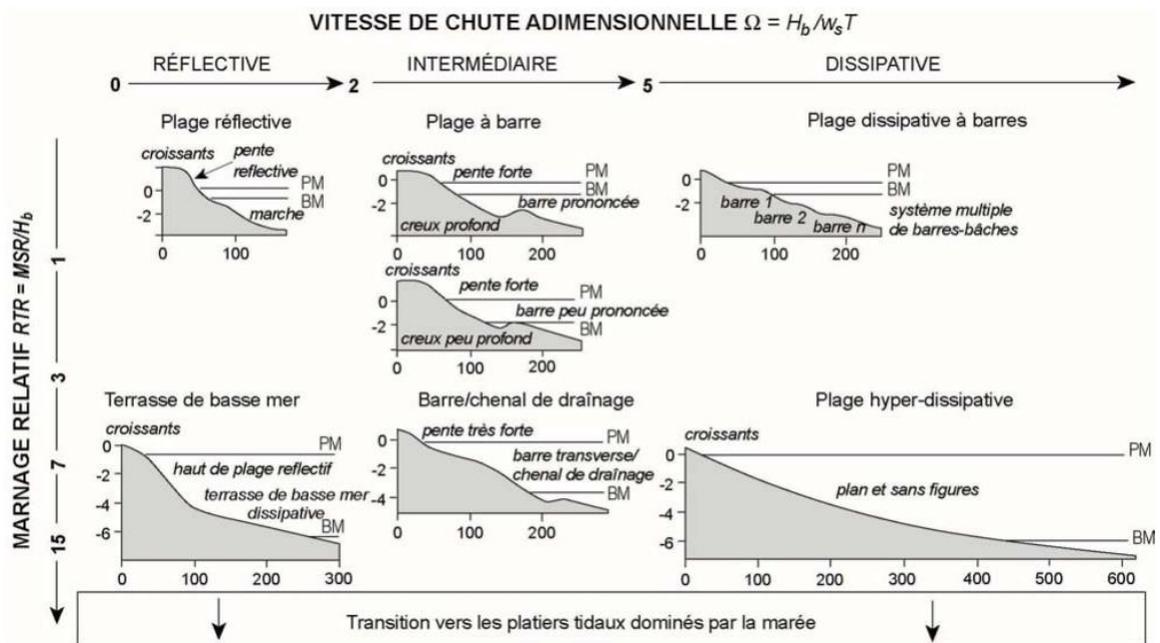


Figure 2.2 Classification morphologique des plages selon les indices  $\Omega$  et *RTR* (*Relative Tide Range*), d'après Masselink and Short, (1993).

Les morphologies du trait de côte et du haut de plage sont principalement dominées par l'action du jet de rive (*swash*), qui est à son tour dépendant de la propagation des vagues dans la zone des barres d'avant-côte. De ce fait, les fluctuations temporelles de la largeur de la plage sont souvent en réponse aux variations saisonnières et événementielles des

conditions de vagues, qui interagissent avec la dynamique et la géométrie des barres sous-marines (Almar et al., 2010).

Short et Aagaard (1993) ont étendu le modèle de Wright et Short (1984) aux plages comportant principalement deux barres, indiquant la fréquence observée de chaque configuration de ces barres sur une côte ouverte de l'Australie. Des modèles conceptuels similaires ont été développés sur d'autres littoraux en s'appuyant notamment sur des systèmes vidéo, des levés topo-bathymétriques ou encore des images satellite (Castelle et al., 2007; Lippmann et al., 1993), voire même à trois barres ou plus (Ruessink et Terwindt, 2000). Un élément important est que, en réponse aux changements de régimes de houle, le nombre de barres peut évoluer, comme par exemple sur la Gold Coast en Australie avec un système alternant entre une barre et deux barres (van Enckevort et al., 2004). Souvent les barres internes et externes peuvent chacune passer par l'ensemble des classifications intermédiaires du modèle de Wright et Short (1984). Une autre particularité des systèmes à plusieurs barres est la possibilité de couplages morphologiques complexes (Brivois et al., 2012; Castelle et al., 2010; Thiébot et al., 2012) qui ont pu être intégrés dans des modèles conceptuels (Price et Ruessink, 2013). Ces couplages se retrouvent également avec le trait de côte et la morphologie de la plage. En effet le couplage le plus présent est lorsque de l'érosion localisée de la plage (*megacusp embayment*), correspondant donc à une pente plus forte, fait face au chenal de la barre (Balouin et al., 2013; Coco et al., 2005). Ce couplage, et cette érosion, peut aller jusqu'au lien entre l'érosion de la dune et la barre externe pendant les événements extrêmes (Castelle et al., 2015). Enfin, et comme résumé dans Castelle et Masselink (2023), ces modèles conceptuels de plages peuvent être aussi modifiés par exemple, en présence de graviers (Jennings et Shulmeister, 2002) ou par encore la géologie et les ouvrages qui peuvent contraindre les circulation induites par les vagues et donner naissance à des états de plage différents et parfois assez persistants (Gallop et al., 2020; Jackson et al., 2005; Loureiro et al., 2013; McCarroll et al., 2016).

### **2.1.2. Transport sédimentaire et échelles de temps caractéristiques des évolutions morphologiques**

Le transport des sédiments est un processus complexe qui dépend principalement de l'intensité et de la structure des courants dans la colonne d'eau. Les travaux de recherche de Deigaard et al. (1992) ont identifié trois modes de transport de sédiments : le charriage (transport sur le fond), la suspension (transport dans la colonne d'eau) et le *sheet flow*

(transport en fine couche très dense près du fond). Ces modes de transport dépendent de l'intensité des courants et des propriétés des particules sédimentaires (taille du grain, porosité, densité). Par conséquent, les courants contribuent activement aux changements sédimentaires observés sur les plages sableuses.

Pendant les épisodes de tempête, le courant de retour peut causer une érosion de la plage en entraînant un transport sédimentaire important vers le large. Les études montrent que la barre d'avant-côte se déplace souvent vers le large pendant ces tempêtes en raison du courant de retour (Hoefel and Elgar, 2003; Thornton et al., 1996). Aussi, la dérive littorale joue un rôle dans le transport des sédiments le long de la côte sur des périodes relativement longues. En présence d'ouvrages maritimes transversaux (e.g., digues, enrochements, brise-lame, épis) elle peut entraîner un engraissement de certaines parties de la plage en amont-transit. A l'inverse, la dérive est bloquée en aval par ces ouvrages et peut provoquer une érosion de la plage (Bouvier, 2019). Outre son impact sur l'évolution du trait de côte à grande échelle, le courant de dérive influe également sur la dynamique du profil de plage à des échelles de temps plus courtes, pendant les tempêtes et les saisons (Figure 2.3a,b). Il peut modifier la morphologie bidimensionnelle des barres sableuses (Garnier et al., 2013) et affecter la vitesse de transport des sédiments (Miller, 1999). Les courants d'arrachement et les cellules de circulation associées, en interagissant avec l'évolution du fond marin, contribuent à façonner la morphologie tridimensionnelle des barres sableuses. Ces structures sous-marines se manifestent alors sous la forme de barres en croissant et de systèmes barre/chenal. Lors des tempêtes, ces courants peuvent provoquer des érosions localisées sur la plage et les dunes (Castelle et al., 2015; Thornton et al., 2007). La turbulence provoquée par le déferlement des vagues peut aussi favoriser la remise en suspension des sédiments (Grasso et al., 2012). L'asymétrie des vitesses orbitales des vagues liée à l'asymétrie de l'enveloppe des vagues en eau intermédiaire ou peu profonde joue également un rôle dans le transport sédimentaire, soit en facilitant la mise en suspension des particules dans la colonne d'eau, soit en créant un transport net vers le rivage (Dubarbier et al., 2017). Ce processus est responsable de l'état d'accrétion des plages pendant les épisodes de vagues peu énergétiques (Hoefel and Elgar, 2003) et permet à la plage de se reconstruire.

Les processus hydro-sédimentaires rapidement décrits ci-dessus sont modulés par l'action des vagues et de la marée et entraînent des modifications morphologiques dans les zones littorales (voir Figure 2.3a). La morphologie des littoraux sableux est donc influencée

par des variations des conditions hydrodynamiques intervenant sur diverses échelles spatiales et temporelles. Ces variations englobent les vagues individuelles (Blenkinsopp et al., 2011), les cycles de marées (Almeida et al., 2015), les tempêtes (Harley et al., 2017) et les saisons (Masselink and Pattiaratchi, 2001). Ces facteurs affectent l'évolution des formes sableuses, allant de transformations instantanées des rides sableuses (en quelques secondes) jusqu'aux évolutions du *shoreface* (plusieurs millénaires), comme illustré dans la Figure 2.3b.

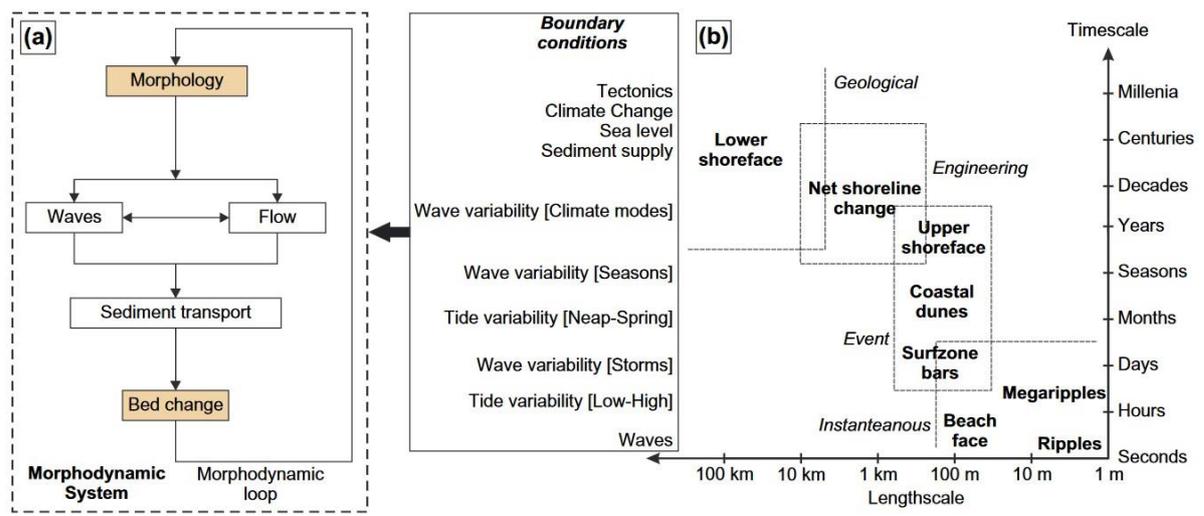


Figure 2.3 a. Schémas du système morphodynamique de plage, b. Représentation spatio-temporelle des principaux modes de variabilité des plages sableuses modifiés d'après Cowell et Thom (1995), modifié par Castelle et Masselink (2023).

### 2.1.3. Modèle d'équilibre des états de plage

Les modèles morphodynamiques basés sur une description fine des processus hydro-sédimentaires abordés ci-dessus ont prouvé leur efficacité pour reproduire l'évolution du profil de la plage, de l'échelle de quelques heures à plusieurs années, dans des conditions modérées et tempétueuses (Dubarbier et al., 2015; Hoefel and Elgar, 2003; Ruessink et al., 2007). Néanmoins, ces modèles exigent une calibration précise et adaptée à chaque site. Même sous une force de vague constante, étant donné le décalage dans la réponse morphologique à la force hydrodynamique, il faut du temps pour qu'un système de plage atteigne l'équilibre (Grasso et al., 2009). Cependant, étant donné que les échelles de temps typiques associées aux changements des conditions de vagues incidentes, aggravées par les variations du niveau de l'eau, sont plus courtes que les échelles de temps associées aux changements morphologiques, la plage n'atteint jamais l'équilibre. Ce concept relativement

simple a pour la première fois été proposé par Wright et Short (1984) (Figure 2.4) pour expliquer les transitions entre les différents états de plage. Ainsi, la direction de changement d'état de plage (par exemple, d'un état dissipatif à plus réfléchif), ou d'un indicateur d'état morphologique donné  $A$  (par exemple, position du trait de côte) du signe du déséquilibre dynamique  $\Delta D = D - D_{eq}$  (avec  $D$ , par exemple, l'énergie des vagues incidentes,  $\Omega$ ) où la condition d'équilibre  $D_{eq}$  varie dans le temps. Le taux d'évolution dépend lui de l'intensité de ce déséquilibre, mais aussi de l'intensité du forçage des vagues  $F$  à l'instant  $t$  (par exemple, la puissance des vagues, le nombre de Dean) disponible pour déplacer les sédiments. Les modèles d'équilibre sont généralement de la forme  $dA/dt = k^{+/-} F \Delta D$ , avec  $k$  un paramètre de taux de réponse indépendant du modèle qui a des valeurs différentes pour les événements d'accrétion ( $\Delta D < 0$ ) et d'érosion ( $\Delta D > 0$ ).

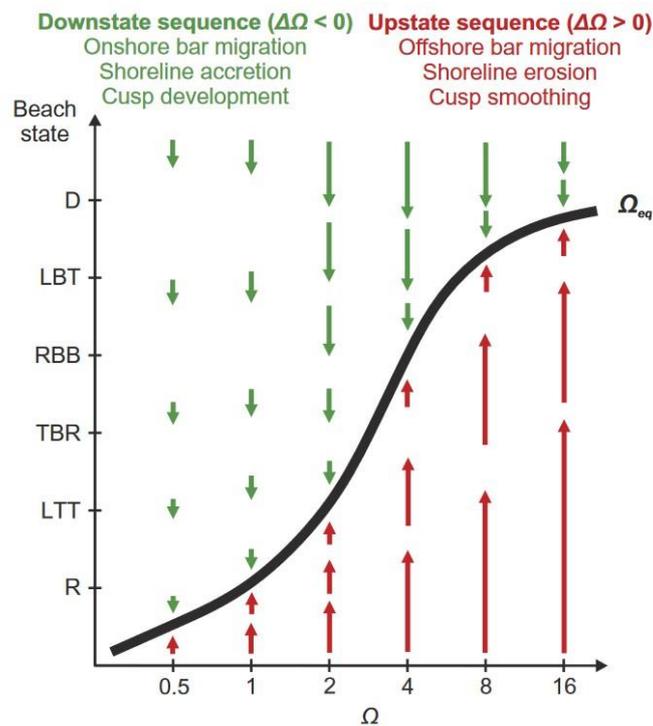


Figure 2.4 Schéma conceptuel illustrant les relations entre le changement d'état de la plage (et la migration des barres, le changement du rivage et le développement des 'cusps') et le déséquilibre morphodynamique et la poussée des vagues incidentes, la longueur des flèches étant proportionnelle au taux de changement. D'après Wright et Short (1984), modifié par Castelle and Masselink, (2023).

L'approche d'équilibre a été implémentée numériquement dans différents modèles (Davidson and Turner, 2009; Miller and Dean, 2004) pour divers descripteurs morphologiques tels que la rotation de l'embouchure côtière (Turki et al., 2013), la position *cross-shore* des bancs de sable (Plant et al., 1999), la taille des grains de sédiment (Prodger

et al., 2016c), les profils de plage (Larson, 1991), la tridimensionnalité des plages (Stokes et al., 2015), et, principalement, la réponse du trait de côte ('Shoreline', en anglais) sur des échelles de temps allant de quelques heures (tempête) à des décennies sur des sites dominés par le transport *cross-shore* (M. D'Anna et al., 2021; Davidson et al., 2013; Lemos et al., 2018; Yates et al., 2009).

Le modèle *ShoreFor* (Davidson et al., 2013) intègre cette approche, se basant sur la condition de déséquilibre du paramètre  $\Omega$  sur les  $2\Phi$  jours précédents, attribuant ainsi à  $\Phi$  la fonction de "mémoire" de la plage. L'évaluation de paramètres indépendants du modèle, comme  $\Phi$ , se fait par calibration avec des données de terrain, ou peut se faire à partir des caractéristiques saisonnières du nombre de Dean en utilisant la version paramétrée du modèle (Splinter et al., 2014). Cette approche entraîne une variabilité dans les réponses entre différents sites. Dans le chapitre 3 de cette thèse, nous nous penchons pour la première fois sur l'application de ce type de modèle à la pente de la plage. Notre objectif est d'examiner la capacité d'un modèle existant à reproduire les pentes de plage calculées dans différentes sections du profil de la plage intermédiaire du Truc Vert.

## **2.2. Approche méthodologique pour le suivi des pentes de plage et de la granularité**

### **2.2.1. Pente des plages**

La pente de la plage est un paramètre critique dans de nombreuses formules empiriques et semi-empiriques utilisées pour estimer par exemple, le *runup* des vagues (Stockdon et al., 2006) et la dérive littorale (Kamphuis, 1991). Dans ces formules, la pente de la plage est généralement considérée comme une constante. Toutefois, sa variabilité temporelle et spatiale en réponse aux tempêtes et aux variations saisonnières et interannuelles reste encore mal comprise. Pendant les tempêtes, l'érosion de la partie supérieure du profil de la plage entraîne le dépôt des sédiments au large, tandis que la diminution de la hauteur des vagues ramène les sédiments vers le rivage, rétablissant le profil initial (Wright et Short, 1984; Yates et al., 2009). L'effet de ce mécanisme est lié aux variations du niveau de la mer, qui déterminent l'accès aux dépôts situés dans la partie supérieure de la plage.

Il est important de s'interroger sur l'existence d'une définition précise et générique du profil de plage, pour ensuite être en mesure d'estimer la pente de la plage en reproduisant aussi fidèlement que possible la réalité sur le terrain (*in situ*) et permettre des comparaisons entre les différentes études.

### a) Définitions du profil de plage

Le terme de profil de plage ou « beach face » en anglais, est fréquemment mentionné dans les publications scientifiques en océanographie côtière. Il existe certaines variations dans la manière dont le terme est appliqué (Bird, 2011; McGlashan et al., 2005). Toutefois, la majorité des définitions s'accordent sur le fait que le profil de plage s'étend de la zone située entre la limite atteinte lors de la marée basse jusqu'à l'extrémité supérieure définie par le *runup* des vagues lors de la marée haute (Jennings and Shulmeister, 2002; Masselink and Li, 2001; Reis and Gama, 2010). Le *runup* désigne l'élévation de la hauteur d'eau au niveau du haut de la plage, c'est la combinaison du *wave setup* (surélévation du niveau d'eau due à l'approche des vagues) et des oscillations d'élévations maximales atteintes par le jet de rive ou zone de ressac, appelé *swash* en anglais (Laporte-Fauret, 2021), voir Figure 2.5. Le *swash* varie sur des échelles de temps allant de quelques secondes (gravitaire) à quelques minutes (infragravitaire) (Komar, 1998).

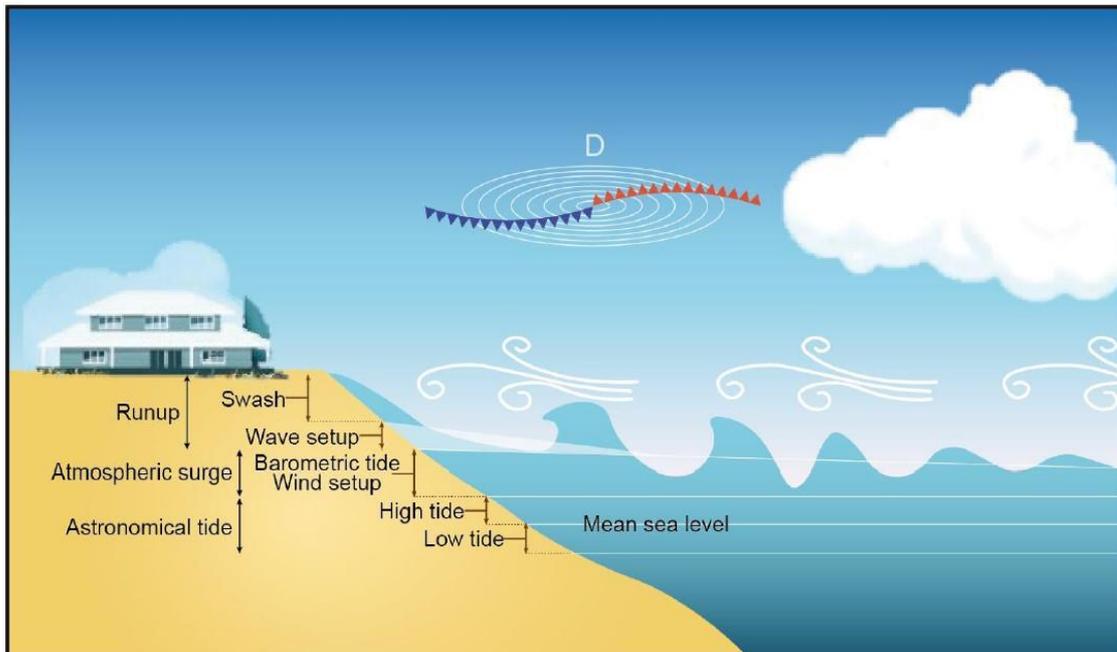


Figure 2.5 Schématisation des principaux processus contribuant à l'augmentation du niveau d'eau sur la côte, (Melet et al., 2018) et modifié par (Laporte-Fauret, 2021).

Des définitions citent : « la zone entre le niveau moyen des basses mers et la berme, qui équivaut à la limite supérieure de l'excursion des vagues à marée haute » (Karsten, 2017) et « le profil de plage est situé entre la ligne de marée basse et la limite supérieure de la zone de *swash* » (Schwartz, 2006).

Bien que certaines définitions concernant le profil de plage existent, il est difficile d'établir avec précision les limites supérieure et inférieure du profil de plage *in situ*. Opérationnellement, la largeur d'une plage (i.e., l'axe transversal ou *cross-shore*) dépend de l'évaluation de l'investigateur des limites supérieures atteintes par le *runup* des vagues et des limites inférieures au niveau de la basse mer (Bujan et al., 2019). De plus, ces limites fluctuent en fonction des coefficients de marée. En présence d'un fort coefficient de marée, la limite inférieure considérée pour déterminer le profil de plage sera située plus près du zéro hydrographique (i.e., le niveau atteint par les plus basses mers astronomiques pour une marée de coefficient 120) par rapport à celle observée en présence d'un coefficient de marée plus faible.

### ***b) Calcul de la pente de la plage***

La pente d'une plage est généralement représentée par une valeur unique, correspondant souvent à l'hypoténuse d'un triangle rectangle délimité par la crête de la plage et le niveau de l'eau atteint à marée basse (Jennings and Shulmeister, 2002; Qi et al., 2010; Reis and Gama, 2010). Pour les plages à structure simple, où la surface est plane (sans motifs morphologiques particuliers), cette méthode est considérée comme suffisamment précise (Aagaard et al., 2012; Almeida et al., 2013; Ivamy and Kench, 2006). Cependant, lorsque le profil de la plage ne suit pas une ligne droite entre le sommet et le niveau de l'eau à marée basse, caractériser la pente devient complexe, comme pour les plages convexes ou concaves (Karunarathna et al., 2012; Masselink et al., 2009; Mwakumanya and Bdo, 2007) et les plages avec des escarpements (Qi et al., 2010) ou ayant une ou plusieurs bermes (Bertoni et al., 2013; Dail et al., 2000). Certaines plages peuvent également présenter une pente douce et une pente plus abrupte sur le même profil de plage en *cross-shore* (Borzzone and Rosa, 2009; Jennings and Shulmeister, 2002), voir aussi Figure 2.1 et Figure 2.2. Dans de tels cas, les différentes parties de la plage peuvent être simplifiées en segments linéaires distincts en partant d'un point fixe en bas de plage (Bujan et al., 2019; Isla and Bujalesky, 2005).

### **c) Méthodes d'acquisition**

Dans cette sous-section, nous décrivons les principales méthodes d'acquisition de données topographiques, souvent nécessaires pour ensuite calculer la pente, en distinguant clairement les méthodes de mesure qualifiées de directes (*in situ*) et indirectes (télétection), en s'attachant à lister leurs principaux avantages et inconvénients.

- **Mesures directes**

À l'origine, les levés de profil de plage étaient réalisés à l'aide d'une lunette de nivellement ou d'un théodolite, puis la technologie a évolué vers l'utilisation du DGPS (Differential Global Positioning System). Cet outil portable, facile à déployer, a largement facilité le suivi des variations morphologiques des plages et la création de modèles numériques de terrain (MNT). Cependant, le DGPS présente des limites en termes de résolution spatiale et de couverture spatiale (Brunier et al., 2016; James et al., 2013). C'est particulièrement vrai lorsque les levés sont réalisés à pied en utilisant un sac à dos pour le transport du matériel. Toutefois, l'utilisation d'un véhicule motorisé (e.g., quad) permet de couvrir une zone plus large tout en gardant des transects peu espacés. A titre d'exemple, sur la plage du Truc Vert environ 2 km de plage sont levés avec un espacement entre 40 et 100 m. En outre, il est sujet à trois principales sources d'incertitude : i) la précision intrinsèque de l'instrument associée à la méthode de positionnement différentiel, en temps réel ou en post-traitement. La précision peut être sub-centimétrique lorsque la distance entre le système mobile et la base de référence utilisée pour la correction de position est faible (quelques centaines de mètres) mais elle augmente avec la distance ; ii) les incertitudes associées à la mesure elle-même (mesure de la hauteur du capteur, oscillations de l'antenne ; ii) les incertitudes liées à l'interpolation des données sur une grille régulière qui sont fonction de l'espacement et de l'orientation des transects. Pour limiter l'erreur d'interpolation, une méthode d'interpolation avec anisotropie est généralement utilisée.

- **Mesures indirectes**

Au cours des deux dernières décennies, des systèmes optiques soutenus par diverses plateformes - avions, drones, cerfs-volants, stations vidéo - ont été développés pour obtenir des informations sur les plages de sable ou de gravier (Almar et al., 2008; Brunier et al., 2016; Holland and Holman, 1996; James et al., 2013). Les progrès dans le domaine de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur ont grandement amélioré la possibilité

d'inférer des données topographiques à partir de ces données optiques. La technique de photogrammétrie *Structure-from-Motion* (SfM) permet la reconstruction d'un modèle topographique à partir d'un ensemble de photos aériennes présentant un grand taux de recouvrement (Jaud et al., 2016; Westoby et al., 2012). C'est une méthode qui trouve ses racines dans l'utilisation de cerfs-volants pour la photographie aérienne par les archéologues et les météorologues dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Plus récemment, des expériences avec des systèmes d'imagerie basés sur des cerfs-volants ont été réalisées sur des zones intertidales (Bryson et al., 2016, 2013; Currier, 2015; Roudaut et al., 2014).

Perko et al. (2014) ont utilisé la photogrammétrie, associée aux images satellite 'Pleiades', pour obtenir des Modèles Numériques d'Élévation (MNE) dans des zones montagneuses. Appliquée sur les plages (Almeida et al., 2019), cette approche permet de générer des MNE à grande échelle (dizaines de kilomètres), à haute résolution (2 m) et avec des incertitudes verticales de l'ordre de 0.5 m. Toutefois, cette approche nécessite une co-régistration précise des images et un recalage sur un MNE approximatif existant. Les erreurs augmentent fortement sur les zones de plage sans texture ou à forte pente. Enfin, ces images sont généralement payantes et nécessitent des conditions météo sans nuage et sans surexposition sur la plage. La photogrammétrie à partir d'images drone permet quant à elle des suivis plus réguliers, sur des zones encore relativement vastes (de l'ordre du kilomètre carré) et surtout avec une résolution spatiale élevée (quelques cm) et des incertitudes verticales faibles (< 10 cm). C'est pourquoi cette approche est désormais utilisée en routine pour suivre l'évolution des plages et des dunes dans le monde (Laporte-Fauret et al., 2019). Toutefois, ces suivis nécessitent un temps sec et peu venteux, empêchant notamment les suivis pendant les tempêtes. De plus, l'obtention d'autorisations de vol est impérative, tandis qu'il est aussi interdit de survoler des personnes. Les vols sont aussi limités par la capacité des batteries.

Les LIDARs (*Light Detection And Ranging*), terrestres et aériens permettent de générer des Modèles Numériques de Terrain (MNT) haute résolution en mesurant le temps de vol des impulsions laser réfléchies. Toutefois, ces techniques ont leurs propres limites : le LIDAR aérien, malgré sa précision et sa capacité à couvrir de vastes zones, est coûteux et requiert un temps de traitement important, ce qui le rend peu adapté à une surveillance côtière régulière à haute fréquence. Le LIDAR terrestre, bien que moins coûteux, est difficile à déployer, a une portée spatiale limitée et peut être intrusif pour les écosystèmes fragiles.

Enfin, on peut indiquer que la pente de plage peut être inférée de l'imagerie satellitaire sans nécessairement devoir générer un MNT. En effet, Vos et al., (2020) ont développé une approche spectrale qui, à partir des lignes d'eau, permet d'estimer la pente de la plage intertidale. Toutefois, cette approche fonctionne sur les sites avec un nombre important d'images satellites sur un temps court, et est donc limitée aux latitudes où les conditions météo ne limitent pas la quantité d'images disponibles.

### **2.2.2. Granularité des sédiments**

La taille des grains des sédiments, un paramètre essentiel dans l'étude de la morphodynamique des plages, est souvent sous-représentée dans la littérature scientifique, malgré son importance déterminante dans la morphodynamique côtière. Les méthodes conventionnelles de quantification de la granularité sont généralement laborieuses et chronophages, limitant la collecte de données à grande échelle spatiale et dans le temps (Hanson et Kraus, 1989; Nielsen, 2002; Turki et al., 2013). De ce fait, l'absence de données détaillées conduit alors à des simplifications importantes de la distribution de la taille des grains, pouvant entraver ainsi les avancées dans notre compréhension de la dynamique sédimentaire en domaine littoral (Buscombe et al., 2014).

Cependant, les modèles numériques ou empiriques couramment utilisés pour simuler la morphodynamique d'une plage ou estimer sa pente moyenne reposent généralement sur une unique taille de grains pour l'ensemble de la plage. Cette taille de grains unique est souvent symbolisée par le diamètre médian ( $D_{50}$  ou  $\Phi_{50}$ ) du sédiment de surface (Flemming, 2011; Reis and Gama, 2010; Soares, 2003; Sunamura, 1975). Or négliger la distribution de taille des grains, ainsi que sa variabilité spatiale et temporelle peut réduire notre compréhension de la réponse morphologique des plages et impacter la précision des modèles (Gallagher et al., 2011). Les travaux de Gallagher et al. (2011) ont présenté des preuves que d'importantes variations spatiales dans la taille des grains de sable de la plage, de l'ordre de 0,2 à 0,7 mm, étaient possibles sur des distances de 10 à 100 m. Les travaux de Gujar et al. (2011) ont constaté que les conditions environnementales locales et saisonnières entraînaient toutes deux des modifications significatives aussi bien dans la morphologie de la plage que dans les caractéristiques des sédiments. Plusieurs autres études soulignent l'importance de prendre en compte le comportement hétérogène des sédiments dans la zone de *surf* pour améliorer l'analyse de la morphologie côtière (Bascom, 1951; Gallagher et al., 2011; Gunaratna et al.,

2019; Holland and Elmore, 2008; Inman and Chamberlain, 1955; Jiang et al., 2015; Pedreros et al., 1996).

### ***a) Origine des sédiments et composition***

Les sables et galets des plages proviennent de diverses sources, transportés par la dérive littorale le long de la côte et déposés lorsque l'énergie de la houle diminue. Le domaine marin participe également à l'alimentation des plages, principalement grâce aux matériaux issus de l'érosion des falaises. Les vagues de tempête ont également la capacité de faire remonter des sédiments depuis l'avant-côte, notamment ceux de nature biodétritique (nature biologique et détritique), tels que les sables coquilliers. Néanmoins, la majeure partie des matériaux constituant les plages sont d'origine terrigène (éléments d'origine continentale), et sont apportés notamment par les cours d'eau (rivières, fleuves, estuaires) (Paskoff, 1998). Au cours du XXe siècle, des travaux de régularisation ont été effectués sur les fleuves et les rivières à travers le monde. Notamment, la construction de barrages s'est multipliée créant des pièges à sédiments fins et grossiers (Rollet, 2007; Vörösmarty et al., 2003). Cela a pour conséquence de limiter l'apport de sédiments aux plages et aux zones littorales en général.

Définir un sédiment comme étant du sable ne constitue qu'une première indication, car ses composants et propriétés peuvent être hautement variables. En effet, la présence de grains de quartz, de micas, de débris de coquilles ou de spicules d'éponges confère au sédiment des propriétés différentes selon le ou les domaines d'application considérés. Les diverses particules sableuses n'ont en effet pas toutes les mêmes propriétés de remise en suspension. De plus, la composition d'un sable peut être homogène, comme pour les dépôts éoliens de milieu désertique, ou très hétérogène comme c'est souvent le cas en milieu marin.

### ***b) Classification granulométrique des sédiments***

Du fait de la continuité des tailles des particules, les limites définies par les méthodes d'étude revêtent un caractère arbitraire (Blott and Pye, 2012). Les travaux de Wentworth (1922) a repris la « classification d' Udden (1898) », et défini les limites granulométriques en appliquant une progression logarithmique (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Classification granulométrique selon Udden-Wentworth (1922)

Millimeters (mm)	Micrometers ( $\mu\text{m}$ )	Phi ( $\phi$ )	Wentworth size class	Rock type
4096		-12.0	Boulder	Conglomerate/ Breccia
256	-----	-8.0	-----	
64	-----	-6.0	Cobble	
4	-----	-2.0	Pebble	
2.00	-----	-1.0	Granule	
1.00	-----	0.0	Very coarse sand	Sandstone
1/2	500	1.0	Coarse sand	
1/4	250	2.0	Medium sand	
1/8	125	3.0	Fine sand	
1/16	63	4.0	Very fine sand	
1/32	31	5.0	Coarse silt	Siltstone
1/64	15.6	6.0	Medium silt	
1/128	7.8	7.0	Fine silt	
1/256	3.9	8.0	Very fine silt	
0.00006	0.06	14.0	Clay	Mud Claystone

Cette classification d'Udden-Wentworth (1922) est la plus citée dans la littérature, mais il faut signaler que dans de nombreux cas, des adaptations ont été faites engendrant de légères différences avec le découpage original. Généralement, la limite supérieure des sables est définie comme étant de 2 mm, tandis que la limite inférieure est fixée à 63  $\mu\text{m}$  (Tableau 2.1).

Le type de sédiments des plages est principalement le fruit de la géologie régionale. Le sable est habituellement le produit de l'érosion des roches voisines, façonnées au fil du temps par l'eau et le vent. Si le substrat local est composé de grès, comme c'est le cas dans le Sud-Ouest de la France, les plages ont tendance à être sableuses. Les régions granitiques, comme la Bretagne, présentent des plages sableuses, bien que le sable y soit généralement plus grossier. En Normandie, des falaises de craie abritent des silex. Lorsque ces falaises s'érodent, ces silex sont libérés et se transforment en galets. Il est donc évident que la nature de la roche régionale joue un rôle déterminant dans la composition de nos plages.

Dans le contexte de cette recherche, nous portons notre attention principalement sur cette plage de tailles mentionnée précédemment. Notre étude se concentre ainsi sur les diverses catégories granulométriques suivantes, en débutant par les fractions granulométriques les plus grossières, à savoir les graviers (diamètre supérieur à 2 mm), puis

les sables très grossiers à grossier (diamètre compris entre 2 mm et 0.5 mm), les sables moyens (diamètre compris entre 0,5 mm et 0,25 mm) et enfin les sables fins à très fins (diamètre compris entre 0,25 mm et 63  $\mu$ m), voir Tableau 2.1.

### ***c) Variabilité spatiale et temporelle de la granularité***

De nombreuses publications mentionnent l'importance de considérer le comportement hétérogène des sédiments dans la zone de *surf* pour améliorer l'analyse de la morphologie côtière (Bascom, 1951; Gallagher et al., 2011; Gunaratna et al., 2019; Holland and Elmore, 2008; Inman and Chamberlain, 1955; Jiang et al., 2015; Moutzouris, 2015; Pedreros et al., 1996). Les sédiments des plages présentent souvent une très forte variabilité à la fois dans l'espace et dans le temps. La variation de la taille des sédiments peut répondre à l'échelle d'un événement de *swash* (Blenkinsopp et al., 2011), d'un cycle de marée (Reniers et al., 2013), du mois (Aragonés et al., 2014) ou d'une saison (Prodger et al., 2016b).

Bagnold (1940) a découvert que les crêtes des rides étaient significativement plus grossières et mieux triées que les creux, ce qui a été confirmé par Doucette (2002) et Trembanis et al. (2004). Sur des échelles spatiales plus larges, Abuodha (2003) a constaté une augmentation de la taille des grains entre les systèmes de dunes, avec Warrick et al. (2009a) constatant que la terrasse à marée basse était significativement plus grossière. Gallagher et al. (2011) ont présenté des preuves montrant que d'importantes variations spatiales de la taille des grains de la plage étaient possibles sur des distances de l'ordre de 10 à 100 m, avec des variations de l'ordre de 0,2 à 0,7 mm, sur la plage méso-tidale à haute énergie du Truc Vert, France. Ces auteurs ont observé une augmentation générale de la taille des grains vers la mer au niveau de la zone intertidale, avec des sédiments sur la plage inférieure jusqu'à 0,24 mm (58%) plus grossiers que les sédiments de la plage supérieure, et ont également trouvé un grossissement localisé dans les zones liées aux vitesses de courant plus rapides. Gujar et al. (2011) ont constaté que les conditions environnementales locales et saisonnières produisaient toutes deux des changements importants dans la morphologie de la plage et les caractéristiques des sédiments. Les travaux de Gallagher et al. (2016) ont également constaté la même augmentation de la taille des grains avec l'augmentation de la distance vers la mer à travers la zone intertidale à Duck, en Caroline du Nord, aux États-Unis. Prodger et al. (2016a) ont étudié la variabilité spatiale de la taille des grains des sédiments et de leur tri sur les plages macro-tidales à haute énergie qui prédominent autour de la côte sud-ouest du Royaume-Uni. Ils ont également mis en avant le gradient *cross-*

*shore*, avec un sédiment plus fin en haut de plage et plus grossier en bas de plage. Les sédiments trouvés dans les chenaux actifs étaient jusqu'à 0,1 mm (26%) plus grossiers et nettement mieux triés que les sédiments trouvés sur les bancs de sable intertidaux adjacents et conformes aux observations précédentes faites par Gallagher et al. (2011) et Thorpe et al. (2014).

Prodger et al. (2016a) ont également montré que les parties supérieures et moyennes des plages étaient uniformes en *longshore*, tandis que la plage inférieure montrait une certaine variation en *longshore*. Il y avait une légère tendance à l'épaississement vers le nord, causée par des zones localisées plus grossières (et bien triées) associées à la morphologie non uniforme de la barre à marée basse et des courants d'arrachement.

Dans les travaux de Prodger et al. (2016c), un ensemble de données de 6 ans d'échantillons de sédiments mensuels provenant de quatre plages sableuses, énergiques et à marées de type macrotidale (*North Cornwall*, Royaume-Unis), a été utilisé pour quantifier les changements de taille et de tri des grains de surface. La taille et le tri des grains montraient une périodicité, avec des sédiments de surface plus grossiers et mieux triés pendant les mois d'hiver plus tempétueux, et des sédiments plus fins et moins bien triés pendant les mois d'été plus calmes. Un modèle simple est proposé qui fournit des prédictions de la variabilité de la taille des grains de sédiment ( $r^2$  moyen = 0,86,  $p < 0,01$ ) et du tri ( $r^2$  moyen = 0,75,  $p < 0,05$ ) sur les quatre sites étudiés, avec des prédictions du signal saisonnier et des réponses aux tempêtes.

Dans le cadre de cette thèse, notre proposition consiste à approfondir l'étude de la variabilité spatiale et temporelle *in situ* de la granularité, en prenant en compte la profondeur (sur 51 centimètres) sur cinq plages soumises à des régimes de marée micro- à macro-tidales.

#### ***d) Méthode de prélèvement et d'analyse***

Les différentes méthodes de collecte de sédiments peuvent conduire à des résultats différents, ce qui nécessite généralement une compréhension et une correction des données pour les rendre directement comparables (Bujan et al., 2019; Graham et al., 2012). Il existe différentes méthodes pour déterminer la distribution granulométrique (répartition en masse en fonction du diamètre des particules) des sédiments, telles que le tamisage par voie sèche (pour les sédiments non-cohésifs), le tamisage par voie humide (pour les sédiments

cohésifs), l'analyse par granulométrie laser (pour les sédiments de granulométrie inférieure à 1 mm et les sédiments non-cohésifs), l'analyse digitale d'images, la sédimentométrie, ou encore la centrifugation (Morio, 2017). Pour l'étude des échantillons de sable, le tamisage à sec est la méthode la plus couramment utilisée (e.g., McLean and Kirk, 1969; Mwakumanya and Bdo, 2007; Reis and Gama, 2010).

La méthode par tamisage avec des tamis de différentes tailles de mailles peut présenter un biais, car certaines particules longilignes peuvent passer en diagonale à travers les ouvertures des mailles des tamis. Ce biais peut également persister avec la granulométrie laser car le modèle de calcul du spectre granulaire suppose que toutes les particules sont sphériques. De plus, spécifiquement avec les tamis à maille très fine, les sédiments peuvent rester coincés dans les mailles, biaisant ainsi les résultats. Il est donc nécessaire de nettoyer régulièrement les tamis, par exemple en les passant dans un bain à ultrasons, pour éliminer tous les grains résiduels et ainsi éviter une contamination des échantillons suivants.

Dans de nombreux cas, la méthode d'échantillonnage introduit une source initiale d'erreur. En effet, lorsque l'on tente de caractériser une distribution étendue à partir d'un nombre limité d'échantillons, cela crée un 'filtre' de la réalité. L'optimisation de la collecte des données peut être réalisée en augmentant le volume d'échantillons et le nombre de sites de prélèvement. Pour ce faire, une amélioration des techniques d'analyse en laboratoire est nécessaire, en particulier en minimisant le temps d'analyse pour accroître le nombre de prélèvements sur site.

### **2.3. Lien entre la granularité et la pente de la plage**

De nombreuses études se sont intéressées à la relation entre la taille des grains des sédiments (ou granularité) et la pente et la morphologie de la plage (Dean, 1973; Masselink and Short, 1993; McLean and Kirk, 1969; Scott et al., 2011; Vellinga, 1984). La pente de la plage et la granularité des sédiments sont des propriétés fondamentales et interdépendantes qui conditionnent le comportement de la plage (Bascom, 1951; Carter, 2013; Davidson-Arnott and G.D, 2010; Gallagher et al., 2016; McLean and Kirk, 1969).

Les premiers travaux de Bascom, (1951) ont montré que la pente de la plage est principalement contrôlée par deux facteurs : la taille du sédiment et l'intensité de l'action des vagues. En effet, la granularité est un facteur majeur qui définit la pente (Bascom, 1951;

McLean and Kirk, 1969), car les grains plus grossiers sont associés à une infiltration plus élevée et à un transport de sédiments plus faible, conduisant à des pentes plus fortes (Davidson-Arnott and G.D, 2010; Reis and Gama, 2010).

Diverses formules ont été élaborées afin de décrire la pente de la plage en se basant sur une valeur unique de taille médiane des sédiments, représentée par  $D_{50}$  ou  $\Phi_{50}$  (Flemming, 2011; Kim et al., 2014; Reis and Gama, 2010; Soares, 2003; Sunamura, 1984, 1975), la plupart du temps en utilisant des équations linéaires ajustées par des mesures sur les plages de sable. L'ensemble des formules proposées par les auteurs mentionnés précédemment sont illustrées dans la Figure 2.6 ci-dessous. On peut en particulier observer que, si la plupart des formules montrent le même lien entre pente et granularité pour des tailles de grain autour de 0.5 mm, les formules proposées divergent largement pour les sédiments plus fins et plus grossiers.

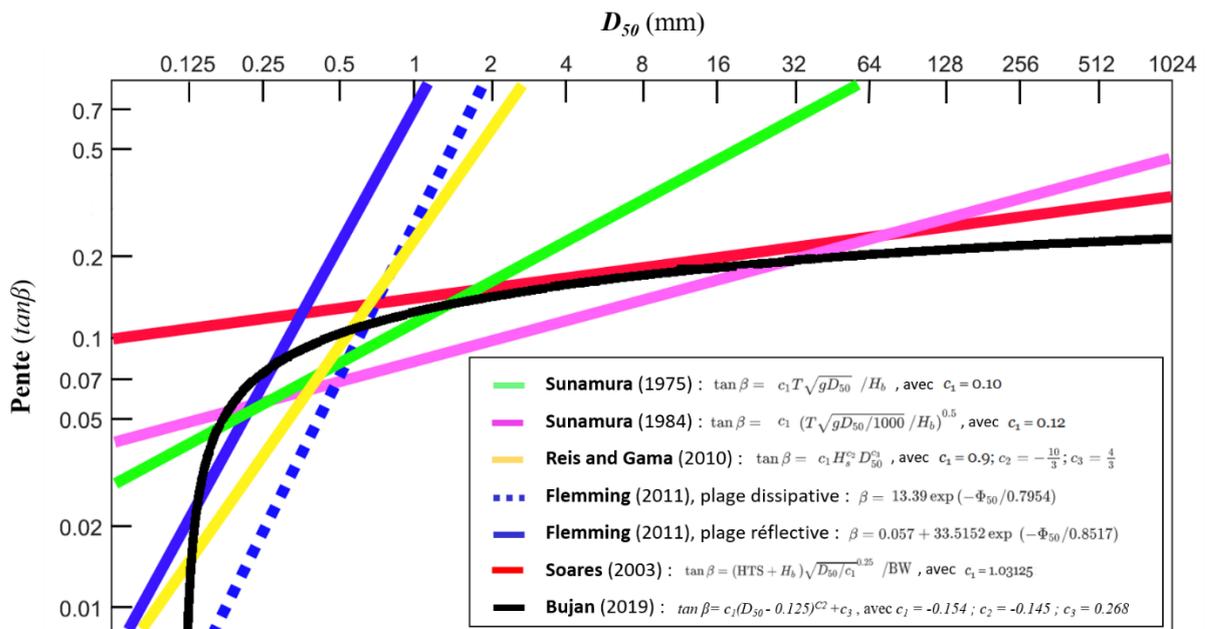


Figure 2.6 Tracé des équations (liste non exhaustive) exprimant la pente de la plage en fonction de la taille des sédiments (Graphique en log-log).  $\beta$  : pente de la plage ;  $\Phi_{50}$  : taille médiane des sédiments exprimée en unité  $\Phi$  ;  $D_{50}$  : taille médiane des sédiments exprimée en mm ;  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  : coefficients empiriques ;  $T$  : période des vagues ;  $L$  : longueur d'onde ;  $H_s$  : hauteur significative des vagues ;  $H_b$  : hauteur des vagues ;  $HTS$  : marnage pour des marées de vives-eaux ;  $g$  : accélération de la pesanteur terrestre ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ;  $BW$  : largeur du profil de plage.

Dans un travail récent, Bujan et al. (2019) ont compilé à partir de la littérature un grand nombre de mesures de granularité (mesures individuelles) et de pente (voir Figure 2.7). Les équations ((1), (2)) diffèrent seulement par l'emplacement de l'intersection à l'origine. Bien

que la distribution des données soit très dispersée, la méta-analyse a montré que la relation entre ces deux paramètres ne suit pas une tendance simple et linéaire (voir courbe noire sur la Figure 2.6.) La distribution des données a été ajustée avec une fonction qui commence par une pente douce associée aux grains de sable fins, qui subit une forte augmentation à mesure que la taille des sédiments augmente jusqu'à la gamme de sable moyen/grossier, puis elle devient plus douce pour les grains très grossiers.

Toutefois, ces deux courbes ne sont pas bien définies dans les zones de gros galets et rochers, où les données sont rares. Il est ambigu si la relation suit la même trajectoire, ou si la pente caractéristique diminue pour les plus grandes tailles de grains. Ce point nécessite des études supplémentaires sur la distribution des tailles de grains plus grossiers. L'approche de l'équation reste donc imparfaite, en raison du bruit dans les données et de la dépendance de la pente à de nombreux facteurs, dont la taille n'est qu'un aspect.

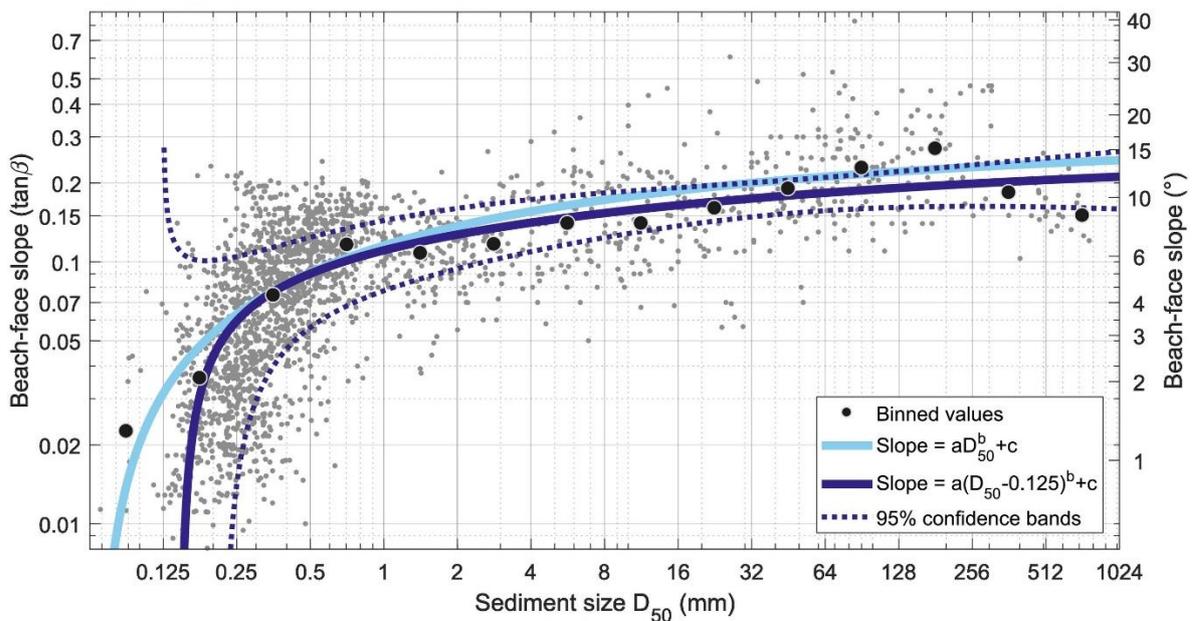


Figure 2.7 Ajustement de l'équation (1), en bleu ( $a = -0,178$  ;  $b = -0,187$  ;  $c = 0,294$ ) et de l'équation (2) en violet ( $a = -0,154$  ;  $b = -0,145$  ;  $c = 0,268$ ) aux données regroupées en intervalles de  $1-\phi$ . Les bandes de confiance de 95% sont indiquées pour l'équation (2). Les points gris illustrent les valeurs utilisées pour l'ajustement des équations. Quant aux points noirs, ils représentent les moyennes des valeurs de  $D_{50}$  pour chaque classe de taille. Extrait de Bujan et al., (2019) et modifié.

L'ensemble de données utilisé dans les travaux de Bujan et al. (2019), illustré Figure 2.7, montre un nuage de points qui englobe une variété complexe d'environnements dynamiques. Ce jeu de données englobe différents profils de plage, sans prendre en compte,

par exemple, l'écart-type, l'état de la plage ou les variabilités de la taille des sédiments en profondeur, transversalement ou longitudinalement. Il ne tient pas compte non plus du fait que les plages étudiées soient en accrétion ou en érosion, ni de la saison ou des variations de la puissance des vagues. Malgré ces simplifications, l'analyse de ces données révèle des tendances globales significatives sur le plan statistique, traversant une diversité de systèmes et de régimes.

Surtout, pour chaque taille de grain, on observe une très large variabilité de pente. Par exemple, pour un  $D_{50}$  de 0.5 mm, la pente peut varier d'un site à l'autre de 0.01 à 0.2, soit un ordre de grandeur. Plusieurs paramètres peuvent expliquer cet étalement. Par exemple, nous avons vu plus haut que le marnage et les conditions de vagues peuvent affecter la pente de plage. Cette variabilité peut être aussi expliquée par l'estimation du  $D_{50}$  qui, par exemple, ne peut pas rendre compte de la complexité de la distribution spatiale et temporelle de la granularité, ou encore d'une distribution bimodale du sédiment.

---

# Chapitre 3. Modèle d'équilibre

---

## 3.1. Préambule

La pente de la plage est un paramètre crucial à considérer pour de nombreuses études liées au littoral, telles que la sécurité des baigneurs (Castelle et al., 2019), le type de déferlement des vagues (Battjes et al., 2004; Galvin Jr., 1968; Iribarren Cavanilles and Casto Nogales, 1949) ou encore l'estimation de la dérive littorale (Kamphuis, 1991). Cependant, elle est souvent considérée comme constante dans le temps et l'espace. Pourtant, la pente de la plage peut varier à court terme en fonction des phénomènes tels que les marées, les changements de régime de vagues de l'échelle de la tempête, jusqu'aux variabilités saisonnières et interannuelles. Afin de comprendre, modéliser et anticiper cette variabilité, il est essentiel d'acquérir des données topographiques sur le long terme (sur plusieurs années) et avec une fréquence suffisante (mensuelle ou hebdomadaire). Il faut ensuite un cadre théorique et/ou conceptuel permettant de développer et appliquer un modèle numérique et le valider avec les données d'observations. Il y a au niveau international très peu de sites de plages sableuses suivies intensivement et faisant l'objet d'un programme d'observation inscrit sur le long terme (Bertin et al., 2022; Dodet et al., 2019b; Ludka et al., 2019; Turner et al., 2016). Parmi ces sites, la plage du Truc Vert, labellisée par le Service National d'Observation (SNO) Dynalit (CNRS-INSU), fait l'objet de suivis réguliers bancarisés depuis le début des années 2000 (Castelle et al., 2020)

Dans ce chapitre, nous étudions la réponse de la pente de la plage méso-macrotidale du Truc Vert, face aux changements du régime des vagues. Cette plage naturelle, peu altérée par l'activité humaine, a fait l'objet de nombreuses études scientifiques (Castelle et al., 2020; Laporte-Fauret et al., 2021; Robin et al., 2020; Sénéchal et al., 2011). À l'aide des relevés topographiques bimensuels réalisés (Castelle et al., 2020), un modèle d'équilibre a été appliqué sur une période de neuf ans, pour explorer la capacité du modèle à reproduire les pentes de plage calculées dans différentes sections du profil de plage.

Ce chapitre tente de répondre aux Questions 1 et 2 mentionnées dans la section 1.2, à savoir :

« **Question 1** : *La pente de la plage du Truc Vert répond-elle à un équilibre dynamique ? Est-ce que l'adaptation d'un modèle d'équilibre peut expliquer/reproduire cette dynamique ? Quelles sont les limitations de cette approche de modélisation ?* »

« **Question 2** : *Quand est-ce que, à l'échelle saisonnière, les pentes de plages présentent leurs minimum et maximum, et cela permet-il de déterminer les périodes optimales pour les suivis biannuels pente/granularité ?* »

Ce travail a été publié dans la revue internationale de rang A : *Journal of Marine and Science Engineering* (Labarthe et al., 2023). La suite de ce chapitre est entièrement constituée de cet article rédigé en anglais.

## **3.2. Introduction**

Sandy beaches occupy approximately one-third of the global ice-free coastline (Luijendijk et al., 2018) and provide precious natural, structural and socio-economical resources to coastal communities (Nunes and Ghermandi, 2013; Poumadère et al., 2015). Sandy beaches are, however, threatened by climate-change-driven sea-level rise (Cooper et al., 2020; Vousdoukas et al., 2020), combined with other factors such as the natural shortage of sediment supply and human activities interfering with natural processes (Luijendijk et al., 2018). Monitoring, understanding, modeling and predicting sandy beach evolution is therefore of great importance.

Amongst other beach morphology parameters, beach slope is critical from many perspectives. For instance, beach slope largely impacts wave breaking type and intensity, from spilling to surging, through plunging (Battjes, 2015; Galvin Jr., 1968; Iribarren Cavanilles and Casto Nogales, 1949). Beach slope is thus important for, e.g., beach safety and lifeguarding as plunging and dumping waves at the shoreline (shorebreak waves) at steep beaches can cause severe spine injuries to those caught in the impact zone (Castelle et al., 2019; Puleo et al., 2016; Robles, 2006). Beach slope controls the reflection at the coast of gravity and infragravity waves (Battjes et al., 2004), and is also a critical parameter in many empirical and semi-empirical formulas used to estimate, e.g., wave runup (Stockdon et al.,

2006) and *longshore* drift (Kamphuis, 1991). In such formulae, beach slope is typically assumed as a single time-invariant parameter. However, beach slope is not homogenous along the beach profile and constantly evolves in response to the storm, seasonal and interannual variations in incident wave conditions. Such beach slope time and space variability is still poorly understood.

The work of Wright and Short (Wright and Short, 1984), based on earlier seminal studies (e.g., Castelle and Masselink, 2023; Short, 1979; Wright et al., 1979), classified different beach types into a comprehensive single-bar beach state model. This classification goes from a reflective (steep) beach state to a dissipative (gently sloping) beach state, all the way through a range of intermediate, barred, beach states. Although this classification has been mostly used as a “static” classification for modal wave conditions (Dionne, 1978), a fundamental aspect was the development of a framework addressing dynamic beach state behavior (Castelle and Masselink, 2023). In brief, the transitions between the different beach types were found to be driven by a disequilibrium between the surf-zone hydrodynamics and the beach (Prodger et al., 2016b), thus indicating a dynamic equilibrium behavior of beach states and, presumably, beach slope.

Equilibrium-based models have been developed over the last few decades to explain the time evolution of different beach parameters. Such a computationally cheap modeling approach has been primarily used to simulate and explain shoreline change from the time scales of storms to years and decades (Castelle et al., 2014; Lemos et al., 2018; Splinter et al., 2014; Yates et al., 2009) (see review of Hunt et al., 2023). Although such models perform substantially better using time-varying free parameters (Ibaceta et al., 2022; Splinter et al., 2017), good results were obtained both for shoreline hindcasting (Castelle et al., 2014; D’Anna et al., 2022; Maurizio D’Anna et al., 2021) and forecasting (Montaño et al., 2020) using time-invariant parameters. Such models have also been applied to different shoreline proxies at meso- to macro-tidal beaches showing a large variability in model skill and free parameter values along the beach profile (Castelle et al., 2014; Lemos et al., 2018). It is noteworthy that equilibrium models also showed a good ability to reproduce the time variability of *cross-shore* sandbar behavior (Plant et al., 1999), embayed beach rotation (Turki et al., 2013), or grain size (Larson, 1991; Prodger et al., 2016c). However, to our knowledge equilibrium models have never been tested on beach slopes.

In this paper, we investigate the beach slope equilibrium response at the high-energy meso-macrotidal beach of Truc Vert, southwest France. Using 9 years of bimonthly topographic surveys, we apply a state-of-the-art equilibrium model to explore model skill for beach slopes computed across different sections of the beach profile, from mid-tide up to the surbaerial beach. We show that two distinct sections of the profile show a clear out-of-phase equilibrium response, thus opening new perspectives to model and predict beach slope on sandy beaches.

### 3.3. Study Site and Data

#### 3.3.1. Truc Vert Beach

Truc Vert is an open sandy beach located on the Gironde coast, southwest France (Figure 3.1a). It is a remote beach located kilometers away from the first carpark, which has never been nourished or affected by hard structures and tourism. Such settings motivated the deployment of a number of intensive field experiments (Sénéchal et al., 2011) as well as the development of a monitoring program which started in 2003 (Castelle et al., 2020).

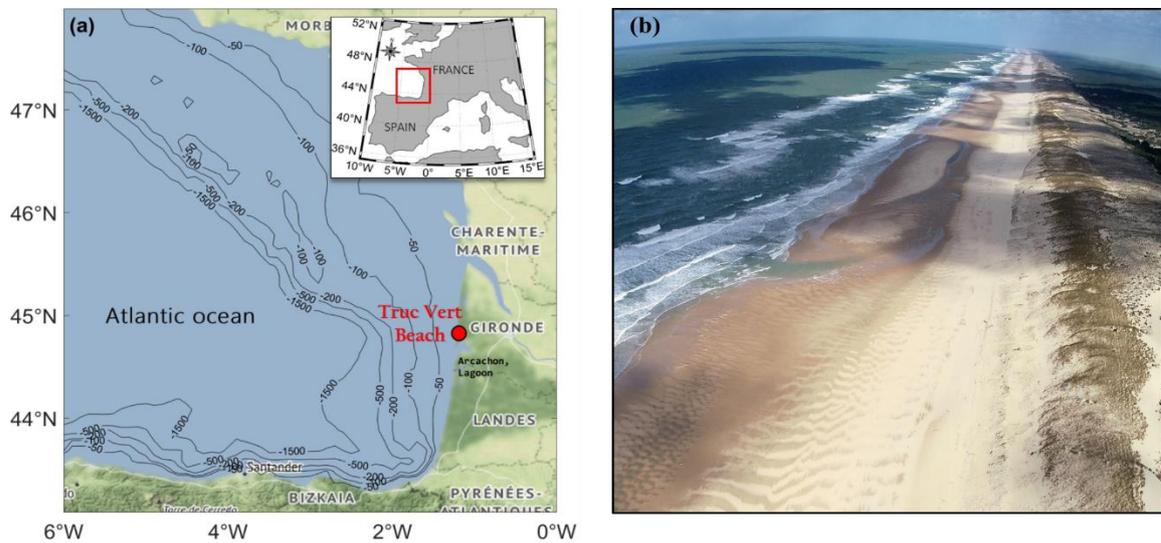


Figure 3.1 (a) Location map of Truc Vert beach in southwest France. (b) UAV photograph of TrucVert (Ph. V. Marieu).

Truc Vert beach is mostly intermediate double-barred and backed by a well-developed aeolian dune (~20–25 m high and ~250 m large) separating the beach from a large area of state-owned forest (Figure 3.1b). The tidal range is meso-macrotidal, with a ~3.7 m annual mean spring tidal range and a maximum astronomical tide range reaching up to 5 m (Castelle

et al., 2018b). Incident waves are generated by extra-tropical storms tracking eastwards across the North Atlantic Ocean. The wave climate is energetic and strongly seasonally modulated with a monthly averaged significant wave height  $H_s$  ranging from 1.1 m in July with a dominant W–NW direction to 2.4 m in January with a dominant W direction (Castelle et al., 2017). Incident winter wave energy shows large interannual variability enforced by regional, large-scale, climate modes of atmospheric variability (Castelle et al., 2018b). Truc Vert can be exposed to severe windstorms, with 10 m hourly wind speed exceeding 30 m/s, causing large coastal dune morphological changes (Laporte-Fauret et al., 2021). The sediment consists of well-mixed fine to medium sand with a mean grain size of approximately 0.35–0.40 mm (Gallagher et al., 2011). Over the last few decades, the shoreline position at Truc Vert has been relatively stable (Castelle et al., 2018b).

### 3.3.2. Beach Slope Data

This study is based on the Truc Vert beach GNSS topographic monitoring program that was implemented in 2003 (Castelle et al., 2020). The beach survey's *alongshore* coverage prior to 2012 was shorter than 1000 m, thus not offering optimal coverage given the strongly *alongshore* non-uniform beach morphology enforced by ~400 m spaced rip channel systems. Therefore, here, we used the data collected between 2012 and 2021 (1500–2000 m *alongshore* coverage), with a notable 2-month gap in 2020 due to the COVID-19 pandemic. Beach surveys typically extend from approximately a -1.5 m (low tide mark) to 6 m (dune foot) elevation above mean sea level (AMSL). Each topographic survey is interpolated on a regular grid in local *cross-shore/longshore* coordinates. The reader is referred to (Castelle et al., 2020) for details on the topographic surveys and interpolation techniques.

The monitoring program from October 2010 to June 2021 resulted in 181 digital elevation models (DEM) computed in local *cross-shore/longshore* coordinates. Figure 3.2 shows an example of a topographic survey (Figure 3.2b) and its corresponding superimposed 20 m spaced interpolated *cross-shore* profiles (Figure 3.2a), highlighting a large *alongshore* variability. Beach slopes were computed on 1 m elevation sections every 0.1 m (i.e., [-1.0;0.0], [-0.9;0.1], ..., [5.0;6.0]) of each 20 m *alongshore* spaced interpolated beach profile. This segmentation was based on preliminary tests showing it best emphasizes the vertical variability of beach slope response. For each date and each 1 m elevation section, beach slopes computed at each 20 m spaced *cross-shore* transect were then averaged *alongshore*

in order to investigate the equilibrium response of beach slope for different parts of the beach profile.

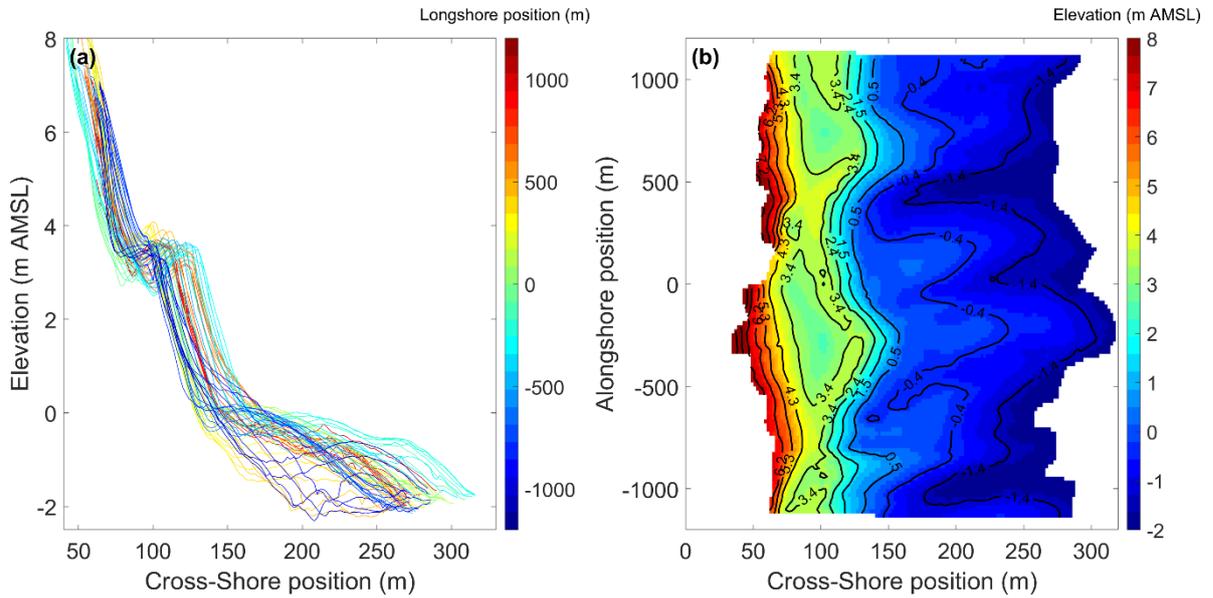


Figure 3.2 Truc Vert beach DEM on 11 September 2018: (a) superimposed 20 m spaced beach profiles and (b) planview DEM.

### 3.3.3. Wave Data

This study used approximately 13.5 years of continuous wave outputs gathered from a calibrated wave hindcast from January 2008 to June 2021 (D’Anna et al., 2022; Maurizio D’Anna et al., 2021). We used the time series of significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and mean direction ( $D_m$ ) at an approximately 54 m depth offshore of Truc Vert beach (D’Anna et al., 2022; Maurizio D’Anna et al., 2021). These data were then used to force the equilibrium model with a 3-hour time step.

## 3.4. Equilibrium Profile Model

### 3.4.1. Equilibrium Model

The local beach slope time series was hindcast using the equilibrium model approach of (Davidson et al., 2013), which so far has been mostly used to simulate shoreline change on *cross-shore-transport-dominated* beaches. The time change of local beach slope,  $S$ , is given as a function of the time-varying, wave power  $P$  and energy disequilibrium  $\Delta\Omega$ :

$$\frac{dS}{dt} = C^{\pm} P^{0.5} \Delta\Omega, \quad (1)$$

where  $C^{\pm}$  is the change rate coefficient for erosion velocity ( $C^{-}$ ) and accretion velocity ( $C^{+}$ ), which represent efficiency rates determining the rate of beach slope change in response to the wave force.  $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_{eq}$  is the energy disequilibrium, with  $\Omega$  being the Dean number given by:

$$\Omega = \frac{H_s}{w_s T_p}, \quad (2)$$

where  $w_s$  is the sediment fall velocity calculated using Soulsby's (1997) formula. The equilibrium energy,  $\Omega_{eq}$ , is computed through:

$$\Omega_{eq}(t) = \frac{\sum_{j=0}^{2\Phi/\Delta t} \Omega_j 10^{-j\Delta t/\Phi}}{\sum_{j=0}^{2\Phi/\Delta t} 10^{-j\Delta t/\Phi}}, \quad (3)$$

with  $\Delta t$  being the sampling interval and  $\Phi$  being the memory decay of the system, in days. This implies that  $\Omega_{eq}$  incorporates all past beach state information for the past  $2\Phi$  days and constantly evolves in time and maintains a weighted “memory” of antecedent incident wave conditions.

The wave power in Equation (1) is given by:

$$P = EC_g, \quad (4)$$

where  $E$  is the wave energy given by:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2, \quad (5)$$

with  $\rho$  being the water density,  $g$  the gravitational acceleration and  $C_g$  the wave group velocity computed using the wave linear theory:

$$C_g = \frac{\omega}{k} \left[ \frac{1}{2} + \frac{kh^2}{\sinh(2kh)} \right], \quad (6)$$

where  $\omega$  is the angular frequency of waves,  $k$  is their wavenumber and  $h$  the water depth.

### 3.4.2. Model Parameter Optimization

The model has four free parameters,  $S_0$  the initial slope,  $\Phi$ ,  $C^-$  and  $C^+$ , that were found by minimizing the root mean square error between the computed and measured beach slopes. The error minimum was found using a simulated annealing non-linear optimization algorithm (Bertsimas and Tsitsiklis, 1993). Such a probabilistic approach can overcome local RMSE minima in this 4-parameter space and find a global optimum. Simulating annealing optimization already gave good results with beach equilibrium models (Castelle et al., 2014; Lemos et al., 2018). Table 3.1 shows the search intervals used to initialize the optimization algorithm, for each free parameter. The model was initialized with broad intervals (including positive and negative erosion and accretion rates) in order to be able to find the optimal values corresponding to all the sections of the beach profile, which readily show a large range of behaviors. The simulated annealing was performed over 3,000,000 iterations.

Table 3.1 Initialization of the 4 free model parameters.

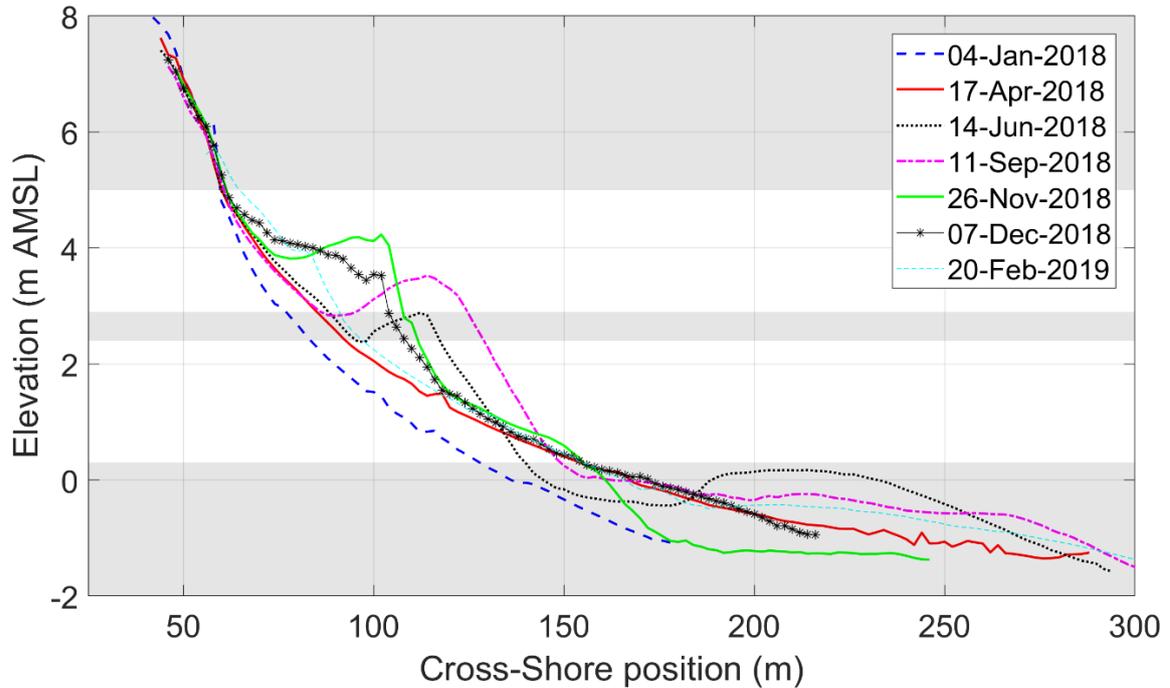
$S_0$	$\Phi$ (days)	$C^-$ ( $s^{-1} \cdot W^{-0.5}$ )	$C^+$ ( $s^{-1} \cdot W^{-0.5}$ )
[-0.5; 0.5]	[1; 850]	[-0.000008; 0.0000081]	[-0.000025; 0.000024]

## 3.5. Results

### 3.5.1. Beach Profile Change in Time and Space

Figure 3.3 illustrates the seasonal beach profile shape change at a given transect over a given year. Starting from an eroded, featureless, concave shape profile in the middle of the winter (January 2018), results show the progressive building of berm throughout spring, summer and early autumn before the berm is smoothed out during the subsequent winter. The berm formed at a *cross-shore* distance around 100 m, and rose by over two meters before

culminating at 4+ m AMSL in early autumn, making this section of the profile the most dynamic. The higher part of the profile (>5 m AMSL) is steep and barely evolves. In contrast, the lower part of the profile is systematically gently sloping owing to the overall concave shape of the beach profile. There is also the occasional presence of the inner bar (June 2018, Figure 3.3).



*Figure 3.3 Superimposed beach profiles at a given transect covering over an entire year illustrating typical seasonal morphological changes at Truc Vert beach.*

Figure 3.4 provides more insight into the beach profile variability from the time scales of weeks, to interannual, through seasonal. A clear seasonal signal can be depicted, particularly in the berm area described in Figure 3.3. Figure 3.4 also reveals a strong interannual variability, which is marked by the winter of 2013/14 which caused outstanding erosion.

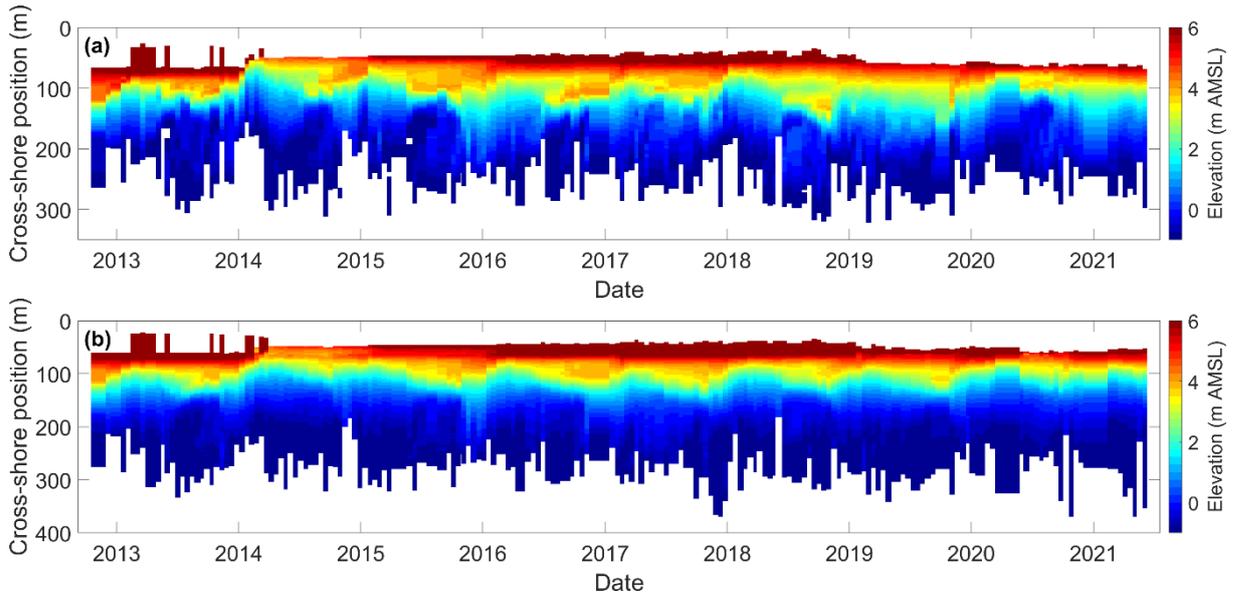


Figure 3.4 Cross-shore profile evolution (elevation colored) from 17 October 2012 to 10 June 2021. (a) Single profile located in the center of the domain and (b) alongshore-averaged profile.

This is particularly striking for the upper part of the beach profile as the dune toe was severely scaped during this winter and has been mostly, slowly, recovering since then. Non-surprisingly, the time series of the along-shore-averaged profiles (Figure 3.4b) shows a smoother variability than that of the single profile (Figure 3.4a). These morphological changes are essentially driven by temporal changes in incident wave conditions, which are used to drive the equilibrium model below.

### 3.5.2. Equilibrium Beach Slope Response

Figure 3.5 shows the equilibrium model skill to simulate beach slope response (Figure 3.5a,b) and the corresponding model free parameters (Figure 3.5c-e) as the function of the beach elevation where the slope is computed. There is large variability in the ability of the model to hindcast beach slope response depending on elevation. However, two distinct areas where  $R^2$  is  $> 0.2$  can be depicted (white areas in Figure 3.5), i.e., where the model explained more than 20% of the observed beach slope variability. For the area in the lower part of the profile,  $R^2$  mostly ranges between 0.3 and 0.4, with  $\Phi < 150$  days and negative erosion and accretion rate coefficients. This means that the beach slope in this region of the profile shows fair equilibrium response characteristics, with slope changes at the scale of individual storms and with the slope steepening (flattening) during low- (high-) energy waves. This contrasts with the other area, located in the higher part of the profile (Figure 3.5). Overall, the

equilibrium model shows better skill than in the lower area, with  $R^2$  even locally exceeding 0.65. Beach slope also shows a slightly larger response rate, with positive values, meaning that the slope steepens (flattens) during high- (low-)energy waves, i.e., out-of-phase with the lower part. Interestingly enough, within this higher area, beach memory  $\Phi$  rapidly increases up-wards, eventually reaching the upper value of  $\Phi = 850$  days. This means that beach slope variability tends to predominate at seasonal scale when going upwards, rather than at the storm scale.

This is further illustrated in Figure 3.6 which shows the time series of observed and modeled beach slopes at five different vertical locations along the profile. In line with the greyish areas in Figure 3.5 where  $R^2 < 0.2$ , the model fails to simulate beach slope variability at these locations (Figure 3.6b,d,f). In contrast, the model shows fair skill at the lower part of the profile (Figure 3.6e), and behaves even better in the higher part of the profile (Figure 3.6c). In line with accretion/erosion rate coefficients of the opposite sign in Figure 3.5, the areas clearly show out-of-phase beach slope signals, with beach slope in the higher part being approximately twice as large as in the lower part.

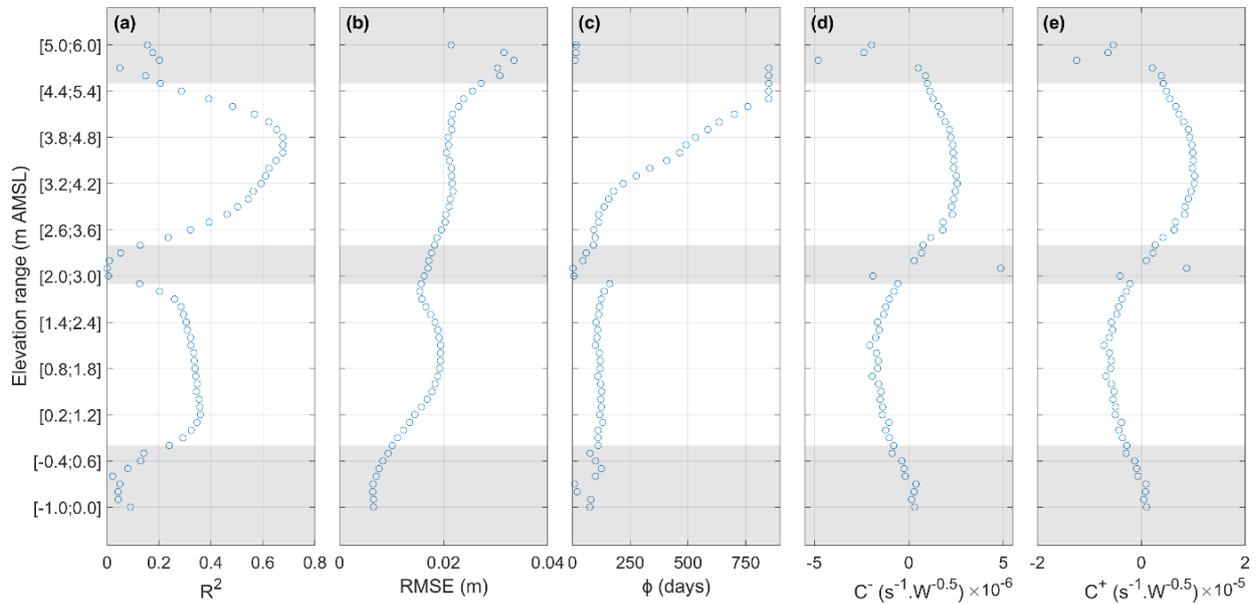


Figure 3.5 (a)  $R^2$  and (b) RMSE between the observed and modelled beach slope and corresponding (c)  $\Phi$  memory, (d)  $C^-$  erosion rate coefficient and (e)  $C^+$  accretion rate coefficient free parameters, found as a function of the elevation where the beach slope is computed. The shaded areas are where  $R^2 < 0.2$  which we considered as elevations where beach slope does not show an equilibrium response.

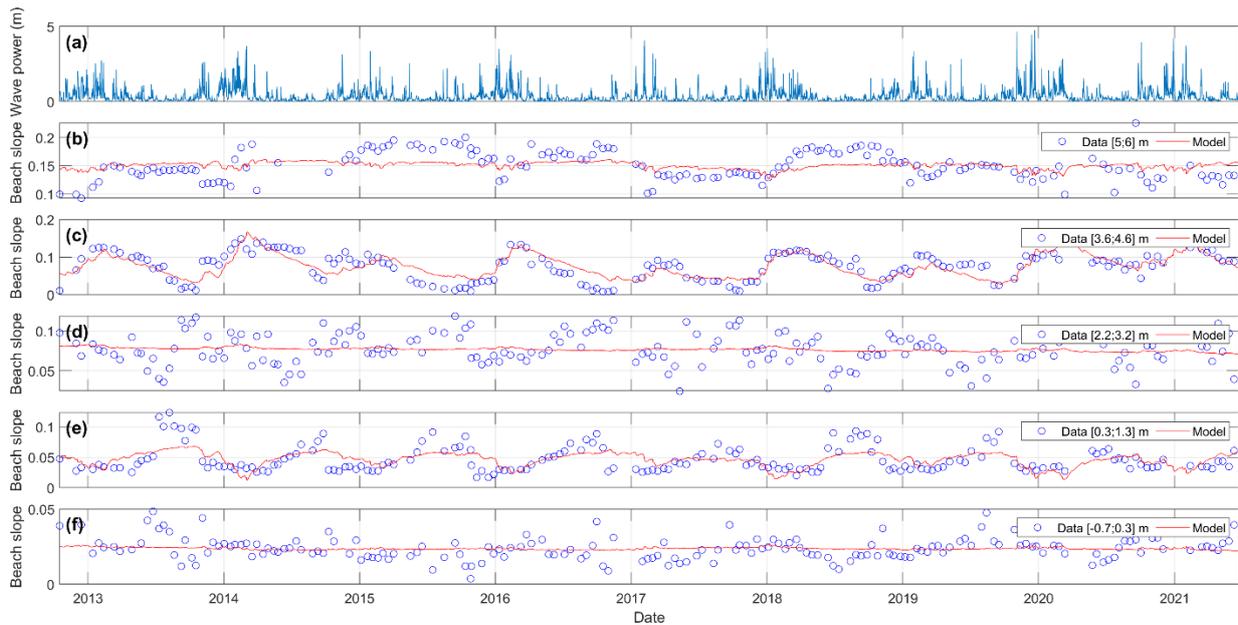


Figure 3.6 Time series of (a) wave power and (b–f) observed (circles) and modeled (solid line) beach slope between (b) 5 - 6 m; (c) 3.6 - 4.6 m; (d) 2.2 - 3.2 m (e) 0.3 - 1.3 m and (f) -0.7 - 0.3 m.

### 3.6. Discussion

Consistent with other sandy beach morphological indicators, such as shoreline, *cross-shore* sandbar position or grain size (Larson, 1991; Plant et al., 1999; Turki et al., 2013), beach slope also shows a clear equilibrium response to changes in incident wave conditions. On the meso-macrotidal beach of Truc Vert, southwest France, such a response strongly depends on the beach elevation around which slope is computed, consistent with earlier work using different shoreline proxies (Castelle et al., 2014; Lemos et al., 2017). The best equilibrium response is found in the higher part of the profile, around 4 m AMSL, that is, well above the highest astronomical tide level ( $\sim 2.5$  m AMSL). This may be seen as a surprising result, which will be discussed later, as this region of the beach profile is only rarely activated by surf zone processes and could be assumed to be decoupled from wave force. At this elevation, the equilibrium model explains over 65% of the observed beach slope variability. This is similar to the shoreline variance explained by the equilibrium model for the optimal shoreline proxy at Truc Vert of around 1.5 m AMSL. Our results therefore demonstrate that equilibrium models can be successful at simulating beach slope variability from the time scales of days to years, with similar skill as for shoreline hindcasting.

In contrast with the shoreline equilibrium response at Truc Vert beach, with a single area of consistent equilibrium shoreline response ranging approximately from 0 to 4 m AMSL, beach slope response shows two distinct opposing areas ranging approximately from 0 to 2.5mAMSL and 3 to 4.5mAMSL (Figure 3.5). The lower part of the profile responds at the storm scale, with the slope decreasing with larger waves. This is in line with existing beach state models (Grasso et al., 2009; Jackson et al., 2005) with more dissipative, gently sloping, beach profiles under storm conditions. In contrast, the higher part of the profile steepens with larger waves and increasingly responds by moving upwards at the seasonal time scale (increased memory  $\Phi$ ). Such opposing behavior can be explained by the berm dynamics. The area below 2 m AMSL is systematically under the crest of the berm and reflects the beach slope response to incident wave conditions during the daily high stage of the tide. The area ranging from 3 to 4.5 m AMSL, located higher along the profile, is systematically steeper during winter (Figure 3.3). This is because during winter storm wave events, surf zone and swash zone processes smooth out the berm, resulting in a featureless concave winter profile (Figure 3.3). However, during berm development from spring to early autumn, thus with a seasonal signature, this sector is located in the lee of the berm crest built up through swash processes, resulting in a progressively decreasing beach slope as seasonal mean wave conditions become less energetic. This explains why the best equilibrium response is found in the higher part of the profile, well above the highest astronomical tide level of around 4 m AMSL. Between these two areas forming a transition between two contrasting behaviors, beach profile does not show an equilibrium response. Similar observations can be made at the higher ( $>4.5$  m AMSL) and lower ( $<0$  m) parts of the profile, where a poor correlation is systemically found, for different reasons. Above 4.5 m AMSL, the beach slope is steep ( $>0.1$ ) and evolves without any apparent link with incident wave conditions (Figure 3.6b). In contrast, below 0 m AMSL, the beach slope is low ( $<0.05$ ) and also shows variations which are not always readily related to changes in incident wave energy. This is consistent with shoreline response at this elevation (Castelle et al., 2014), because this part of the profile is strongly influenced by the inner-bar dynamics. Given that the *cross-shore* inner-bar dynamics at Truc Vert beach are influenced largely by tide-range variations (Almar et al., 2009), this is not captured by the equilibrium model. Such findings suggest that an alternative approach could be to develop an equilibrium berm response model rather than a multiple, elevation-dependent, equilibrium beach slope model, such as that developed here.

In our contribution, we only applied an equilibrium model based on that developed for the shoreline by (Davidson et al., 2013). However, different equilibrium response frameworks exist (Castelle et al., 2014; D’Anna et al., 2022; Dean, 1991; Jaramillo et al., 2020; Yates et al., 2009). The model of (Yates et al., 2009) was also tested here, showing similar skill. However, the interpretation of the model free parameters is more complex (Vitousek et al., 2021), and outputs were thus not shown herein. We used time-invariant free parameters, but we hypothesize that investigating time-varying parameters, such as in (Ibaceta et al., 2022), may further improve model skill. Another avenue for model improvement is to account for tide range, as berm development was found to depend on spring-neap tide cycles at the microtidal beach of Narrabeen, Australia, using high-frequency Lidar data (Splinter et al., 2018). We assumed a sediment grain size constant in both time and space. However, large variations (0.2–0.7 mm) in grain size over tens of meters linked with morphological variability have been observed at Truc Vert (Gallagher et al., 2011). In addition, grain size has been found elsewhere to largely vary in time in response to changes in wave conditions (Prodger et al., 2016c). Including changes in grain size could improve beach slope model skill, but there is currently no framework for this. Finally, given the wealth of long-term beach monitoring programs (Bertin et al., 2022; Dodet et al., 2019b; Ludka et al., 2019; Turner et al., 2016), applying such a model to different sites to search for a parametrized version of the free parameters, similar to what (Splinter et al., 2014) did for shoreline, would help to better understand the influence of the general settings (e.g., sediment size, wave climate, tide regime) on beach slope response.

### **3.7. Conclusions**

Beach slope is usually considered as a time-invariant and profile-average parameter. By applying a simple equilibrium model to a 9-year time series of bimonthly beach surveys of a high-energy meso-macrotidal beach, we found that beach slope can locally exhibit a strong equilibrium response. A state-of-the-art equilibrium model and a global optimization simulating annealing algorithm were combined to reveal two distinct areas with contrasting behaviors. First, at 0–2 m AMSL, below the berm crest, equilibrium slope response was found at the storm timescales, with slope steepening under low energy waves. At 2.5–4 m AMSL, above the berm crest, an opposite behavior was observed, with the equilibrium response time scale moving increasingly, seasonally, upwards. This study provides new

perspectives to better understand, model and predict beach slope and sandy beaches. It also motivates the further development of beach monitoring programs.

### **3.8. Implications**

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé neuf années de relevés topographiques bimensuels, allant de 2012 à 2021, afin de calculer les pentes de la plage du Truc Vert à différents niveaux d'élévation le long du profil *cross-shore* (i.e., le profil transversal). Un modèle d'équilibre a été appliqué à ces différentes séries temporelles de pentes calculées par sections en utilisant 13,5 années de données de vague issues d'un modèle de prévision. L'objectif était d'évaluer la capacité du modèle à expliquer l'évolution des pentes de plage calculées pour différentes sections du profil afin de répondre aux questions scientifiques précitées. Au-delà des avancées scientifiques listée ci-dessous, cette étude motive le développement de programmes de surveillance des plages afin d'élaborer des bases de données de pente de plage pour vérifier la généralité de nos résultats.

***Question 1 :** La pente de la plage du Truc Vert répond-elle à un équilibre dynamique ? Est-ce que l'adaptation d'un modèle d'équilibre peut expliquer/reproduire cette dynamique ? Quelles sont les limitations de cette approche de modélisation ?*

***Réponse 1 :***

Les résultats de l'application du modèle montrent que la plage du Truc Vert répond à un équilibre dynamique avec des comportements contrastés pour deux zones distinctes du profil de la plage. Tout d'abord, entre 0 à 2 m au-dessus du niveau moyen de la mer, nous observons une réponse d'équilibre de la pente de la plage, à l'échelle de la tempête. Dans cette zone, la pente se raidit sous des vagues de faible énergie, tandis que la pente diminue pendant les tempêtes, et le modèle d'équilibre explique jusqu'à 40 % de la variabilité observée de la pente de plage. Le modèle montre également que cette zone de plage répond plutôt à l'échelle de la tempête ( $\Phi < 150$  jours) et présente donc une réponse d'équilibre en accord avec le modèle conceptuel de Wright et Short (1984) sur les changements d'état de plage et de morphologie associées (réflectif-intermédiaire-dissipatif). En effet, cette zone soumise à l'action des vagues et du jet de rive entre la mi-marée et la marée haute, devient plus dissipative (moins pentue) pendant les tempêtes, plus réflective (plus pentue) pendant les épisodes de temps calme. En revanche, pour la zone comprise entre 2,5 à 4 m au-dessus

du niveau moyen de la mer, les vagues de tempête entraînent une augmentation de la pente de plage. Dans cette partie du profil, nous observons une réponse à l'équilibre, à l'échelle saisonnière et le modèle explique jusqu'à 65 % de la variabilité observée de l'inclinaison de la pente de plage. Cette réponse inversée s'explique par le fait que ce secteur se situe derrière la crête de la berme. La réponse à l'échelle saisonnière s'explique elle par le fait que la berme est progressivement érodée pendant l'hiver par la succession des tempêtes, et ne se reconstruit alors que lentement au cours du printemps et de l'été.

Bien que le modèle affiche des résultats satisfaisants, il sera nécessaire d'améliorer certaines limitations des modèles utilisés dans les études futures. Notamment grâce à l'intégration des propriétés hétérogènes des sédiments qui pourrait améliorer la compétence du modèle à expliquer l'équilibre dynamique de la pente des plages. Pour cette étude, le modèle a été exécuté pour les mêmes propriétés sédimentaires pour tous les profils, à savoir une seule granularité de 0.40 mm supposée constante à la fois dans le temps et l'espace. Cependant, de grandes variations de la granularité (de 0,2 à 0,7 mm) ont été observées sur des dizaines de mètres en lien avec la variabilité morphologique au Truc Vert (Desmazes, 2005).

Actuellement, il n'existe aucun cadre pour prendre en compte la variabilité granulométrique dans les approches de modélisation à l'équilibre. Pourtant, de nombreuses publications mentionnent l'importance de considérer le comportement hétérogène des sédiments dans la zone de surf pour améliorer l'analyse de la morphologie côtière (Bascom, 1951; Gallagher et al., 2011; Gunaratna et al., 2019; Holland and Elmore, 2008; Inman and Chamberlain, 1955; Moutzouris, 2015; Pedreros et al., 1996). Les travaux menés dans ce chapitre se limitent également à une seule plage, à savoir la plage du Truc Vert. Les travaux *in situ* menés dans le cadre de cette thèse (Chapitres 4 et 5) ont justement pour objectif d'améliorer notre compréhension des relations dans le temps et l'espace entre la granulométrie et la morphologie de plusieurs plages situées en France métropolitaine.

« **Question 2 :** *Quand, à l'échelle saisonnière, les pentes des plages présentent-elles leur minimum et maximum, et cela permet-il de déterminer les périodes optimales pour les suivis biannuels de pente/granularité ?* »

**Réponse 2 :**

Les résultats issus de l'observation et de la modélisation montrent que les extrêmes de pente sont observés en sortie d'hiver (mars/avril) et sortie d'été (septembre/octobre). Cette observation permet de justifier le choix des périodes durant lesquelles sont planifiées les campagnes de mesure *in situ* pour la plage du Truc Vert. En effet, les premiers levés ont été réalisés en fin d'été (vers les mois de septembre/octobre), lorsque la pente de la plage est la plus forte et les deuxièmes levés en fin d'hiver (vers les mois de mars/avril) lorsque la pente est la plus faible.

Ce chapitre s'est appuyé sur des levés réalisés sur la plage du Truc Vert, et la généralisation aux autres sites suivis dans les chapitres suivants doit être discutée. La plage du Truc Vert est soumise à un régime de houle provenant de l'Atlantique Nord, ce qui en fait, en termes de saisonnalité, une plage représentative des autres plages choisies pour cette étude (Anglet, Saint-Trojan-les-Bains). Les deux périodes extrêmes identifiées en septembre et en mars au Truc Vert ont été utilisées pour déterminer les périodes optimales pour les suivis biannuels de pente/granularité, ce qui peut s'appliquer à l'ensemble des plages étudiées sur la façade ouest. Cette généralisation est aussi confortée par des études précédentes sur la réponse des plages de la façade atlantique européenne qui montre des réponses en phase (Dodet et al., 2019b; Masselink et al., 2016). La généralisation à la plage de Saint-Aygulf, située en Méditerranée, est plus incertaine. En effet, et même si aucun suivi morphologique long terme permet de le vérifier, ce secteur du littoral méditerranéen est souvent exposé à des coups de vent de sud, associés à des vagues énergétiques, dès septembre. A cause de ce manque de données et aussi pour des raisons logistiques, les mesures *in situ* à Saint-Aygulf ont toutefois été réalisées pendant les mêmes périodes que sur les quatre autres plages.

---

# Chapitre 4. Mesures *in situ*

---

## 4.1. Introduction

La plupart des travaux de modélisation morphodynamique des côtes sableuses reposent sur l'hypothèse d'un sédiment uniforme pour toute la zone d'étude (voir Chapitre 3). La granularité est représentée par le diamètre médian ( $D_{50}$ ) sur tout le domaine d'étude. Les échantillons servant à calculer le  $D_{50}$  sont généralement prélevés en surface, alors que de fortes hétérogénéités spatiales et temporelles du sédiment existent en surface et en profondeur (Garlan et al., 2020).

Afin d'améliorer la modélisation et la prévision de l'évolution de la pente des plages et de leur morphologie, une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité des sédiments des plages est nécessaire aussi bien dans le temps que dans l'espace. Pour cela nous avons mis en place un protocole expérimental *in situ* sur cinq plages situées en France métropolitaine, sur une période de trois ans.

Les sites d'études sélectionnés sont répartis en deux catégories : les plages principales au nombre de quatre choisies dès le début de la thèse et une plage secondaire rajoutée dès la deuxième campagne de mesure *in situ* pour avoir une meilleure représentativité de la diversité des plages en France métropolitaine. Les plages principales sont : Le Truc Vert, Anglet, Saint-Malo et Saint-Aygulf. La plage dite secondaire est la plage de Saint-Trojan-les-Bains. Le suivi des plages d'Anglet, Truc Vert et Saint-Trojan-les-Bains étaient sous la responsabilité de l'Université de Bordeaux et le suivi des plages de Saint-Malo et Saint-Aygulf, sous la responsabilité du Shom, Brest. Ces plages ont été sélectionnées à partir de critères physiques et géographiques (e.g., morphologie, granularité, marnage).

Parmi les plages principales, deux sont labellisées par le Service National d'Observation DYNALIT : (1) le Truc Vert, site suivi depuis près de 20 ans par EPOC, qui a aussi fait l'objet d'une campagne de mesures intensives en Octobre 2008 dans le cadre du projet

ECORS (Sénéchal et al., 2011) et (2) Anglet suivi par vidéo en collaboration entre SIAME et EPOC. Ces deux plages sont soumises à des régimes de vagues et de marée assez similaires mais, de par la granularité des sédiments, présentent des morphologies et des dynamiques très différentes. Les trois autres sites d'étude, complémentaires du Truc Vert et d'Anglet notamment en termes de marnage et d'énergie à la côte, présentent un intérêt pour le Shom (cartographie).

Dans le cadre de cette thèse, ces cinq plages ont fait l'objet de suivis biannuels depuis 2020 (sauf la plage de Saint-Trojan-les-Bains qui a été rajoutée après la première campagne *in situ*) sur une durée de trois ans. Ces campagnes ont été organisées et réalisées sous ma responsabilité, avec l'appui de collègues d'EPOC (Truc Vert, Saint-Trojan-les-Bains et Anglet) et du Shom (Saint-Aygulf, Saint-Malo).

Les protocoles expérimentaux ont été définis et validés dans les premiers mois de ma thèse en interaction avec mes encadrants. Pour tous les sites d'étude, les prélèvements sédimentaires ont été accompagnés de mesures de topographie à l'aide d'un drone et/ou de séries de profils réalisés à l'aide d'un système GNSS (Global Navigation Satellite System). Ces plages font l'objet de suivis spatio-temporels de la granularité (suivant la variabilité *longshore*, *cross-shore* et sur la verticale) et de la pente des plages. La diversité des plages en terme de granularité, de régime de vagues et de marée a permis d'étudier cette variabilité en fonction de la variabilité des forçages marins.

L'objectif de ces campagnes de mesures *in situ* est de collecter un maximum de données qui seront par la suite traitées et analysées pour comprendre la relation entre pente des plages et granularité du sédiment, en vue d'améliorer la compréhension et la prévision de la morphologie des plages dans le temps et l'espace, et de pouvoir ainsi répondre aux questions 3, 4 et 5 mentionnées dans la section 1.2, voir Chapitre 5.

## **4.2. Sites d'étude**

Les cinq plages (Figure 4.1) de l'étude sont réparties géographiquement entre la Manche, l'Océan Atlantique Nord et la mer Méditerranée. Les cinq plages retenues pour cette étude sont : Saint-Trojan-les-Bains (17), Truc Vert (33), Saint-Malo (35), Anglet (64) et Saint-Aygulf (83).

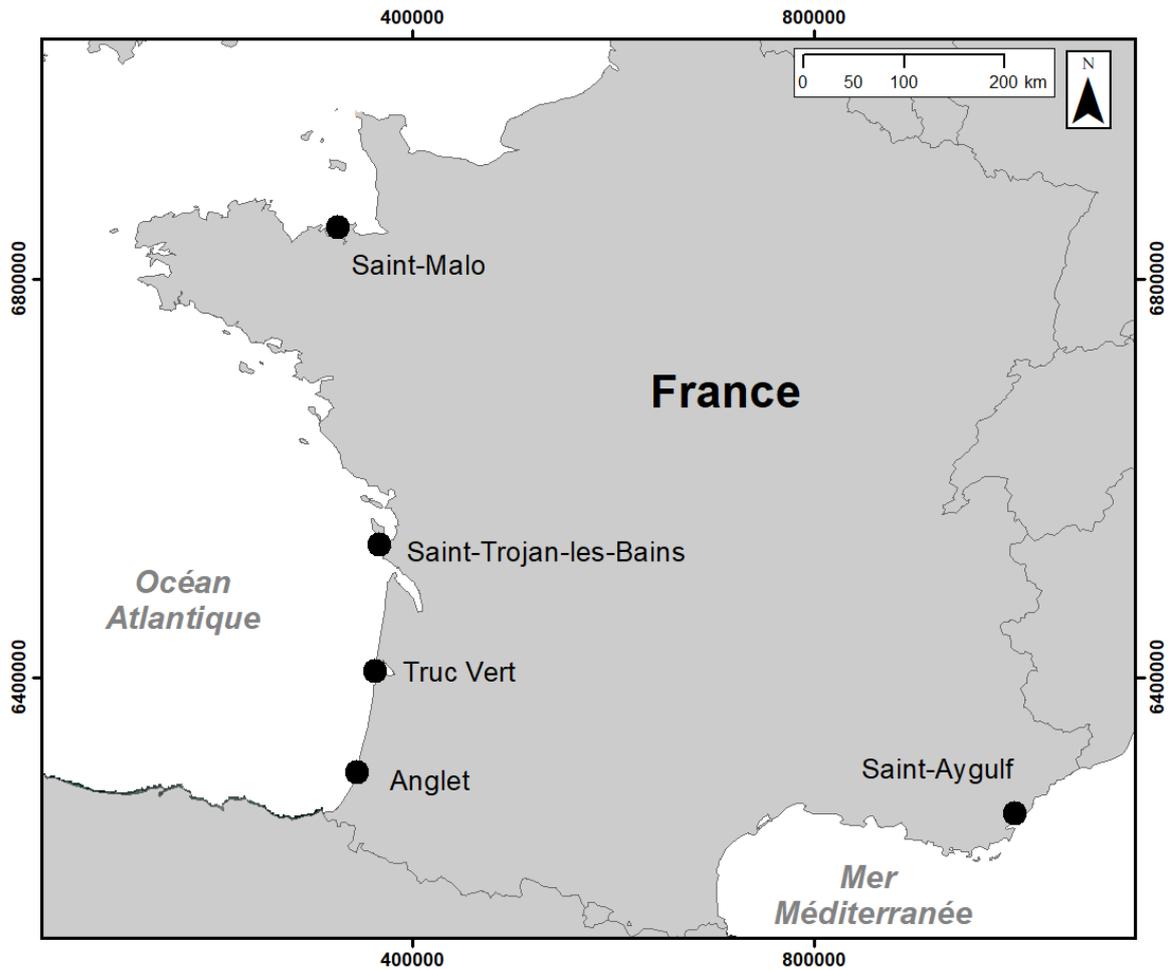


Figure 4.1 Carte de localisation géographique des cinq sites d'étude, en Lambert-93.

Ces plages ont été choisies aussi pour leur historique de suivis réguliers permettant une bonne connaissance de leur dynamique à différentes échelles temporelles, de la tempête aux évolutions saisonnières et interannuelles.

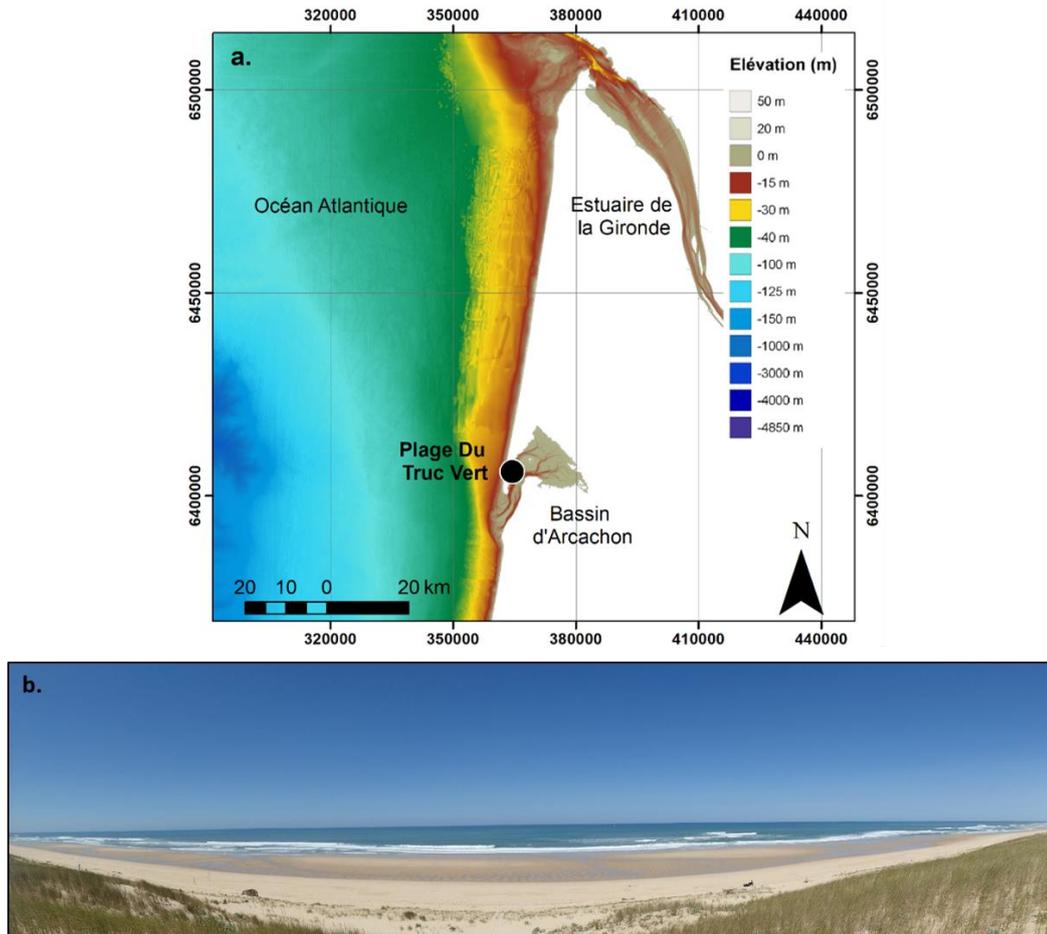
Aussi, la sélection des sites d'étude a été effectuée selon des critères physiques, géographiques et d'accessibilité, ainsi que d'autres caractéristiques telles que le marnage, le nombre de Dean, le nombre de barres sableuses, la pente moyenne, la largeur, la disponibilité de données de forçage fiables, la hauteur modale des vagues, la présence de contraintes géologiques (e.g., un cap rocheux), la granularité des sédiments, le caractère anthropique et la dérive littorale (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Caractéristiques principales des cinq plages étudiées.

	<b>Truc Vert</b> (TV)	<b>Anglet</b> (AG)	<b>Saint-Trojan-les-Bains</b> (ST)	<b>Saint-Malo</b> (SM)	<b>Saint-Aygulf</b> (SA)
<b>Département</b>	Gironde (33)	Pyrénées-Atlantiques (64)	Charente-Maritime (17)	Ille-et-Vilaine (35)	Var (83)
<b>Nom de la plage</b>	Plage Du Truc Vert	Plage De La Chambre D'Amour	Plage de la Giraudière ou Grande Plage	Plage de la Hogue	Plage de Saint-Aygulf et Plage de Fréjus
<b>Coordonnées géographiques</b>	44.74303, -1.2452	43.4959, -1.5458	45.8462, -1.2509	48.6608, -1.9956	43.39795, 6.73017
<b>Aménagement</b>	Aucun (plage naturelle)	Digue, Epis rocheux, Rechargements	Aucun (plage naturelle)	Digue, Brise-lames (pieux en bois)	Brise-lames (enrochement)
<b>Forçage dominant</b>	Houle océanique énergétique	Houle océanique énergétique	Houle océanique	Marée	Vagues de tempêtes et mer de vent
<b>Nb de Dean / Morphologie</b>	$1 < \Omega < 6$ Intermédiaire	$\Omega < 1$ , Intermédiaire à réfective	$\Omega > 6$ Dissipative	$\Omega > 6$ Dissipative	$1 < \Omega < 6$ Intermédiaire
<b>Barre sableuse</b>	Double barre (intertidal/subtidal)	Double barre (intertidal/subtidal)	Barres intertidales	Pas de barres	Une barre peu prononcée
<b>Pente moyenne</b>	$\tan\beta = 0.025$ (Dodet et al., 2019b)	$\tan\beta \approx 0.1$ (Rodriguez-Padilla et al., 2019)	$\tan\beta = 1/80$ (Bertin et al., 2018)	-	-
<b>Largeur d'estran (m)</b>	$\approx 170$	$\approx 90$	$\approx 170$	$\approx 270$	$\approx 25$
<b>Marnage</b>	Méso-macrotidal	Mésotidal	Macrotidal	Macrotidal	Microtidal
<b>Hauteur <math>H_s</math> moyenne (m)</b>	Annuelle : 1.36 (Butel et al., 2002)	( <i>Bayonne Boucau</i> ) Annuelle : 1.63 Été : 1.20 Hiver : 2.06 (Dodet et al., 2019a)	( <i>Ile d'Aix</i> ) Annuelle : 1.6 Été : 1.19 Hiver : 2.03 (Dodet et al., 2019a)	Annuelle : 1.13 Été : 0.86 Hiver : 1.42 (Dodet et al., 2019a)	( <i>Port Ferréol</i> ) Annuelle : 0.53 Été : 0.29 Hiver : 0.71 (Dodet et al., 2019a)
<b>Granularité : <math>D_{50}</math> (mm)</b>	0.4 (Dodet et al., 2019b)	0.3 (bimodale) (Briere and Abadie, 2004)	0.2 (Bertin et al., 2018)	De 0.5 à 2 (Bonnot-Courtois et al., 2002)	-
<b>Enjeux socio-économique</b>	Préservation d'un site naturel	Activités portuaires et tourisme balnéaire	Risque de submersion marine	Station balnéaire, Fort enjeux environnementaux	Station balnéaire, Fort enjeux environnementaux
<b>Autres</b>	La dune est entretenue par l'ONF pour la protection de la forêt	Anthropisée, Située proche de l'embouchure de l'Adour	Très forte érosion	Plage nettoyée en saison estivale, Plan d'Action de Prévention des Inondations	Fortement anthropisée

### 4.2.1. Plage Du Truc Vert (Lège Cap-Ferret)

La plage du Truc Vert (TV) est localisée dans le département de la Gironde (33). Elle est située à une quinzaine de kilomètres au nord de l'embouchure du Bassin d'Arcachon sur la commune de Lège Cap Ferret (Figure 4.2a,b).

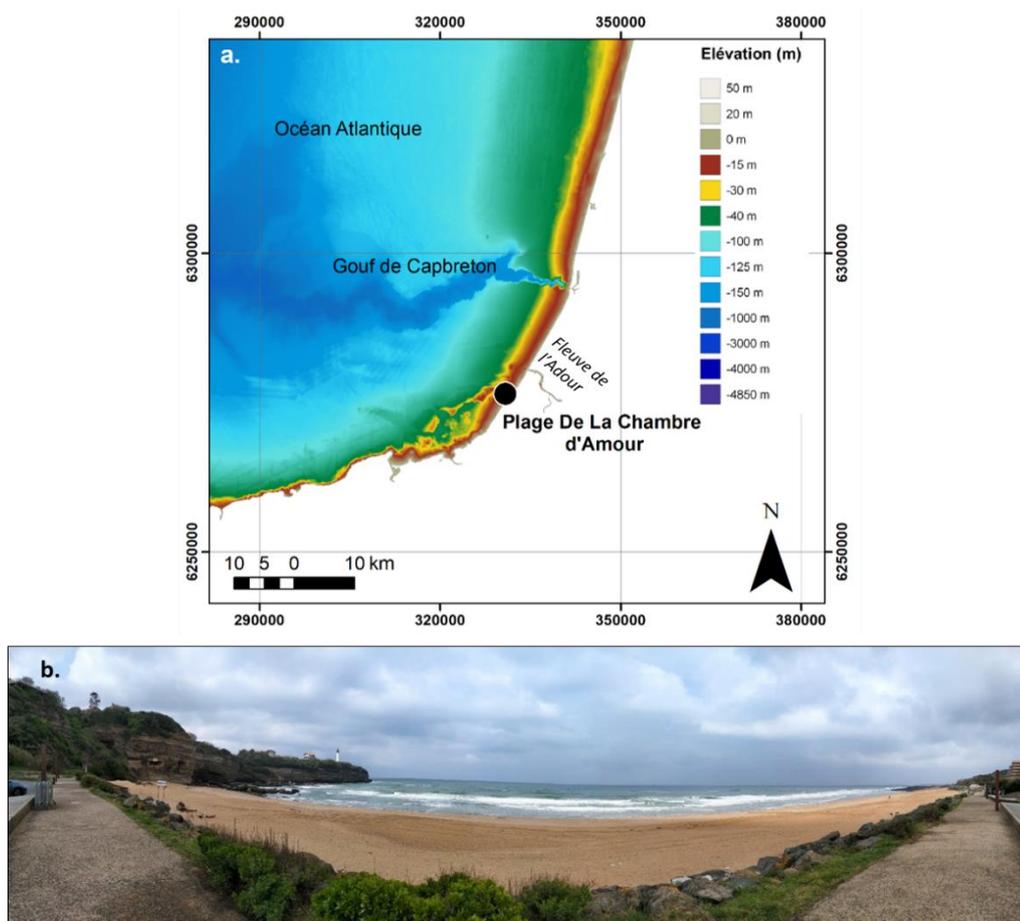


En tant que plage naturelle non aménagée (Figure 4.2b), elle offre un environnement préservé, soumis principalement à un forçage de houle océanique énergétique. La morphologie de la plage est classée comme intermédiaire ( $1 < \Omega < 6$ ) (Short, 1999). Deux barres sableuses intertidales et subtidales sont présentes, avec une pente de plage moyenne de  $\tan\beta = 0.025$  (Dodet et al., 2019b). Le profil cross-shore de cette plage s'étend sur environ 170 m. Le régime de marée est méso-macrotidal. La hauteur moyenne annuelle des vagues ( $H_s$ ) est de 1.36 m (Butel et al., 2002). La granularité du sable est caractérisée par un  $D_{50}$  de 0.4 mm (Dodet et al., 2019b).

En raison de l'absence d'aménagement et de la préservation du site, les enjeux socio-économiques sont principalement liés à la protection de cet environnement naturel. L'Office National des Forêts (ONF) joue un rôle important dans la gestion de la dune et la protection de la forêt environnante. Cette plage constitue ainsi un terrain d'étude pertinent pour les chercheurs en océanographie et en géomorphologie côtière et elle a fait l'objet de nombreuses études par la laboratoire EPOC.

#### 4.2.2. Anglet : Plage de la Petite Chambre D'Amour

La plage de la petite Chambre d'Amour se situe à Anglet (AG) dans le département des Pyrénées-Atlantiques (64). Cette plage se situe à 3 kilomètres au sud de l'embouchure de l'estuaire de l'Adour qui prend sa source dans les Pyrénées occidentales et à environ 20 kilomètres au sud du gouf de Capbreton (canyon sous-marin au large de Capbreton) (Figure 4.3a,b).



Cette plage se situe au pied d'une falaise et les aménagements comprennent une digue et des épis rocheux (Figure 4.3b). Le forçage dominant est une houle océanique énergétique, et la morphologie est caractérisée par un nombre de Dean inférieur à 1, indiquant une plage intermédiaire à réfléchive. Deux barres sableuses intertidales et subtidales sont présentes. La pente moyenne est d'environ  $\tan\beta \approx 0.1$  (Rodriguez-Padilla et al., 2019).

Le profil *cross-shore* mesure environ 90 m, et la plage est soumise à un marnage mésotidal. La hauteur  $H_s$  moyenne annuelle des vagues est de 1,63 m, avec une hauteur de 1,20 m en été et 2,06 m en hiver (Bayonne Boucau) (Dodet et al., 2019a). La distribution granulométrique du sable est bimodale, avec une granularité  $D_{50}$  de 0,3 mm (Briere and Abadie, 2004; Mouragues, 2020).

La plage d'Anglet, marquée par l'activité humaine, notamment en raison de la proximité d'un complexe hôtelier, revêt une grande importance socio-économique, tant pour les activités portuaires que pour le tourisme balnéaire. Sa puissante houle attire de nombreux visiteurs, en particulier les amateurs de sports nautiques (e.g., surf). Par ailleurs, il est crucial de prendre en compte le rechargement des plages après la saison hivernale en tant que facteur d'impact anthropique sur cette zone côtière.

#### **4.2.3. Saint-Trojan-les-Bains : Plage de la Giraudière ou Grande Plage**

La plage de la Giraudière, également connue sous le nom de Grande Plage, est située à Saint-Trojan-les-Bains (ST) dans le département de la Charente-Maritime (17) au SW de l'île d'Oléron (Figure 4.4a,b). Il s'agit d'une plage naturelle, sans aménagement particulier, soumise à une houle océanique. La plage est caractérisée par une morphologie dissipative ( $\Omega > 6$ ), avec la présence parfois de barres intertidales et qui montre une faible pente ( $\tan\beta = 0.0125$ ) (Bertin et al., 2018).

Le profil mesure environ 170 m, et la plage est soumise à un marnage macrotidal. La hauteur  $H_s$  moyenne annuelle des vagues est de 1,6 m, avec une hauteur de 1,19 m en été et 2,03 m en hiver (Ile d'Aix) (Dodet et al., 2019a). Le  $D_{50}$  est de 0,2 mm (Bertin et al., 2018). Suite à la persistance de vagues à faible énergie, des systèmes de barres intertidales de faible amplitude et une berme présentant une pente modérée (1/25) peuvent se former (Bertin et al., 2008).

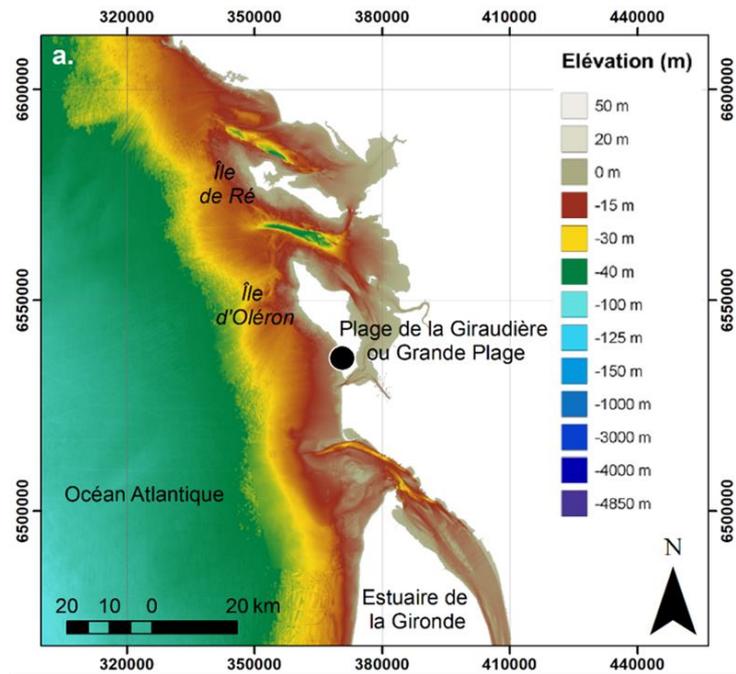


Figure 4.4 a. Localisation de la Plage de la Giraudière ou de la Grande Plage, MNT bathymétrique du Shom, avec une résolution de  $0.001^\circ$  ( $\sim 111$  m), Lambert-93, b. Photo de la Plage de la Giraudière ou de la Grande Plage, Saint-Trojan-les-Bains, C.Labarthe, le 10/09/2021.

La Grande Plage de Saint-Trojan-les-Bains fait face à des défis environnementaux tels que le risque de submersion marine et une très forte érosion. Ces facteurs soulignent l'importance de surveiller et protéger ce site naturel remarquable.

#### 4.2.4. Saint-Malo : Plage de la Hoguette

La plage de la Hoguette se trouve à Saint-Malo (SM), dans le département d'Ille-et-Vilaine (35) (Figure 4.5a). A noter qu'elle a été élue en mars plage 2022 préférée des français. Elle est aménagée avec une digue et des brise-lames constitués de pieux en bois (Figure 4.5b).

Le forçage dominant de la plage est la marée, et sa morphologie est dissipative ( $\Omega > 6$ ), sans barre sableuse. Le profil mesure environ 270 m, et la plage est soumise à un marnage megatidal (un des plus importants d'Europe) avec un minimum de 2,09 m, une moyenne de 7,77 m et un maximum de 13,35 m (Dodet et al., 2019a). La hauteur  $H_s$  moyenne annuelle des vagues est de 1,13 m, avec une hauteur de 0,86 m en été et 1,42 m en hiver (Dodet et al., 2019a). La granularité du sable varie entre 0,5 et 2 mm (Bonnot-Courtois et al., 2002).

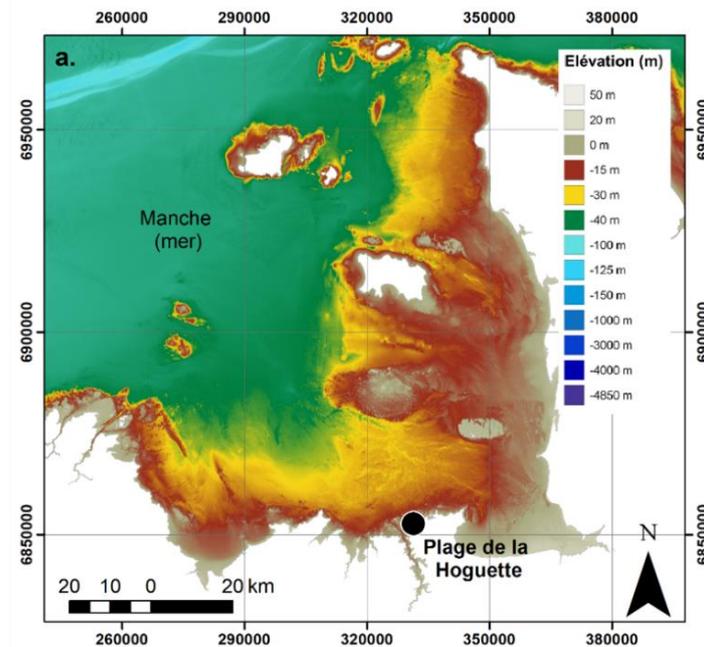


Figure 4.5 a. Localisation de la Plage de la Hoguette, MNT bathymétrique du Shom, avec une résolution de  $0.001^\circ$  ( $\sim 111$  m), Lambert-93, b. Photo de la plage de la Hoguette, Saint-Malo.

La plage de la Hoguette, marquée par des nettoyages en période estivale, présente un enjeu socio-économique majeur en tant que station balnéaire prisée et compte tenu des défis environnementaux importants qu'elle génère. Elle fait l'objet d'un Plan d'Action de Prévention des Inondations (PAPI) pour mieux anticiper les risques liés aux phénomènes naturels. Le rechargement des plages après la saison hivernale constitue également un facteur à considérer dans l'impact anthropique, bien que ce phénomène soit moins prononcé à Saint-Malo qu'à Anglet.

#### 4.2.5. Saint-Aygulf : Plage de Saint-Aygulf et Plage de Fréjus

La plage de Saint-Aygulf et la plage de Fréjus se situent à Saint-Aygulf (SA), dans le département du Var (83) (Figure 4.6a). La plage est aménagée dans sa partie méridionale par des brise-lames en enrochements pour atténuer l'impact de la houle. La présence de ces brise-lames confère à la plage une morphologie particulière en forme d'arc de cercle comme illustrée dans la Figure 4.6b. Des tombolos sont visibles en arrière des brise-lames.

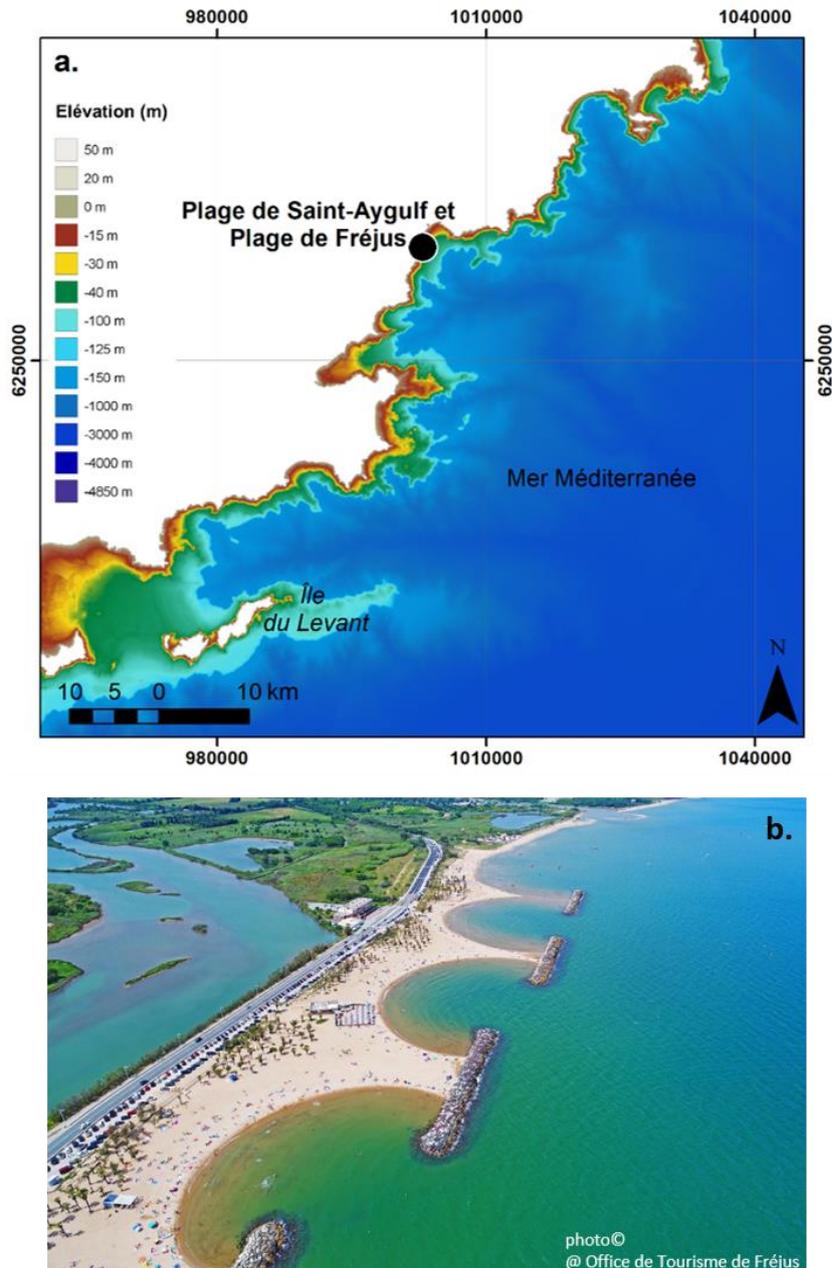


Figure 4.6 a. Localisation de la Plage de Saint-Aygulf et de la Plage de Fréjus, MNT bathymétrique du Shom, avec une résolution de 0.001° (~ 111 m), Lambert-93, b. Photo aérienne de la plage de Saint-Aygulf et de la Plage de Fréjus, Saint-Aygulf.

Le forçage dominant provient des vagues de tempêtes et de la mer de vent, et la morphologie est intermédiaire ( $1 < \Omega < 6$ ), avec une barre sableuse peu prononcée. Le profil *cross-shore* mesure environ 25 m, et la plage est soumise à un marnage microtidal. La hauteur  $H_s$  moyenne annuelle des vagues est de 0,53 m, avec une hauteur de 0,29 m en été et 0,71 m en hiver (Port Ferréol) (Dodet et al., 2019a).

Les plages de Saint-Aygulf et de Fréjus revêtent une importance socio-économique importante en tant que stations balnéaires prisées et pour les enjeux environnementaux majeurs qu'elles soulèvent. Ces plages attirent les vacanciers et les résidents locaux par leur situation avantageuse et leur accessibilité, renforcée par la proximité d'une route très fréquentée située à proximité immédiate de la plage. Toutefois, malgré cette pression anthropique, il est essentiel de prendre en compte les enjeux environnementaux pour assurer une gestion durable de cette zone côtière.

### **4.3. Campagnes de mesures**

La date exacte des campagnes de mesure *in situ* a été déterminée en fonction des périodes présentant des coefficients de marée élevés (Tableau 4.2). Lors de ces coefficients importants, l'étale de basse mer de vives eaux offre un accès à l'ensemble de la zone intertidale.

La collecte des différentes données, pour les plages affectées par la marée, s'effectue après la pleine mer en commençant par le haut de la plage pour finir en bas de plage autour l'étale de basse mer. La collecte des données topographiques est effectuée au moment de l'étale de basse mer, en parallèle des prélèvements sédimentaires par d'autres personnes de l'équipe, d'où l'importance d'être à plusieurs sur le terrain. Les prélèvements sédimentaires sont réalisés dans un ordre précis en tenant compte des horaires de marée, à l'exception de la plage de Saint-Aygulf où le marnage est négligeable.

L'ensemble des données brutes collectées sur toute la période de ce protocole expérimental est résumé dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Dates des campagnes de mesure in situ et détail des données topographiques et de granularité collectés, en grisé : périodes en sortie d'été et en blanc : périodes en sortie d'hiver.

Plages	Dates	Orthophotographie (Drone)	Données topographiques utilisées	Distance <i>cross-shore</i> (en m)	Distance <i>longshore</i> (en m)	Nombre de prélèvements de sable traités/collectés
Truc Vert	18/09/2020	✓	GNSS	~ 230	~ 2000 *	77/78
	29/03/2021	✓	GNSS	~ 230	~ 2000 *	66/78
	08/09/2021	✓	GNSS	~ 230	~ 2000 *	68/78
	01/04/2022	✓	GNSS	~ 230	~ 2000 *	68/78
Anglet	21/09/2020	-	GNSS	~ 130	~ 240	75/78
	30/03/2021	✓	UAV	~ 130	~ 130	68/78
	09/09/2021	✓	UAV	~ 130	~ 240 (travaux)	75/78
	31/03/2022	-	GNSS	~ 130	~ 240	71/78
Saint-Aygulf	18/05/2021	-	GNSS	~ 30 + ~ 30	~ 100	76/78
	19/10/2021	-	GNSS	~ 30 + ~ 30	~ 100	76/78
	04/05/2022	-	GNSS	~ 30 + ~ 30	~ 100	64/78
Saint-Malo	19/10/2020	✓	UAV	~ 320	~ 300	78/78
	28/04/2021	✓	GNSS	~ 320	~ 300	70/78
	07/10/2021	-	GNSS	~ 320	~ 300	61/78
	19/04/2022	-	GNSS	~ 320	~ 300	51/78
Saint-Trojan-les-Bains	31/03/2021	✓	GNSS	~ 220	~ 260	65/78
	10/09/2021	✓	GNSS	~ 220	~ 260	65/78
	30/03/2022	✓	GNSS	~ 220	~ 260	54/78

\* La distance *longshore* considérée au Truc Vert est plus importante car le levé GNSS a pu être réalisé à l'aide d'un quad.

## 4.4. Stratégie d'échantillonnage des données de granularité

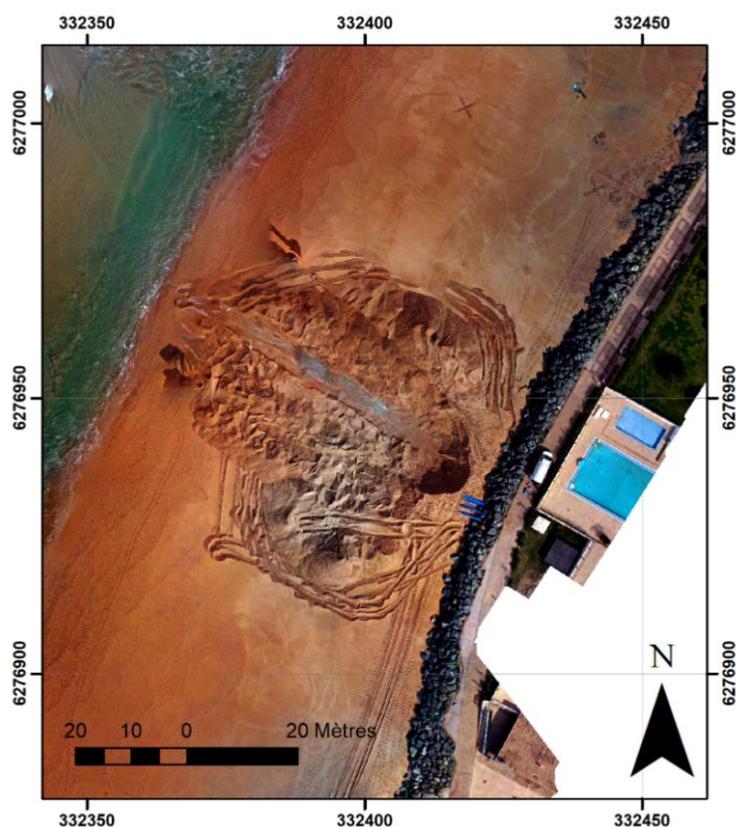
### 4.4.1. Distribution spatiale des points de prélèvements

Afin de collecter, pour chaque plage, des données de granularité représentatives des variabilités *longshore* et *cross-shore* du site, nous avons déterminé un protocole de prélèvement s'appuyant sur : i) un profil *cross-shore*, afin d'explorer la variabilité le long du profil transversal et ii) deux profils *longshore*, en bas de plage et haut de plage, afin d'appréhender la variabilité longitudinale de la plage. L'objectif est de comprendre comment la granularité varie en fonction de la position le long des profils. Etant donné que certains sites d'étude sont de type intermédiaire, ils présentent des morphologies de type barre/chenal dont le positionnement d'une année ou d'une saison à l'autre peut avoir largement évolué. Dans ce cas la localisation des profils était déterminée le jour même sur site à dire d'expert.

Au contraire, sur les plages sans chenal les transects ont été fixés pour l'ensemble des campagnes. Cette approche est détaillée ci-dessous.

### ***a) Stratégie pour les plages à barre/avec chenal***

Les plages du Truc Vert, d'Anglet et de Saint-Trojan-les-Bains se caractérisent par la présence de barres sableuses et de chenaux de baines, plus ou moins marqués. Les frontières de nos zones d'étude sont délimitées par les laines de haute et de basse mer. Toutefois, lors de la seconde campagne menée à Anglet le 30 mars 2021, nous avons été contraints de décaler nos points de prélèvements situés au nord de la zone d'étude en raison de travaux réalisés par le complexe hôtelier « Belambra Clubs » (Figure 4.7), qui se trouve en face de notre zone de recherche.



*Figure 4.7 Travaux réalisés par le complexe hôtelier «Belambra Clubs» pour sa piscine, Orthophotographie (UAV) de la plage de la petite Chambre D'Amour, Anglet, le 30/03/2021.*

Les travaux consistaient à creuser une tranchée transversale le long de la plage d'une profondeur de plusieurs mètres, afin de poser un tuyau pour alimenter la piscine de l'hôtel en eau. Aussi, la ligne longitudinale en haut de plage a été positionnée au-delà de la laisse de haute mer. Ces ajustements ont été nécessaires en raison de l'incapacité d'effectuer

certaines prélèvements à cause des dégâts provoqués par les engins de chantier présents sur la plage (Figure 4.7). La distribution des points de prélèvement et la position des trois profils de plage ne sont pas fixes pour ces trois plages, et dépendent de la position des chenaux de baigne et des barres sableuses le jour de la campagne sur le terrain (voir l'exemple de la plage du Truc Vert, Figure 4.8). Donc, le jour de la campagne *in situ*, la distribution précise des points de prélèvements est déterminée en observant la morphologie de la plage, tout en veillant à ne pas s'éloigner de la zone d'étude de la campagne précédente.

Pour chacune des trois plages, les trois profils sont ajustés de la manière suivante : un profil transversal ou *cross-shore* (perpendiculaire à la plage) placé sur la barre entre les deux baignes suivi de deux profils longitudinaux ou *longshore* (parallèles à la plage), avec, le premier profil longitudinal situé sur la barre en bas de plage et le second profil longitudinal localisé au pied de la berme, comme illustré dans la Figure 4.8.

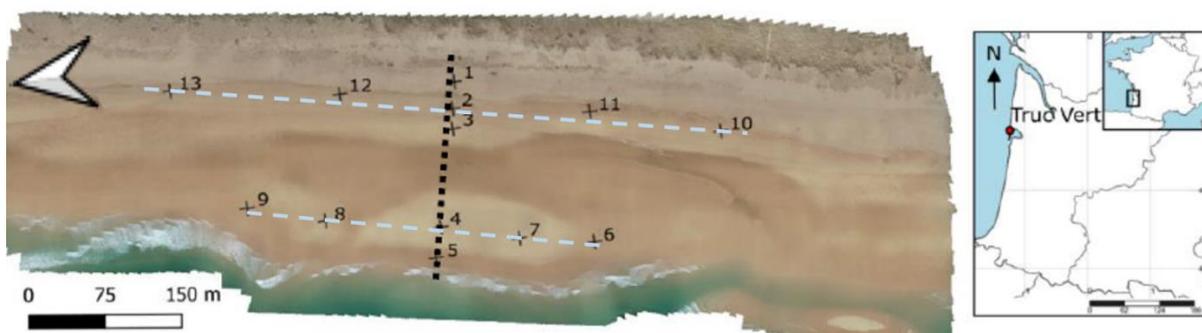


Figure 4.8 Distribution des 13 points de prélèvement (croix noires) sur une plage avec chenal, Orthophotographie (UAV) de la plage du Truc Vert, le 22/06/2020. En pointillé noir, la radiale *cross-shore* et en pointillé bleu clair les deux radiales *longshore*.

Les points de prélèvements 1 à 5 sont situés sur la radiale *cross-shore* centrée sur le motif de baigne, avec le point de prélèvement n°1 placé en haut de plage et le point de prélèvement n°5 positionné derrière la barre en bas de plage (Figure 4.8).

Les points de prélèvements 6 à 9 sont sur la radiale *longshore* en bas de plage située sur la barre sableuse en bas de plage, avec le point de prélèvement n°6 localisé en limite de chenal de baigne et le point de prélèvement n°9 au niveau de la fin de la barre sableuse (Figure 4.8).

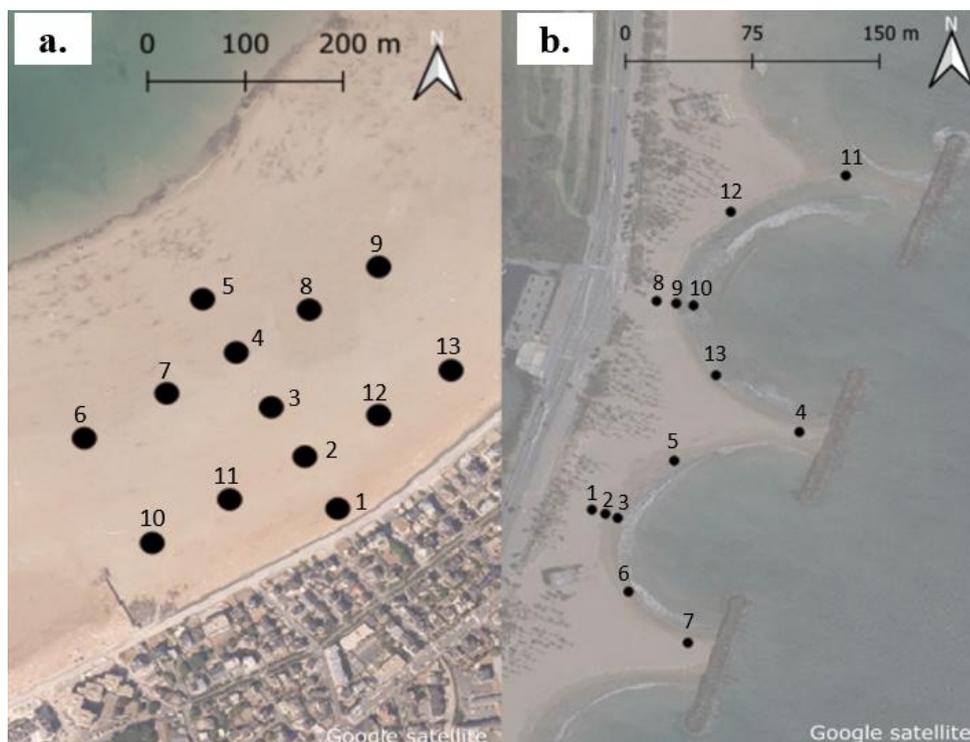
Les points de prélèvements 10 à 13 sont sur la radiale *longshore* positionnée en haut de la plage, au pied de la berme avec les stations de prélèvements en face de celles situées sur

la radiale *longshore* en bas de plage. Cette méthode de distribution des treize points de prélèvement est la même pour les plages du Truc Vert, d'Anglet et Saint-Trojan-les-Bains.

### ***b) Stratégie appliquée aux plages sans barre émergentes/sans chenal***

Pour la plage de Saint-Malo, les treize stations de prélèvement sédimentaires ainsi que les trois profils de plage (un profil transversal et deux profils longitudinaux) sont fixes. Autrement dit, les prélèvements de sédiments sont effectués au même endroit/coordonnées GNSS lors de chaque mission sur cette plage, comme indiqué sur la Figure 4.9a. Les coordonnées géographiques des points de prélèvements fixés ont été enregistrées lors de la première campagne de terrain.

La plage de Saint-Aygulf présente une morphologie différente des autres plages de l'étude. Elle a donc sa propre distribution spatiale des différents points de prélèvements. La répartition des prélèvements sédimentaires a dû être adaptée pour se conformer à la morphologie particulière de cette plage (Figure 4.6 et Figure 4.9b).



*Figure 4.9 Stratégie d'échantillonnage in situ. Distribution des profils de plage et des treize prélèvements sédimentaires représentés par les points noirs, a. Saint-Malo, b. Saint-Aygulf.*

Les épis rocheux situés au large de la plage de Saint-Aygulf créent une morphologie en tombolos. Les treize points de prélèvement sont répartis le long de trois profils de plage :

deux transversaux et un longitudinal en bas de plage qui suivent la morphologie spécifique de la plage (Figure 4.9b). Les deux profils transversaux sont composés chacun de trois points de prélèvements. Le profil longitudinal situé en bas de plage épouse la morphologie de la plage en forme d'arc de cercle et comprend sept points de prélèvements (Figure 4.9b).

Comme pour la plage de Saint-Malo, les coordonnées géographiques des stations de prélèvements ont été enregistrées lors de la première campagne terrain. Les prélèvements sédimentaires sont effectués au même endroit/coordonnées GNSS pour l'ensemble des missions sur cette plage.

#### 4.4.2. Profondeur d'échantillonnage

Pour chaque point de prélèvement, nous avons effectué un prélèvement superficiel sur le premier centimètre [0-1 cm], suivi de prélèvements tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 51 cm. De cette manière, nous avons collecté six échantillons différents (Figure 4.10) par point de prélèvement, c'est-à-dire six couches : [0-1cm], [1-11cm], [11-21cm], [21-31cm], [31,41cm] et [41,51cm].

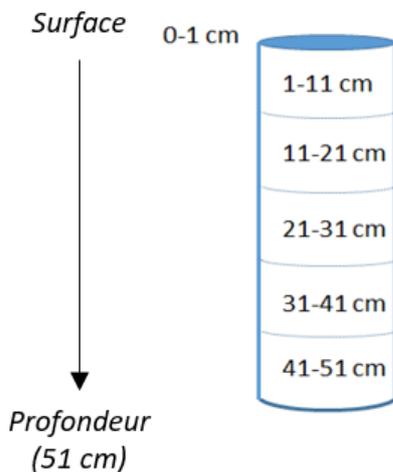


Figure 4.10 Schéma des six différentes couches de sédiment à prélever sur la verticale, pour une station de prélèvement.

Compte tenu de la présence de treize stations de prélèvement par plage et de la collecte de six échantillons de sédiment à la verticale pour chaque station de prélèvement, un total théorique de 78 échantillons est collecté pour chaque plage. Cependant, ce nombre peut être affecté par l'impossibilité de prélever les couches de sédiment situées en profondeur lorsque le sédiment est saturé en eau, notamment en bas de plage (Figure 4.12).

### 4.4.3. Techniques de prélèvement

Les prélèvements sédimentaires sont effectués sur chaque plage pendant l'étale de basse mer de vives eaux pour permettre un accès à toute la zone intertidale (excepté pour la plage de Saint-Aygulf où le marnage est négligeable). Pour l'analyse au laboratoire, environ 300g de sable par échantillon sont nécessaires. Le conditionnement a été fait dans des sachets en plastiques numérotés et datés la veille de la campagne *in situ* pour plus de confort sur le terrain, garantir la précision lors de la manipulation des échantillons et pour un gain de temps.

Les échantillons de sédiments sont prélevés plus facilement lorsque les zones de prélèvement sont suffisamment sèches. En effet, les prélèvements sédimentaires effectués en bas de plage au moment de l'étale de basse mer sont plus difficiles, en raison de la stratégie d'échantillonnage qui est plus longue et complexe en présence d'un sable humide (section 4.4.3b) par rapport à un sable sec (section 4.4.3a). Par conséquent, la collecte des données en bas de plage a nécessité une attention particulière pour obtenir des échantillons représentatifs de chaque zone dans un temps restreint, contraint par les horaires de marée. Donc, premièrement, les prélèvements sédimentaires situés en haut de plage étaient réalisés juste après la pleine mer. Puis, nous prélevions les sédiments localisés en milieu de plage, avant d'effectuer les prélèvements en bas de plage, autour de l'heure de basse mer. Sauf pour la plage de Saint-Aygulf où la période de prélèvement des échantillons n'était pas dépendante de la marée.

En fonction de l'état du sable (sec ou humide), la technique de prélèvement utilisée varie. Deux protocoles différents ont été mis en place en fonction du type de station de prélèvement considéré. Les détails concernant ces protocoles sont présentés ci-dessous :

#### **a) Prélèvement sur sable sec**

Lorsque le sable est sec, nous pouvons creuser une tranchée à l'aide d'une pelle (Figure 4.11a) sur 51 cm de profondeur et utiliser un mètre gradué pour identifier les différentes couches de 10 centimètres à prélever (Figure 4.10 et Figure 4.11b,c), à l'aide d'une truelle, puis conditionner les échantillons dans les sachets plastiques pré-datés et pré-numérotés.

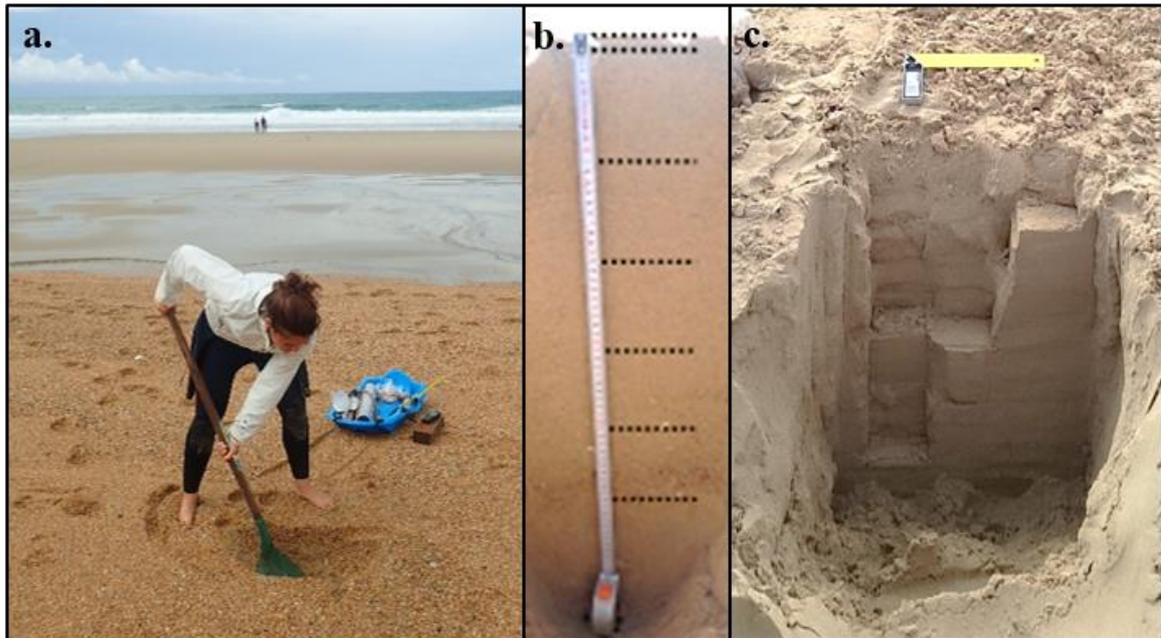


Figure 4.11 a. Tranchée sur la verticale dans du sable sec, réalisée manuellement à l'aide d'une pelle, b. Stratégie d'échantillonnage à la verticale, en ligne pointillée la limite des 6 strates identifiée le long du mètre ruban enrouleur, c. Tranchée avec les 6 strates prélevées.

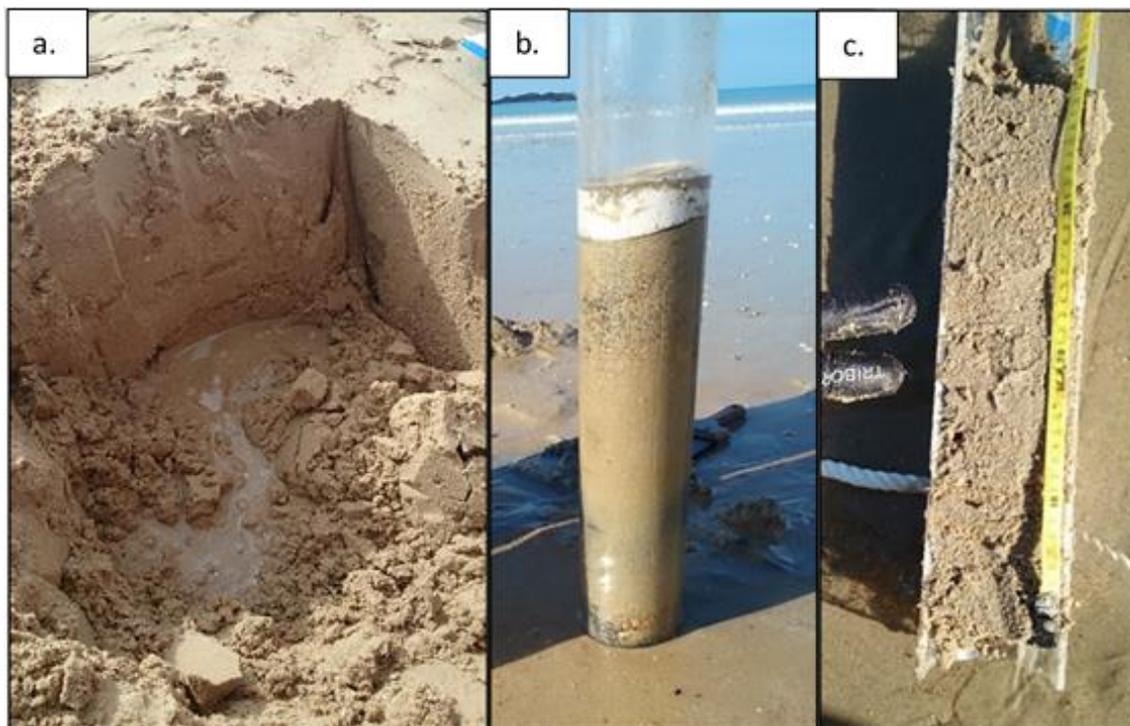
### **b) Prélèvement sur sable saturé en eau**

En présence d'un sable trop humide, il est impossible de creuser une tranchée manuellement car l'eau remonte et entraîne l'effondrement de celle-ci (Figure 4.12a). Dans ce cas, pour prélever les échantillons, il a été choisi d'employer un tube en PVC ou en acier, servant de carottier. Ce dernier doit être enfoncé dans le sable en exerçant une pression avec les mains, soit dès la surface, soit dès que le sédiment est trop humide pour continuer à creuser une tranchée manuellement (Figure 4.12b).

Si la force manuelle ne permet pas d'enfoncer le carottier à une profondeur de 51 cm pour respecter la profondeur d'échantillonnage requise de ce protocole, il est nécessaire d'utiliser un marteau et un support pour enfoncer le carottier jusqu'à la profondeur désirée. Parfois, il est impossible d'atteindre la profondeur requise de 51 cm en raison de la compacité du sable.

Pour extraire le tube en PVC ou acier, il faut creuser autour du tube à la main puis venir occluser l'ouverture pour retirer la carotte sans perdre son contenu. Le tube en PVC ou en acier contenant le prélèvement est directement vidé sur un demi-cylindre en PVC et la carotte obtenue est échantillonnée *in situ* à l'aide d'un mètre gradué (Figure 4.12c). Puis, les

échantillons sont conditionnés dans les sachets plastiques pré-datés et pré-numérotés. Cette technique est plus complexe et nécessite plus de temps que celle sur sable sec.



*Figure 4.12 Technique de prélèvement sur sable humide. a. Tranchée à la pelle inefficace dans du sable humide, b. Carotte de sable réalisée à l'aide d'un tube en PVC, c. Échantillonnage in situ sur un demi tube en PVC à l'aide d'un mètre gradué.*

## **4.5. Acquisition et traitement des données topographiques**

Les campagnes de prélèvements sédimentaires sont systématiquement accompagnées d'un relevé topographique, idéalement réalisé le même jour en fonction des conditions météorologiques. Ces levés topographiques ont été effectués à marée basse de vive-eau, en utilisant soit une méthode de stéréophotogrammétrie par drone MultiRotor, soit un récepteur GNSS, voire les deux. Ces deux méthodes permettent l'acquisition d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) après traitement. L'utilisation de la méthode par drone permet non seulement l'acquisition d'un MNT mais également celle d'une orthophotographie, cela permet de visualiser à la fois la morphologie de la plage et sa texture, c'est-à-dire les zones de sédiments plus fins ou plus grossiers (Figure 4.14).

Les levés topographiques GNSS sont effectués selon l'axe *cross-shore* pour couvrir l'ensemble de la zone étudiée, permettant par la suite de calculer la pente de la plage. La longueur de ces profils varie en fonction de la morphologie de chaque plage. Ainsi, sur la plage du Truc Vert, le profil transversal mesure environ 170 mètres (Figure 4.8), tandis qu'à Saint-Malo, il mesure environ 270 mètres (Figure 4.9a) en raison de la plus faible pente de cette plage. La superficie totale de la zone topographiée diffère ainsi selon chaque plage considérée.

#### 4.5.1. Système GNSS

Afin de couvrir au mieux la zone d'étude de chaque plage, un levé topographique a été réalisé à pied à l'aide d'un GNSS installé dans un sac à dos ou sur un quad pour toutes les campagnes *in situ*, sauf pour la troisième campagne sur la plage d'Anglet, le 09/09/2021. La distance entre chaque transect transversal a été ajustée en fonction des caractéristiques morphologiques de la plage locale et de sa longueur longitudinale, variant généralement de 20 à 30 mètres (Figure 4.13) avec une acquisition des données toutes les secondes.



Figure 4.13 Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Plage de la petite Chambre d'Amour acquis par GNSS, le 21/09/2020, Anglet. La ligne blanche sur le MNT représente le trajet parcouru à pied pour la réalisation du levé topographique.

Le GNSS utilisé est composé d'un récepteur Trimble R80 (constellations GPS et GLONASS) corrigé par une base fixe, soit locale en RTK, c'est-à-dire en temps réel, (Trimble

Net59 au Truc Vert), soit disponible en post traitement (PPK) sur le réseau RGP de l'IGN. La hauteur des vagues ou un coefficient de marée plus faible ont parfois gêné l'acquisition de données sur la partie inférieure de la plage, en particulier concernant le contour de la barre interne. Pour référencer l'altitude, les repères du Service Géodésique National français (NGF-IGN 69) ont été utilisés et transformés en altitude. La précision est de d'ordre centimétrique (environ 1 cm en horizontal et 1.5 cm en vertical). Le levé topographique est ensuite interpolé avec anisotropie dans le sens *longshore* pour obtenir un MNT sur l'ensemble de la zone topographiée (Figure 4.13). Les MNT sont ensuite utilisés pour visualiser les différents profils de plage, les profils moyens et calculer la pente moyenne de la plage (i.e., la moyenne en *longshore* de toutes les pentes calculées) sous MATLAB (Figure 4.15b). La méthode utilisée est celle décrite dans Laporte-Fauret et al. (2019).

#### 4.5.2. Photogrammétrie par drone

Lorsque les conditions météorologiques étaient favorables, c'est-à-dire avec un vent ne dépassant pas 45 km/h et des précipitations modérées, l'utilisation d'un drone peut être une option intéressante pour obtenir des orthophotographies (Figure 4.8, Figure 4.14a,b,c) ainsi qu'un modèle numérique de terrain géoréférencé (Figure 4.15a) avec une résolution centimétrique (Laporte-Fauret et al., 2019).

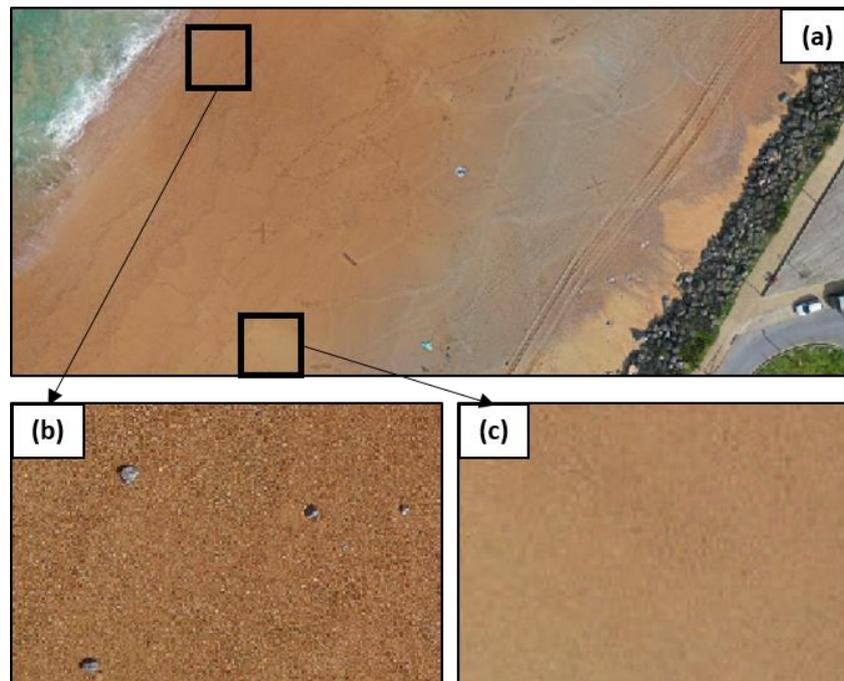
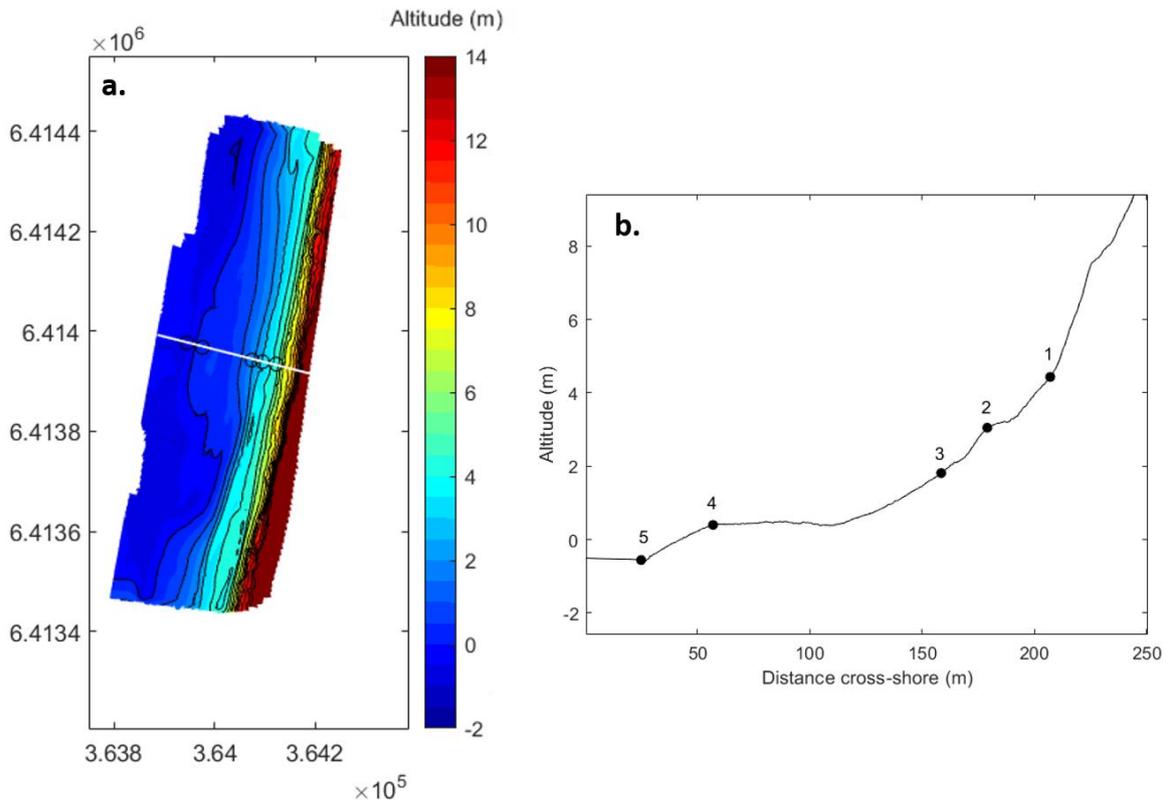


Figure 4.14 a. Orthophotographie drone, Vincent M., le 30/03/2021, Plage De la petite Chambre D'Amour, Anglet, b. Zoom sur une zone de sable grossier, c. Zoom sur une zone de sable fin.

Le drone utilisé était de type quadrirotor, DJI Phantom 4 PRO V2. Les MNT et orthophotographies ont été obtenues par photogrammétrie suivant la méthodologie de Laporte-Fauret et al. (2019) : des images sont acquises toutes les deux secondes pendant que le drone suit un plan de vol prédéterminé au-dessus de la zone étudiée. Elles sont ensuite assemblées dans le logiciel Agisoft Metashape pour former un nuage de point à partir duquel seront calculés le MNT et l'orthophotographie.

Cette approche nous a permis d'obtenir une vue d'ensemble de la zone d'étude permettant de mieux comprendre la relation entre la morphologie et la granularité en surface. En cas d'indisponibilité de l'orthophotographie due à l'impossibilité d'utiliser un drone, nous avons choisi une solution alternative en prenant des photos panoramiques avec un simple appareil photo.

Les MNT (Figure 4.15a) peuvent être utilisés pour visualiser les différents profils de plage (Figure 4.15b) et calculer la pente moyenne de la plage (i.e., la moyenne en *longshore* de toutes les pente calculées).



## 4.6. Traitement des données de granularité

L'analyse granulométrique des différents échantillons prélevés a été faite par tamisage à sec. Le Shom a fait l'acquisition d'un granulomètre laser par caméra en 2022 permettant de gagner en précision tout en réduisant de 80 % le temps d'analyse des échantillons. Cet appareil de mesure, dont l'acquisition était initialement prévue pour le début de la thèse, n'a malheureusement pas été acquis à temps pour notre étude et avons été contraints d'utiliser la méthode de tamisage à sec.

### 4.6.1. Tamisage par voie sèche

L'analyse granulométrique des échantillons prélevés est effectuée au laboratoire par tamisage à sec. Ce processus consiste à faire passer un échantillon à travers une série de tamis ayant des mailles calibrées de plus en plus petites afin de séparer les grains selon des classes de tailles respectant la norme AFNOR. Les sédiments sont séparés en différentes classes granulométriques en fonction du diamètre de chaque maille de tamis. Le diamètre de coupure de chaque maille de tamis détermine la taille de la particule de sédiment retenue par ce tamis. Le protocole d'analyse granulométrique utilisé est décrit dans la Figure 4.16. Il nécessite tout d'abord un rinçage des échantillons à l'eau claire pour éliminer le sel, suivi d'un séchage dans une étuve à 80°C pendant au moins 12 heures, de manière à ce que les échantillons soient parfaitement secs pour l'étape de tamisage. Pour assurer un séchage optimal des échantillons avant le tamisage à sec, il est conseillé de les préparer la veille. Ainsi, les échantillons seront parfaitement secs et prêts pour le tamisage le jour suivant.

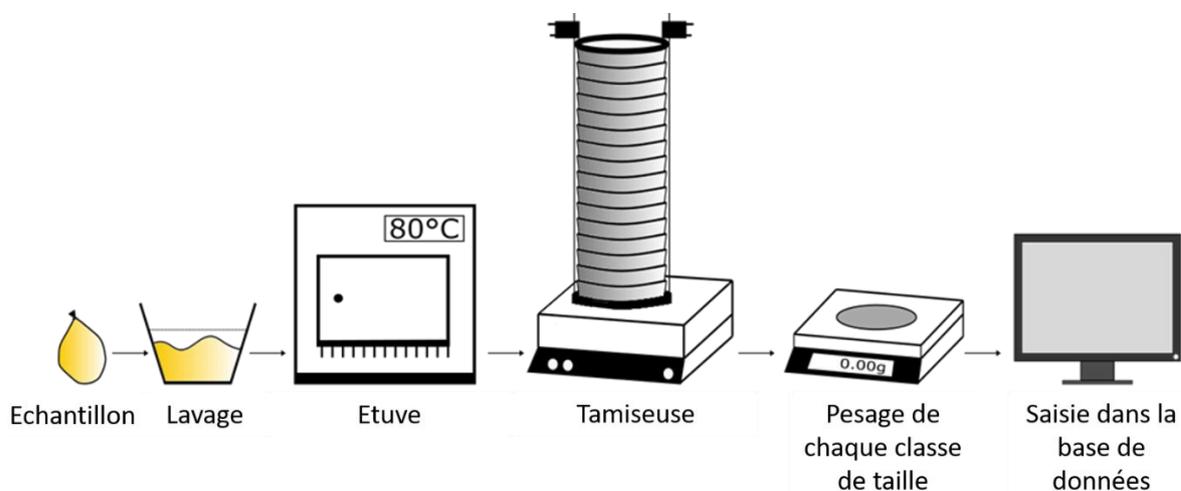


Figure 4.16 Schéma du traitement des échantillons de sable au laboratoire.

Les échantillons sont tamisés à sec sur une colonne de 16 tamis soumis à des vibrations alternées pendant 10 minutes. La taille des mailles des tamis utilisés, allant de 50  $\mu\text{m}$  à 4.00 mm, englobe toutes les classes de la famille des sables. Les tailles des tamis, de la base vers le sommet, sont les suivantes : 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 315  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 630  $\mu\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}$ , 1.00 mm, 1.25 mm, 1.60 mm, 2.00 mm, 2.50 mm, 3.15 mm et 4.00 mm. (Wentworth, 1922). Les masses de refus recueillies sur chaque tamis sont pesées avec une précision de 0.01 g.

Pour cette étude, nous avons tamisé l'ensemble des 1238 échantillons collectés (Tableau 4.2). Etant donné que nous pouvions tamiser environ 14 échantillons quotidiennement, le temps total consacré au travail en laboratoire est d'environ 650 heures.

#### **4.6.2. Traitements statistiques**

Les résultats des pesées obtenus grâce au tamisage à sec sont analysés à l'aide du logiciel Gradistat (Blott and Pye, 2001) pour déterminer différents paramètres statistiques. Ce logiciel permet de convertir les masses en pourcentages et de fournir des informations statistiques sur la distribution de la taille des grains de sable pour chaque échantillon.

Le programme utilise différentes approches et méthodes de calcul statistiques, notamment logarithmique, arithmétique et géométrique. Dans le cadre de ces travaux de recherche, la méthode du moment géométrique, basée sur le log-normal avec des valeurs de tailles de grains en mètre, est utilisée car elle est la plus couramment utilisée en sédimentologie.

Le programme calcule différents paramètres de statistiques descriptives tels que la médiane, ou grain médian ( $D_{50}$ ), la moyenne ou l'asymétrie (Skewness) (Blott and Pye, 2001). La classification granulométrique d'Udden-Wentworth (1922) est utilisée pour décrire la répartition des classes granulométriques des sédiments. Les données collectées sont ensuite exploitées à l'aide du logiciel Matlab pour créer une base de données finale complète sur laquelle travailler.

## **4.7. Besoins humains et matériels**

### **4.7.1. Granularité**

Pour prélever des échantillons de sédiments (sur du sable humide ou sec), la technique nécessite la présence d'au moins deux personnes pour garantir son efficacité.

Le matériel requis comprend des sachets plastiques pour le conditionnement des échantillons, un feutre indélébile pour numéroter les sachets, une pelle pour creuser une tranchée de 51 cm de profondeur, un mètre enrouleur pour identifier les différentes strates à prélever, et une truelle pour prélever les 6 couches de 10 cm d'épaisseur chacune. Un « chariot sable » ou une simple « luge » (Figure 4.11 a) pour transporter le matériel sur la plage.

Pour prélever des échantillons de sable humide, un tube en PVC ou en acier faisant office de carottier doit être utilisé en combinaison avec un marteau et un support pour enfoncer le carottier dans le sol à la station d'échantillonnage. Enfin, un demi-tube en PVC est utilisé pour transvaser les sédiments prélevés par le carottier dans les sachets plastiques (Figure 4.12).

### **4.7.2. Topographie**

Pour les levés au GNSS, deux personnes sont nécessaires pour des raisons de sécurité. Concernant les besoins matériels, nous avons besoin de la station fixe de référence et du GPS portatif et un sac à dos ou un quad. Pour utiliser le drone, il est impératif d'obtenir une autorisation de survol de la zone concernée et de réaliser des marquages au sol (par exemple, un CD-ROM ou une croix tracée dans le sable) pour géoréférencer les orthophotographies et les MNT.

Pour des raisons de sécurité, une zone de décollage et d'atterrissage est délimitée à l'aide d'un "tapis d'atterrissage" placé sur le sol. Les pilotes sont également équipés d'une chasuble de couleur vive ou fluo pour une meilleure visibilité.

---

# Chapitre 5. Analyse 4D de la granularité

---

Ce chapitre décrit les résultats issus des suivis topographiques et des prélèvements sédimentaires collectés lors des différentes campagnes de prélèvement *in situ* puis analysés par tamisage à sec. L'objectif de ce chapitre est d'analyser la distribution spatiale (*cross-shore*, *longshore* et *verticale*) et temporelle (annuelle et saisonnière) des sédiments, mais aussi la variabilité entre les sites. Comme les sites présentent des conditions géologiques et des forçages différents, l'influence de l'état de plage sur les distributions spatiales et temporelles de la granularité est aussi explorés. Plus spécifiquement, ce chapitre tente de répondre aux Questions 3, 4, 5 et 6 mentionnées dans la section 1.2, à savoir :

« **Question 3** : *A l'échelle intersite est-ce que la granularité moyenne et les pentes moyennes sont corrélées, et cette corrélation/relation varie-t-elle suivant la saison ?* »

« **Question 4** : *Est-ce que l'état de plage (dissipatif - intermédiaire - réfléchif) contrôle la distribution verticale de la granularité des sédiments ?* »

« **Question 5** : *Est-ce que la présence de corps sédimentaires contrôle la variabilité horizontale des sédiments de surface ?* »

« **Question 6** : *Quels sont les paramètres permettant d'expliquer les incertitudes des relations existantes entre granularité et pente de plage ?* »

Il est important de noter que cette étude ne repose pas sur un nombre identique de campagnes *in situ* pour chaque plage, ni sur un nombre identique d'échantillons collectés pour chaque campagne (voir Tableau 4.2). En outre, les levés topographiques réalisés par le Shom lors de toutes les campagnes sur la plage microtidale de Saint-Aygulf n'ont couvert que la partie haute et plate du profil, et n'ont donc pas couvert la cassure de pente en bas de

plage qui est directement soumise à l'action de la houle, et qui est donc représentative de la pente de plage. De ce fait, les pentes calculées pour cette plage seront montrées dans ce chapitre, mais seront exclues de l'interprétation (Figure 5.5b).

## 5.1. Comparaison intersites annuelle

### 5.1.1. Pente

Les pentes des cinq plages étudiées ont été calculées de manière optimale pour chaque campagne *in situ*, en tenant compte de la qualité des données topographiques collectées. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode décrite dans la section 4.5. Pour chaque plage, les profils de plage de chaque campagne nous ont permis de calculer une pente moyenne pour l'ensemble de la période de l'étude, soit trois ans. La valeur moyenne globale de la pente des cinq plages étudiées est répertoriée dans le Tableau 5.1. Ainsi, dans un premier temps, l'ensemble des données topographiques collectées nous permet d'avoir une vision globale du type de pente caractéristique de chaque plage.

Tableau 5.1 Pente moyennée sur toutes les campagnes *in situ* pour les cinq plages de l'étude.

	Anglet (AG)	Saint-Aygulf (SA)	Saint-Malo (SM)	Saint-Trojan- les-Bains (ST)	Truc Vert (TV)
<b>Pente générale</b> ( $\tan\beta$ )	0.0590	0.0220	0.0235	0.0226	0.0327

Le Tableau 5.1 présente les données relatives à la pente ( $\tan\beta$ ) moyennées sur l'ensemble des campagnes *in situ* pour l'ensemble des cinq plages de l'étude. La plage du Truc Vert présente une pente générale de  $\tan\beta = 0.0327$ , tandis que la plage d'Anglet affiche une pente plus marquée avec une valeur de  $\tan\beta = 0.0590$ . Les plages de Saint-Trojan-les-Bains et de Saint-Aygulf présentent des pentes similaires, respectivement  $\tan\beta = 0.0226$  et  $\tan\beta = 0.0220$ . Enfin, la plage de Saint-Malo montre une pente légèrement supérieure à celle de ces deux dernières, avec une valeur de  $\tan\beta = 0.0235$ . Ces résultats indiquent donc que trois plages présentent des pentes douces avec des valeurs similaires malgré des conditions marines différentes (« Saint-Aygulf », Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains). La plage réfléchive d'Anglet est la seule plage présentant une pente moyenne relativement raide, tandis que la plage intermédiaire du Truc Vert se situe entre les deux extrêmes.

## 5.1.2. Granularité

### a) Variabilité générale

Afin de caractériser la variabilité de la granularité entre les différentes plages étudiées (Figure 5.1), nous avons déterminé le  $D_{50}$  moyen pour chaque plage en exploitant l'ensemble des données disponibles sur les 78 données théoriques par plage (Tableau 4.2).

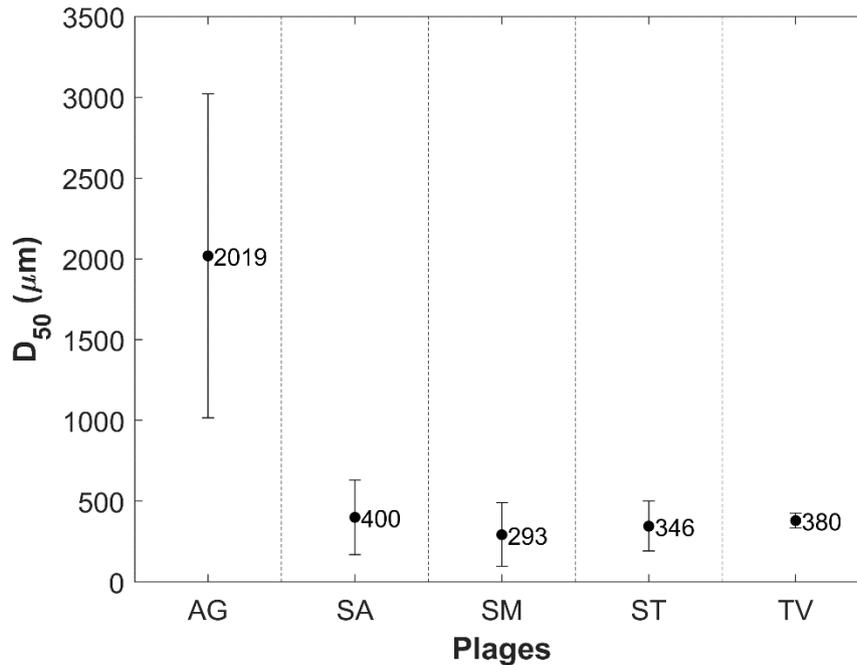


Figure 5.1 Moyennes des valeurs de  $D_{50}$  et écarts-types pour l'ensemble des échantillons de toutes les campagnes sur les cinq plages étudiées avec de gauche à droite : AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf, SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert. Les lignes verticales en pointillés séparent visuellement les différentes plages.

Les résultats présentés dans la Figure 5.1 montrent que la plage d'Anglet se caractérise par la granularité moyenne la plus grossière avec un  $D_{50} = 2019 \mu\text{m}$  ainsi que le plus fort écart type indiquant une incertitude de  $\pm 1002 \mu\text{m}$ . Ceci démontre une granularité fortement hétérogène pour la plage d'Anglet. En revanche, la plage de Saint-Malo présente le plus faible diamètre de grain médian ( $D_{50} = 293 \mu\text{m} \pm 196 \mu\text{m}$ ). Les plages de Saint-Aygulf, Saint-Trojan-les-Bains présentent des  $D_{50}$  et des écarts types comparables, avec des  $D_{50}$  respectivement de  $400 \mu\text{m} \pm 231 \mu\text{m}$  et  $346 \mu\text{m} \pm 154 \mu\text{m}$ . La plage du Truc Vert se caractérise par des sédiments de taille similaire à la plage de Saint-Aygulf avec un  $D_{50} = 380 \mu\text{m}$  ainsi que le plus faible écart type indiquant une incertitude de seulement  $\pm 46 \mu\text{m}$ . Ceci indique une granularité assez homogène pour la plage du Truc Vert.

Comme pour les pentes, la plage d'Anglet se distingue nettement des autres sites en termes de granularité moyenne, étant composée principalement de graviers selon la classification de Wentworth (1922). En revanche, bien que la plage du Truc Vert présente une pente moyenne sensiblement plus raide que celles de Saint-Aygulf, Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains, sa granularité moyenne est similaire à ces trois dernières, correspondant à des sables moyens selon la classification de Wentworth (1922).

### **b) Variabilité sur la profondeur**

Dans le but de mieux caractériser la variabilité de la granularité sur la verticale pour chaque plage, le  $D_{50}$  moyen a été calculé pour chacune des six couches en profondeur. Ainsi, pour chaque plage étudiée, nous disposons maintenant de six valeurs de  $D_{50}$  moyens, chacune correspondant à une profondeur spécifique (Figure 5.2). Les valeurs de  $D_{50}$  sont affichées au milieu de chaque couche, car elles représentent la valeur moyenne de la couche considérée. À ce stade, les résultats indiquent une augmentation de la granularité entre le premier centimètre et la couche sous-jacente. Ce phénomène est également observé, bien que de façon plus modérée, sur la plage du Truc Vert.

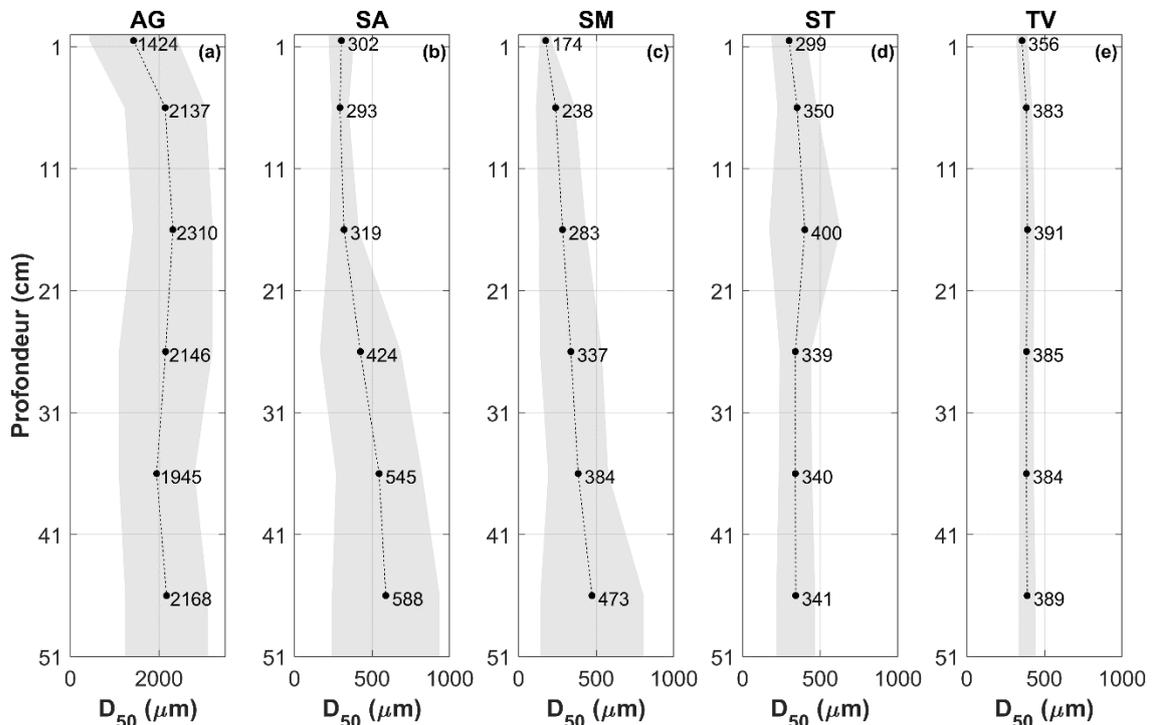


Figure 5.2  $D_{50}$  moyenné pour tous les échantillons de chaque strate pour chaque plage, avec de gauche à droite : AG: Anglet (l'axe des abscisses diffère des autres plages pour une meilleure lisibilité), SA: Saint-Aygulf, SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert. L'aire grisée représente l'écart-type autour du  $D_{50}$  moyenné.

Globalement, un point commun entre toutes les plages, certes avec des degrés différents, réside dans la présence d'un gradient vertical de granularité. En effet, les sédiments sont systématiquement plus fins proche de la surface qu'en profondeur. Si cette variabilité verticale est peu importante comme sur la plage du Truc Vert, sur d'autres sites cette variabilité est beaucoup plus marquée. C'est par exemple le cas de la plage de Saint-Malo où, en moyenne, le  $D_{50}$  est presque trois fois plus fin en surface qu'à 50 cm de profondeur. Les résultats relatifs à chaque plage sont exposés ci-dessous, accompagnés d'une explication plus approfondie.

La plage d'Anglet (Figure 5.2a) présente la plus forte granularité pour toutes les profondeurs. Pour cette plage, la granularité des sédiments de surface est généralement plus faible que celle des sédiments sous-jacents. On constate que la granularité augmente de la surface vers la profondeur, avec une moyenne de  $D_{50}$  allant de 1424  $\mu\text{m}$  pour la couche de surface (0 à 1 cm) à 2168  $\mu\text{m}$  pour la couche située entre 41 et 51 cm de profondeur. Les écarts-types sont également importants sur toute la verticale, démontrant une forte hétérogénéité des sédiments.

La granularité de la plage de Saint-Aygulf (Figure 5.2b) présente une croissance en fonction de la profondeur pour toutes les strates, avec une moyenne de  $D_{50}$  allant de 302  $\mu\text{m}$  pour la couche de surface (0 à 1 cm) à 588  $\mu\text{m}$  pour la couche comprise entre 41 et 51 cm. Cette plage présente un granoclassement croissant entre la couche de surface et les couches sous-jacentes, sauf pour la couche comprise entre 1 et 11 cm de profondeur ( $D_{50} = 293 \mu\text{m}$ ). Si la granularité en surface présente un écart-type relativement faible, cette variabilité augmente avec la profondeur, démontrant une forte hétérogénéité des sédiments sous la surface.

La plage de Saint-Malo (Figure 5.2c) présente également une augmentation de la granularité en fonction de la profondeur pour toutes les couches, avec une moyenne de  $D_{50}$  allant de 174  $\mu\text{m}$  pour la couche de surface (0 à 1 cm) à 473  $\mu\text{m}$  pour la couche située entre 41 et 51 cm de profondeur. Cette plage présente la granularité la plus faible parmi les cinq sites d'étude pour les couches situées entre la surface et une profondeur de 31 cm. Le même schéma d'écart-type est observé que pour la plage de Saint-Aygulf, où l'on constate une hétérogénéité des sédiments beaucoup plus prononcée en profondeur qu'en surface.

Pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains (Figure 5.2d) la granularité augmente en fonction de la profondeur, avec une moyenne de  $D_{50}$  allant de 299  $\mu\text{m}$  pour la couche de surface (0 à 1 cm) à 341  $\mu\text{m}$  pour la couche comprise entre 41 et 51 cm. Cependant, cette plage présente un granoclassement croissant uniquement entre la couche de surface et les couches sous-jacentes allant jusqu'à 21 cm de profondeur, le  $D_{50}$  va de 299  $\mu\text{m}$  pour la couche de surface à 400  $\mu\text{m}$  pour la couche comprise entre 21 et 31 cm. Puis, la granularité devient plus faible pour les couches sous-jacentes avec un  $D_{50}$  relativement constant (340  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) de 31 cm à 51 cm. Contrairement à Saint-Malo et Saint-Aygulf, il n'y a pas d'évolution marquée de la granularité sur la verticale.

La granularité pour la plage du Truc Vert (Figure 5.2e) augmente entre la couche de surface ( $D_{50} = 356 \mu\text{m}$ ) et la zone sous-jacente (1-11cm) avec un  $D_{50} = 383 \mu\text{m}$ , puis demeure quasi-constante avec une moyenne passant de 383 à 389  $\mu\text{m}$  pour la couche plus profonde située entre 41 et 51 cm. Cette plage présente une faible variabilité de granularité à la verticale, avec une moyenne de  $D_{50} = 380 \mu\text{m} \pm 46 \mu\text{m}$ , demeurant relativement constante. Avec un écart-type faible sur toute la verticale, cela démontre que les variations horizontales et temporelles sont également faibles.

### ***c) Variabilité sur la profondeur, par radiales***

Afin de mieux caractériser la variabilité de la granularité verticale pour chaque plage, en tenant compte de la radiale concernée, le  $D_{50}$  moyen a été calculé pour chacune des six strates et des trois radiales (*cross-shore*, *longshore* haut de plage et *longshore* bas de plage). De cette manière, pour chaque plage examinée, nous disposons désormais de six valeurs de  $D_{50}$  moyennes, chacune correspondant à une profondeur spécifique au sein de chacune des trois radiales étudiées.

Pour la plage d'Anglet (Figure 5.3a-c), le comportement est assez homogène sur les trois radiales (*cross-shore*, *longshore* haut de plage, *longshore* bas de plage), avec une augmentation du diamètre en fonction de la profondeur, comme déjà illustré à la Figure 5.2. Les variations entre les profondeurs et les radiales sont modérées. La radiale *longshore* en bas de plage présente tout de même des valeurs de  $D_{50}$  plus élevées que les deux autres radiales.

Pour la plage de Saint-Aygulf (Figure 5.3d,e) la granularité présente une tendance nette à être plus grossière en profondeur pour les deux radiales étudiées : *cross-shore* et *longshore* bas de plage, mais les variations entre radiales sont significatives, avec une croissance et une variabilité en fonction de la profondeur beaucoup plus marquée selon l'axe *cross-shore* que selon l'axe *longshore*.

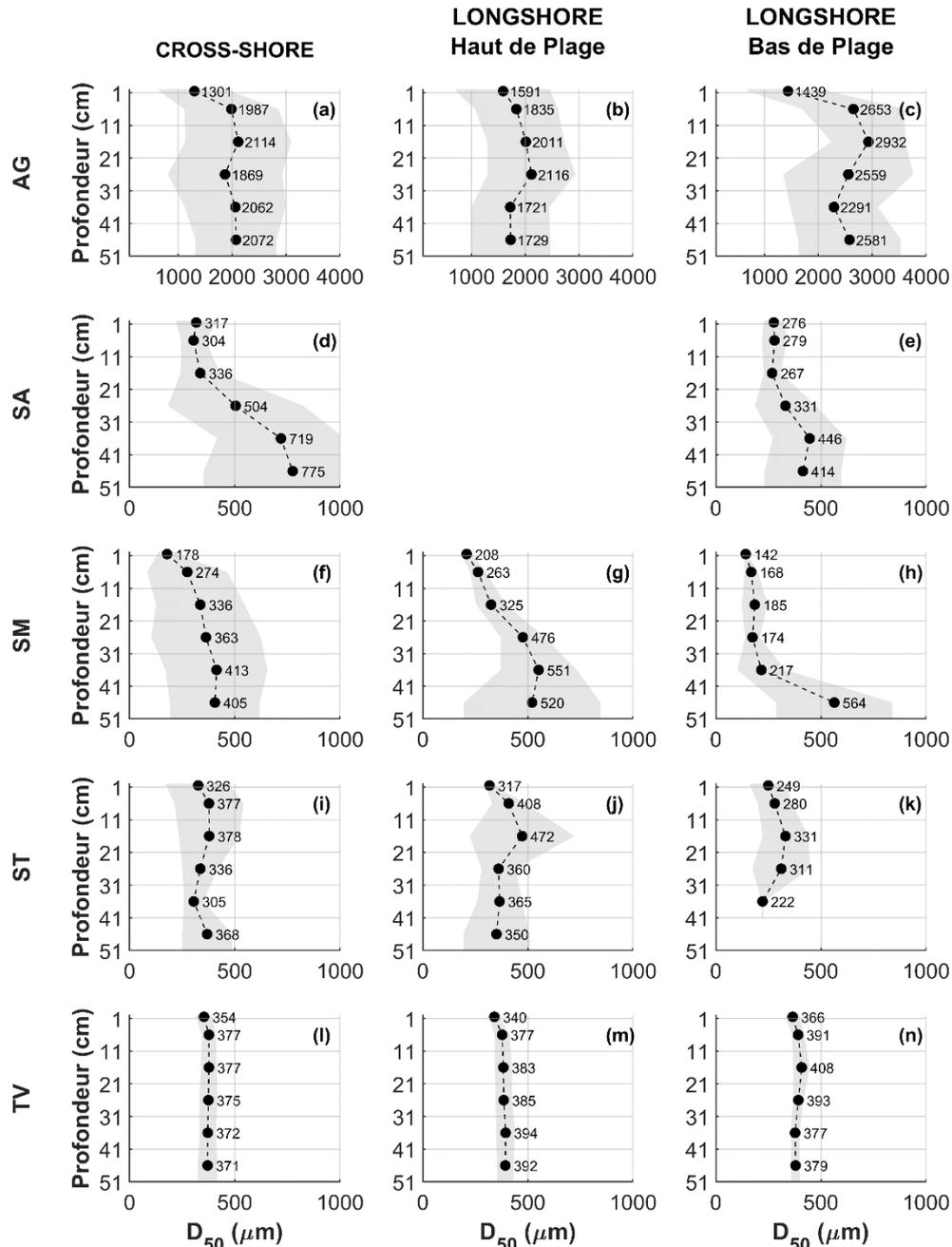


Figure 5.3  $D_{50}$  moyenné par strates en fonction des trois radiales (*cross-shore*, *longshore* haut de plage, *longshore* bas de plage) pour tous les échantillons des cinq plages étudiées (AG: Anglet (L'axe des abscisses diffère des autres axes en termes d'unités), SA: Saint-Aygulf, SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert). L'aire grisée représente l'écart-type autour du  $D_{50}$  moyenné. A noter : la plage de SA ne possède pas de radiale *longshore* en haut de plage.

La granularité de la plage de Saint-Malo (Figure 5.3f-h) indique également une tendance à être plus grossière en profondeur pour les trois radiales étudiées (*cross-shore*, *longshore* haut de plage, *longshore* bas de plage). Les variations entre les strates sont plus marquées dans la radiale *longshore* haut de plage, tandis que les radiales *cross-shore* et *longshore* bas de plage présentent des variations plus homogènes.

Concernant la plage de Saint-Trojan-les-Bains (Figure 5.3i-k), la granularité montre une légère tendance à être plus grossière en profondeur pour les radiales *cross-shore* et *longshore* de bas de plage (Figure 5.3i,j). Les variations entre les strates sont moins prononcées par rapport aux autres plages, indiquant une distribution granulométrique plus homogène en fonction de la profondeur.

La plage du Truc Vert présente une granularité légèrement plus grossière en profondeur qu'en surface pour les trois radiales étudiées (*cross-shore*, *longshore* haut de plage, *longshore* bas de plage). Les variations modérées entre les strates témoignent d'une distribution granulométrique relativement homogène en fonction de la profondeur, soulignant la stabilité et la cohérence des caractéristiques sédimentaires de cette plage.

Globalement, cette analyse par radiale indique que les grandes tendances montrées en moyenne par plage (Figure 5.2) se retrouvent sensiblement sur toutes les radiales. Cela indique donc que la morphologie de la plage, la présence de barre ou encore le fait de se situer en haut ou bas d'estran n'affecte pas significativement le gradient vertical de la granularité sur une plage donnée.

### **5.1.3. Relation entre pente et granularité**

La Figure 5.4 illustre les résultats de l'étude comparative de la granularité moyennée et de la pente moyennée sur toutes les campagnes pour les cinq plages de l'étude, en excluant la plage de Saint-Aygulf. Une tendance globale est visible avec une relation entre pente de plage et granularité. Les pentes plus fortes étant associées aux granularités plus élevées, même si le nombre restreint de données ne permet pas de calculer des corrélations statistiquement robustes.

Si cette relation semble claire pour Anglet et Truc Vert et le groupe de points Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains, le fait que Saint-Malo présente une pente plus forte que Saint-Trojan-les-Bains alors que cette dernière présente un sédiment sensiblement plus fin

montre que d'autres paramètres entrent en jeu pour déterminer le lien entre la pente de plage et la granularité moyenne. De plus, le diamètre médian peut potentiellement dissimuler les fluctuations d'hétérogénéité à l'intérieur d'un même échantillon sédimentaire.

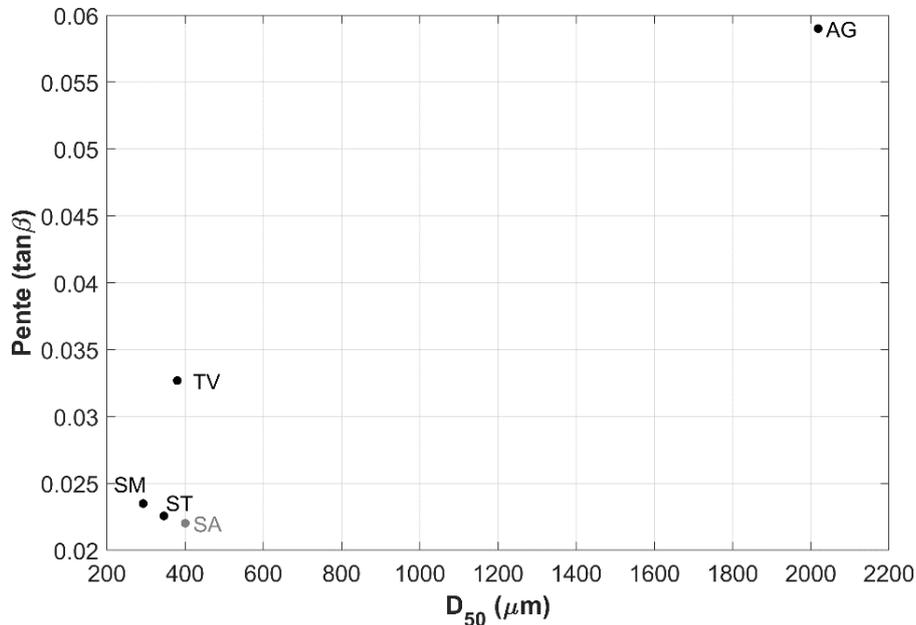


Figure 5.4 Pente moyennée en fonction du  $D_{50}$  moyenné, sur toutes les campagnes pour les cinq plages étudiées AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf (en gris car la pente n'est pas représentative de la réalité et doit être interprétée avec précaution), SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert.

## 5.2. Variabilité intrasite saisonnière

### 5.2.1. Pente

La Figure 5.5 illustre les profils de plage et les pentes moyennes pour toutes les campagnes menées sur les cinq plages étudiées. Chaque sous-graphique représente une plage spécifique. L'analyse de ces profils et pentes moyennes permet d'appréhender plus précisément les caractéristiques topographiques et morphologiques propres à chaque plage, tout en facilitant leur comparaison. Globalement, la Figure 5.5 montre des typologies de profil contrastés. Si certaines plages montrent une variabilité saisonnière faible et des profils sans réel motifs (Saint-Aygulf, Saint-Trojan-les-Bains et Saint-Malo), Truc Vert et Anglet montrent une variabilité plus marquée. Par exemple sur la plage du Truc Vert, comme montré sur le modèle d'équilibre (Chapitre 3. ), une dynamique saisonnière associée à la

formation et à la disparition de la berme estivale est observée, et qui est plus subtile sur la plage de Saint-Trojan-les-Bains.

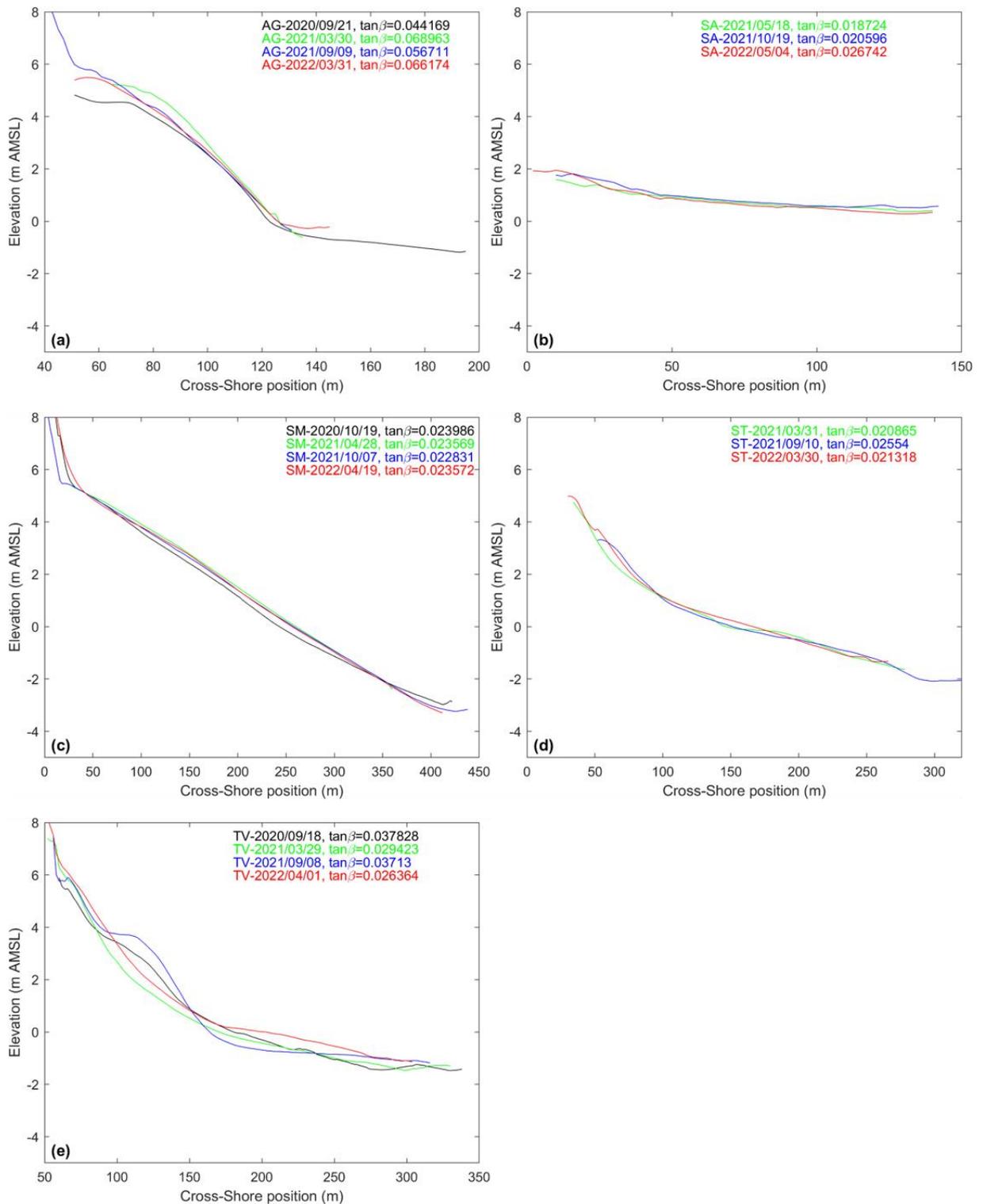


Figure 5.5 Profils de plage et pente moyennée de toutes les campagnes pour les cinq plages de l'étude. a. Anglet (AG), b. Saint-Aygulf (SA), c. Saint-Malo (SM), d. Saint-Trojan-les-Bains (ST), e. Truc Vert (TV). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaa/mm/jj (où aaaa représente l'année, mm le mois et jj le jour).

Par contre, pour Anglet si le haut de plage ne présente pas de dynamique de berme, la présence/absence d'une barre intertidale en bas de plage peut être observée. C'est un point commun à toutes les plages à marée étudiées ici, mise à part la plage macrotidale de Saint-Malo qui reste très linéaire. Sur ces plages, le bas de plage est systématiquement moins pentu que le haut de plage, ce qui est particulièrement vrai lorsque qu'on se déplace vers les plages les plus réfléchives (e.g., Anglet). Ceci est en accord avec le modèle conceptuel de Masselink et Short (1993) pour les plages à marée (Figure 2.2). Pour Anglet, même si le niveau d'eau ne permettait pas de mesurer la zone basse de la plage d'Anglet, le plateau en bas de plage mesuré en septembre 2020 était visible sous la surface de l'eau aux autres dates.

Le Tableau 5.2 illustre les valeurs moyennes de la pente générale ( $\tan\beta$ ) pour les cinq plages examinées, à la fois en sortie d'été et en sortie d'hiver. Les résultats détaillés ci-après révèlent que, mis à part Saint-Malo, qui ne montre pas de variation saisonnière et la plage de « Saint-Aygulf » et d'Anglet, qui ne suivent pas cette tendance, les pentes des plages sont systématiquement plus prononcées en sortie d'été qu'en sortie d'hiver (TV et ST). Cette observation est en accord avec les travaux de modélisation présentés au Chapitre 3. et soutient l'hypothèse générale selon laquelle la pente de plage diminue (i.e., elle devient plus dissipative) en présence de vagues plus énergétiques en hiver. Les plages d'Anglet et « Saint-Aygulf » présentent des caractéristiques différentes en termes de pentes au fil des saisons. Ces deux plages réfléchives présentent des pentes plus marquées en fin d'été et plus douces en fin d'hiver.

Tableau 5.2 Pente moyennée par périodes (sortie d'hiver et sortie d'été) pour les cinq plages de l'étude : AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf (en gris car la pente n'est pas représentative de la réalité et doit être interprétée avec précaution), SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert.

	Anglet (AG)	Saint-Aygulf (SA)	Saint-Malo (SM)	Saint-Trojan-les- Bains (ST)	Truc Vert (TV)
<b>Pente générale Sortie d'Eté (<math>\tan\beta</math>)</b>	0.0504	0.0206	0.0234	0.0255	0.0375
<b>Pente générale Sortie d'Hiver (<math>\tan\beta</math>)</b>	0.0676	0.0228	0.0236	0.0211	0.0279

En conclusion, les résultats présentés dans le Tableau 5.2 mettent en évidence que la plage de Saint-Malo présente une pente constante sans variation saisonnière, caractéristique des plages dissipatives. Les plages du Truc Vert et de Saint-Trojan-les-Bains présentent des

pententes plus prononcées en été qu'en hiver. Cela est en accord avec le fait que ces plages sont exposées à des houles hivernales intenses, puisque que la pente diminue avec l'énergie des vagues. En revanche, la plage d'Anglet présente des pententes plus prononcées en fin d'hiver. Il est intéressant de noter que la plage d'Anglet présente une configuration particulière, connue sous le nom de "plage de poche" (ou *pocket beach* en anglais), avec la présence d'un récif au large qui peut exercer un contrôle sur la morphologie. D'autre part, elle peut être influencée par les activités humaines (e.g., rechargement, reprofilage, etc.).

## 5.2.2. Granularité

### a) Variabilité générale

Les résultats présentés Figure 5.6 illustrent les valeurs moyennes du  $D_{50}$  pour chaque campagne *in situ* réalisée sur les cinq plages, calculées à partir de l'ensemble des échantillons collectés. Ces résultats mettent en évidence les variations du  $D_{50}$  moyen au sein de chaque campagne et entre les différentes plages étudiées, pour montrer l'effet des saisons sur la granularité des sédiments. Globalement, les résultats montrent que pour chaque plage le sédiment est plus grossier en sortie d'été qu'en sortie d'hiver (pour les plages de Saint-Malo, Saint-Trojan-les-Bains et Truc Vert), tandis que pour les plages d'Anglet et de Saint-Aygulf, c'est l'inverse. Le détail par plage est donné ci-dessous.

Pour la plage d'Anglet (AG), les  $D_{50}$  moyens varient entre  $1793 \mu\text{m} \pm 1023 \mu\text{m}$  et  $2415 \mu\text{m} \pm 823 \mu\text{m}$ , avec les valeurs les plus élevées en sortie d'hiver ( $D_{50} = 2104 \mu\text{m}$ ) et les plus basses en sortie d'été ( $D_{50} = 1933 \mu\text{m}$ ). La plage de Saint-Aygulf (SA) présente des  $D_{50}$  moyens compris entre  $366 \mu\text{m} \pm 190 \mu\text{m}$  et  $434 \mu\text{m} \pm 291 \mu\text{m}$ , avec une légère augmentation en sortie d'hiver ( $D_{50} = 417 \mu\text{m}$ ) par rapport à la sortie d'été ( $D_{50} = 366 \mu\text{m}$ ). Les résultats pour la plage de Saint-Malo (SM) indiquent des  $D_{50}$  moyens oscillant entre  $236 \mu\text{m} \pm 99 \mu\text{m}$  et  $324 \mu\text{m} \pm 243 \mu\text{m}$ , avec une différence entre la sortie d'hiver ( $D_{50} = 524 \mu\text{m}$ ) et la sortie d'été ( $D_{50} = 649 \mu\text{m}$ ). Enfin, pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains (ST) et du Truc Vert (TV), les  $D_{50}$  moyens se situent respectivement entre  $320 \mu\text{m} \pm 106 \mu\text{m}$  et  $386 \mu\text{m} \pm 256 \mu\text{m}$ , et  $355 \mu\text{m} \pm 41 \mu\text{m}$  et  $405 \mu\text{m} \pm 52 \mu\text{m}$ . Pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains, le  $D_{50}$  en sortie d'hiver est de  $325 \mu\text{m}$  et de  $386 \mu\text{m}$  et en sortie d'été. Le  $D_{50}$  moyen pour la plage du Truc Vert est également inférieur en sortie d'hiver ( $D_{50} = 365 \mu\text{m}$ ) par rapport à la sortie d'été ( $D_{50} = 395 \mu\text{m}$ ).

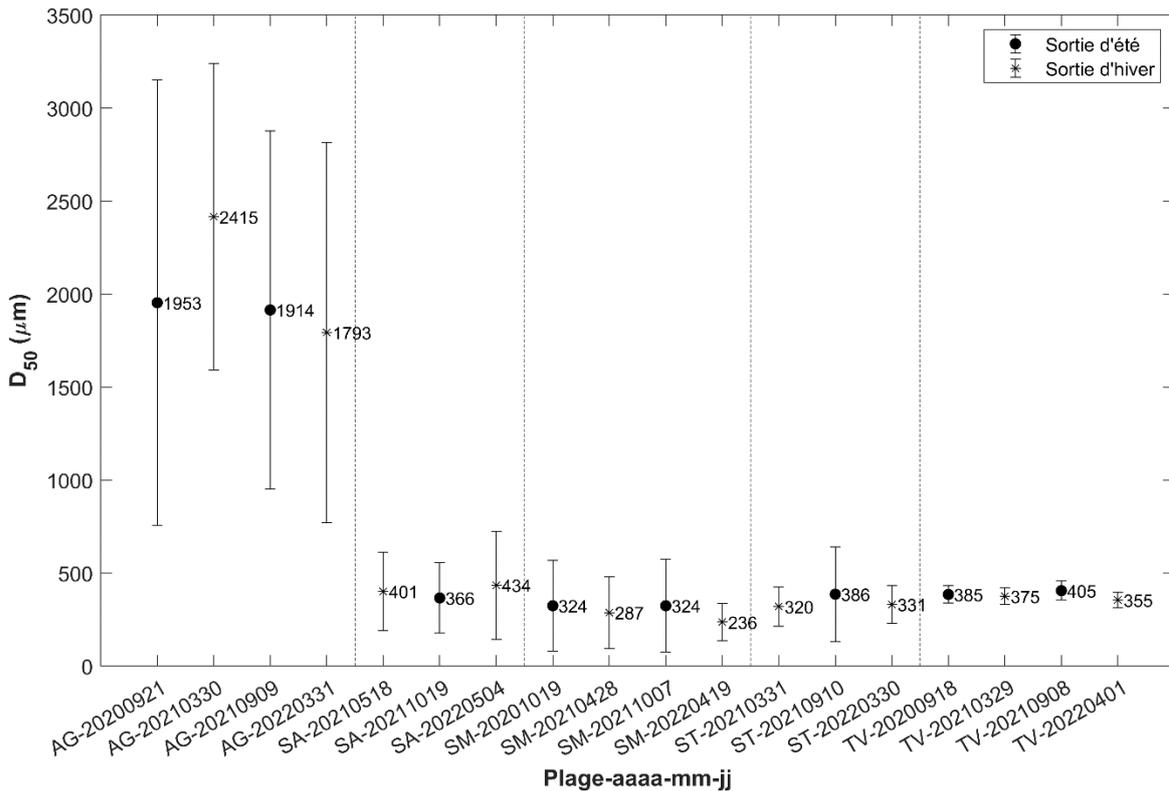


Figure 5.6 Moyennes et écarts-types des valeurs de  $D_{50}$  pour chaque campagne pour l'ensemble des échantillons, sur les cinq plages étudiées (AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf, SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV : Truc Vert). Les lignes verticales en pointillés séparent visuellement les différentes plages. Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaa-mm-jj.

### b) Variabilité générale, par radiales

L'étude présentée dans la Figure 5.7.a,b, examine la valeur du diamètre médian ( $D_{50}$ ) moyenné suivant les trois radiales (*cross-shore*, *longshore* en haut de plage et *longshore* en bas de plage) pour les différentes plages et dates. Pour rappel, la plage de Saint-Aygulf ne possède pas de données pour la radiale *longshore* en haut de plage. La Figure 5.7a offre une représentation d'Anglet (AG) en relation avec les quatre autres plages étudiées, à savoir Truc Vert (TV), Saint-Aygulf (SA), Saint-Malo (SM) et Saint-Trojan-les-Bains (ST). D'autre part, la Figure 5.7b propose un aperçu concentré sur les quatre plages précédemment citées (TV, SA, SM et ST), facilitant ainsi la compréhension de leurs spécificités.

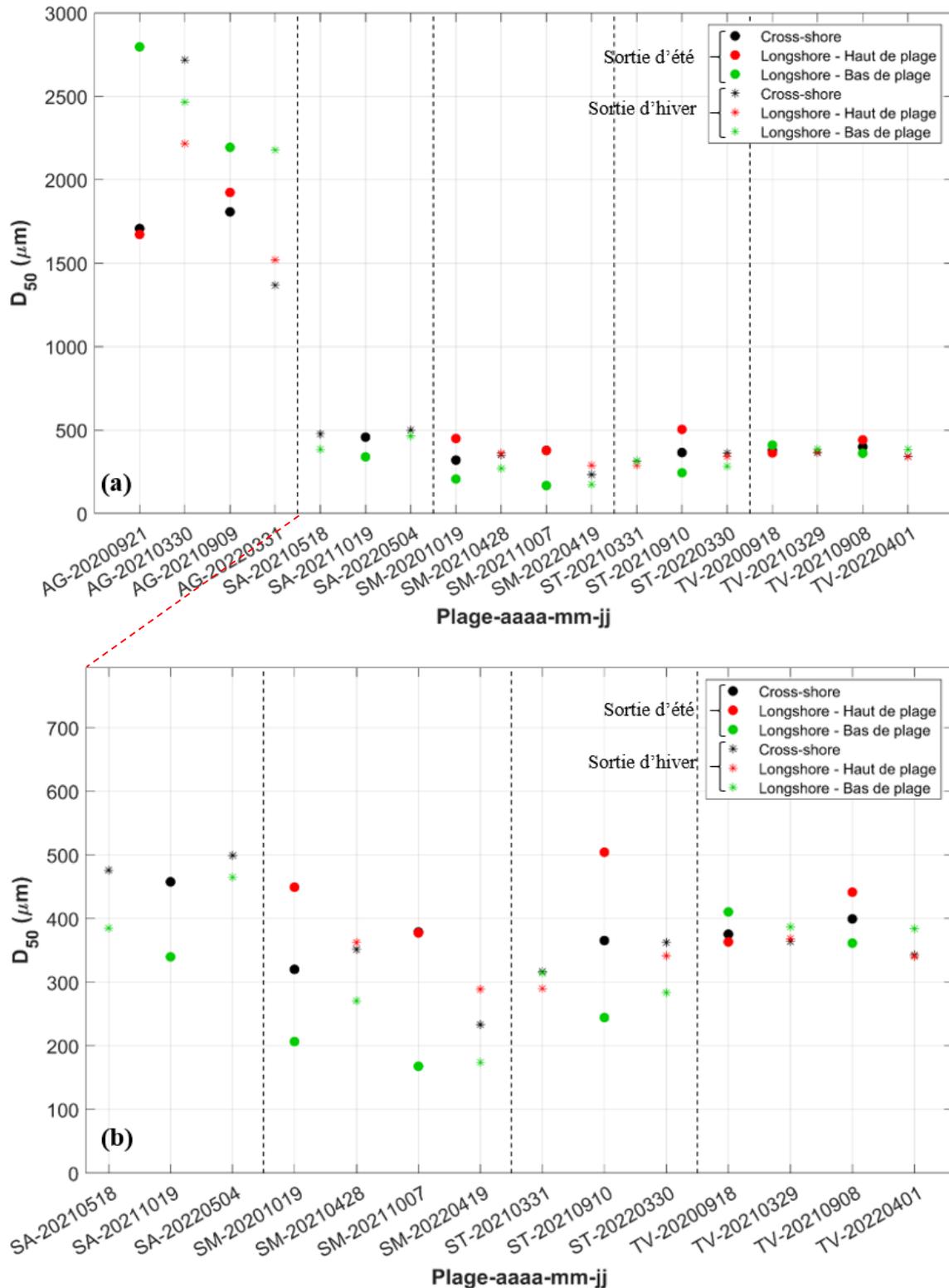


Figure 5.7 Moyennes et écarts-types des valeurs de  $D_{50}$  pour chaque campagne pour l'ensemble des échantillons, sur les cinq plages étudiées pour toutes les radiales (Cross-shore, Longshore en haut de plage et Longshore en bas de plage). Les lignes verticales en pointillés séparent visuellement les différentes plages (AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf, SM: Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV : Truc Vert). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj, a. Toutes les plages de l'étude, b. Zoom sur les plages : SA, SM, ST et TV.

Les valeurs de  $D_{50}$  de la radiale *longshore* bas de plage (en vert sur la Figure 5.7) sont plus élevés par rapport à la radiale *longshore* située en haut de plage (en rouge) pour les plages d'Anglet et Truc Vert. En revanche, pour les trois autres plages (SA, ST et SM), on observe l'inverse (Figure 5.7b.). Ces résultats confirment la tendance précédemment observée sur la Figure 5.3.

En sortie d'hiver, les 'clusters' de points sont plus resserrés, indiquant une plus faible variabilité entre les trois radiales qu'en fin d'été. La plage du Truc Vert se distingue par les plus faibles variabilités spatiales et temporelles du  $D_{50}$ , bien qu'elle présente une forte variabilité morphologique.

La plage d'Anglet présente des variations saisonnières similaires pour les radiales cross-shore et *longshore* en haut de plage, mais une tendance globale vers une diminution de la taille de grain plutôt qu'une variation saisonnière pour la radiale *longshore* en bas de plage (Figure 5.7a).

Les plages de Saint-Malo, Saint-Trojan-les-Bains et du Truc Vert (Figure 5.7b) montrent des fluctuations du  $D_{50}$  moyen pour la radiale *cross-shore* et des radiales *longshore* en haut et en bas de plage en fonction de la saison. Il est intéressant de noter que les variations saisonnières de la taille du grain sont opposées pour les radiales *longshore* en haut et en bas de plage, avec généralement une augmentation de la taille du grain après l'été et une diminution après l'hiver en haut de plage (en rouge sur la figure), et le comportement inverse est observé en bas de plage (en vert sur la figure).

Pour conclure, cette étude met en évidence l'hétérogénéité spatiale et saisonnière des valeurs de  $D_{50}$  en fonction des radiales étudiées pour les différentes plages et dates considérées. Elle souligne l'importance de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle de la taille des grains des sédiments pour améliorer les biais des modèles de dynamique côtière et mieux comprendre l'évolution des plages.

### **c) Variabilité sur la profondeur**

- **Plage d'Anglet (AG)**

Les graphiques de la Figure 5.8 montrent une variabilité des valeurs de  $D_{50}$  importante en fonction de la profondeur et de la date de prélèvement pour la plage d'Anglet. D'une manière générale, les valeurs de  $D_{50}$  sont plus élevées dans les strates les plus profondes,

entre 11 cm et 51 cm de profondeur, que pour les moins profondes. Les plus faibles granularités sont observées pour la strate de surface (e.g.,  $D_{50} = 944 \mu\text{m}$ , en mars 2022, Figure 5.8d) ce qui est en accord avec les valeurs moyennes présentées en Figure 5.2. Si l'on exclut la couche de surface, l'évolution temporelle montre deux patterns différents caractérisant l'après hiver et l'après été. Le  $D_{50}$  moyen de la couche la plus profonde [41,51] cm varie considérablement en fonction de la date de prélèvement, allant de 2736  $\mu\text{m}$  en septembre 2020 (Figure 5.8a) , à 1419  $\mu\text{m}$  en mars 2022 (Figure 5.8d). La granularité de la strate [11,21] cm montre également une variabilité importante, allant de 2053  $\mu\text{m}$  en septembre 2020 (Figure 5.8a) à 2711  $\mu\text{m}$  en mars 2021 (Figure 5.8b). Ces résultats montrent que la totalité des 51 premiers centimètres de sédiments à la plage d'Anglet sont mobiles sur une période d'un an, selon le profil considéré.

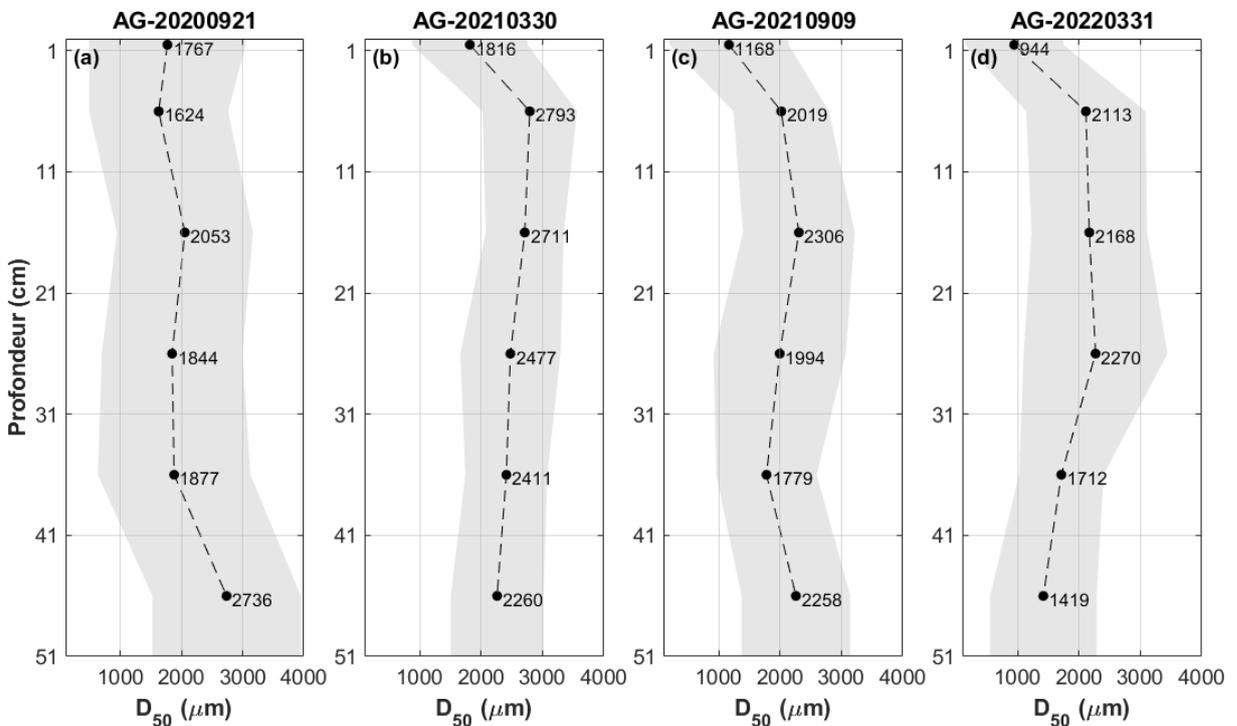


Figure 5.8  $D_{50}$  moyenné par strates pour les quatre campagnes in situ, pour tous les échantillons de la plage d'Anglet (AG). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

- **Plage de Saint-Aygulf (SA)**

La Figure 5.9 montre que le  $D_{50}$  moyen dans la strate [41,51] cm a considérablement varié en fonction de la date de prélèvement, allant de 608  $\mu\text{m}$  en mai 2021 (Figure 5.9a) à 713  $\mu\text{m}$  en mai 2022 (Figure 5.9c) en passant par 443  $\mu\text{m}$  en octobre 2021 (Figure 5.9b). Le

$D_{50}$  moyen de la strate [11,21] cm a également montré une variation importante, allant de 304  $\mu\text{m}$  en mai 2021 (Figure 5.9a) à 328  $\mu\text{m}$  en mai 2022 (Figure 5.9c). En général, la granularité a tendance à augmenter avec la profondeur (i.e., un grano-classement croissant de la surface vers les couches sous-jacentes), avec les valeurs les plus élevées dans les strates les plus profondes ([31,41] cm et [41,51] cm). Aussi, l'écart-type est plus important en profondeur qu'en surface, et cela quel que soit la saison. Selon la Figure 5.9, il n'existe pas à Saint Aygulf de pattern de profondeur caractéristique de la saison.

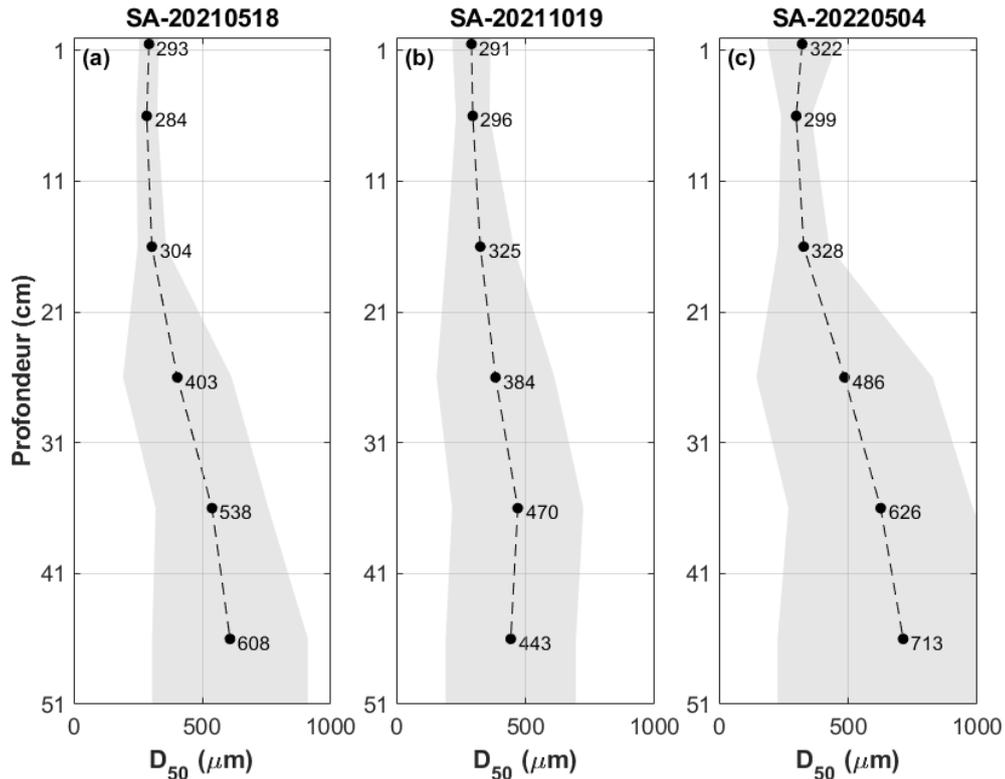


Figure 5.9  $D_{50}$  moyenné par strates pour les trois campagnes in situ, pour tous les échantillons de la plage de Saint-Aygulf (SA). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

- **Plage de Saint-Malo (SM)**

Les résultats de cette étude Figure 5.10 montrent que pour la strate de surface [0,1] cm, le  $D_{50}$  moyen passe de 188  $\mu\text{m}$  en octobre 2020 (Figure 5.10a) à 157  $\mu\text{m}$  en octobre 2021 (Figure 5.10c). La valeur de  $D_{50}$  dans cette strate a diminué de 31  $\mu\text{m}$  sur cette période. Pour la strate [1,11] cm, le  $D_{50}$  est stable, il est passé de 266  $\mu\text{m}$  en octobre 2020 (Figure 5.10a) à 263  $\mu\text{m}$  en octobre 2021 (Figure 5.10c). Les autres strates ont révélé une tendance fluctuante, oscillant entre augmentation et stagnation de la taille moyenne des particules de sable. Pour les quatre campagnes in situ pour cette plage, une tendance de classification croissante de la

granularité peut être observée de la surface vers les couches sous-jacentes, à l'exception des strates [41,51] cm en octobre 2021 (Figure 5.10c) et [31,41] cm en avril 2022 (Figure 5.10d). Comme pour Saint-Aygulf, l'écart-type augmente globalement pour les couches les plus profondes, tandis qu'il est systématiquement faible en surface. Comme nous l'avons observé précédemment à Saint-Aygulf, il en est de même pour le site de Saint-Malo, où aucune variation saisonnière marquée n'est constatée.

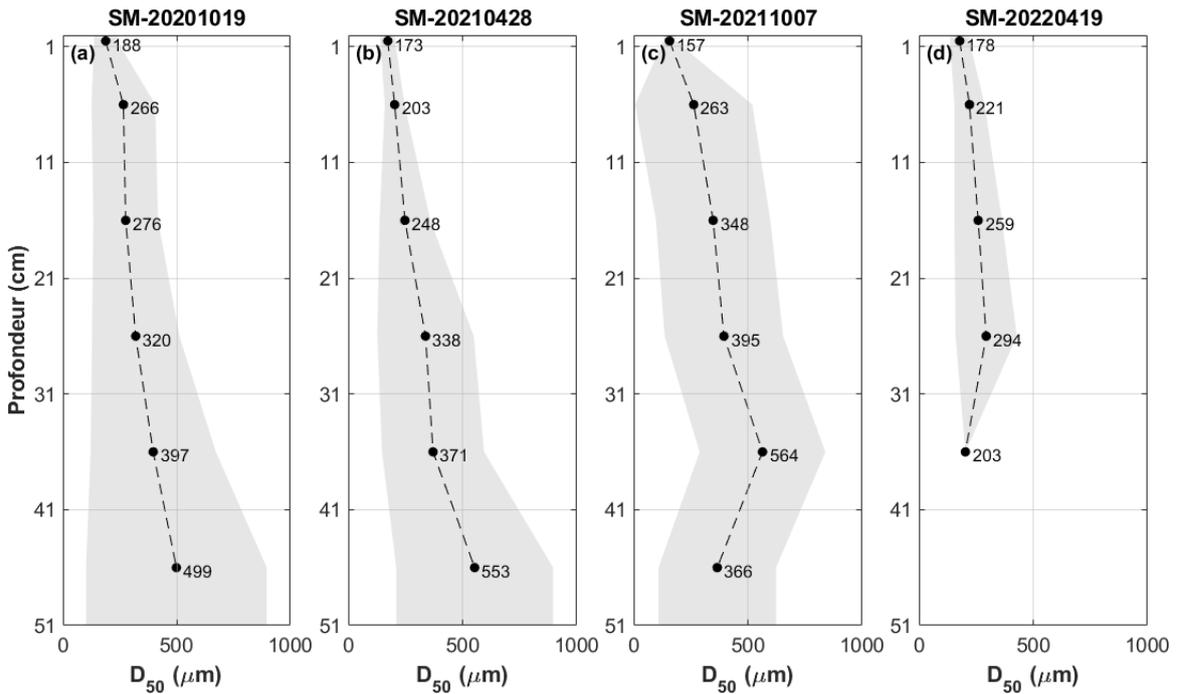


Figure 5.10  $D_{50}$  moyenné par strates pour les quatre campagnes in situ, pour tous les échantillons de la plage de Saint-Malo (SM). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

- **Plage de Saint-Trojan-les-Bains (ST)**

La Figure 5.11 confirme que les strates situées en profondeur ont tendance à avoir une granularité plus forte, avec des valeurs de  $D_{50}$  allant jusqu'à 405  $\mu\text{m}$  pour la strate [41,51] cm lors de la campagne de septembre 2021 (Figure 5.11b). Les résultats de la campagne de septembre 2021 (Figure 5.11b) montrent également une augmentation significative de la taille des grains de sable pour toutes les strates, en particulier pour les strates [11,21] cm et [41,51] cm, avec des valeurs de  $D_{50}$  respectives de 494  $\mu\text{m}$  et 405  $\mu\text{m}$ . Les résultats de la campagne de mars 2022 (Figure 5.11c) indiquent une diminution de la taille des grains pour les strates de surface (de 0 à 11 cm), tandis que les strates plus profondes ont une granularité

plus forte, avec une valeur de  $D_{50}$  de 399  $\mu\text{m}$  pour la strate [31,41] cm. Contrairement à la plage d'Anglet, aucun motif saisonnier marquant ne ressort sur cette plage.

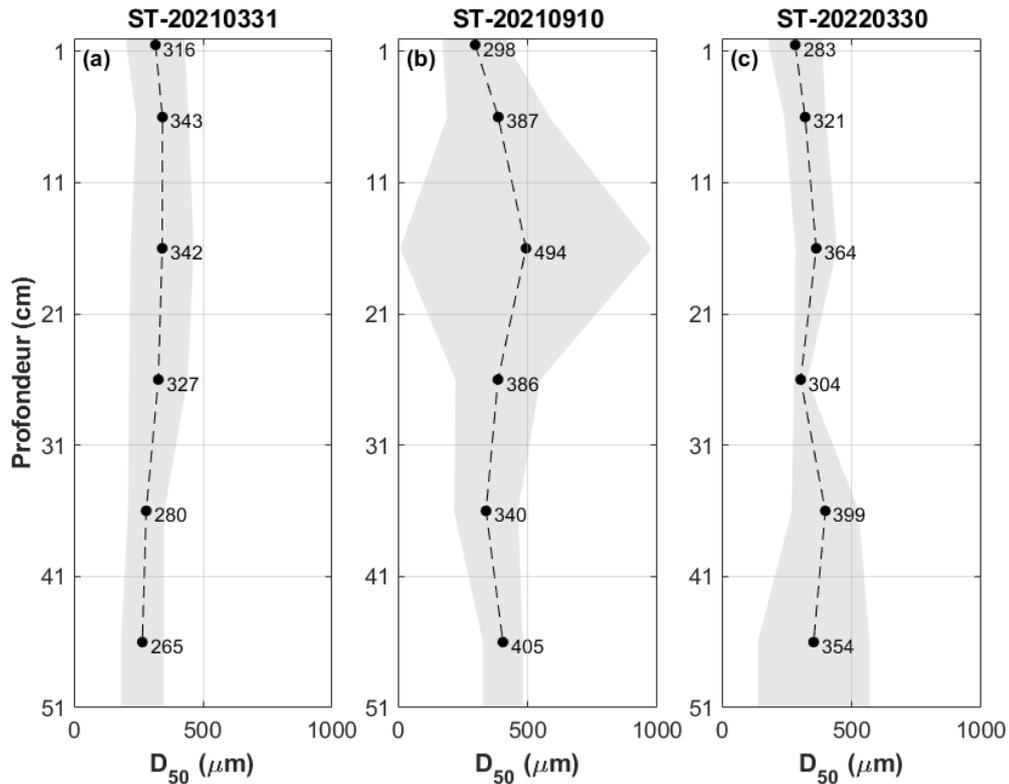


Figure 5.11  $D_{50}$  moyenné par strates pour les trois campagnes *in situ*, pour tous les échantillons de la plage de Saint-Trojan-les-Bains (ST). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

- **Plage du Truc Vert (TV)**

L'étude des quatre campagnes *in situ* de la plage du Truc Vert (Figure 5.12) confirme que les strates les plus profondes ont tendance à avoir une granularité plus grossière, avec une valeur maximale de  $D_{50}$  de 436  $\mu\text{m}$  pour la strate [41,51] cm lors de la campagne septembre 2021 (Figure 5.12c). Les résultats de la campagne de septembre 2021 ont également montré une augmentation significative de la taille des grains dans toutes les strates par rapport aux autres campagnes, avec une augmentation maximale de 31  $\mu\text{m}$  pour la strate [31,41] cm. En revanche, les résultats de la campagne d'avril 2022 (Figure 5.12d) ont montré une diminution de la granularité pour les strates de surface, avec une valeur minimale de  $D_{50}$  de 327  $\mu\text{m}$  pour la strate [0,1] cm. Toutefois, et comme pour le site de Saint-Trojan, il est difficile de conclure sur la présence d'un motif saisonnier.

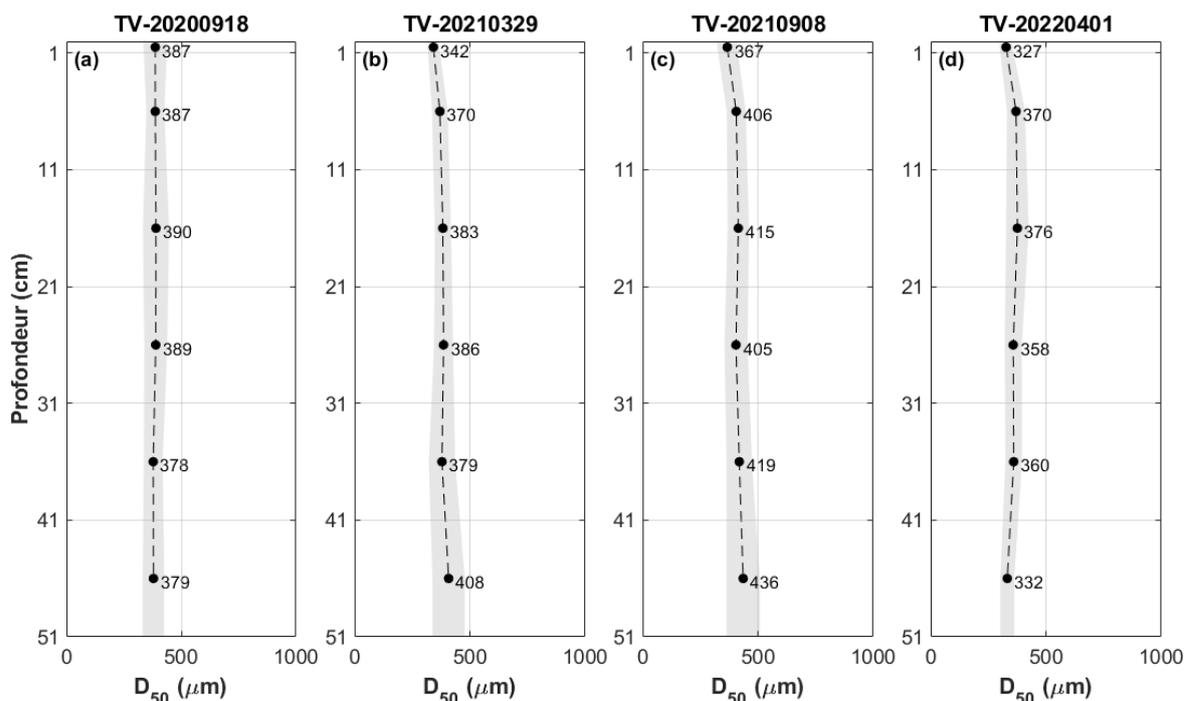


Figure 5.12  $D_{50}$  moyenné par strates pour les trois campagnes *in situ*, pour tous les échantillons de la plage du Truc Vert (TV). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

#### d) Variabilité sur la profondeur, par radiales

- Plage d'Anglet (AG)

Les résultats illustrés dans la Figure 5.13 indiquent que la granularité des sédiments a une répartition très hétérogène spatialement, avec une forte variabilité sur la verticale pour les trois radiales étudiées (la radiale *cross-shore* et les deux radiales *longshore*) et temporellement.

Il est difficile de faire ressortir des tendances pour cette plage. Toutefois, on peut observer une tendance générale indiquant que les valeurs moyennes de  $D_{50}$  sur la verticale sont plus faibles pour les sédiments situés le long de la radiale *longshore* en haut de plage, tandis qu'elles sont plus grossières sur la radiale *longshore* en bas de plage.

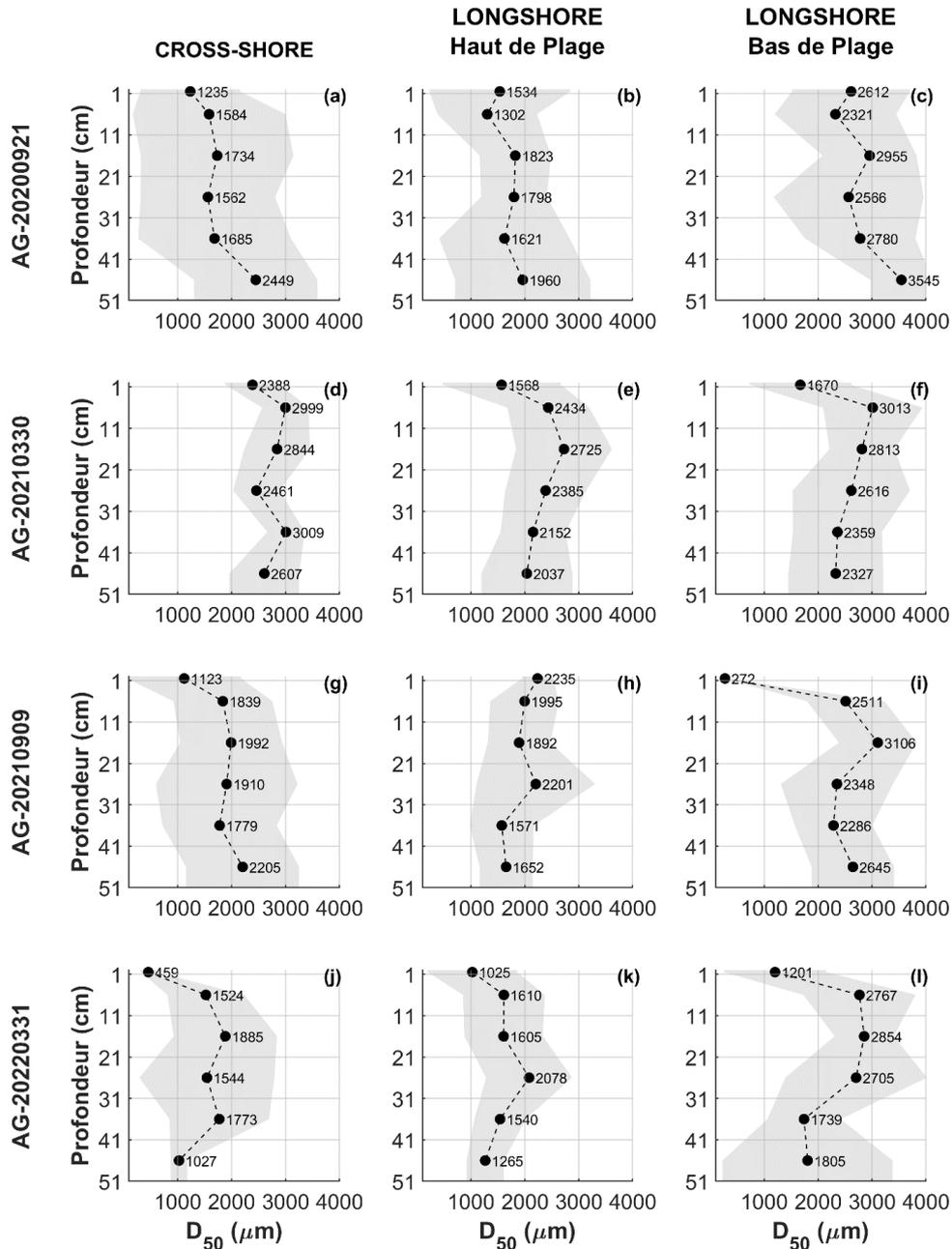


Figure 5.13  $D_{50}$  moyenné par strates pour chacune des 4 campagnes in situ, pour tous les échantillons de la plage d'Anglet (AG). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage- aaaammjj.

- **Plage de Saint-Malo (SM)**

Les résultats exposés dans la Figure 5.14 indiquent que la granularité des sédiments affiche une variabilité verticale pour la radiale cross-shore. En revanche, cette variabilité est moins prononcée le long de la radiale *longshore* en haut de plage et très faible pour celle située en bas de plage. Sur les deux radiales *longshore*, on observe également une tendance à présenter une variabilité réduite du  $D_{50}$  en surface par rapport à celle en profondeur.

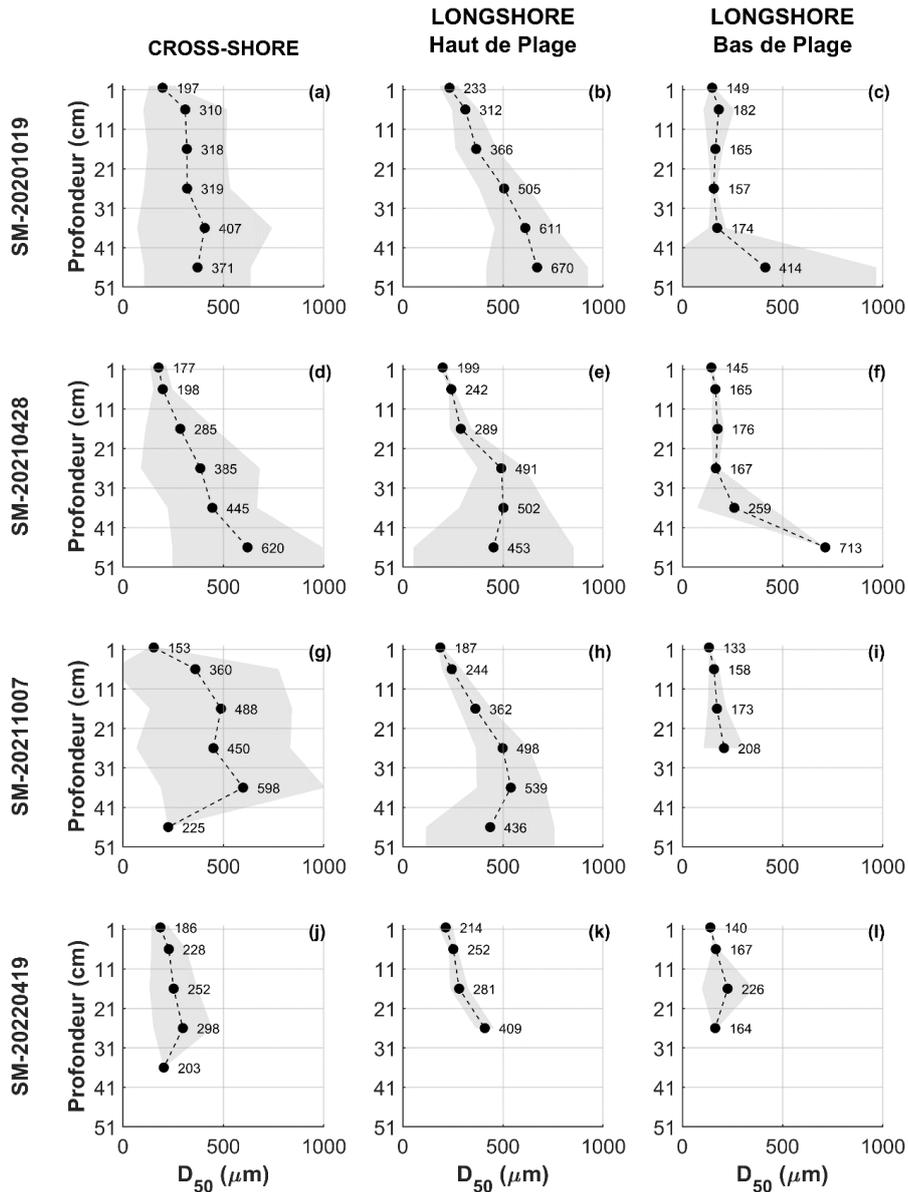


Figure 5.14  $D_{50}$  moyenné par strates pour chacune des 4 campagnes *in situ*, pour tous les échantillons de la plage de Saint-Malo (SM). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage- aaaammjj.

Pour cette plage, une tendance générale se confirme, indiquant que les valeurs moyennes de  $D_{50}$  sur la verticale sont plus faibles pour les sédiments situés le long de la radiale *longshore* en bas de plage, alors qu'elles deviennent plus grossières le long de la radiale *longshore* en haut de plage. Sur les trois radiales étudiées, il est clairement observé que les sédiments de surface sont plus fins que ceux des couches sous-jacentes. Autrement dit, un granoclasement croissant est visible pour ces trois radiales et pour chaque campagne *in situ* réalisée.

- **Plage du Truc Vert (TV)**

Les résultats exposés dans la Figure 5.15 confirment que la granularité des sédiments affiche une très faible variabilité sur la verticale pour toutes les radiales et toutes les campagnes réalisées sur la plage du Truc Vert. En revanche, cette variabilité est légèrement moins prononcée le long de la radiale *longshore* en bas de plage. L'étude des trois radiales, montre que les sédiments de surface sont légèrement plus fins que ceux des couches sous-jacentes. De plus, les valeurs moyennes de  $D_{50}$  sont plus grossières le long de la radiale *longshore* en bas de plage comparées à celles le long de la radiale *longshore* en haut de plage.

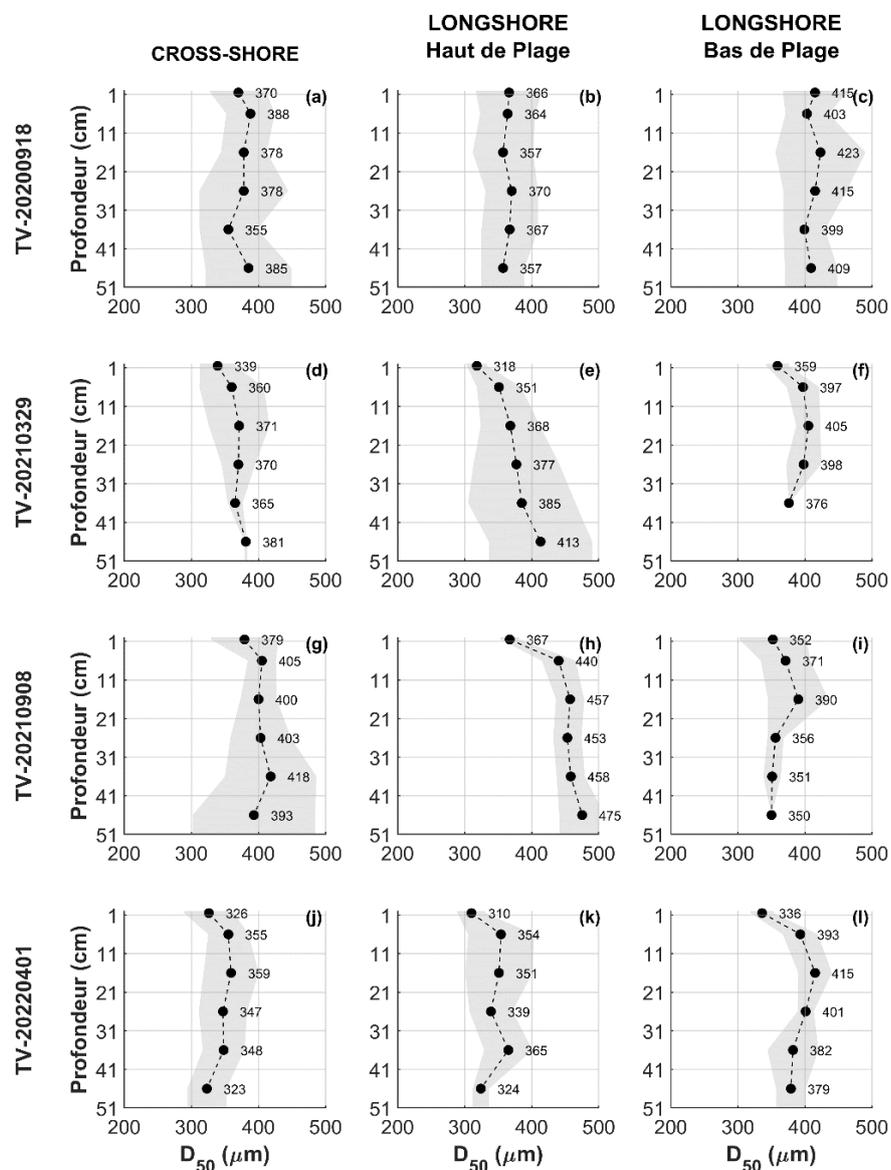


Figure 5.15  $D_{50}$  moyenné par strates pour chacune des 4 campagnes in situ, pour tous les échantillons de la plage du Truc Vert (TV). Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-aaaammjj.

### 5.2.3. Relation entre la pente et la granularité

Les résultats de l'étude comparative entre la granularité moyenne et la pente moyenne par campagne pour les cinq plages de l'étude sont présentés dans la Figure 5.16. Globalement, cette figure montre des 'clusters' de points correspondant à chacune des plages suggérant, pour chaque site, une certaine forme de relation entre la granularité et la pente. Un autre résultat majeur est que, quel que soit la saison, les points se trouvent systématiquement largement en-dessous de la courbe représentant l'équation proposée par Bujan et al. (2019). Cela signifie que, pour les sites étudiés dans cette thèse, le modèle surestime systématiquement la pente d'un facteur 2 à 3. Une explication est que, tous les sites de cette figure (hormis Saint-Aygulf qui présente des pentes non-physiques) sont des environnements méso- à macrotidaux. Ainsi, comme les études précédentes montrent qu'un marnage important diminue la pente de plage, nous pouvons faire l'hypothèse que le marnage explique cette surestimation et peut, plus largement, expliquer la variabilité verticale des pentes observées dans l'étude de Bujan et al. (2019) (Figure 2.7). Un autre facteur permettant d'expliquer cette surestimation, mais dans une moindre mesure, est que les valeurs de  $D_{50}$  utilisées dans l'étude de Bujan et al. (2019) se basent principalement sur des sédiments de surface qui sont en réalité généralement légèrement plus fins que le sédiment en profondeur. Ci-dessous je détaille la variabilité saisonnière de cette relation.

D'une saison à l'autre, la pente et la granularité des plages varient. Concernant les plages dissipatives de Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains, ainsi que la plage intermédiaire du Truc Vert ; la Figure 5.16b montre une variation saisonnière : en fin d'hiver, on observe une granularité faible accompagnée d'une pente plus douce (le 'cluster' de points est déplacé vers le bas et la gauche), tandis qu'à la sortie de l'été, la granularité est plus élevée avec une pente de plage plus forte (le 'cluster' de points est décalé vers le haut et la droite). À l'exception de la pente de la plage de Saint-Malo, qui demeure pratiquement stable entre les deux saisons.

En effet, pour la plage de Saint-Malo, bien que le  $D_{50}$  soit inférieur en fin d'hiver ( $D_{50} = 287 \mu\text{m}$  en avril 2021 et  $D_{50} = 236 \mu\text{m}$  en avril 2022) comparé à la fin d'été ( $D_{50} = 324 \mu\text{m}$  en octobre 2020 et 2021), la pente de la plage demeure quasiment identique pour les deux saisons, avec  $\tan\beta = 0.0235 \pm 1$  (Tableau 5.2 Pente moyennée par périodes (sortie d'hiver et sortie d'été) pour les cinq plages de l'étude : AG: Anglet, SA: Saint-Aygulf (en gris car la pente n'est pas représentative de la réalité et doit être interprétée avec précaution), SM:

Saint-Malo, ST: Saint-Trojan-les-Bains et TV: Truc Vert. Pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains, le  $D_{50}$  est également plus faible en sortie d'hiver ( $D_{50} = 320 \mu\text{m}$  en mars 2021 et  $D_{50} = 331 \mu\text{m}$  en mars 2022) qu'en sortie d'été ( $D_{50} = 386 \mu\text{m}$  en septembre 2021). Aussi, la pente est plus prononcée en fin d'été ( $\tan\beta = 0.0255$  en septembre 2021) qu'en fin d'hiver ( $\tan\beta = 0.0209$  en mars 2021 et  $\tan\beta = 0.0213$  en mars 2022). Ces plages dissipatives sont caractérisées par des pentes faibles qui absorbent l'énergie des vagues.

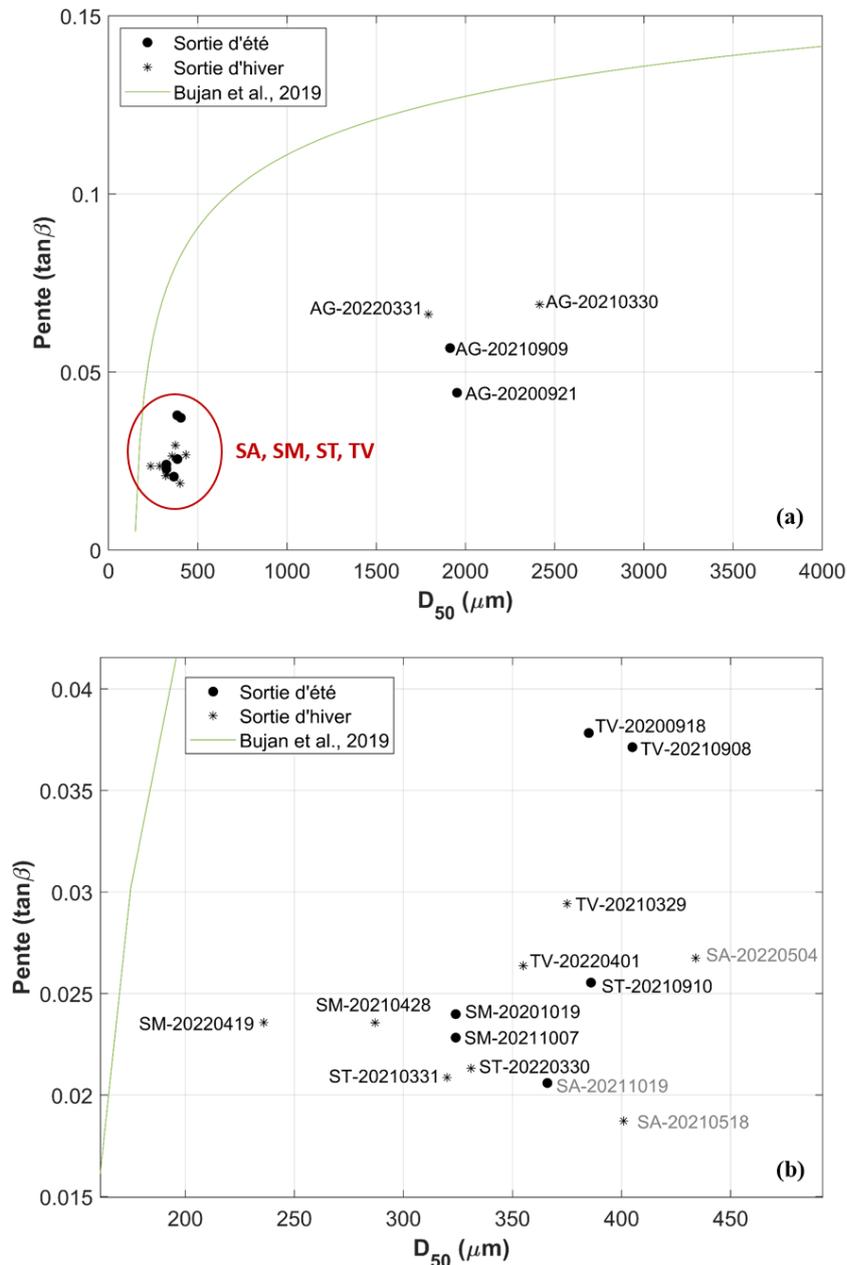


Figure 5.16 Variabilité de la pente de plage en fonction du  $D_{50}$  moyenné par date de campagne. La plage et la date de la campagne sont annotées de la manière suivante Plage-aaaammjj. La ligne verte représente l'équation de Bujan et al. 2019,  $Pente = a(D_{50} - 0.125)^b + c$ , avec  $a = -0.154$  ;  $b = -0.145$  ;  $c = 0.268$ . a. Plage d'AG, b. Zoom sur le cercle rouge de la figure a, qui correspond aux plages de SA, SM, ST et TV.

La plage du Truc Vert présente un  $D_{50}$  inférieur en fin d'hiver ( $D_{50} = 375 \mu\text{m}$  en mars 2021 et  $D_{50} = 355 \mu\text{m}$  en avril 2022) par rapport à la fin d'été ( $D_{50} = 385 \mu\text{m}$  en septembre 2020 et  $D_{50} = 405 \mu\text{m}$  en septembre 2021), et la pente (Tableau 5.2) est plus marquée en fin d'été ( $\tan\beta = 0.0375$ ) qu'en fin d'hiver ( $\tan\beta = 0.0279$ ). Il s'agit d'une plage intermédiaire, qui se situe entre les plages dissipatives et réfléchives en termes d'énergie des vagues.

Toutefois, les plages d'Anglet (Figure 5.16a) et de « Saint-Aygulf » (Figure 5.16b) se démarquent des trois autres mentionnées précédemment par des tendances inversées. En effet, leur granularité est généralement plus faible en fin d'été qu'en fin d'hiver, et la pente suit une trajectoire similaire, étant également moins forte en fin d'été qu'en fin d'hiver. Globalement, le 'cluster' de points est décalé vers le haut et la droite en sortie d'hiver et en bas à gauche en sortie d'été.

Enfin, la plage d'Anglet affiche généralement un  $D_{50}$  supérieur en fin d'hiver ( $D_{50} = 2415 \mu\text{m}$  en mars 2021) qu'en fin d'été ( $D_{50} = 1953 \mu\text{m}$  en septembre 2020 et  $D_{50} = 1914 \mu\text{m}$  en septembre 2021), avec une pente (Tableau 5.2) plus prononcée en fin d'hiver ( $\tan\beta = 0.0676$ ) par rapport à celle en fin d'été ( $\tan\beta = 0.0504$ ). Cette plage est également réfléchive, réfléchissant l'énergie des vagues au lieu de la dissiper. Sur la plage de « Saint-Aygulf », le  $D_{50}$  est plus élevé en fin d'hiver ( $D_{50} = 401 \mu\text{m}$  en mai 2021 et  $D_{50} = 434 \mu\text{m}$  en mai 2022) qu'en fin d'été ( $D_{50} = 366 \mu\text{m}$  en octobre 2021). La pente (Tableau 5.2) est également plus forte à la fin de l'hiver ( $\tan\beta = 0.0228$ ) par rapport à celle en sortie d'été ( $\tan\beta = 0.0206$ ).

Les plages dissipatives et intermédiaires diffèrent des plages réfléchives en termes de relation saisonnière entre granularité et pente, comme l'indique l'examen des cinq plages étudiées précédemment. Néanmoins, ces points restent systématiquement en-dessous de la courbe établie par l'équation de Bujan et al. (2019) (Figure 5.16a,b).

### **5.3. Variabilité horizontale des sédiments**

L'analyse de la variabilité spatiale du  $D_{50}$ , effectuée sur les treize stations de prélèvement sédimentaire et pour chaque campagne, ne montre généralement pas de tendance claire (Annexe D). Un exemple est présenté ici avec la plage du Truc Vert, où l'on observe une tendance inverse en haut et bas de plage en fonction de la saison, ainsi qu'une différence entre les zones situées au nord et au sud de la barre sableuse en bas de plage.

### 5.3.1. Plage du Truc Vert

Les résultats des quatre campagnes *in situ* pour la plage du Truc Vert sont illustrés dans la Figure 5.17. Il est possible d'observer que le  $D_{50}$  en surface (colonne de gauche) et moyenné sur la verticale (colonne de droite) pour les 4 campagnes est relativement homogène, compris entre 250  $\mu\text{m}$  et environ 500  $\mu\text{m}$ .

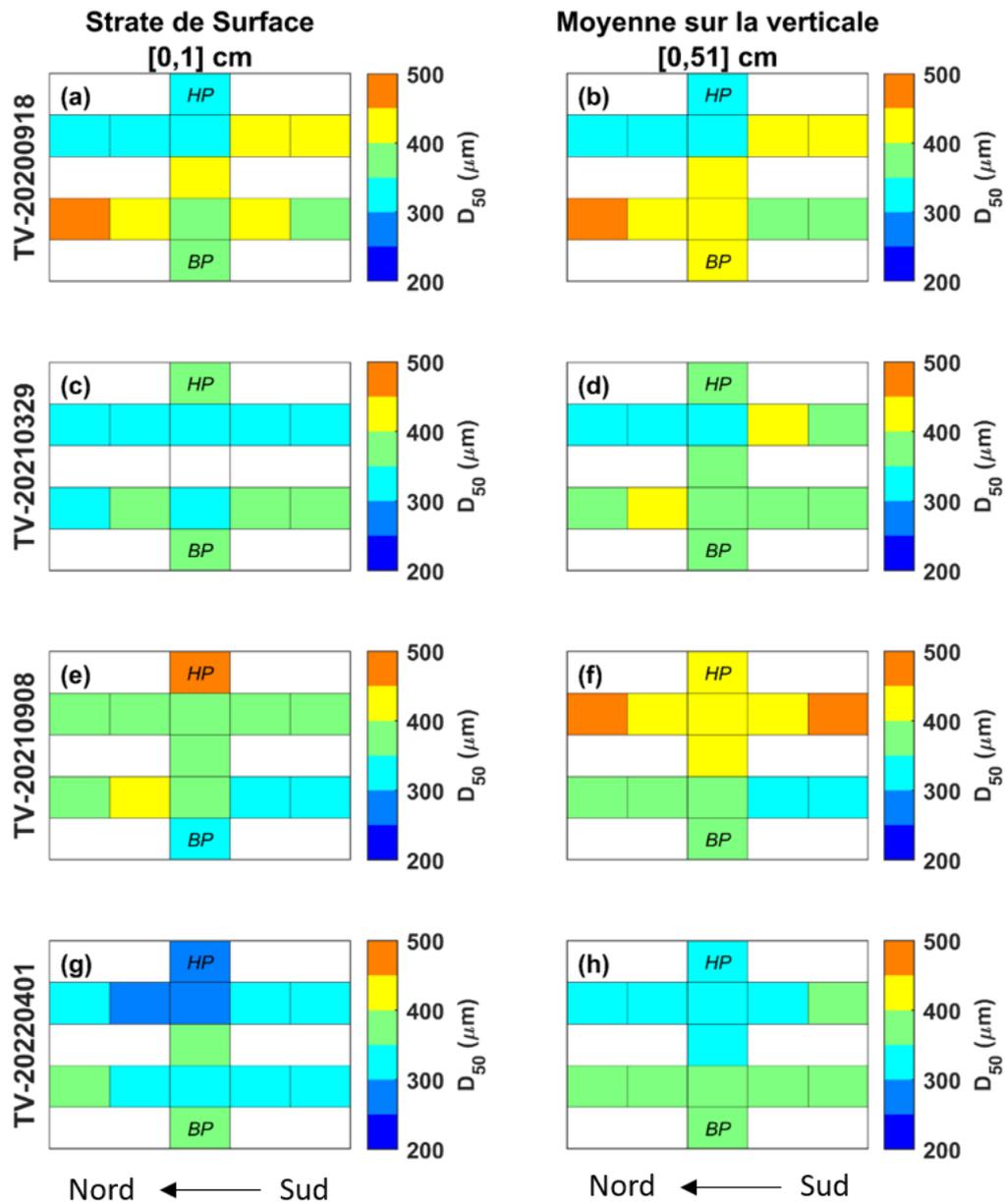


Figure 5.17 Schéma simplifié illustrant la variation spatiale du  $D_{50}$  pour les quatre campagnes *in situ* au Truc Vert: comparaison entre la strate de surface (colonne de gauche) et la moyenne des six strates sur la verticale (colonne de droite) des 13 stations de prélèvement suivant la radiale cross-shore et les deux radiales longshore. Les abréviations HP et BP signifient respectivement Haut de Plage et Bas de Plage. La plage et la date de la campagne sont annotées de la manière suivante Plage- aaaammjj.

Les résultats confirment les tendances précédemment observées en termes de variations horizontales de la granularité des sédiments. Nous avons constaté que la radiale *longshore* située en bas de plage présente des valeurs de  $D_{50}$  plus élevées par rapport à celle en haut de plage, ce qui est conforme aux conclusions antérieures (Figure 5.7). Par ailleurs, les valeurs de  $D_{50}$  relevées aux stations de prélèvement situées au nord de la barre sableuse en bas de plage, se sont révélées supérieures à celles obtenues au sud de la même barre (Figure 4.8). Cette conclusion est également vérifiée pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains (Annexe D)

## 5.4. Discussion

Nos résultats permettent de répondre aux Questions 3, 4, 5 et 6 posées dans le Chapitre 1, et dont les réponses sont synthétisées dans le prochain chapitre. Ci-dessous nous discutons les principaux résultats obtenus.

La pente de plage et la granularité présentent une grande variabilité spatio-temporelle, et sont souvent simplifiées dans les modèles existants en se basant sur une unique valeur de pente et de  $D_{50}$  ou  $\phi_{50}$  (Flemming, 2011; Rector, 1954; Reis and Gama, 2010; Soares, 2003; Sunamura, 1984, 1975). Néanmoins, plusieurs études soulignent l'importance de considérer l'hétérogénéité des sédiments dans la zone de *surf* pour améliorer l'analyse de la morphologie côtière (Bascom, 1951; Gallagher et al., 2011; Gunaratna et al., 2019; Holland and Elmore, 2008; Inman and Chamberlain, 1955; Moutzouris, 2015; Pedreros et al., 1996). Dans ce contexte, nous avons élaboré une méthodologie expérimentale *in situ* sur cinq plages françaises distinctes, sélectionnées pour leur représentativité de la diversité du littoral métropolitain, à savoir : Anglet, Saint-Trojan-les-Bains et Le Truc Vert sur la côte Atlantique, Saint-Aygulf en Méditerranée, et Saint-Malo en mer de la Manche. Nous nous sommes basés sur la réponse d'un modèle existant appliqué sur la plage du Truc Vert (Labarthe et al., 2023, voir Chapitre 3), pour orchestrer nos campagnes de mesure *in situ*. Les cinq plages choisies ont donc fait l'objet de suivis bisannuels (en post-hiver : mars/avril et post-été : septembre/octobre) sur trois ans, pour effectuer un suivi 4D de la granularité et des pentes de plage. Cependant, nos recherches (Chapitre 3), ainsi que d'autres travaux, indiquent que les épisodes de tempêtes influencent la pente des plages (Robin et al., 2020; Vousdoukas et al., 2012) et la taille et la distribution des sédiments (Ma et al., 2019). L'étude du comportement de la plage du Truc Vert, analysé statistiquement, révèle une variabilité saisonnière qui pourrait ne pas être appropriée pour des plages comme celle de Saint-Aygulf.

Il convient de souligner que nous avons choisi le  $D_{50}$  comme indicateur granulométrique, fréquemment employé dans les modèles de morphodynamique des plages et dans la littérature, facilitant ainsi la comparaison entre différents sites. Ce critère se révèle particulièrement approprié pour des environnements comme la plage du Truc Vert, où les sédiments sont homogènes. Toutefois, il présente des limites en présence de sédiments hétérogènes (Bujan et al., 2019), comme cela est le cas à Anglet, où certains échantillons sédimentaires affichent une distribution granulométrique bimodale (Annexe E) en accord avec Briere et Abadie (2004).

Nous avons constaté une relation générale entre la granularité moyenne et les pentes moyennées pour quatre des cinq plages étudiées. Plus la pente est forte, plus la granularité est élevée, confirmant les travaux de (Flemming, 2011; Kim et al., 2014; Rector, 1954; Reis and Gama, 2010; Soares, 2003; Sunamura, 1984, 1975). Contrairement à la relation linéaire moyenne entre la taille des sédiments et la pente des plages, qui a été mise en évidence par ces chercheurs mentionnés précédemment, les travaux de Bujan et al. (2019) ont démontré que la relation entre ces deux paramètres ne suit pas une tendance simple et linéaire, mais plutôt une tendance d'ordre supérieur. Cette découverte remet en question les idées préconçues et souligne la complexité de la relation entre la taille des sédiments et la pente des plages. Mais, l'étude de Bujan et al. (2019) repose sur des données de la littérature, qui se concentrent essentiellement sur des échantillons de sable. De plus, les informations concernant la pente et la taille des grains sont fréquemment réduites à une unique valeur, et les échantillons de sédiments proviennent uniquement de prélèvements en surface. Comme mentionné par Masselink et al. (2007), le manque de lien clair entre la morphologie de la plage et la sédimentologie peut en partie être dû aux lacunes de la méthodologie d'échantillonnage, qui a ignoré la variabilité verticale des caractéristiques de taille des sédiments à travers la 'couche active'. Cela peut expliquer en partie la forte dispersion des points issus des mesures *in situ* dans Bujan et al. (2019), avec des pentes pouvant varier d'un ordre de grandeur pour la même taille de grain. Si on superpose nos points de mesures sur ces courbes, on note que les formulations existantes surestiment largement les pentes mesurées sur nos sites méso- à macro-tidaux. Cette surestimation systématique suggère donc que le fort marnage est responsable de ce biais. Cela est aussi en accord avec les modélisations conceptuelles d'état de plage pour les plages à marée montrant que, pour le même nombre de Dean (prenant en compte à la fois le forçage hydrodynamique et la taille de grain), une plage à fort marnage présente une pente moyenne plus faible qu'une plage

avec faible marée. D'autres facteurs, comme la saisonnalité, et la variabilité spatiale (horizontale et en profondeur), peuvent expliquer une part de la dispersion des points.

Cette étude montre que la granularité des sédiments varie avec la profondeur. Généralement, la médiane de taille est plus élevée dans les strates plus profondes et plus fines en surface. À Anglet, la distribution verticale de la granularité est marquée par une forte variabilité spatiale et temporelle. Dès les recherches de Bagnold (1940), il a été établi qu'un certain critère de taille de grain permet de différencier les plages dominées par l'infiltration de celles qui sont relativement imperméables à la houle. Cet intervalle de taille critique se situe quelque part dans la plage de sable grossier à gravier fin (0,5 à 9 mm). Ce changement de conductivité hydraulique de la plage, et les pertes de volume conséquentes dues à l'infiltration de la houle, modifient fondamentalement la géomorphologie des plages à sédiments plus grossiers, les poussant vers des profils plus raides. Les travaux de Jennings et Shulmeister (2002) ont constaté que les plages de galets ( $2 < D_{50} \leq 64$  mm) présentaient en général des pentes abruptes. De plus, Buscombe et Masselink (2006) ont mis en évidence que l'hydrodynamique, en particulier les processus liés à l'infiltration, jouait un rôle plus important dans la morphodynamique des plages de gravier. Ils ont également constaté que ces plages de graviers tendent à présenter des pentes plus abruptes par rapport à celles composées de sable, avec des pentes dépassant fréquemment les 10 degrés.

Les cinq plages étudiées présentent des caractéristiques morphologiques distinctes, avec une variabilité saisonnière. L'analyse révèle des variations de la granularité ( $D_{50}$ ) (Prodger et al., 2016c) et des pentes de plage (Labarthe et al., 2023) selon les saisons. Pour les plages dissipatives et intermédiaires, la granularité et la pente augmentent après l'été et diminuent après l'hiver. À l'inverse, les plages réfléchives présentent une granularité et une pente plus élevées en hiver qu'en été. Donc, des facteurs supplémentaires peuvent influencer cette relation, comme le suggère également la pente plus prononcée de Saint-Malo par rapport à la granularité plus fine de Saint-Trojan-les-Bains. L'hydrodynamique pourrait être un facteur impactant la relation entre la pente et la granularité. Comme suggéré par les études de McLean et Kirk (1969) et Nordstrom (1977), l'hydrodynamique joue un rôle important dans l'impact de la relation entre la pente et la taille des sédiments. Pendant un évènement de tempête (surcote), les grandes vagues ont souvent tendance à enlever du sable de la plage, abaissant la surface à une élévation inférieure, ce qui se traduit par une redistribution des sédiments (Gallagher et al., 2016).

Aussi, la radiale *longshore* en haut de plage tend généralement à présenter des valeurs moyennes de  $D_{50}$  plus basses, tandis que les sédiments situés le long de la radiale *longshore* en bas de plage sont en général plus grossiers sur les cinquante centimètres de profondeur pris en compte dans cette étude, en accord avec les travaux de Gallagher et al. (2011, 2016) et Prodger et al. (2016a). La zone de 'shore break', où les vagues se brisent à la base de l'avant-plage avant de déferler sur la plage, génère des vitesses intenses et turbulentes capables de mettre en suspension les sédiments les plus fins, les transportant ainsi vers l'intérieur des terres et/ou vers le large alors que les particules plus grossières, moins mobiles, demeurent en place (Blondeaux, 2012; Duncan, 1964; Hay et al., 2014; Ivamy and Kench, 2006; Mason and Coates, 2001; Reniers et al., 2013).

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les variations spatiales, saisonnières et en profondeur de la granularité des sédiments dans les modèles de dynamique côtière. Les résultats soulignent la grande complexité de la granularité des plages, à la fois spatialement et temporellement. Il est observé de manière presque systématique que le sédiment de surface est plus fin que les sédiments sous-jacents. Cette observation est moins importante pour une plage relativement homogène telle que celle du Truc Vert, mais revêt une grande importance pour les autres plages où le sédiment de surface sous-estime la granularité sur la profondeur, ce qui peut avoir un impact sur le calcul de la pente à partir des données granulométriques.

Ainsi, la taille des grains, l'hydrodynamique (turbulence, rugosité, infiltration, etc.) et la morphologie sont des paramètres interdépendants à travers des rétroactions (Gallagher et al., 2016). Notre travail contribue à une meilleure compréhension des relations entre la granularité et la morphologie des plages dans différents contextes, et souligne la nécessité de multiplier les analyses sédimentaires, notamment sur les plages à sédiment grossier et en profondeur.

---

# Chapitre 6. Conclusion générale et perspective

---

## 6.1. Conclusion générale

Cette recherche a enrichi notre compréhension de la morphodynamique des plages sableuses dans les environnements micro- à macro-tidaux. Une approche de modélisation à complexité réduite s'appuyant sur le concept d'équilibre dynamique a pour la première fois été appliquée à la dynamique des pentes de plage, en s'appuyant sur les données d'observation du Truc Vert. Ce modèle nous a guidé dans le choix des périodes pour mener nos campagnes de mesure *in situ*, pour l'analyse 4D de granularité, sur cinq plages sélectionnées pour leur diversité physique et géographique en France métropolitaine. En combinant ces deux approches, j'ai pu répondre aux six questions de recherche présentées dans la section 1.2. Les réponses à ces questions, qui sont détaillées dans les précédents chapitres, sont synthétisées ci-dessous.

***Question 1 : La pente de la plage du Truc Vert répond-elle à un équilibre dynamique ? Est-ce que l'adaptation d'un modèle d'équilibre peut expliquer/reproduire cette dynamique ? Quelles sont les limitations de cette approche de modélisation ?***

***Réponse 1 :***

La pente de la plage du Truc Vert présente un comportement d'équilibre dynamique. Toutefois nous avons distingué deux zones situées au-dessous et au-dessus de la crête de la berme avec des comportements opposés. Entre 0 et 2 m au-dessus du niveau moyen de la mer, sous la berme, nous avons observé une réponse à l'équilibre de la pente de la plage, expliqué jusqu'à 40% par le modèle, à l'échelle des tempêtes ( $\Phi < 150$  jours), où la pente devient plus raide sous des vagues de faible énergie et diminue pendant les tempêtes, en

accord avec le modèle conceptuel de Wright et Short (1984). Sous la berme, entre 2.5 et 4 m, les vagues de tempêtes entraînent une augmentation de la pente de la plage, avec une réponse à l'équilibre à l'échelle saisonnière. La réponse inversée observée est due à la position de ce secteur derrière la crête de la berme. De plus, la réponse de la pente de la plage de ce secteur à l'échelle saisonnière peut être attribuée à l'érosion progressive de la berme pendant l'hiver sous l'effet des tempêtes successives, suivie d'une reconstruction lente au cours du printemps et de l'été. Malgré le succès du modèle qui explique jusqu'à 65% de la variabilité observée de l'inclinaison de la pente de la plage dans cette partie du profil, certaines améliorations sont nécessaires pour les futures études. En particulier, l'intégration de l'hétérogénéité des propriétés sédimentaires pourrait améliorer la capacité du modèle à expliquer l'équilibre dynamique de la pente des plages.

***Question 2 : Quand, à l'échelle saisonnière, les pentes des plages présentent-elles leur minimum et maximum, et cela permet-il de déterminer les périodes optimales pour les suivis biannuels de pente/granularité ?***

***Réponse 2 :***

Les résultats issus de l'observation et de la modélisation pour la plage du Truc Vert indiquent que les pentes les plus extrêmes des plages apparaissent en sortie d'hiver (mars/avril) et sortie d'été (septembre/octobre), nous permettant de déterminer les périodes optimales pour les suivis *in situ* des cinq plages de l'étude. Nos travaux, basés sur des levés réalisés au Truc Vert (plage située au Cap Ferret), pourraient être étendus à d'autres sites, comme discuté dans les chapitres 4 et 5. La plage du Truc Vert, soumise à un régime de houle provenant de l'Atlantique Nord, est représentative des autres plages de l'étude (Anglet, Saint-Trojan-les-Bains). Nous avons utilisé les périodes extrêmes observées en septembre et en mars pour planifier les suivis biannuels de pente et de granularité, applicable à toutes les plages de la façade ouest. Des études précédentes sur les plages de l'Atlantique européen soutiennent cette généralisation (Dodet et al., 2019b; Masselink et al., 2016). Cependant, l'extension de cette approche à la plage de Saint-Aygulf, en Méditerranée, est plus incertaine. Bien qu'aucun suivi à long terme n'existe, cette région est souvent soumise à des coups de vent de sud, avec des vagues énergétiques dès septembre. En raison de cette incertitude et de contraintes logistiques, les mesures *in situ* à Saint-Aygulf ont été synchronisées avec celles des quatre autres plages.

***Question 3 : A l'échelle intersite est-ce que la granularité moyenne et les pentes moyennes sont corrélées, et est-ce que cette corrélation/relation varie suivant la saison ?***

***Réponse 3 :***

L'analyse biannuelle 4D des sédiments et des données topographiques, sur une période de trois ans, a permis d'établir les caractéristiques de pente et de granularité pour différents types de plages. Dans la majorité des cas, une relation générale a été mise en évidence entre la granularité et les pentes moyennées, à l'exception de la plage de Saint-Aygulf dont les profils de pente ne sont pas représentatifs de la réalité. Parmi les plages étudiées, une tendance globale a été observée : les plages aux pentes plus marquées présentent généralement une granularité plus élevée. Cette tendance est notable pour Anglet, le Truc Vert, Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains. Cependant, malgré cette tendance apparente, d'autres facteurs peuvent influencer cette relation, comme le démontre la plage de Saint-Malo qui, malgré une pente plus prononcée, présente un sédiment plus fin que Saint-Trojan-les-Bains. Ainsi, une approche plus globale et contextuelle est nécessaire pour comprendre le lien entre la pente de plage et la granularité. La relation saisonnière entre la granularité et la pente de la plage varie selon le type de plage (dissipative, intermédiaire, réfléchive). Les plages dissipatives de Saint-Malo et Saint-Trojan-les-Bains, ainsi que la plage intermédiaire du Truc Vert, affichent une granularité et une pente plus faibles à la fin de l'hiver, tandis qu'à la fin de l'été, ces mêmes plages présentent une granularité et une pente plus importantes. Par contre, les plages d'Anglet et de Saint-Aygulf dévoilent une tendance inverse : leur granularité et leur pente sont généralement plus faibles à la fin de l'été qu'à la fin de l'hiver. Ces observations soulignent l'importance de considérer la saisonnalité dans cette relation, mais aussi sa complexité.

***Question 4 : Est-ce que l'état de plage (dissipatif - intermédiaire - réfléchif) contrôle la distribution verticale de la granularité des sédiments ?***

***Réponse 4 :***

Sur la base d'une analyse biannuelle des données topographiques et sédimentaires sur une période de trois ans, une tendance distincte a été mise en évidence dans la distribution verticale de la granularité des sédiments sur différentes plages. Les sédiments sont systématiquement plus fins près de la surface (le premier centimètre) qu'en profondeur (jusqu'à 50 cm de profondeur), indiquant un gradient vertical croissant de taille de grain.

C'est un phénomène observable sur toutes les plages étudiées, bien qu'à des degrés divers. Par exemple, la plage de Saint-Malo présente une variabilité verticale beaucoup plus marquée, avec un  $D_{50}$  près de trois fois plus fin en surface qu'à 50 cm de profondeur. Sur d'autres sites, comme la plage du Truc Vert, cette variabilité est moins importante. Néanmoins, dans tous les cas, une augmentation de la granularité est observée entre le premier centimètre et la couche sous-jacente. Cette tendance persiste sur l'ensemble des radiales étudiées (*cross-shore* et *longshore* haut de plage et bas de plage), indiquant que le gradient vertical de la taille de grain n'est pas significativement affecté par la morphologie de la plage, la présence de barre ou la position en haut ou en bas d'estran. En d'autres termes, l'état de la plage (dissipatif, intermédiaire, réfléchissant) n'altère pas le contrôle sur la distribution verticale de la granularité des sédiments. Néanmoins, la radiale *longshore* en haut de plage tend généralement à présenter des valeurs moyennes de  $D_{50}$  plus basses, tandis que les sédiments situés le long de la radiale *longshore* en bas de plage sont en général plus grossiers sur les cinquante centimètres de profondeur pris en compte dans cette étude.

***Question 5 : Est-ce que la présence de corps sédimentaires contrôle la variabilité horizontale des sédiments ?***

***Réponse 5 :***

L'analyse de la variabilité spatiale horizontale du  $D_{50}$ , basée sur les échantillons recueillis sur les treize stations de prélèvements sédimentaires lors de chaque campagne, ne révèle généralement pas de tendance claire ou facilement interprétable (voir Annexe D). Cependant, pour la plage du Truc Vert, nous observons une tendance inverse en haut et bas de plage en fonction de la saison, ainsi qu'une différence entre les zones situées au nord et au sud de la barre sableuse en bas de plage. En effet, pour la plage du Truc Vert, nous notons que la radiale *longshore* en bas de plage présente des valeurs de  $D_{50}$  plus élevées par rapport à celle en haut de plage, confirmant les conclusions antérieures. De plus, les stations de prélèvement au nord de la barre sableuse en bas de plage affichent des valeurs de  $D_{50}$  supérieures à celles au sud de cette même barre. Cette observation est également validée pour la plage de Saint-Trojan-les-Bains. Cette constatation pourrait s'expliquer par les modulations de dérive littorale ou par les courants de baine, qui pourraient déposer des sédiments plus grossiers au nord de la barre sableuse située en bas de plage, ou éroder les sédiments fins, laissant ainsi une concentration plus élevée de sédiments grossiers.

**Question 6 : Quels sont les paramètres permettant d'expliquer les incertitudes des relations existantes entre granularité et pente de plage ?**

**Réponse 6 :** Les données reliant la taille des sédiments avec la pente de la plage (Bujan et al., 2019 ; cf. Figure 2.7) montrent de fortes incertitudes autour des paramétrisations existantes avec, par exemple, pour une taille de grain donnée une pente de plage pouvant varier d'un ordre de grandeur d'un site à l'autre. Le fait que les paramétrisations surestiment d'un facteur 2 à 3 les pentes observées sur nos sites méso- à macro-tidaux vont dans le sens que le marnage pourrait expliquer une grande part de la variabilité observée dans Bujan et al. (2019). D'autres facteurs, comme le fait de prendre un sédiment de surface, souvent plus fin que le sédiment moyen sur la profondeur, et qui localement peut varier largement à cause de la forte variabilité horizontale des tailles de grain observée sur la plupart de sites, peuvent expliquer une part de la dispersion des points observée dans Bujan et al. (2019).

## **6.2. Perspectives de recherche**

Les résultats obtenus au cours de ce travail apportent plusieurs perspectives de recherche :

***RI.** Application du modèle d'équilibre sur d'autres plages et sur le profil subtidal.*

Le modèle d'équilibre a été appliqué à la plage du Truc Vert, une plage méso-macrotidale intermédiaire avec une forte dynamique de la berme. Ainsi, ce comportement contrasté entre deux zones de la plage est certainement spécifique aux plages à berme. Ce n'est pas le cas des plages étudiées dans les chapitres 4 et 5, qui ne présentent pas de dynamique de berme. Toutefois, ces plages ne font pas l'objet de suivi topographique long terme et haute fréquence comme c'est le cas de la plage du Truc Vert. Ainsi, le modèle pourrait être appliqué à d'autres plages suivies intensivement et dont les données sont ouvertes (par exemple, Bertin et al., 2022; Turner et al., 2016). Comme cela a pu être réalisé pour le trait de côte (Splinter et al., 2014), l'application du modèle d'équilibre sur un grand nombre de plages pourrait permettre de développer une forme paramétrée, généralisée, du modèle et identifier les variables environnementales contrôlant les valeurs de ces paramètres.

L'équipe Methys/EPOC est actuellement en cours de développement d'une petite embarcation radiocommandée pouvant naviguer dans les vagues et équipée d'un sondeur

mono-faisceau permettant de mesurer la morphologie de la plage sous-marine. Ce drone sera prochainement testé sur la plage du Truc Vert pour étendre le profil topographique à la zone subtidale. Ces données permettront à terme d'étendre le modèle à l'ensemble du profil actif.

*R2. Afin d'assurer une couverture spatiale étendue et pérenne, et potentiellement d'aborder les évolutions haute-fréquence (effets des tempêtes), il est important de perfectionner les méthodes d'acquisition, de traitement et d'analyse des données de granularité et de pente des plages, en donnant la priorité aux approches peu intrusives.*

Pour vérifier la validité de nos conclusions saisonnières et vérifier si elles ne sont pas biaisées par des événements exceptionnels tels que les tempêtes, il serait intéressant d'appliquer le protocole élaboré dans cette thèse, qui prend en compte la variabilité 4D de la granularité et la pente de la plage, à l'échelle événementielle. Grâce à des modèles de prévision, comme WAVEWATCH III (Tolman, 2009) utilisé notamment pour les prévisions en météorologie marine (Mentaschi et al., 2015), il est possible de prédire l'arrivée de houles énergétiques sur la côte, ce qui nous permettrait de réaliser des prélèvements et des relevés topographiques avant et après l'événement. Ensuite, nous pourrions comparer et analyser les changements potentiels suite à l'événement, ce qui nous aiderait à confirmer ou réfuter la pertinence de nos conclusions saisonnières. Toutefois, appréhender ces réponses à l'échelle de la tempête et/ou assurer une pérennité se heurte à plusieurs défis, cf. ci-dessous :

- **Pente**

La technologie laser LIDAR (*Light Detection And Ranging*), qui évalue la distance entre un émetteur et une surface réfléchissante en se basant sur le temps de trajet d'un signal lumineux, est de plus en plus sollicitée dans divers domaines, notamment pour le suivi morphologique et l'analyse des impacts des tempêtes sur les littoraux (Stockdonf et al., 2002). Au cours de la dernière décennie, cette technologie s'est largement imposée pour le suivi de la zone de *surf* ainsi que pour l'analyse des interactions entre le jet de rive et le haut de plage. Ceci est principalement permis par la capacité des lasers infrarouges à mesurer simultanément la surface libre des vagues déferlées et la topographie de la plage (Almeida et al., 2015; Blenkinsopp et al., 2010; Brodie et al., 2015; Martins et al., 2015). En tant que technologie de télédétection, les LIDARs ont le privilège d'être relativement résistants aux événements extrêmes car ils n'interagissent pas directement avec les vagues déferlantes (Martins et al., 2018). Comparé aux mesures ponctuelles *in situ* traditionnelles, les avantages

majeurs du LIDAR résident dans sa capacité à fournir des mesures directes des profils de plages et de vagues à haute fréquence et haute résolution spatiale, notamment le LIDAR a déjà montré un très fort potentiel pour l'étude de la dynamique haute-fréquence de la berme (Phillips et al., 2019). Toutefois, le déploiement du LIDAR présente certains défis, tels que la nécessité d'une structure raccordée au réseau électrique proche de la zone d'étude ainsi qu'une capacité de stockage robuste et conséquente.

La bathymétrie côtière, bien que cruciale pour les études côtières, est rarement réalisée de manière continue à cause des défis liés à la collecte de données avec des méthodes traditionnelles. Cependant, la télédétection, notamment par le biais des satellites (e.g., Sentinel-2A/B du programme Copernicus de l'UE), émerge comme une alternative attrayante (Caballero and Stumpf, 2019). Cette méthode peut fournir des données bathymétriques à relativement bonne résolution, avec toutefois des fortes incertitudes en fonction des environnements et des méthodes employées. Récemment, les travaux de Viaña-Borja et al., (2023) ont appliqué un modèle SBS (*Satellite-Derived Bathymetry*) dans la mer Méditerranée occidentale (île de Majorque, Espagne). Ils ont obtenu des résultats satisfaisants pour des profondeurs allant jusqu'à 14 m avec un biais moyen de 0,02 m et une erreur absolue médiane de 0,71 m comparée aux données de sondeur multifaisceaux (MBES). Des résultats bien meilleurs peuvent être obtenues pour la pente du domaine intertidal en utilisant la méthodologie récemment proposée par Vos et al. (2020).

- **Granularité**

Lors des prélèvements sédimentaires sur le terrain (*in situ*), il serait possible de perfectionner notre technique de prélèvements pour tenter de dépasser la profondeur de 50 centimètres, une limite établie par le protocole de cette étude en raison de la difficulté d'accéder aux couches sédimentaires plus profondes. Des recherches récentes menées par (van Ijzendoorn et al., 2023), ont mis au point un nouvel outil appelé "sand scraper" (ou "grattoir à sable" en français), qui facilite les prélèvements sédimentaires. Cependant, leur méthode n'a pas encore été appliquée au-delà d'une profondeur de 5 cm. L'objectif principal serait d'adopter une technique à la fois peu intrusive et économiquement efficiente en termes de ressources matérielles et humaines.

Concernant les analyses en laboratoire, elles pourraient être effectuées à l'aide d'un granulomètre laser associé à un système vidéo, qui élimine les distorsions liées à

l'assimilation des particules allongées à des sphères. Cet équipement, capable de traiter des échantillons allant du micromètre à plusieurs millimètres, supprime le besoin de tamisage préalable de l'échantillon. A l'heure actuelle, nombre de granulomètres sont spécialement élaborés pour n'analyser que la fraction fine de l'échantillon, rendant ainsi incontournable un pré-tamisage via une tamiseuse pour évincer la section plus grossière. L'adoption d'un tel système nous permettrait de maximiser notre efficacité en laboratoire et de réduire considérablement la durée des processus de tamisage, actuellement longs et fastidieux. L'utilisation de ce granulomètre, combinée à un logiciel d'analyse de données calculant divers paramètres statistiques, pourrait nous offrir la possibilité de consacrer davantage de temps à l'étude de divers paramètres que le  $D_{50}$ . Cela serait particulièrement intéressant pour les échantillons hétérogènes et bimodaux (e.g., la plage d'Anglet).

À l'échelle microscopique, des techniques par imagerie permettent de quantifier la taille des grains (Baptista et al., 2012; Barnard et al., 2007; Buscombe et al., 2014; Buscombe and Masselink, 2009; Gallagher et al., 2011; Rubin, 2004; Soloy, 2022) en appliquant des algorithmes de traitement sur les images. Pour couvrir une plus grande superficie, un scanner laser terrestre (TLS) a également été utilisé à plusieurs reprises pour modéliser la rugosité du lit des rivières et estimer la sédimentologie de surface (Heritage and Milan, 2009). La précision dépend fortement de la variabilité naturelle du sable et de la qualité des images, requérant une mise au point excellente.

## **Articles publiés**

Garlan T., Almar R., Gauduin H., Gosselin M., Morio O., Labarthe C. (2020). 3D variability of sediment granulometry in two tropical environments: Nha Trang (Vietnam) and Saint-Louis (Sénégal), *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 495-499, doi: 10.2112/SI95-096.1.

Labarthe, C., Castelle, B., Garlan, T., Marieu V., Bujan S., Shute, P. (2022). Analyse de l'évolution 4D de la granularité des sédiments sur les plages sableuses dominées par l'action des vagues. XVII èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Chatou, Editions Paralia CFL. DOI:10.5150/jngcgc.2022.008

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. *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 584. <https://doi.org/10.3390/jmse11030584>

## **Présentation en conférence**

Labarthe, C., Castelle, B., Garlan, T., Marieu V., Bujan S., Shute, P. (2022). Analyse de l'évolution 4D de la granularité des sédiments sur les plages sableuses dominées par l'action des vagues. XVII èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Chatou, Octobre 2022. Présentation Orale (présentiel)

## Références bibliographiques

- Aagaard, T., Hughes, M., Baldock, T., Greenwood, B., Kroon, A., Power, H., 2012. Sediment transport processes and morphodynamics on a reflective beach under storm and non-storm conditions. *Mar. Geol.* 326–328, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.09.004>
- Abuodha, J.O.Z., 2003. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *J. Afr. Earth Sci.* 36, 41–54. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00016-2)
- Almar, R., Castelle, B., Ruessink, B.G., Sénéchal, N., Bonneton, P., Marieu, V., 2010. Two- and three-dimensional double-sandbar system behaviour under intense wave forcing and a meso–macro tidal range. *Cont. Shelf Res.* 30, 781–792. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.001>
- Almar, R., Castelle, B., Ruessink, G., Sénéchal, N., Bonneton, P., Marieu, V., 2009. High-frequency video observation of a double sandbar system under high-energy wave forcing. *J. Coast. Res.* 1706–1710.
- Almar, R., Coco, G., Bryan, K.R., Huntley, D.A., Short, A.D., Sénéchal, N., 2008. Video observations of beach cusp morphodynamics. *Mar. Geol.* 254, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.05.008>
- Almeida, L.P., Almar, R., Bergsma, E.W.J., Berthier, E., Baptista, P., Garel, E., Dada, O.A., Alves, B., 2019. Deriving High Spatial-Resolution Coastal Topography From Sub-meter Satellite Stereo Imagery. *Remote Sens.* 11, 590. <https://doi.org/10.3390/rs11050590>
- Almeida, L.P., Masselink, G., Russell, P., Davidson, M., Poate, T., McCall, R., Blenkinsopp, C., Turner, I., 2013. Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner (Lidar). *J. Coast. Res.* 636–641. <https://doi.org/10.2112/SI65-108.1>
- Almeida, L.P., Masselink, G., Russell, P.E., Davidson, M.A., 2015. Observations of gravel beach dynamics during high energy wave conditions using a laser scanner. *Geomorphology* 228, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.019>
- Aragónés, L., López, I., Villacampa, Y., Serra, J.C., Saval, J.M., 2014. New Methodology for the Classification of Gravel Beaches: Adjusted on Alicante (Spain). *J. Coast. Res.* 31, 1023–1034. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00140.1>
- Bagnold, R.A., 1940. Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank. (includes photographs). *J. Inst. Civ. Eng.* 15, 27–52. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1940.14279>
- Balouin, Y., Tesson, J., Gervais, M., 2013. Cuspate shoreline relationship with nearshore bar dynamics during storm events - field observations at Sète Beach, France. *J. Coast. Res.* SI65, 440–445. <https://doi.org/10.2112/SI65-075.1>
- Baptista, P., Cunha, T.R., Gama, C., Bernardes, C., 2012. A new and practical method to obtain grain size measurements in sandy shores based on digital image acquisition and processing. *Sediment. Geol.*, The 2011 Tohoku-oki tsunami 282, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.10.005>
- Barnard, P.L., Rubin, D.M., Harney, J., Mustain, N., 2007. Field test comparison of an autocorrelation technique for determining grain size using a digital ‘beachball’ camera versus traditional methods. *Sediment. Geol.* 201, 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.05.016>
- Bascom, W., 1951. The Relationship Between Sand Size and Beach Face Slope. University of California, Department of Engineering, Institute of Engineering Research.

- Battjes, J.A., 2015. Surf Similarity 466–480. <https://doi.org/10.1061/9780872621138.029>
- Battjes, J.A., Bakkenes, H.J., Janssen, T.T., van Dongeren, A.R., 2004. Shoaling of subharmonic gravity waves. *J. Geophys. Res. Oceans* 109. <https://doi.org/10.1029/2003JC001863>
- Bertin, S., Floc'h, F., Le Dantec, N., Jaud, M., Cancouët, R., Franzetti, M., Cuq, V., Prunier, C., Ammann, J., Augereau, E., Lamarche, S., Belleney, D., Rouan, M., David, L., Deschamps, A., Delacourt, C., Suanez, S., 2022. A long-term dataset of topography and nearshore bathymetry at the macrotidal pocket beach of Porsmilin, France. *Sci. Data* 9, 79. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01170-3>
- Bertin, X., Castelle, B., Chaumillon, E., Butel, R., Quique, R., 2008. Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy dissipative beach: St. Trojan beach, SW Oléron Island, France. *Cont. Shelf Res.* 28, 1316–1332. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.005>
- Bertin, X., De Bakker, A., Guérin, T., Chataigner, T., Martins, K., Coulombier, T., 2018. Transferts d'énergie et réflexion des ondes infragravitaires au niveau d'une plage dissipative, in: XVèmes Journées, La Rochelle. Presented at the Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Editions Paralia, pp. 9–18. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.002>
- Bertoni, D., Grotoli, E., Ciavola, P., Sarti, G., Benelli, G., Pozzebon, A., 2013. On the displacement of marked pebbles on two coarse-clastic beaches during short fair-weather periods (Marina di Pisa and Portonovo, Italy). *Geo-Mar. Lett.* 33, 463–476. <https://doi.org/10.1007/s00367-013-0341-3>
- Bertsimas, D., Tsitsiklis, J., 1993. Simulated Annealing. *Stat. Sci.* 8, 10–15. <https://doi.org/10.1214/ss/1177011077>
- Bird, E.C.F., 2011. *Coastal Geomorphology: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Blenkinsopp, C.E., Mole, M.A., Turner, I.L., Peirson, W.L., 2010. Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR. *Coast. Eng.* 57, 1059–1065. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.07.001>
- Blenkinsopp, C.E., Turner, I.L., Masselink, G., Russell, P.E., 2011. Swash zone sediment fluxes: Field observations. *Coast. Eng.* 58, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.002>
- Blondeaux, P., 2012. Sediment mixtures, coastal bedforms and grain sorting phenomena: An overview of the theoretical analyses. *Adv. Water Resour., Two-Phase Modeling of Sediment Dynamics* 48, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.004>
- Blott, S., Pye, K., 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landf.* 26, 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Blott, S.J., Pye, K., 2012. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology* 59, 2071–2096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x>
- Bonnot-Courtois, C., Augris, C., Blanchard, M., Houlgatte, E., 2002. (Côtes d'Armor – Ille-et-Vilaine).
- Borzzone, C.A., Rosa, L.C., 2009. Impact of oil spill and posterior clean-up activities on wrack-living talitrid amphipods on estuarine beaches. *Braz. J. Oceanogr.* 57, 315–323.
- Bouvier, C., 2019. Barres d'avant-côte et trait de côte : dynamique, couplage et effets induits par la mise en place d'un atténuateur de houle (These de doctorat). Bordeaux.
- Briere, C., Abadie, S., 2004. Analyse des courants induits par la houle au voisinage de l'embouchure de l'Adour à Anglet, in: VIIIèmes Journées, Compiègne. Presented at the Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Editions Paralia, pp. 29–37. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2004.004-B>

- Brighton, B., Sherker, S., Brander, R., Thompson, M., Bradstreet, A., 2013. Rip current related drowning deaths and rescues in Australia 2004–2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1069–1075. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1069-2013>
- Brivois, O., Idier, D., Thiebot, J., Castelle, B., Le Cozannet, G., Calvete Manrique, D., 2012. On the use of linear stability model to characterize the morphological behaviour of a double bar system. Application to Truc Vert Beach (France). *Comptes rendus Geosci.* 344, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.02.004>
- Brodie, K.L., Raubenheimer, B., Elgar, S., Slocum, R.K., McNinch, J.E., 2015. Lidar and Pressure Measurements of Inner-Surfzone Waves and Setup. *J. Atmospheric Ocean. Technol.* 32, 1945–1959. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00222.1>
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E.J., Pothin, V., Vella, C., Dussouillez, P., Gardel, A., Michaud, E., 2016. Structure-from-Motion photogrammetry for high-resolution coastal and fluvial geomorphic surveys. *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 22, 147–161. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11358>
- Bryson, M., Duce, S., Harris, D., Webster, J., Thompson, A., Vila-Concejo, A., Williams, S., 2016. Geomorphic changes of a coral shingle cay measured using Kite Aerial Photography. *Geomorphology* 270. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.018>
- Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Murphy, R., Bongiorno, D., 2013. Kite Aerial Photography for Low-Cost, Ultra-high Spatial Resolution Multi-Spectral Mapping of Intertidal Landscapes. *PloS One* 8, e73550. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073550>
- Bujan, N., Cox, R., Masselink, G., 2019. From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. *Mar. Geol.* 417, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012>
- Buscombe, D., Masselink, G., 2009. Grain-size information from the statistical properties of digital images of sediment. *Sedimentology* 56, 421–438. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00977.x>
- Buscombe, D., Masselink, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Sci. Rev.* 79, 33–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.003>
- Buscombe, D., Rubin, D.M., Lacy, J.R., Storlazzi, C.D., Hatcher, G., Chezar, H., Wyland, R., Sherwood, C.R., 2014. Autonomous bed-sediment imaging-systems for revealing temporal variability of grain size. *Limnol. Oceanogr. Methods* 12, 390–406. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.390>
- Butel, R., Dupuis, H., Bonneton, P., 2002. Spatial Variability of Wave Conditions on the French Atlantic Coast using In-Situ Data. *J. Coast. Res.* 36, 96–108. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.96>
- Caballero, I., Stumpf, R.P., 2019. Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 226, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- Carter, R.W.G., 2013. *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines*. Elsevier.
- Castelle, B., Bonneton, P., Dupuis, H., Sénéchal, N., 2007. Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast: A review. *Mar. Geol.* 245, 141–159. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.06.001>
- Castelle, B., Brander, R., Tellier, E., Bruno, S., Scott, T., Mccarroll, R., Campagne, J.-M., Cavailhes, T., Lechevrel, P., 2018a. Surf zone hazards and injuries on beaches in SW France. *Nat. Hazards* 93. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3354-4>
- Castelle, B., Bujan, S., Ferreira, S., Dodet, G., 2017. Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast. *Mar. Geol.* 385, 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.006>

- Castelle, B., Bujan, S., Marieu, V., Ferreira, S., 2020. 16 years of topographic surveys of rip-channelled high-energy meso-macrotidal sandy beach. *Sci. Data* 7, 410. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00750-5>
- Castelle, B., Guillot, B., Marieu, V., Chaumillon, E., Hanquiez, V., Bujan, S., Poppeschi, C., 2018b. Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 200, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.005>
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Ferreira, S., Parisot, J.-P., Capo, S., Sénéchal, N., Chouzenoux, T., 2014. Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Mar. Geol.* 347, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003>
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Sénéchal, N., Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology* 238, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.006>
- Castelle, B., Masselink, G., 2023. Morphodynamics of wave-dominated beaches. *Camb. Prisms Coast. Futur.* 1, e1. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.2>
- Castelle, B., Ruessink, G., Bonneton, P., Marieu, V., Bruneau, N., Price, T., 2010. Coupling mechanisms in double sandbar systems. Part 1: Patterns and physical explanation. *Earth Surf. Process. Landf.* 35. <https://doi.org/10.1002/esp.1929>
- Castelle, B., Scott, T., Brander, R., McCarroll, J., Robinet, A., Tellier, E., de Korte, E., Simonnet, B., Salmi, L.-R., 2019. Environmental controls on surf zone injuries on high-energy beaches. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 2183–2205. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2183-2019>
- Castelle, B., Scott, T., Brander, R.W., McCarroll, R.J., 2016. Rip current types, circulation and hazard. *Earth-Sci. Rev.* 163, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.008>
- Ciotti, B.J., Targett, T.E., Nash, R.D.M., Burrows, M.T., 2013. Small-scale spatial and temporal heterogeneity in growth and condition of juvenile fish on sandy beaches. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 448, 346.
- Coco, G., Bryan, K., Ruessink, G., Turner, I., Enckevort, I.M.J., 2005. Video observations of Shoreline and Sandbar Coupled Dynamics.
- Cooper, J. a. G., Masselink, G., Coco, G., Short, A.D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A.N., Kelley, J.T., Pilkey, O.H., Jackson, D.W.T., 2020. Sandy beaches can survive sea-level rise. *Nat. Clim. Change* 10, 993–995. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2>
- Cowell, P.J., Thom, B.G., 1995. Morphodynamics of coastal evolution, in: Woodroffe, C.D., Carter, R.W.G. (Eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 33–86. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511564420.004>
- Currier, K., 2015. Mapping with strings attached: Kite aerial photography of Durai Island, Anambas Islands, Indonesia. *J. Maps* 11, 589–597. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.925839>
- Dail, H.J., Merrifield, M.A., Bevis, M., 2000. Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing. *Mar. Geol.* 162, 443–458. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00072-9)
- D’Anna, M., Castelle, B., Idier, D., Rohmer, J., Le Cozannet, G., Thieblemont, R., Bricheno, L., 2021. Uncertainties in Shoreline Projections to 2100 at Truc Vert Beach (France): Role of Sea-Level Rise and Equilibrium Model Assumptions. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 126, e2021JF006160. <https://doi.org/10.1029/2021JF006160>

- D'Anna, M., Idier, D., Castelle, B., Rohmer, J., Cagigal, L., Mendez, F.J., 2022. Effects of stochastic wave forcing on probabilistic equilibrium shoreline response across the 21st century including sea-level rise. *Coast. Eng.* 175, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104149>
- D'Anna, Maurizio, Idier, D., Castelle, B., Vitousek, S., Le Cozannet, G., 2021. Reinterpreting the Bruun Rule in the Context of Equilibrium Shoreline Models. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 974. <https://doi.org/10.3390/jmse9090974>
- Davidson, M., Turner, I., 2009. A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline evolution. *J. Geophys. Res.* 114. <https://doi.org/10.1029/2007JF000888>
- Davidson, M.A., Splinter, K.D., Turner, I.L., 2013. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coast. Eng.* 73, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002>
- Davidson-Arnott, R., G.D., R., 2010. Davidson-Arnott, R.G.D., 2010. Introduction to Coastal Processes and Geomorphology.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *J. Coast. Res.* 7, 32.
- Dean, R.G., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Eng. Dyn. Coast. Zone* P 215.
- Desmazes, F., 2005. Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine : exemple de la plage du Truc Vert (These de doctorat). Bordeaux 1.
- Dionne, J.-C., 1978. Komar, P.D. (1976) : Beach Processes and Sedimentation, Englewood Cliffs (New Jersey), Prentice-Hall, xii et 429 p., 218 fig., 18,5 x 24 cm, \$33.30. *Géographie Phys. Quat.* 32, 178–179. <https://doi.org/10.7202/1000349ar>
- Dodet, G., Bertin, X., Bouchette, F., Gravelle, M., Testut, L., Wöppelmann, G., 2019a. Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France: Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes. *J. Coast. Res.* 88, 10. <https://doi.org/10.2112/SI88-003.1>
- Dodet, G., Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Davidson, M., Floc'h, F., Jackson, D., Suanez, S., 2019b. Beach recovery from extreme storm activity during the 2013-14 winter along the Atlantic coast of Europe: BEACH RECOVERY FROM EXTREME STORM ACTIVITY. *Earth Surf. Process. Landf.* 44, 393–401. <https://doi.org/10.1002/esp.4500>
- Doucette, J.S., 2002. Geometry and grain-size sorting of ripples on low-energy sandy beaches: field observations and model predictions. *Sedimentology* 49, 483–503. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2002.00456.x>
- Dubarbier, B., Castelle, B., Marieu, V., Ruessink, G., 2015. Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior. *Coast. Eng.* 95, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.09.004>
- Dubarbier, B., Castelle, B., Ruessink, G., Marieu, V., 2017. Mechanisms controlling the complete accretionary beach state sequence. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5645–5654. <https://doi.org/10.1002/2017GL073094>
- Duncan, J.R., 1964. The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development. *Mar. Geol.* 2, 186–197. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(64\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(64)90039-8)
- Flemming, B.W., 2011. 3.02 - geology, morphology, and sedimentology of estuaries and coasts 7–38.
- Gallagher, E., Wadman, H., McNinch, J., Reniers, A., Koktas, M., 2016. A Conceptual Model for Spatial Grain Size Variability on the Surface of and within Beaches. *J. Mar. Sci. Eng.* 4, 38. <https://doi.org/10.3390/jmse4020038>

- Gallagher, E.L., MacMahan, J., Reniers, A.J.H.M., Brown, J., Thornton, E.B., 2011. Grain size variability on a rip-channeled beach. *Mar. Geol.* 287, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>
- Gallop, S.L., Kennedy, D.M., Loureiro, C., Naylor, L.A., Muñoz-Pérez, J.J., Jackson, D.W.T., Fellowes, T.E., 2020. Geologically controlled sandy beaches: Their geomorphology, morphodynamics and classification. *Sci. Total Environ.* 731, 139123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139123>
- Galvin Jr., C.J., 1968. Breaker type classification on three laboratory beaches. *J. Geophys. Res.* 1896-1977 73, 3651–3659. <https://doi.org/10.1029/JB073i012p03651>
- Garlan, T., Almar, R., Gauduin, H., Gosselin, M., Morio, O., 2020. 3D variability of sediment granulometry in two tropical environment: Nha Trang (Vietnam) and of Saint-Louis (Sénégal). *J. Coast. Res.* 5.
- Garnier, R., Falqués, A., Calvete, D., Thiébot, J., Ribas, F., 2013. A mechanism for sandbar straightening by oblique wave incidence. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2726–2730. <https://doi.org/10.1002/grl.50464>
- Garola, A., López-Dóriga, U., Jiménez, J.A., 2022. The economic impact of sea level rise-induced decrease in the carrying capacity of Catalan beaches (NW Mediterranean, Spain). *Ocean Coast. Manag.* 218, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106034>
- Gourlay, M.R., Meulen, T. van der, 1968. Beach and dune erosion tests (I). M0935.
- Graham, D., Rollet, A., Rice, S., Piégay, H., 2012. Conversions of Surface Grain-Size Samples Collected and Recorded Using Different Procedures. *J. Hydraul. Eng.* 138, 839–849. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000595](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000595)
- Grasso, F., Castelle, B., Ruessink, B.G., 2012. Turbulence dissipation under breaking waves and bores in a natural surf zone. *Cont. Shelf Res.* 43, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.05.014>
- Grasso, F., Michallet, H., Barthélemy, E., Certain, R., 2009. Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology: Transients and equilibrium states. *J. Geophys. Res. Oceans* 114. <https://doi.org/10.1029/2009JC005308>
- Gujar, A.R., Ganesan, P., Iyer, S.D., Gaonkar, S.S., Ambre, N.V., Loveson, V.J., Mislankar, P.G., 2011. Influence of morphodynamic variability over seasonal beach sediments and its probable effect on coastal development. *Ocean Coast. Manag.* 54, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.03.007>
- Gunaratna, T., Suzuki, T., Yanagishima, S., 2019. Cross-shore grain size and sorting patterns for the bed profile variation at a dissipative beach: Hasaki Coast, Japan. *Mar. Geol.* 407, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.10.008>
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1989. GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Report 1. Technical Reference. (DTIC Document).
- Harley, M.D., Turner, I.L., Kinsela, M.A., Middleton, J.H., Mumford, P.J., Splinter, K.D., Phillips, M.S., Simmons, J.A., Hanslow, D.J., Short, A.D., 2017. Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Sci. Rep.* 7, 6033. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05792-1>
- Hay, A.E., Zedel, L., Stark, N., 2014. Sediment dynamics on a steep, megatidal, mixed sand–gravel–cobble beach. *Earth Surf. Dyn.* 2, 443–453. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-443-2014>
- Heritage, G.L., Milan, D.J., 2009. Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology, Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models* 113, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.021>

- Hoefel, F., Elgar, S., 2003. Wave-Induced Sediment Transport and Sandbar Migration. *Science* 299, 1885–1887. <https://doi.org/10.1126/science.1081448>
- Holland, K.T., Elmore, P.A., 2008. A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth-Sci. Rev.* 89, 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.003>
- Holland, K.T., Holman, R.A., 1996. Field observations of beach cusps and swash motions. *Mar. Geol.* 134, 77–93. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(96\)00025-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(96)00025-4)
- Houston, J.R., 2018. The economic value of America’s beaches — a 2018 update 86.
- Hunt, E., Davidson, M., Steele, E.C.C., Amies, J.D., Scott, T., Russell, P., 2023. Shoreline modelling on timescales of days to decades. *Camb. Prisms Coast. Futur.* 1, e17. <https://doi.org/10.1017/cft.2023.5>
- Ibaceta, R., Splinter, K.D., Harley, M.D., Turner, I.L., 2022. Improving multi-decadal coastal shoreline change predictions by including model parameter non-stationarity. *Front. Mar. Sci.* 9.
- Inman, D., Chamberlain, T., 1955. Particle-size Distribution in Nearshore Sediments1. *Find. Anc. Shorel.* 3. <https://doi.org/10.2110/pec.55.01.0106>
- Iribarren Cavanilles, R., Casto Nogales, M., 1949. Protection des ports. PIANC Congr. 1949 SII-C4.
- Isla, F.I., Bujalesky, G.G., 2005. Groundwater Dynamics on Macrotidal Gravel Beaches of Tierra del Fuego, Argentina\*. *J. Coast. Res.* 211, 65–72. <https://doi.org/10.2112/02102.1>
- Ivamy, M.C., Kench, P.S., 2006. Hydrodynamics and morphological adjustment of a mixed sand and gravel beach, Torere, Bay of Plenty, New Zealand. *Mar. Geol.* 228, 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.01.002>
- Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G., del Rio, L., 2005. Geological control of beach morphodynamic state. *Mar. Geol.* 216, 297–314. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.02.021>
- James, M., Ilic, S., Ružić, I., 2013. Measuring 3D coastal change with a digital camera 2013, 893–904.
- Jaramillo, C., Jara, M.S., González, M., Medina, R., 2020. A shoreline evolution model considering the temporal variability of the beach profile sediment volume (sediment gain / loss). *Coast. Eng.* 156, 103612. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103612>
- Jaud, M., Grasso, F., Le Dantec, N., Verney, R., Delacourt, C., Ammann, J., Deloffre, J., Grandjean, P., 2016. Potential of UAVs for Monitoring Mudflat Morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France). *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 5, 50. <https://doi.org/10.3390/ijgi5040050>
- Jennings, R., Shulmeister, J., 2002. A field based classification scheme for gravel beaches. *Mar. Geol.* 186, 211–228. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00314-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00314-6)
- Jiang, C., Wu, Z., Chen, J., Deng, B., Long, Y., 2015. Sorting and Sedimentology Character of Sandy Beach Under Wave Action. *Procedia Eng.*, 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015) 116, 771–777. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.363>
- Kamphuis, J.W., 1991. Alongshore Sediment Transport Rate. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 117, 624–640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:6\(624\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(624))
- Karsten M., 2017, 2017. Shoreline management guidelines. DHI Water Environ. Horsholm Den. 2017.
- Karunaratna, H., Horrillo-Caraballo, J.M., Ranasinghe, R., Short, A.D., Reeve, D.E., 2012. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Mar. Geol.* 299–302, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.12.011>

- Kim, H., Hall, K., Jin, J.-Y., Park, G.-S., Lee, J., 2014. Empirical estimation of beach-face slope and its use for warning of berm erosion. *J. Meas. Eng.* 2, 29–42.
- Komar, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*, 2nd ed. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- 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. *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 584. <https://doi.org/10.3390/jmse11030584>
- Laporte-Fauret, Q., 2021. Rôle des interactions biophysiques dans la dynamique dunaire en réponse aux perturbations (phdthesis). Université de Bordeaux.
- Laporte-Fauret, Q., Castelle, B., Michalet, R., Marieu, V., Bujan, S., Rosebery, D., 2021. Morphological and ecological responses of a managed coastal sand dune to experimental notches. *Sci. Total Environ.* 782, 146813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146813>
- Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., Rosebery, D., 2019. Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 63. <https://doi.org/10.3390/jmse7030063>
- Larson, M., 1991. Equilibrium Profile of a Beach with Varying Grain Size. Presented at the Coastal Sediments, ASCE, pp. 905–919.
- Lemos, 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 Dyn.* 68, 1207–1220. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1185-1>
- Lemos, C., Floc'h, F., Yates, M.L., Dantec, N.L., Marieu, V., Hamon, K., Cuq, V., Suanez, S.S., Delacourt, C., 2017. Equilibrium modeling of the Beach Profile on a Macrotidal Embayed Beach. *Coast. Dyn.*
- Lippmann, T.C., Holman, R.A., Hathaway, K.K., 1993. Episodic, Nonstationary Behavior of a Double Bar System at Duck, North Carolina, U.S.A., 1986–1991. *J. Coast. Res.* 49–75.
- Loureiro, C., Ferreira, Ó., Cooper, J.A.G., 2013. Applicability of parametric beach morphodynamic state classification on embayed beaches. *Mar. Geol.* 346, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.005>
- Ludka, B., Guza, R., O'reilly, W., Merrifield, M., Flick, R., Bak, S., Hesser, T., Bucciarelli, R., Olfe, C., Woodward, B., Boyd, W., Smith, K., Okihiro, M., Grenzeback, R., Parry, L., Boyd, G., 2019. Sixteen years of bathymetry and waves at San Diego beaches. *Sci. Data* 6, 161. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0167-6>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., 2018. The State of the World's Beaches. *Sci. Rep.* 8, 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Ma, B., Dai, Z., Pang, W., Ge, Z., Li, S., Mei, X., Huang, H., 2019. Dramatic typhoon-induced variability in the grain size characteristics of sediments at a meso-macrotidal beach. *Cont. Shelf Res.* 191, 104006. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104006>
- Martins, K., Blenkinsopp, C.E., Deigaard, R., Power, H.E., 2018. Energy Dissipation in the Inner Surf Zone: New Insights From LiDAR-Based Roller Geometry Measurements. *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 3386–3407. <https://doi.org/10.1029/2017JC013369>
- Martins, K., Blenkinsopp, C.E., Zang, J., 2015. Monitoring Individual Wave Characteristics in the Inner Surf with a 2-Dimensional Laser Scanner (LiDAR). *J. Sens.* 2016, e7965431. <https://doi.org/10.1155/2016/7965431>
- Mason, T., Coates, T.T., 2001. Sediment Transport Processes on Mixed Beaches: A Review for Shoreline Management. *J. Coast. Res.* 17, 645–657.

- Masselink, G., Auger, N., Russell, P., O'hare, T., 2007. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology* 54, 39–53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00825.x>
- Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D., Floc'h, F., 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophys. Res. Lett.* 43, 2135–2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>
- Masselink, G., Li, L., 2001. The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Mar. Geol.* 176, 139–156. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00161-X)
- Masselink, G., Pattiaratchi, C., 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Mar. Geol.* 172, 243–263. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00128-6)
- Masselink, G., Russell, P., Turner, I., Blenkinsopp, C., 2009. Net sediment transport and morphological change in the swash zone of a high-energy sandy beach from swash event to tidal cycle time scales. *Mar. Geol.* 267, 18–35. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.09.003>
- Masselink, G., Short, A., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *J. Coast. Res.* 9, 785–800.
- McCarroll, R.J., Brander, R.W., Turner, I.L., Leeuwen, B.V., 2016. Shoreface storm morphodynamics and mega-rip evolution at an embayed beach: Bondi Beach, NSW, Australia. *Cont. Shelf Res.* 116, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.013>
- McGlashan, D.J., Duck, R.W., Reid, C.T., 2005. Defining the foreshore: coastal geomorphology and British laws. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 62, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.08.016>
- McLachlan, A., Defeo, O., Short, A.D., 2018. Characterising sandy beaches into major types and states: Implications for ecologists and managers. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 215, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.027>
- McLean, R.F., Kirk, R.M., 1969. Relationships between grain size, size-sorting, and foreshore slope on mixed sand - shingle beaches. *N. Z. J. Geol. Geophys.* 12, 138–155. <https://doi.org/10.1080/00288306.1969.10420231>
- Melet, A., Meyssignac, B., Almar, R., Le Cozannet, G., 2018. Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise. *Nat. Clim. Change* 8. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0088-y>
- Ménard, A.D., Houser, C., Brander, R.W., Trimble, S., Scaman, A., 2018. The psychology of beach users: importance of confirmation bias, action, and intention to improving rip current safety. *Nat. Hazards* 94, 953–973. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3424-7>
- Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., Mazzino, A., 2015. Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Model.* 90, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.04.003>
- Miller, H.C., 1999. Field measurements of longshore sediment transport during storms. *Coast. Eng.* 36, 301–321. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00010-1)
- Miller, J., Dean, R., 2004. A simple new shoreline model. *Coast. Eng.* 51, 531–556. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006>
- Montaño, J., Coco, G., Antolínez, J.A.A., Beuzen, T., Bryan, K.R., Cagigal, L., Castelle, B., Davidson, M.A., Goldstein, E.B., Ibaceta, R., Idier, D., Ludka, B.C., Masoud-Ansari, S., Méndez, F.J., Murray, A.B., Plant, N.G., Ratliff, K.M., Robinet, A., Rueda, A., Sénéchal, N., Simmons, J.A., Splinter, K.D., Stephens, S., Townend, I., Vitousek, S., Vos, K., 2020. Blind testing of shoreline evolution models. *Sci. Rep.* 10, 2137. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59018-y>

- Morio, O., 2017. Compréhension des dynamiques morpho-sédimentaires cohésives et non-cohésives des littoraux de Bretagne Sud (France) à différentes échelles spatio-temporelles. 613.
- Mouragues, A., 2020. Etude de la dynamique instationnaire des vagues et des circulations associées en milieu littoral (These de doctorat). Bordeaux.
- Moutzouris, C.I., 2015. Longshore Sediment Transport Rate vs. Cross – Shore Distribution of Sediment Grain Sizes 1959–1973. <https://doi.org/10.1061/9780872626874.146>
- Mwakumanya, M.A., Bdo, O., 2007. Beach Morphological Dynamics: A Case Study of Nyali and Bamburi Beaches in Mombasa, Kenya. *J. Coast. Res.* 232, 374–379. <https://doi.org/10.2112/04-0354.1>
- Nielsen, P., 2002. Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modelling. *Coast. Eng.* 45, 53–60. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00036-9)
- Nordstrom, K.F., 1977. The use of grain size statistics to distinguish between high- and moderate-energy beach environments. *J. Sediment. Res.* 47, 1287–1294. <https://doi.org/10.1306/212F731F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Nunes, P., Ghermandi, A., 2013. The Economics of Marine Ecosystems: Reconciling Use and Conservation of Coastal and Marine Systems and the Underlying Natural Capital. *Environ. Resour. Econ.* 56, 459–465.
- Paskoff, R., 1998. La crise des plages : pénurie de sédiments. *Mappemonde* 52, 11–15. <https://doi.org/10.3406/mappe.1998.2120>
- Pedreiros, R., Howa, H.L., Michel, D., 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Mar. Geol.* 135, 35–49. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00042-4)
- Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K., Schardt, M., 2014. Assessment of the mapping potential of Pléiades stereo and triplet data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* II-3, 103–109. <https://doi.org/10.5194/isprsrannals-II-3-103-2014>
- Phillips, M.S., Blenkinsopp, C.E., Splinter, K.D., Harley, M.D., Turner, I.L., 2019. Modes of Berm and Beachface Recovery Following Storm Reset: Observations Using a Continuously Scanning Lidar. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 124, 720–736. <https://doi.org/10.1029/2018JF004895>
- Plant, N.G., Holman, R.A., Freilich, M.H., Birkemeier, W.A., 1999. A simple model for interannual sandbar behavior. *J. Geophys. Res. Oceans* 104, 15755–15776. <https://doi.org/10.1029/1999JC900112>
- Poumadère, M., Bertoldo, R., Idier, D., Mallet, C., Oliveros, C., Robin, M., 2015. Coastal vulnerabilities under the deliberation of stakeholders: The case of two French sandy beaches. *Ocean Coast. Manag.* 105, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.024>
- Price, T., Ruessink, G., 2013. Observations and conceptual modelling of morphological coupling in a double sandbar system. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 477–489. <https://doi.org/10.1002/esp.3293>
- Prodger, S., Russell, P., Davidson, M., 2016a. Grain-size distributions on high energy sandy beaches and their relation to wave dissipation. *Sedimentology* 64. <https://doi.org/10.1111/sed.12353>
- Prodger, S., Russell, P., Davidson, M., Miles, J., 2016b. Beach Morphological Predictions: The Impact of a Temporally Varying Sediment Fall Velocity. *J. Coast. Res.* 447–451. <https://doi.org/10.2112/SI75-090.1>
- Prodger, S., Russell, P., Davidson, M., Miles, J., Scott, T., 2016c. Understanding and predicting the temporal variability of sediment grain size characteristics on high-energy beaches. *Mar. Geol.* 376, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.04.003>

- Puleo, J.A., Hutschenreuter, K., Cowan, P., Carey, W., Arford-Granholm, M., McKenna, K.K., 2016. Delaware surf zone injuries and associated environmental conditions. *Nat. Hazards* 81, 845–867. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2108-9>
- Qi, H., Cai, F., Lei, G., Cao, H., Shi, F., 2010. The response of three main beach types to tropical storms in South China. *Mar. Geol.* 275, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.06.005>
- Rector, R.L., 1954. Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Beaches. U.S. Beach Erosion Board.
- Reis, A.H., Gama, C., 2010. Sand size versus beachface slope — An explanation based on the Constructal Law. *Geomorphology* 114, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.008>
- Reniers, A.J.H.M., Gallagher, E.L., MacMahan, J.H., Brown, J.A., van Rooijen, A.A., van Thiel de Vries, J.S.M., van Prooijen, B.C., 2013. Observations and modeling of steep-beach grain-size variability. *J. Geophys. Res. Oceans* 118, 577–591. <https://doi.org/10.1029/2012JC008073>
- Robin, N., Billy, J., Castelle, B., Hesp, P., Laporte-Fauret, Q., Lerma, A.N., Marieu, V., Rosebery, D., Bujan, S., Destribats, B., Michalet, R., 2020. Beach-dune Recovery from the Extreme 2013-2014 Storms Erosion at Truc Vert Beach, Southwest France: New Insights from Ground-penetrating Radar. *J. Coast. Res.* 95, 588–592. <https://doi.org/10.2112/SI95-115.1>
- Robles, L.A., 2006. Cervical spine injuries in ocean bathers: wave-related accidents. *Neurosurgery* 58, 920–923; discussion 920-923. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000209941.18102.35>
- Rodriguez-Padilla, I., Castelle, B., Marieu, V., Morichon, D., 2019. A Simple and Efficient Image Stabilization Method for Coastal Monitoring Video Systems. *Remote Sens.* 12, 70. <https://doi.org/10.3390/rs12010070>
- Rollet, A.-J., 2007. Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain (phdthesis). Université Jean Moulin - Lyon III.
- Roudaut, G., Almar, R., Deschamps, A., Karine, D., Perrot, Y., Delacourt, C., Ammann, J., Le Dantec, N., Roubaud, F., Sall, M., Brehmer, P., 2014. Kite aerial photography system : a low cost and high resolution solution for beach monitoring (2D map and 3D topography).
- Rubin, D.M., 2004. A Simple Autocorrelation Algorithm for Determining Grain Size from Digital Images of Sediment. *J. Sediment. Res.* 74, 160–165. <https://doi.org/10.1306/052203740160>
- Ruessink, B.G., Terwindt, J.H.J., 2000. The behaviour of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model. *Mar. Geol.* 163, 289–302. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00094-8)
- Ruessink, G., Kuriyama, Y., Reniers, A., Roelvink, D.J.A., Walstra, D.-J., 2007. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks. *J. Geophys. Res.* 112 2007 Doi1010292006JF000730 112. <https://doi.org/10.1029/2006JF000730>
- Schwartz, M., 2006. Encyclopedia of Coastal Science. Springer Science & Business Media.
- Scott, T., Masselink, G., Russell, P., 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Mar. Geol. - MAR Geol.* 286, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.004>
- Sénéchal, N., Abadie, S., Gallagher, E., MacMahan, J., Masselink, G., Michallet, H., Reniers, A., Ruessink, G., Russell, P., Sous, D., Turner, I., Arduin, F., Bonneton, P., Bujan, S., Capo, S., Certain, R., Pedreros, R., Garlan, T., 2011. The ECORS-Truc Vert'08 nearshore field experiment: presentation of a three-dimensional morphologic system in

- a macro-tidal environment during consecutive extreme storm conditions. *Ocean Dyn.* 61, 2073–2098. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0472-x>
- Short, A., 1979. Three Dimensional Beach-Stage Model. *J. Geol.* 87, 553–571. <https://doi.org/10.1086/628445>
- Short, A.D., Aagaard, T., 1993. Single and Multi-Bar Beach Change Models. *J. Coast. Res.* 141–157.
- Soares, A.G., 2003. Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic Communities in Temperate, Subtropical and Tropical Regions: A Macroecological Approach.
- Soloy, A., 2022. Etude de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire sur les plages de galets (These de doctorat). Normandie.
- Soulsby, R., 1997. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. Thomas Telford.
- Splinter, K.D., Harley, M.D., Turner, I.L., 2018. Remote Sensing Is Changing Our View of the Coast: Insights from 40 Years of Monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. *Remote Sens.* 10, 1744. <https://doi.org/10.3390/rs10111744>
- Splinter, K.D., Turner, I.L., Davidson, M.A., Barnard, P., Castelle, B., Oltman-Shay, J., 2014. A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 119, 1936–1958. <https://doi.org/10.1002/2014JF003106>
- Splinter, K.D., Turner, I.L., Reinhardt, M., Ruessink, G., 2017. Rapid adjustment of shoreline behavior to changing seasonality of storms: observations and modelling at an open-coast beach. *Earth Surf. Process. Landf.* 42, 1186–1194. <https://doi.org/10.1002/esp.4088>
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J., Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *Coast. Eng.* 47, 211–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6)
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coast. Eng.* 53, 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Stockdon, H.F., Jr., A.H.S., List, J.H., Holman, R.A., 2002. Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic Lidar Data. *J. Coast. Res.* 18, 502–513.
- Stokes, C., Davidson, M., Russell, P., 2015. Observation and prediction of three-dimensional morphology at a high-energy macrotidal beach. *Geomorphology* 243, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.024>
- Sunamura, T., 1984. Quantitative predictions of beach-face slopes. *GSA Bull.* 95, 242–245. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<242:QPOBS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<242:QPOBS>2.0.CO;2)
- Sunamura, T., 1975. “Static” Relationship Among Beach Slope, Sand Size, and Wave Properties. *Geogr. Rev. Jpn.* 48, 485–489. <https://doi.org/10.4157/grj.48.485>
- Thiébot, J., Idier, D., Garnier, R., Falqués, A., Ruessink, B.G., 2012. The influence of wave direction on the morphological response of a double sandbar system. *Cont. Shelf Res.* 32, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.014>
- Thornton, E.B., Humiston, R.T., Birkemeier, W., 1996. Bar/trough generation on a natural beach. *J. Geophys. Res. Oceans* 101, 12097–12110. <https://doi.org/10.1029/96JC00209>
- Thornton, E.B., MacMahan, J., Sallenger Jr., A.H., 2007. Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes. *Mar. Geol.* <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.02.018>
- Thorpe, A., Miles, J., Masselink, G., Russell, P., 2014. Bedform Dynamics in a Rip Current. *J. Coast. Res.* 70, 700–705. <https://doi.org/10.2112/SI70-118.1>
- Tolman, H.L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14.
- Trembanis, A., Wright, L., Friedrichs, C., Green, M., Hume, T., 2004. The effects of spatially complex inner shelf roughness on boundary layer turbulence and current and wave

- friction: Tairua Embayment, New Zealand. *Cont. Shelf Res.* 24, 1549–1571. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.04.006>
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., Gonzalez, M., 2013. An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Mar. Geol.* 346, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.002>
- Turner, I., Harley, M., Short, A., Simmons, J., Bracs, M., Phillips, M., Splinter, K., 2016. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Sci. Data* 3, 160024. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.24>
- Valdemoro, H.I., Jiménez, J.A., 2006. The Influence of Shoreline Dynamics on the Use and Exploitation of Mediterranean Tourist Beaches. *Coast. Manag.* 34, 405–423. <https://doi.org/10.1080/08920750600860324>
- van Enckevort, I.M.J., Ruessink, B.G., Coco, G., Suzuki, K., Turner, I.L., Plant, N.G., Holman, R.A., 2004. Observations of nearshore crescentic sandbars. *J. Geophys. Res. Oceans* 109. <https://doi.org/10.1029/2003JC002214>
- van IJzendoorn, C.O., Hallin, C., Cohn, N., Reniers, A.J.H.M., De Vries, S., 2023. Novel sediment sampling method provides new insights into vertical grain size variability due to marine and aeolian beach processes. *Earth Surf. Process. Landf.* 48, 782–800. <https://doi.org/10.1002/esp.5518>
- Vellinga, P., 1984. A tentative description of a universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches. *Coast. Eng.* 8, 177–188. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(84\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(84)90012-7)
- Viaña-Borja, S.P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R.P., Navarro, G., Caballero, I., 2023. Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 120, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103328>
- Vitousek, S., Cagigal, L., Montaña, J., Rueda, A., Mendez, F., Coco, G., Barnard, P.L., 2021. The Application of Ensemble Wave Forcing to Quantify Uncertainty of Shoreline Change Predictions. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 126, e2019JF005506. <https://doi.org/10.1029/2019JF005506>
- Vörösmarty, C., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., Syvitski, J., 2003. Anthropogenic Sediment Retention: Major Global Impact from Registered River Impoundments. *Glob. Planet. Change* 39, 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)
- Vos, K., Harley, M.D., Splinter, K.D., Walker, A., Turner, I.L., 2020. Beach Slopes From Satellite-Derived Shorelines. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2020GL088365. <https://doi.org/10.1029/2020GL088365>
- Vousdoukas, M.I., Almeida, L.P.M., Ferreira, Ó., 2012. Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 583–593. <https://doi.org/10.1002/esp.2264>
- Vousdoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T.A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., Feyen, L., 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat. Clim. Change* 10, 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- Wentworth, C.K., 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *J. Geol.* 30, 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wright, L.D., Chappell, J., Thom, B.G., Bradshaw, M.P., Cowell, P., 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Mar. Geol.* 32, 105–140. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(79\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(79)90149-X)

- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.* 56, 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. *J. Geophys. Res.* 114, C09014. <https://doi.org/10.1029/2009JC005359>

## Annexe A

Fiche de laboratoire utilisée pour le tamisage à sec.

Date de la campagne :
-----------------------

N° échantillon	
----------------	--

Masse sèche avant tamisage	
----------------------------	--

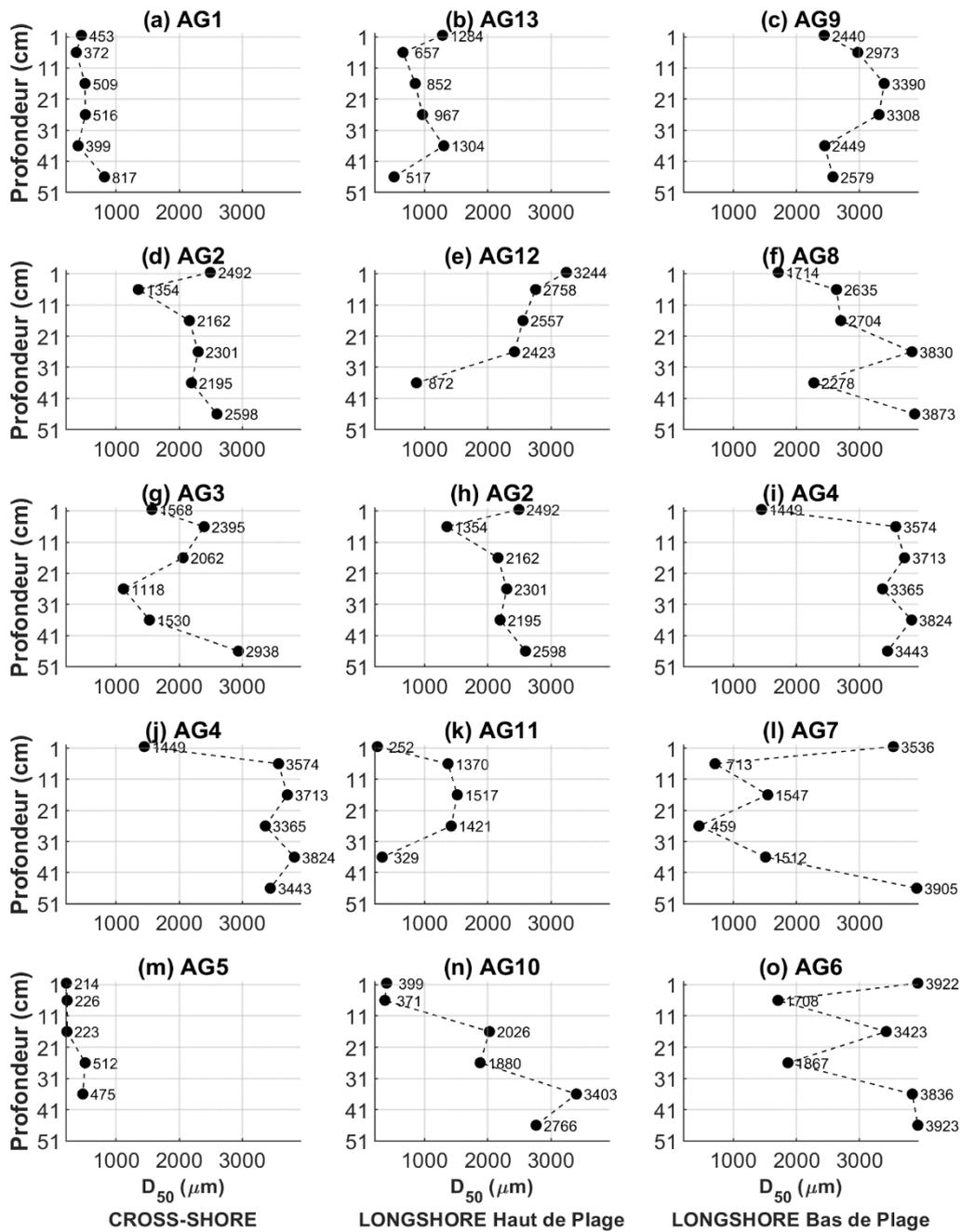
Tamis	Masse (en g)
4 mm	
3.15 mm	
2.5 mm	
2 mm	
1.6 mm	
1.25 mm	
1 mm	
800 $\mu\text{m}$	
630 $\mu\text{m}$	
500 $\mu\text{m}$	
400 $\mu\text{m}$	
315 $\mu\text{m}$	
250 $\mu\text{m}$	
200 $\mu\text{m}$	
100 $\mu\text{m}$	
50 $\mu\text{m}$	
Refus de tamis	

Masse sèche après tamisage	
----------------------------	--

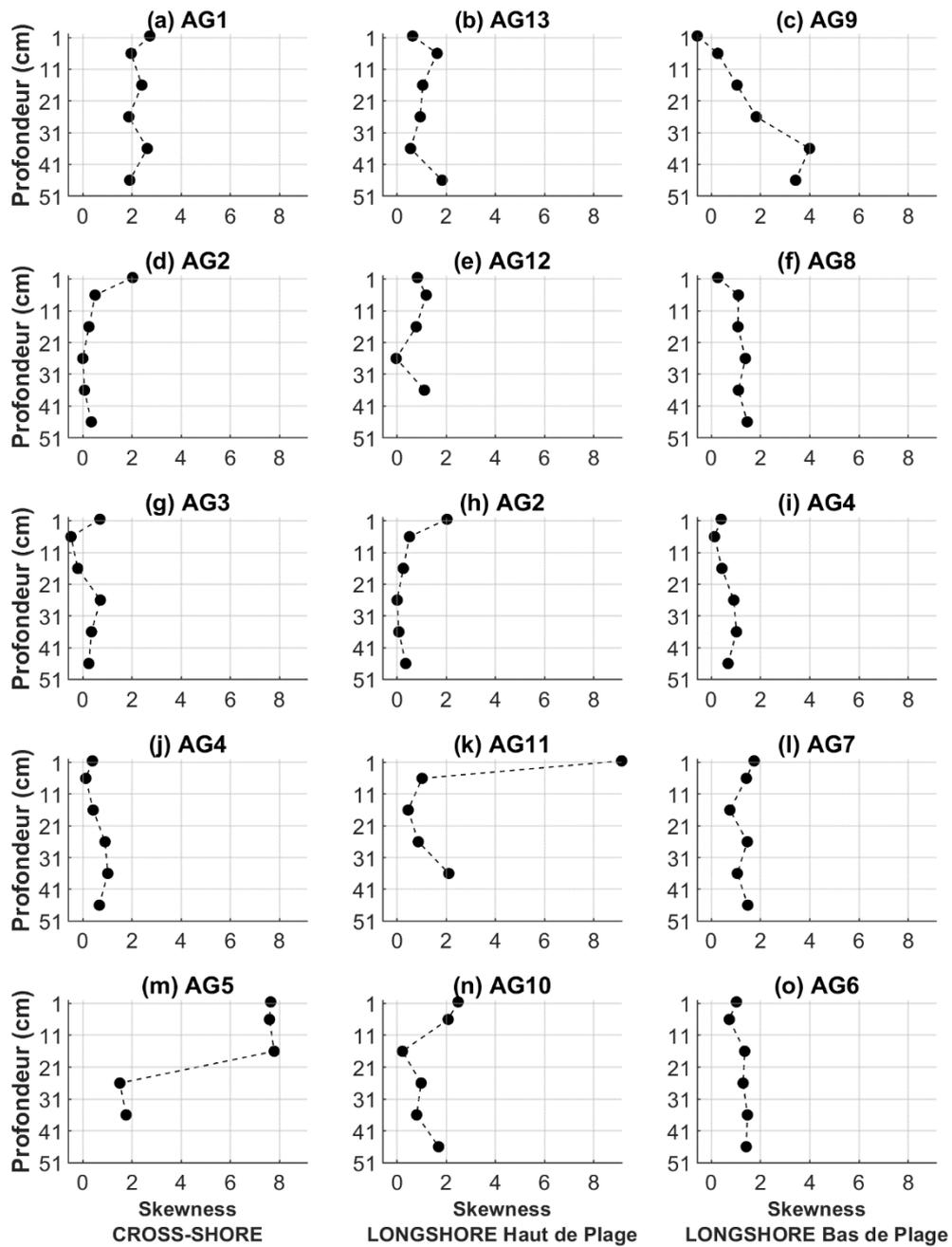
## **Annexe B**

Données brutes de  $D_{50}$  et *Skewness* des 13 stations de prélèvements, classées par strates et par radiales (sauf pour la plage de SA) pour l'ensemble des prélèvements collectés lors de chaque campagne. Afin de faciliter la compréhension des données présentées, le titre de chaque graphique est composé du nom de la plage ainsi que de la date de la campagne in situ, notée Plage-AAAAMMJJ (AAAA= l'année, MM= le mois et JJ= le jour.)

# AG-20200921

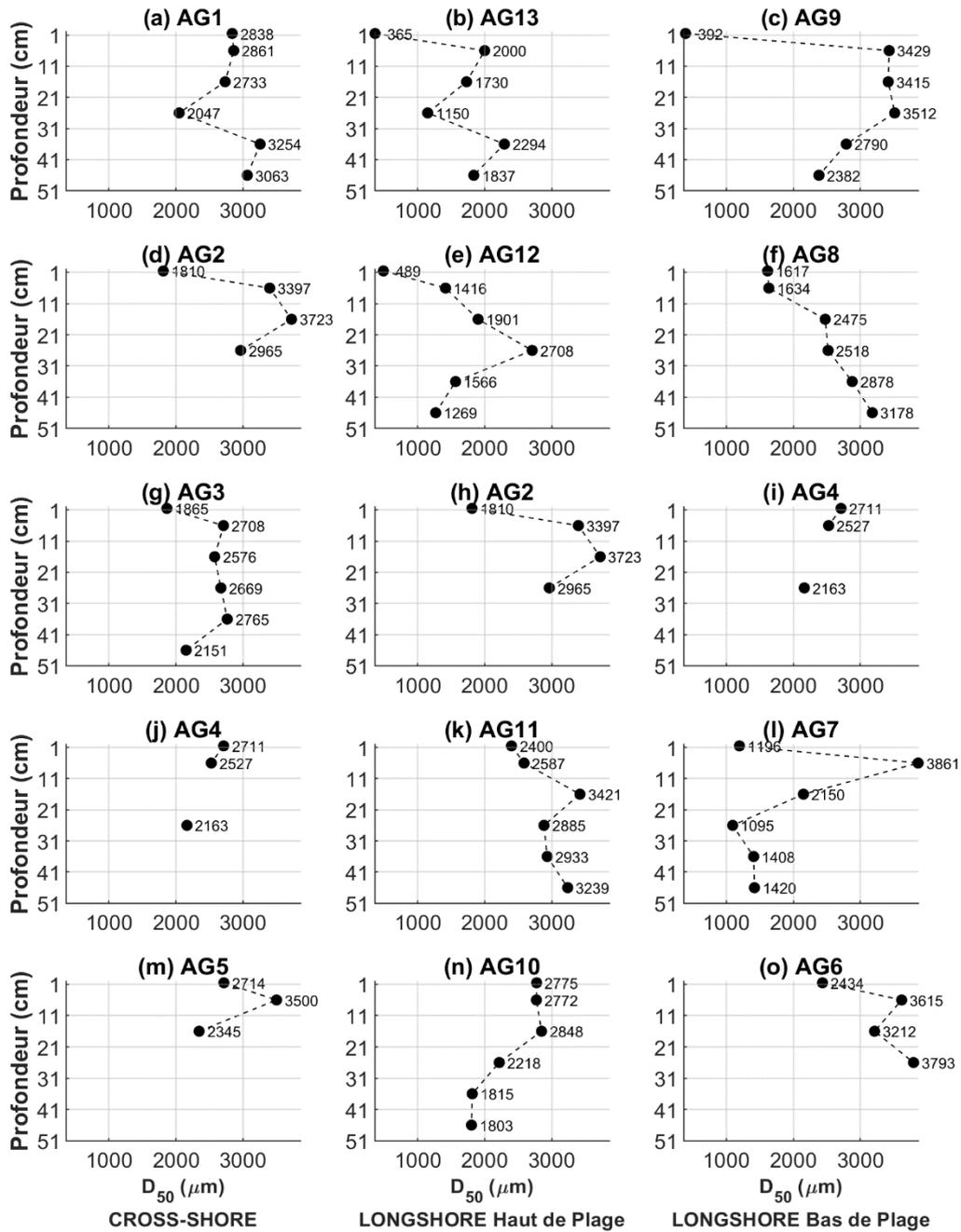


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.



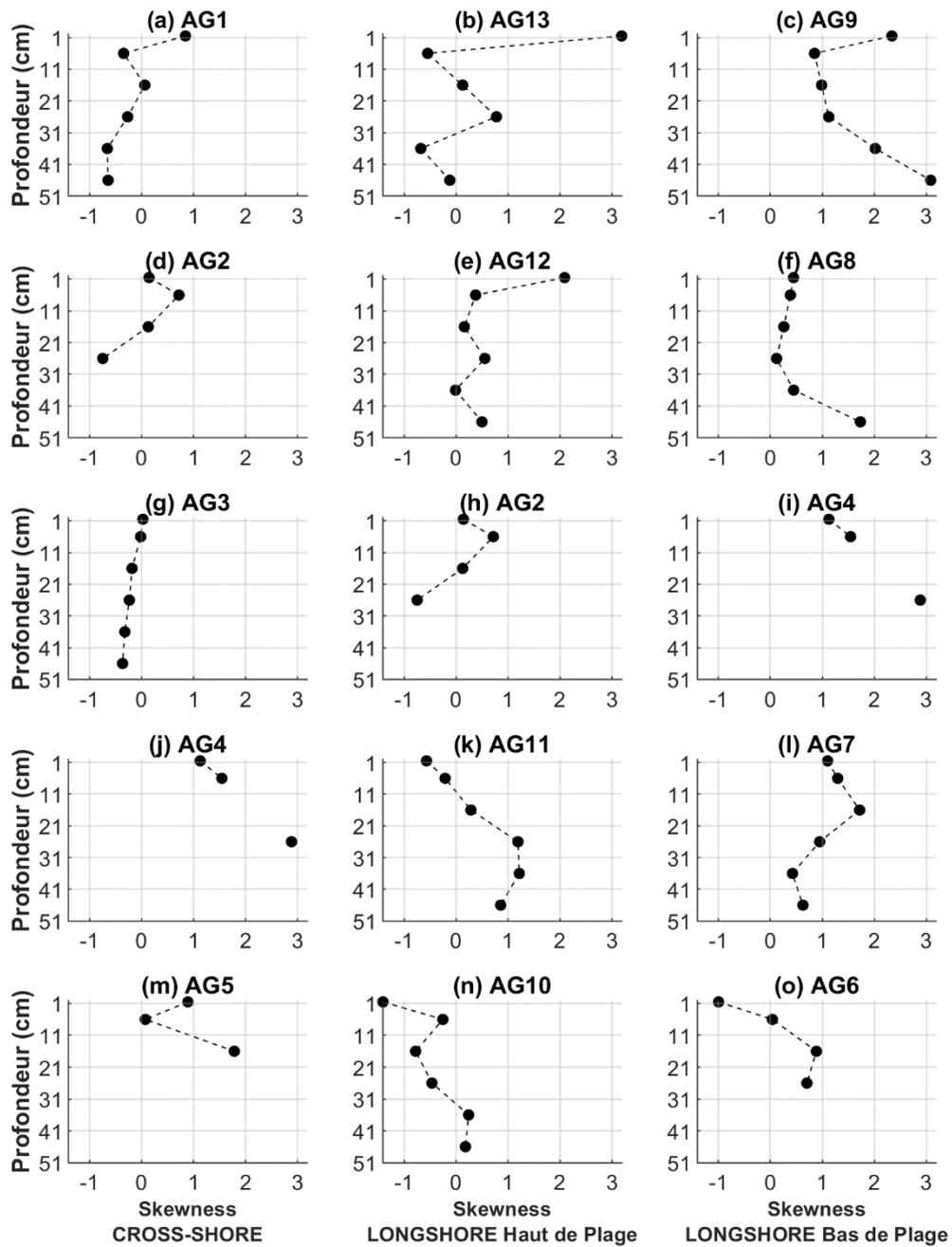
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20210330



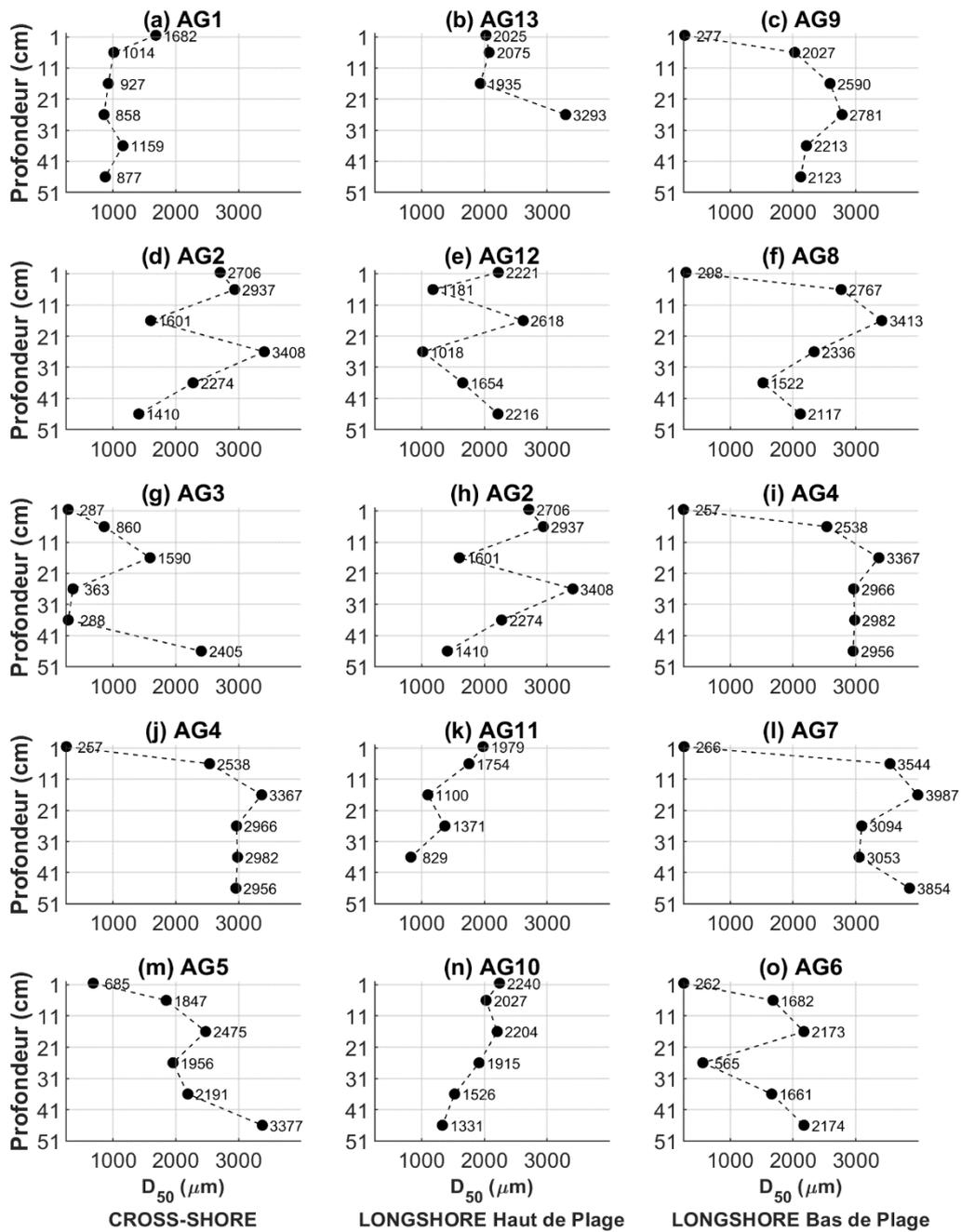
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20210330



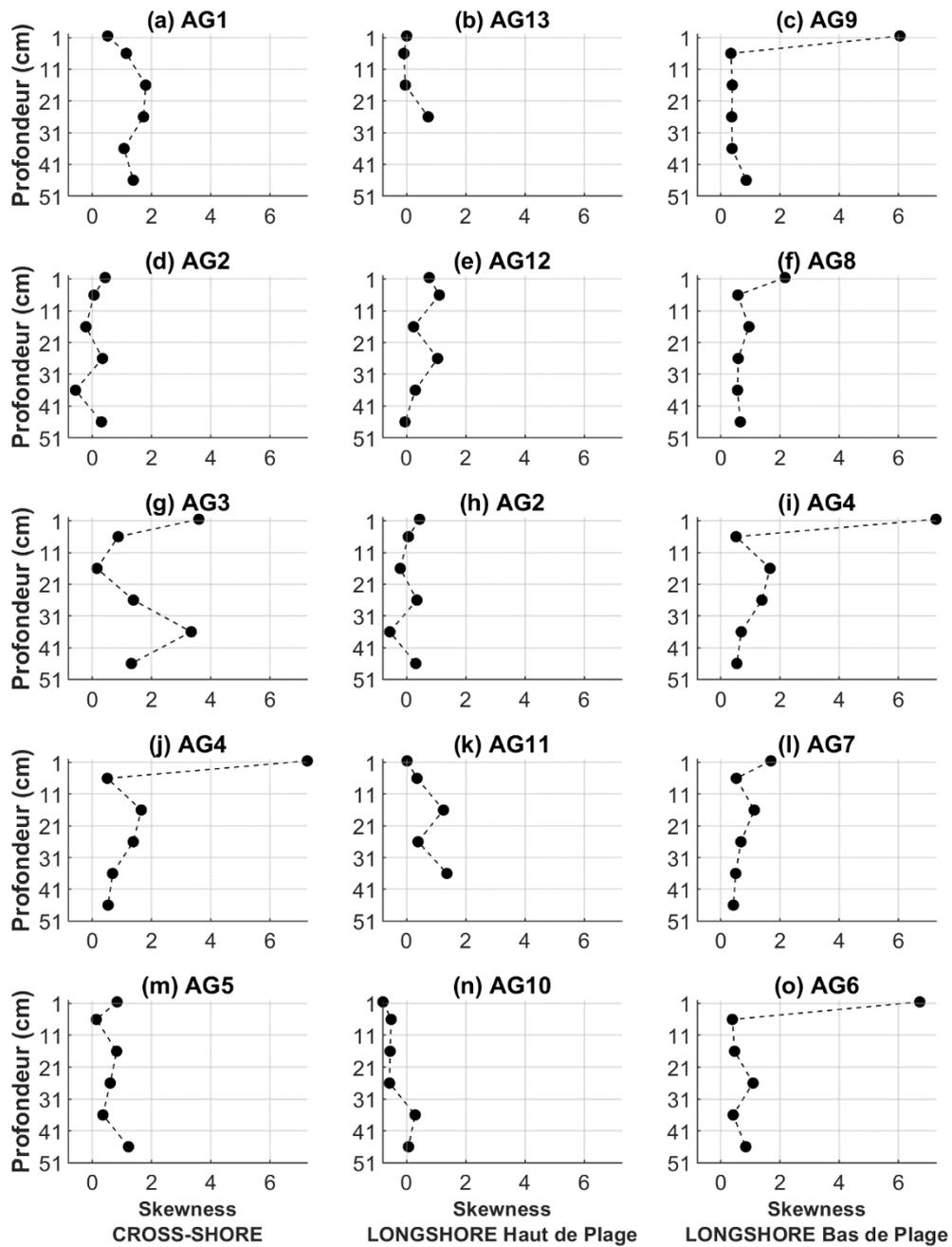
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20210909



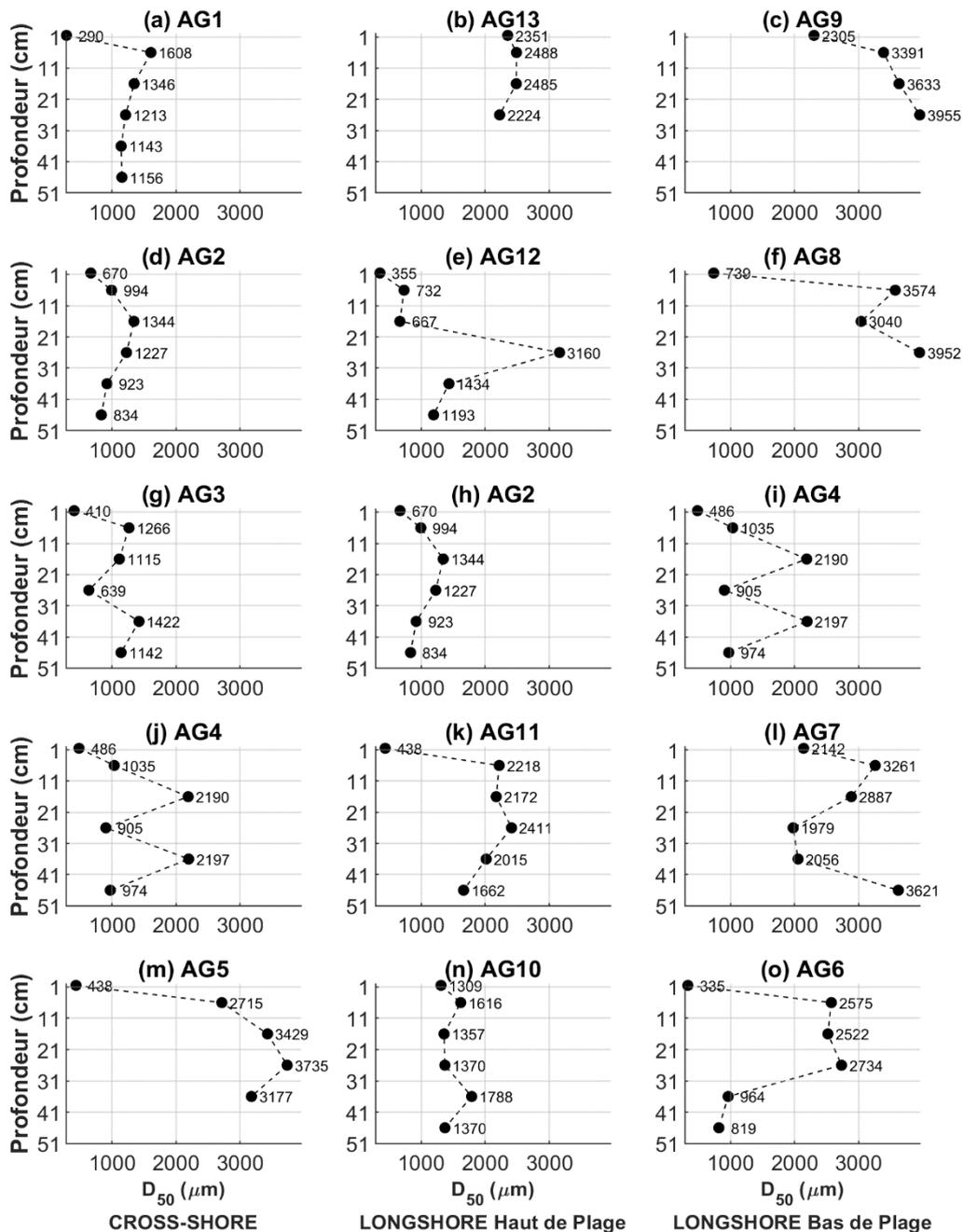
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20210909



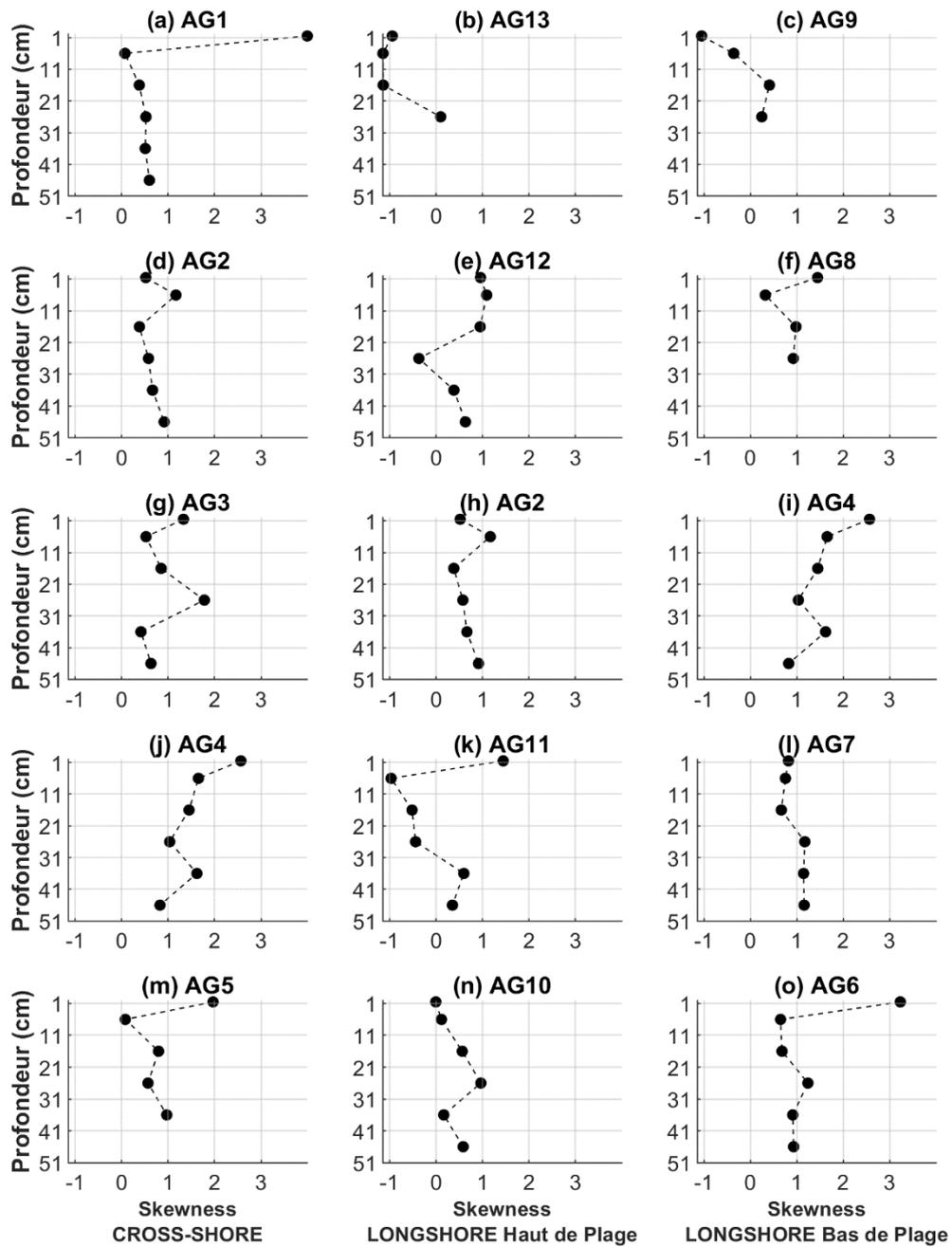
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20220331



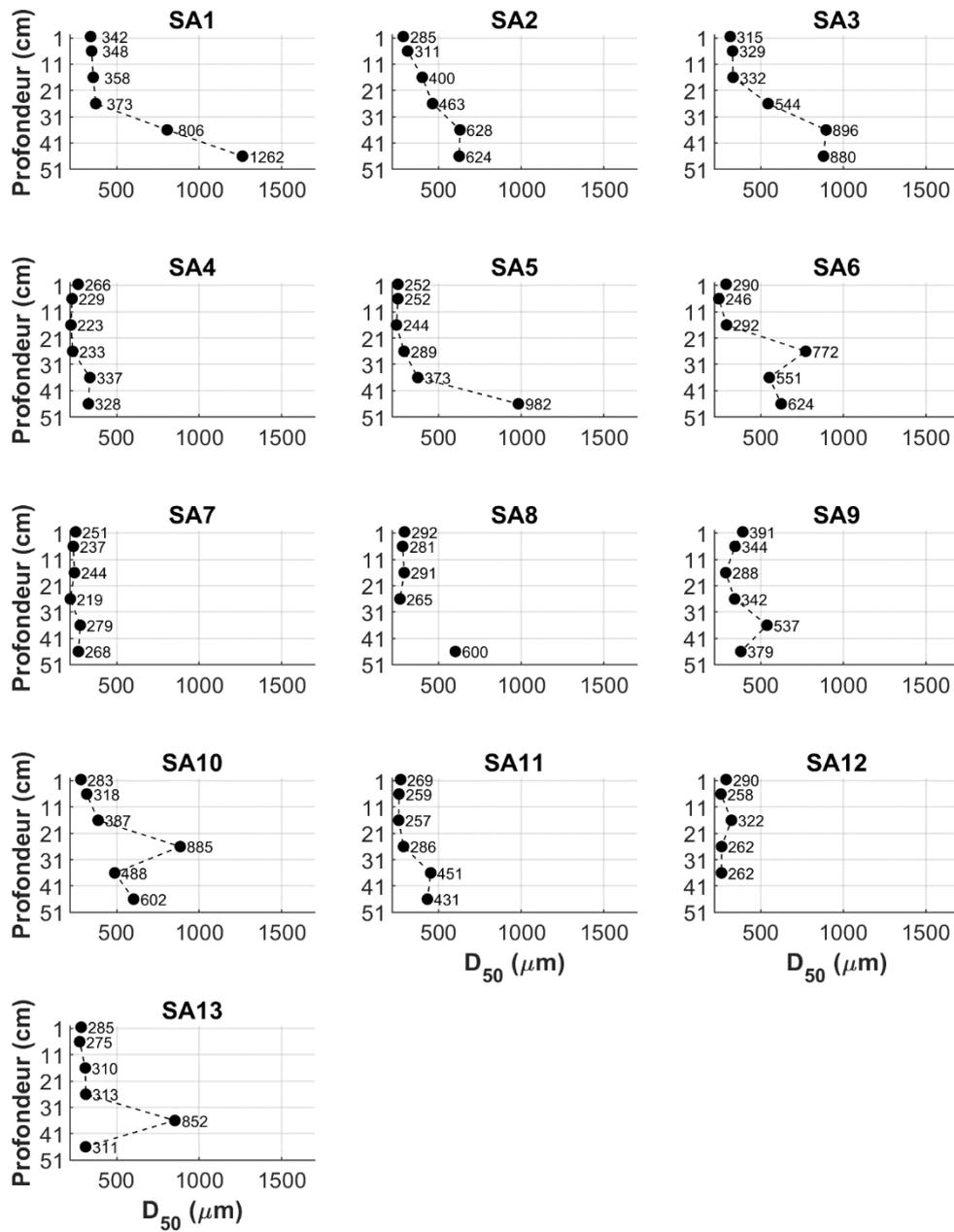
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# AG-20220331



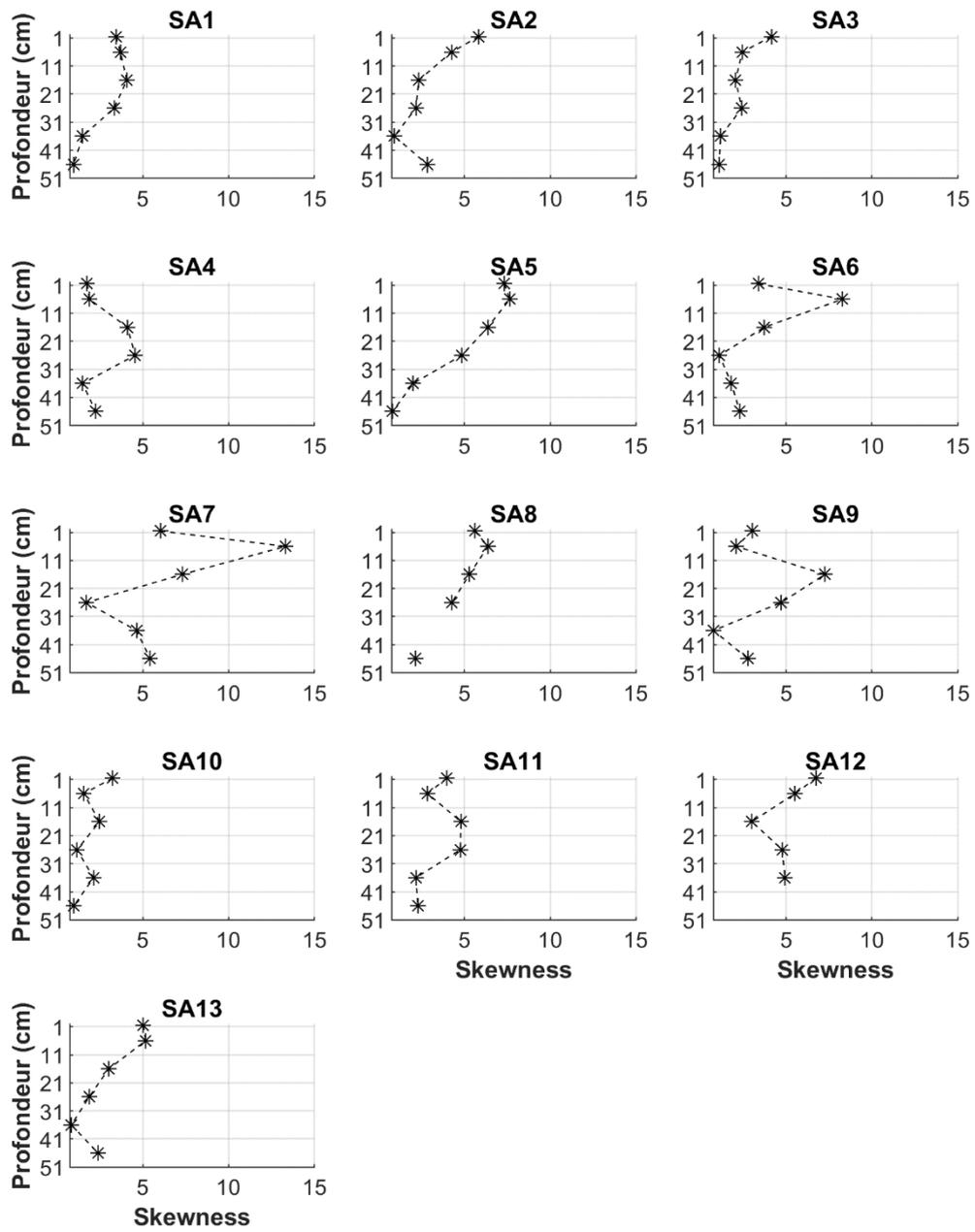
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SA-20210518



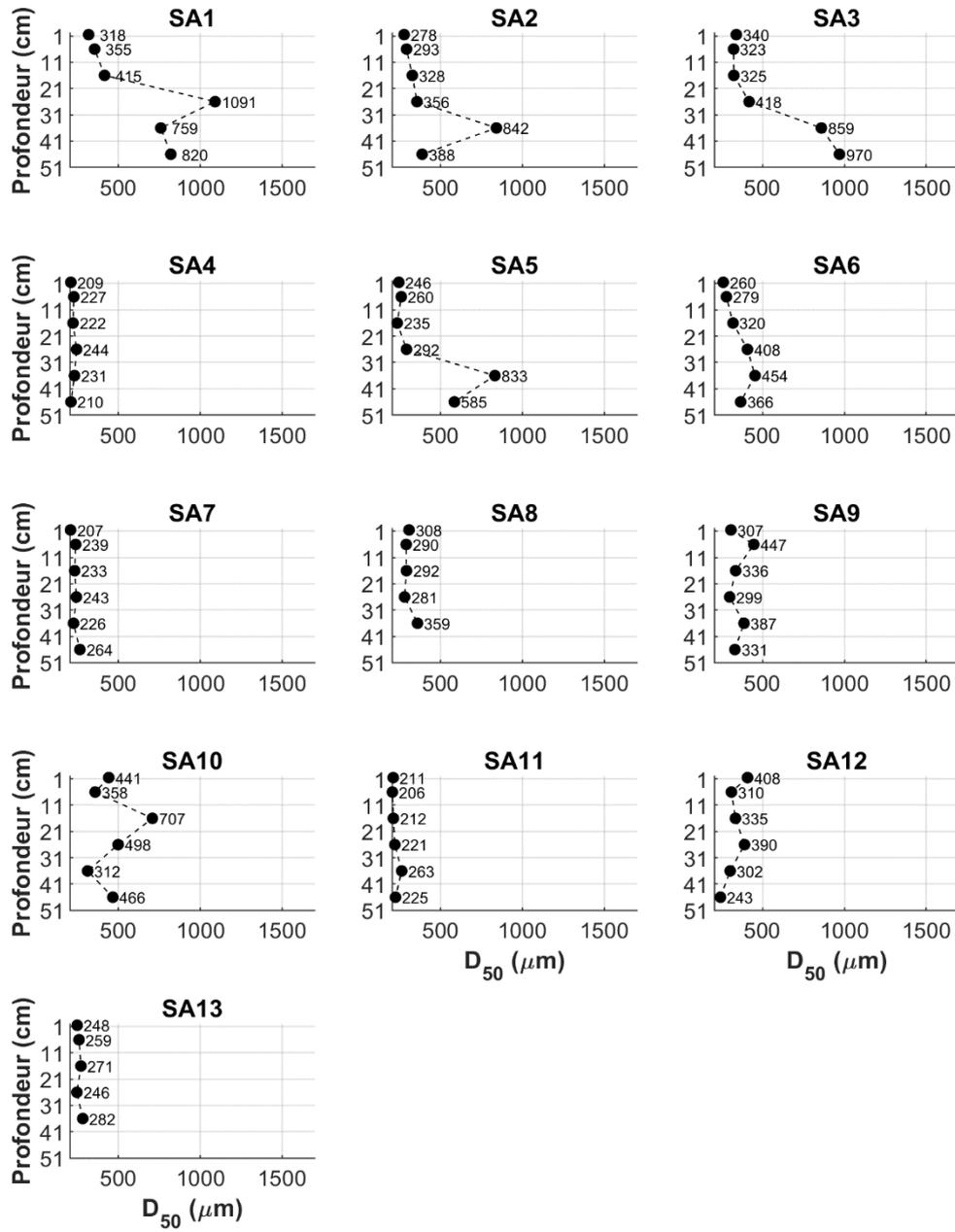
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SA-20210518



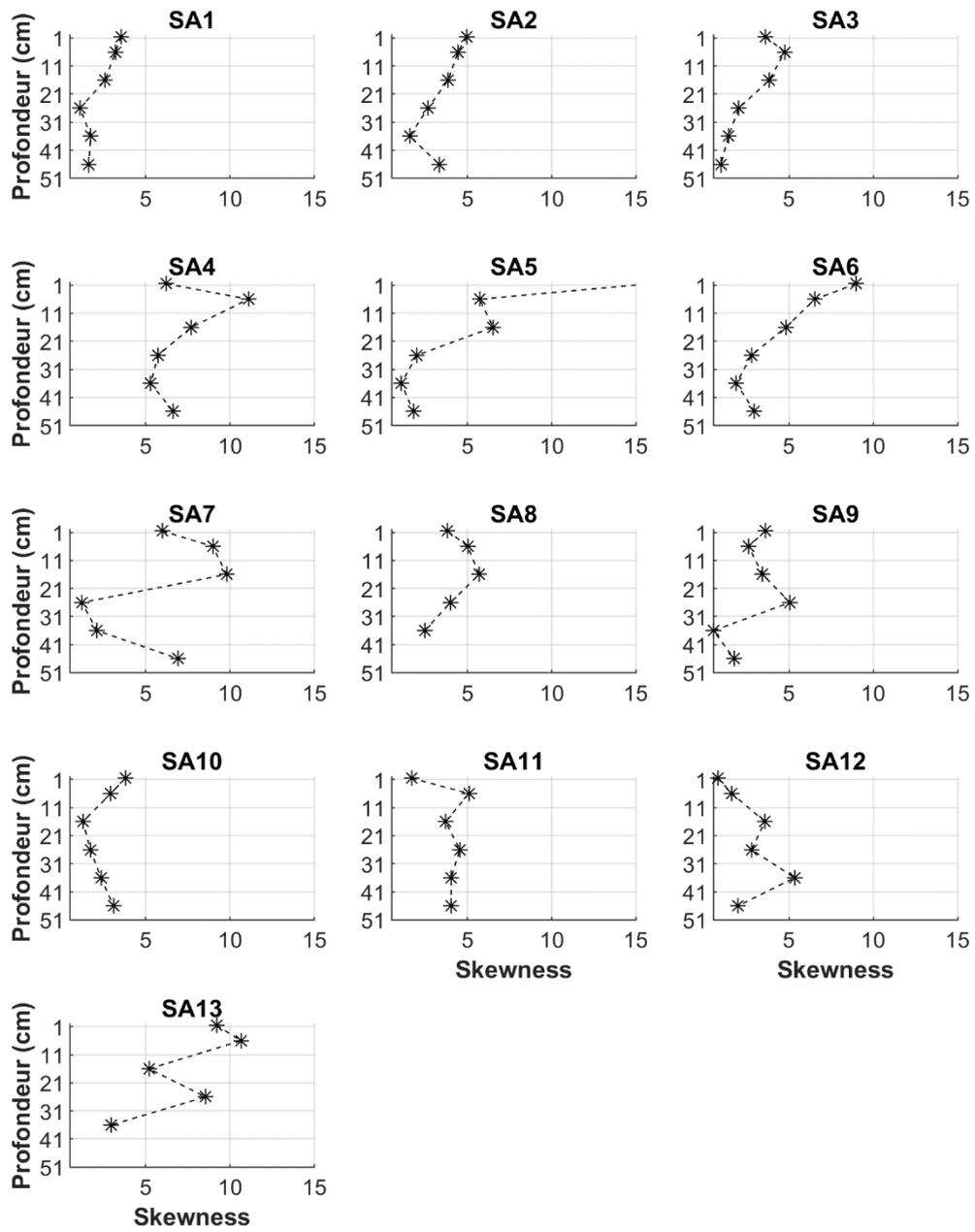
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SA-20211019



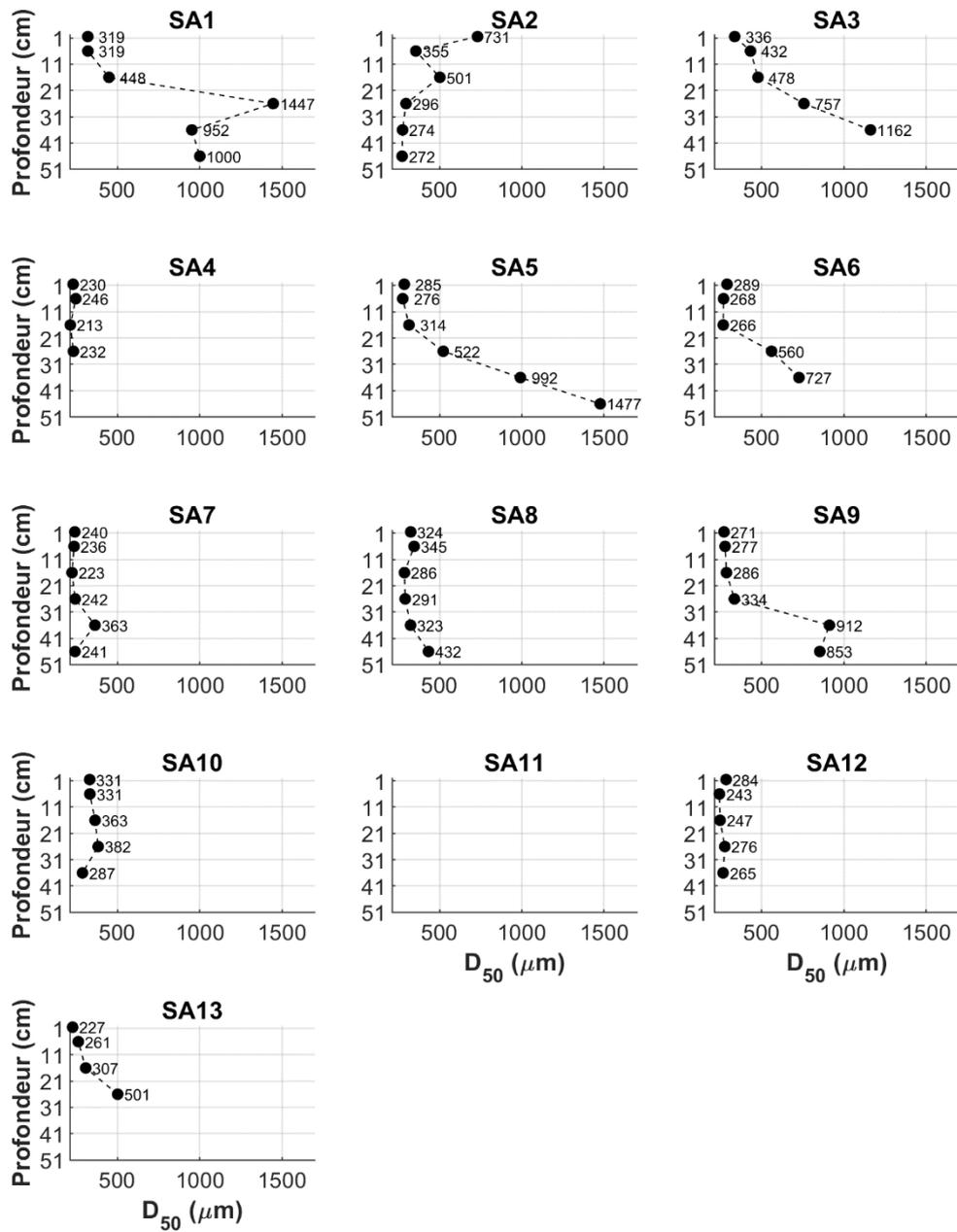
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SA-20211019



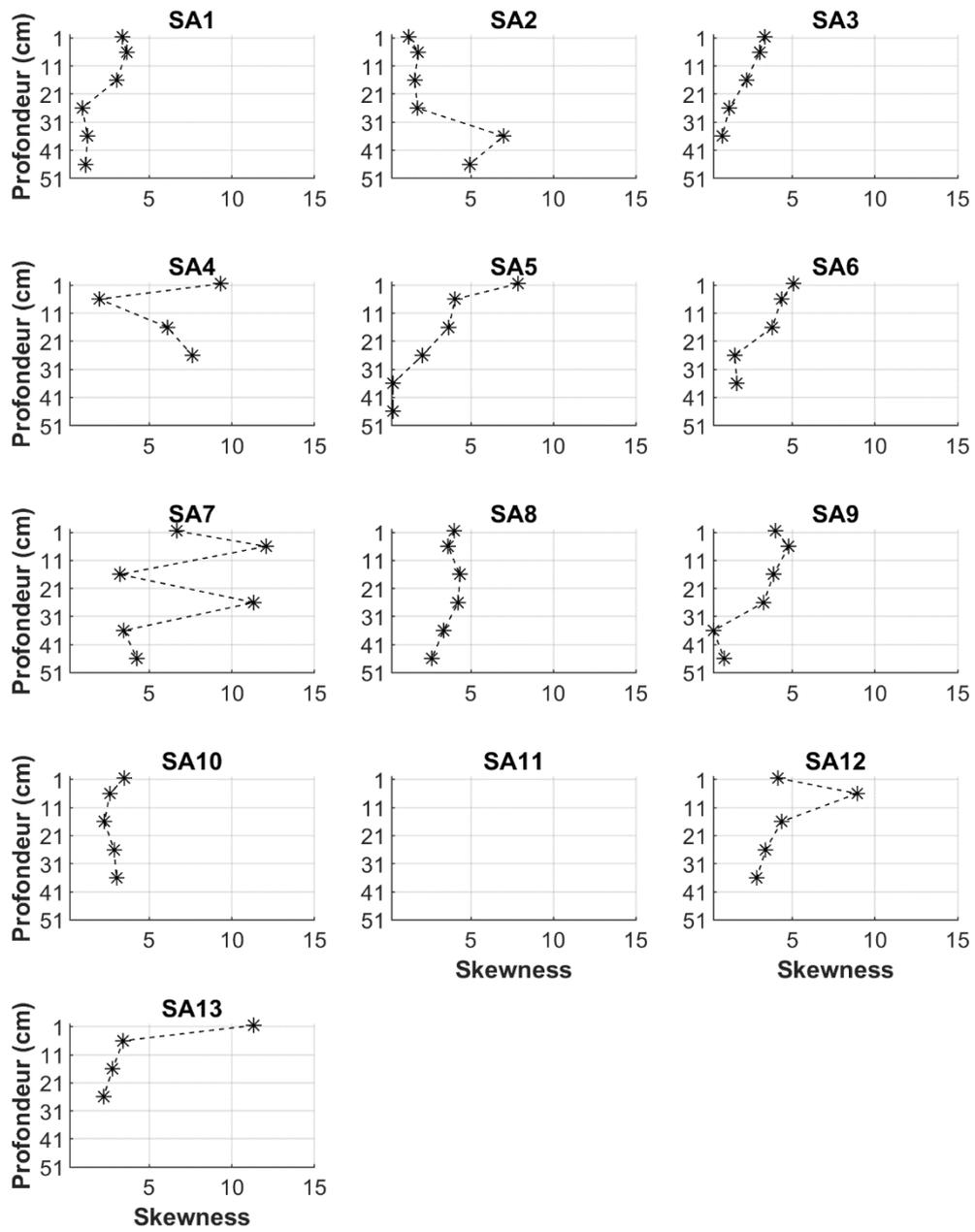
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SA-20220504



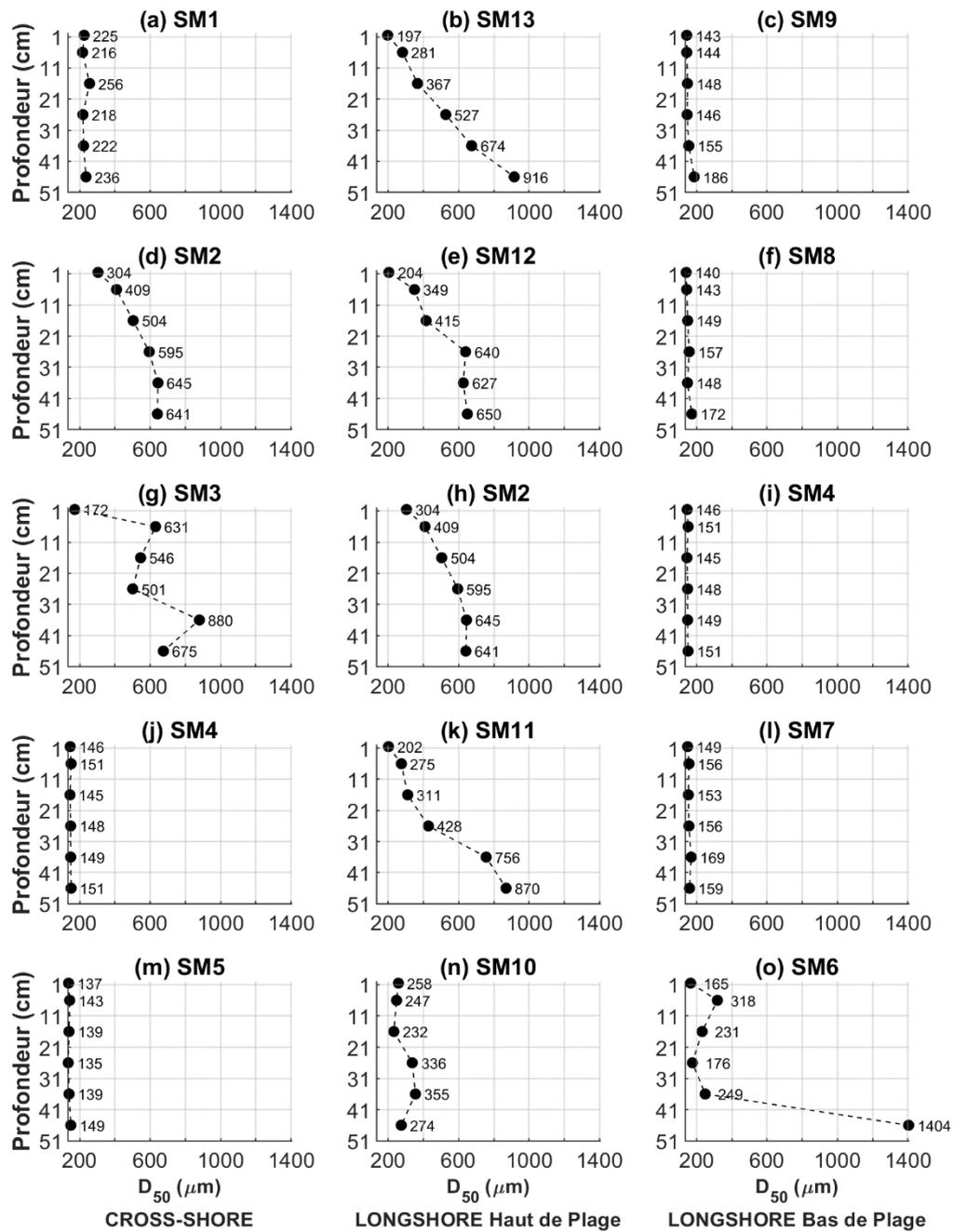
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SA-20220504



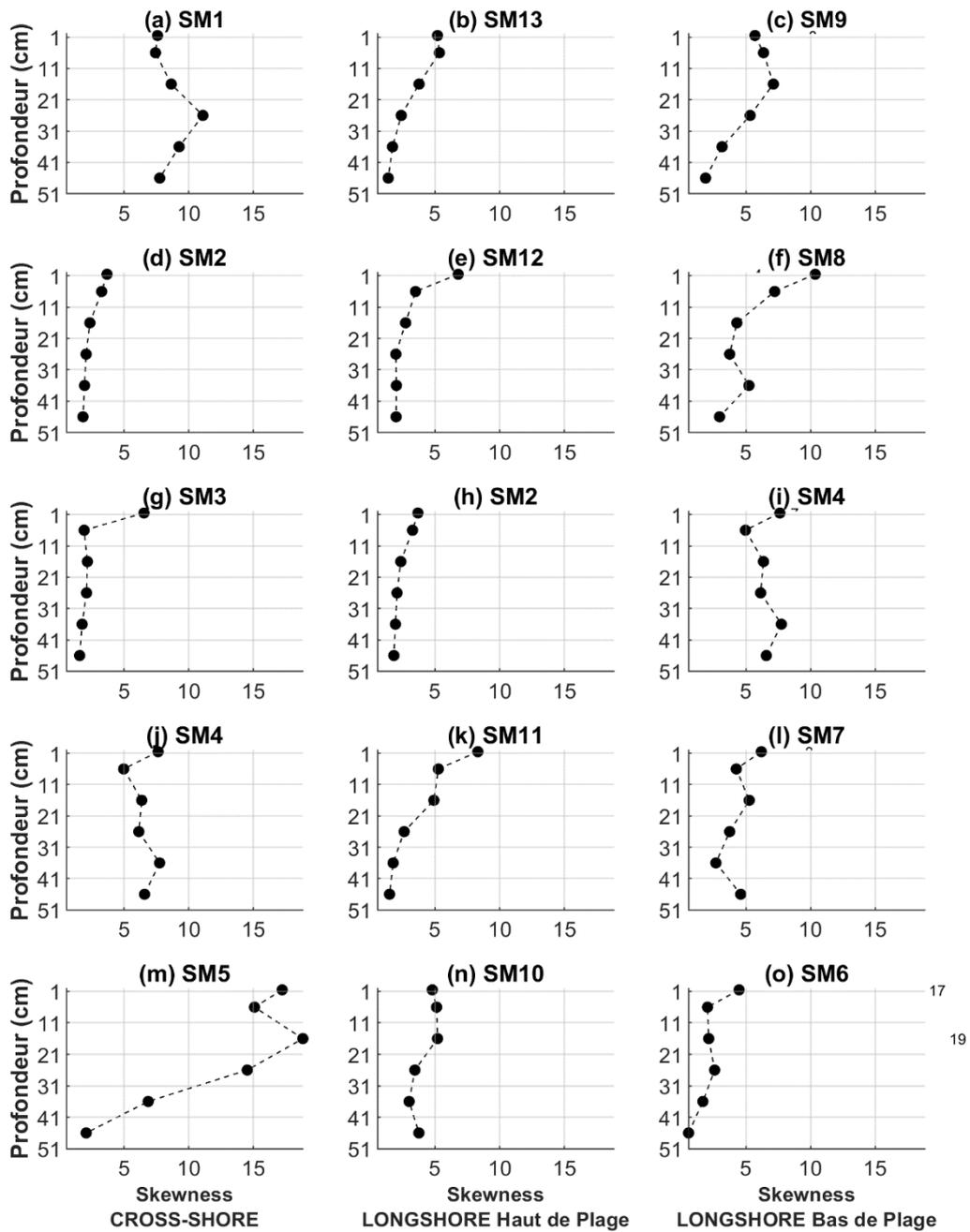
(voir Figure Figure 4.9b pour la distribution spatiale des points)

# SM-20201019



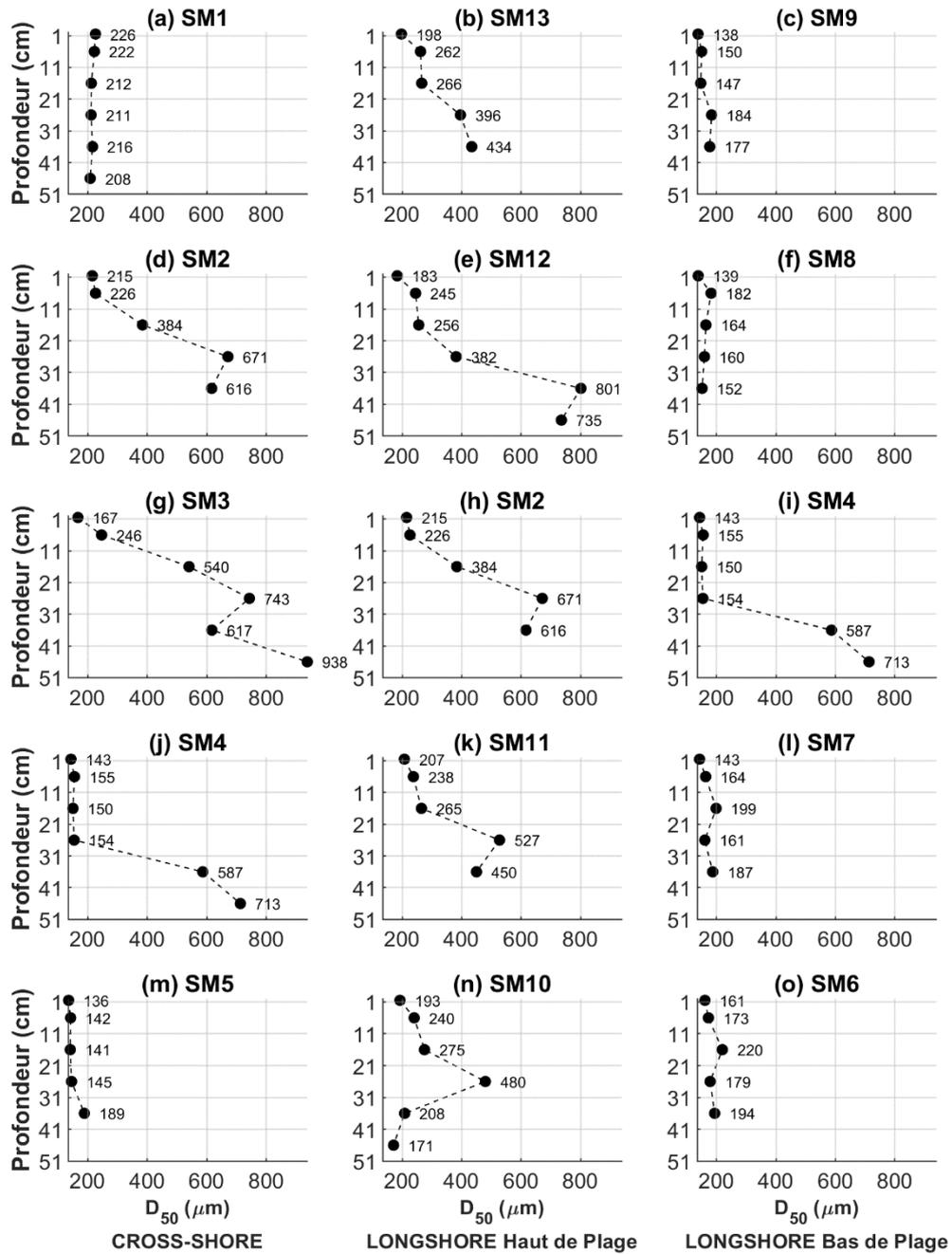
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20201019



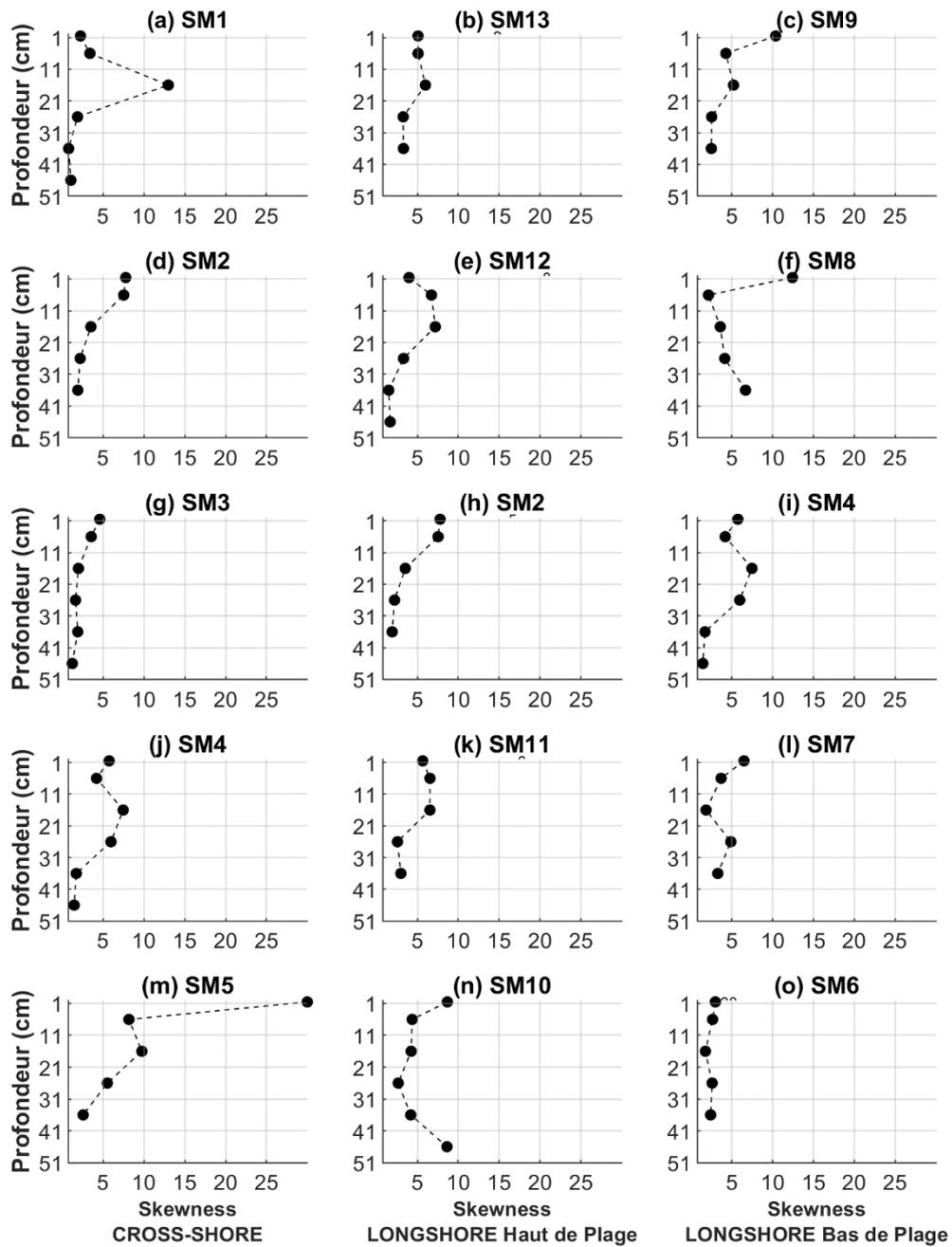
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20210428



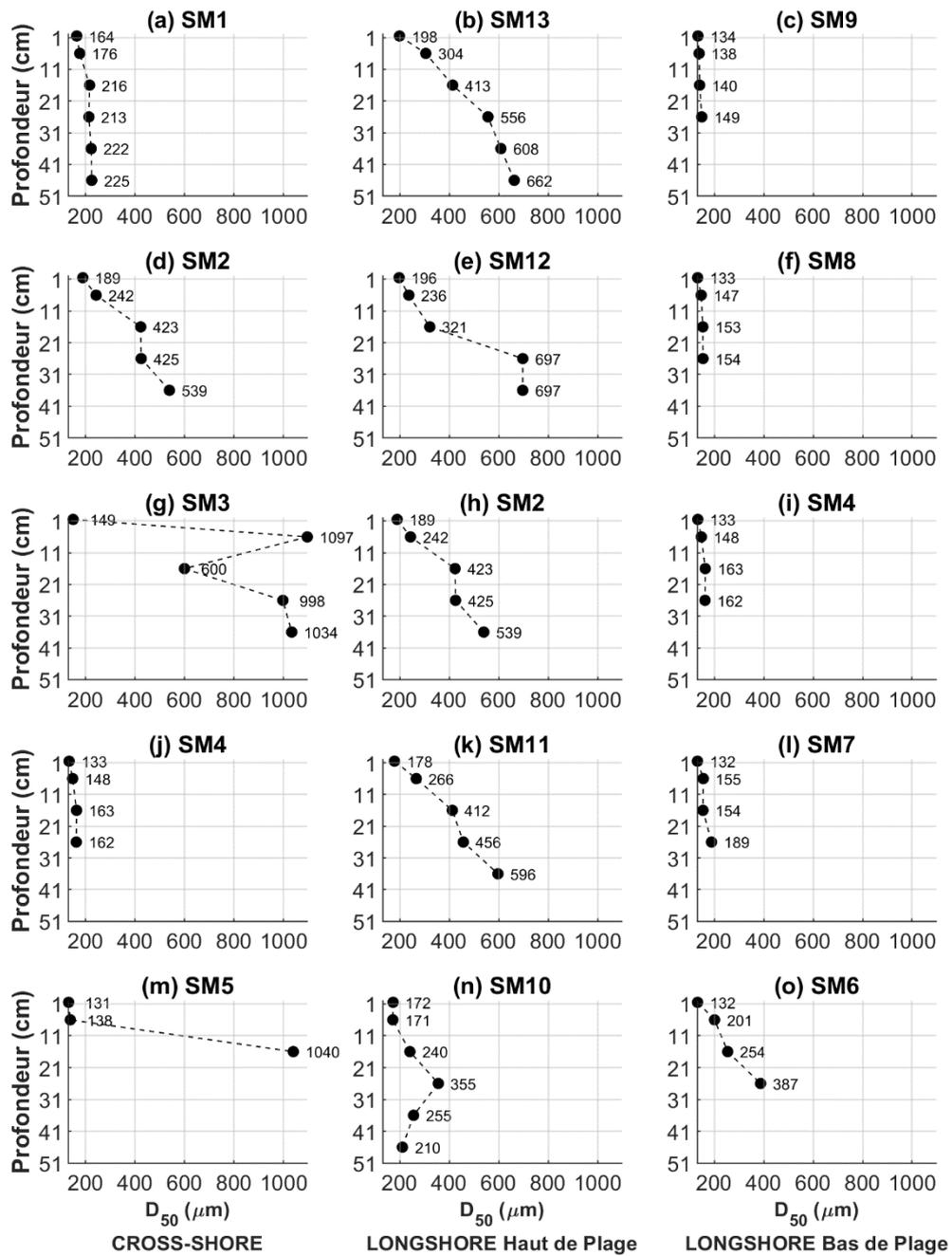
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20210428



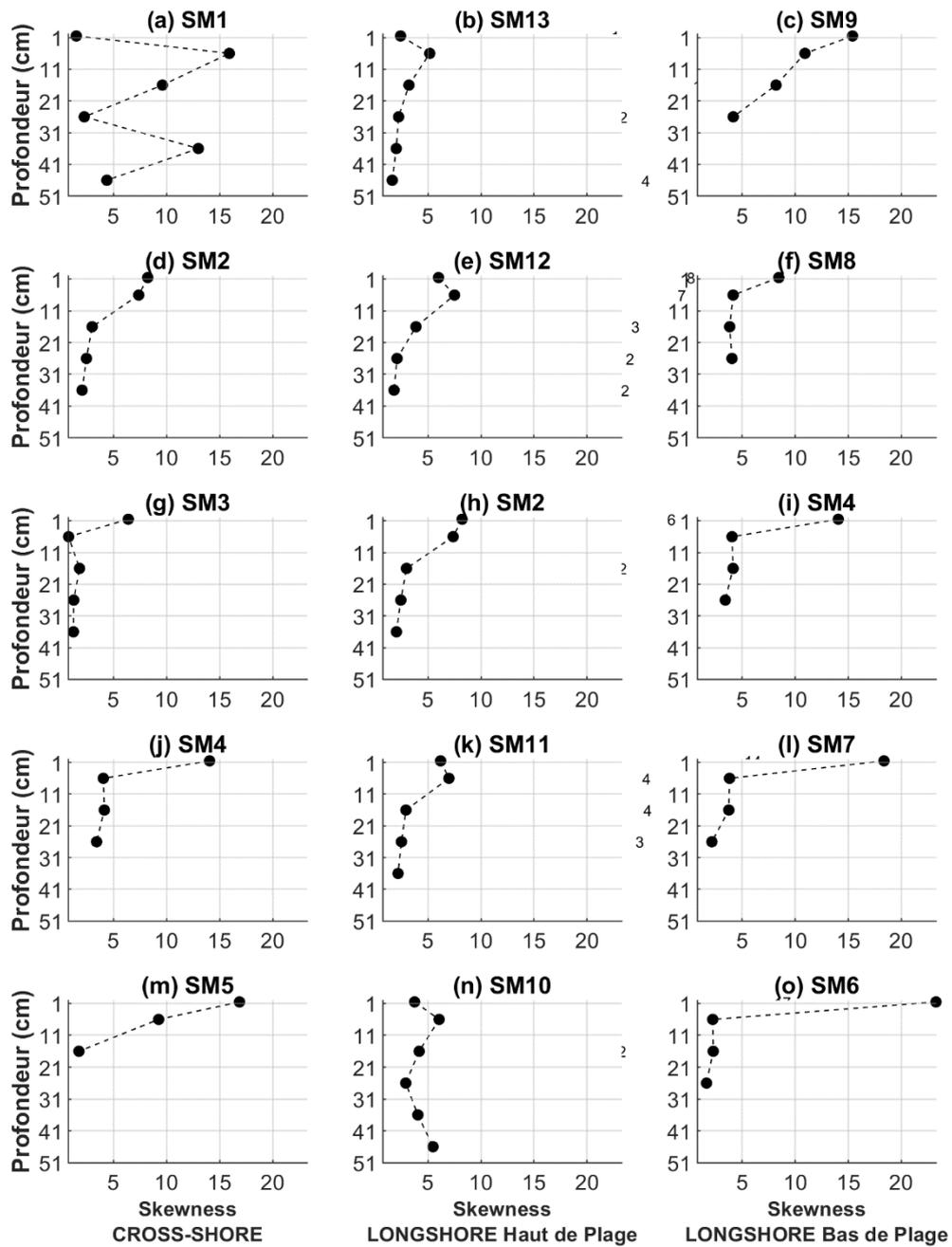
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20211007



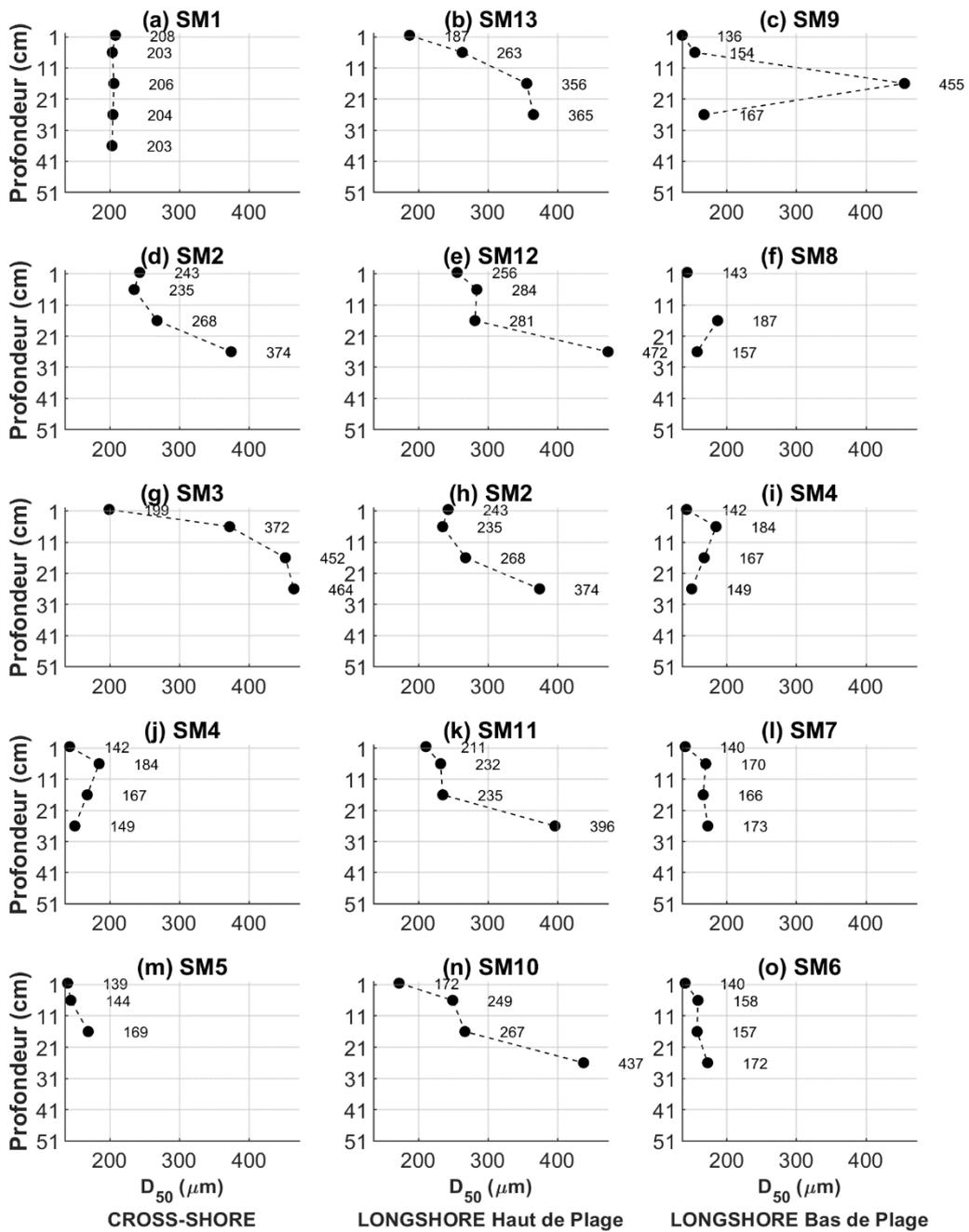
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20211007



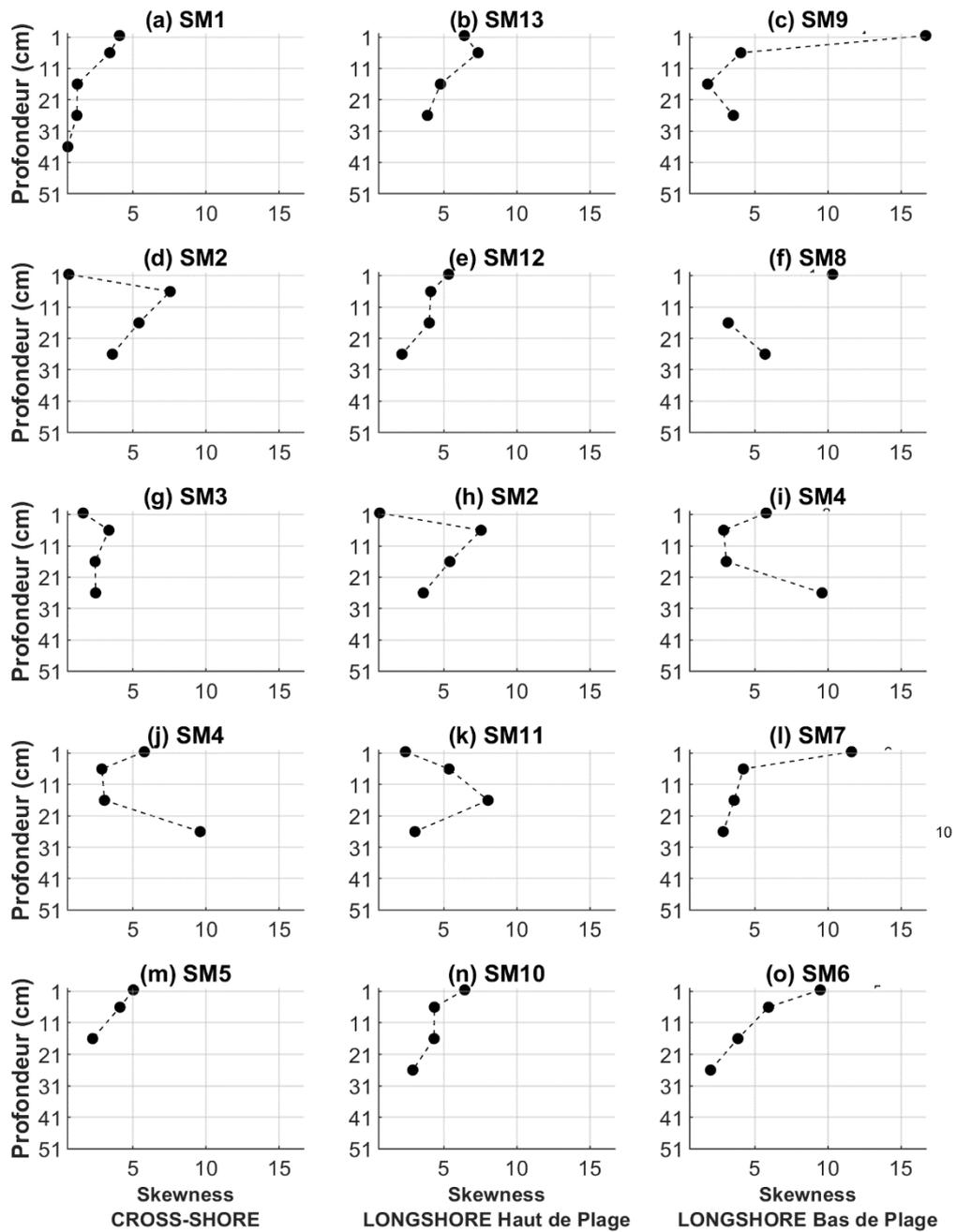
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20220419



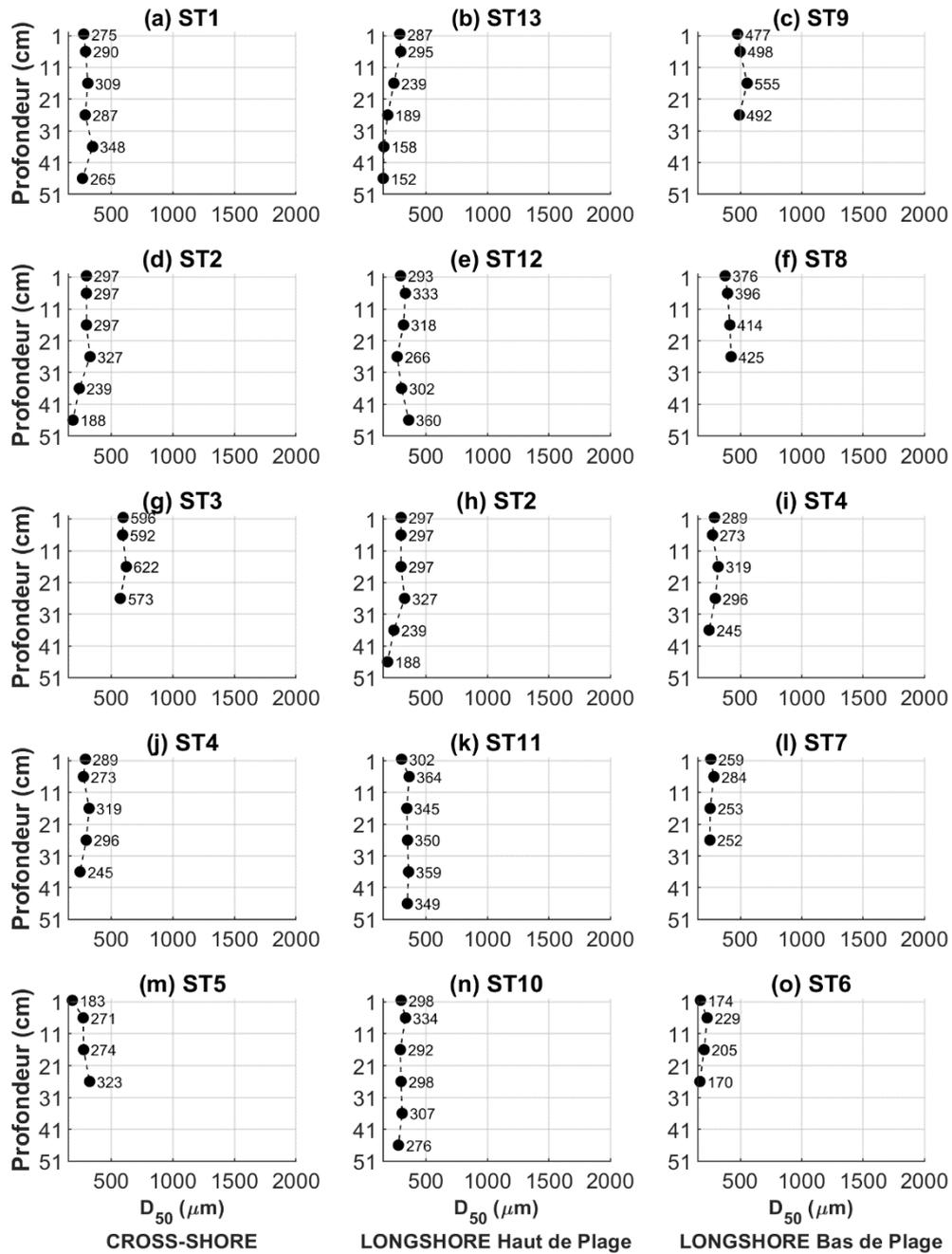
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# SM-20220419



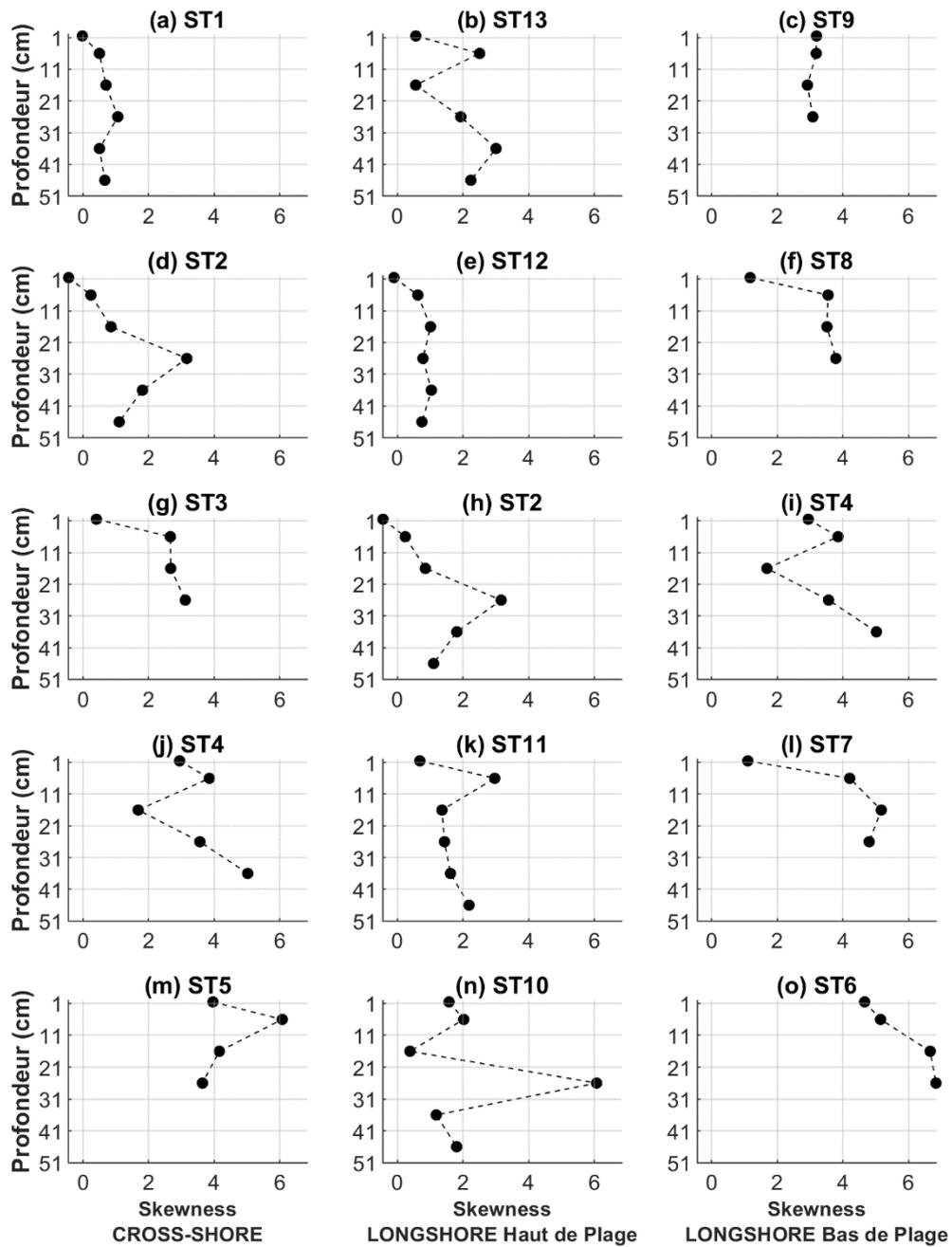
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20210331



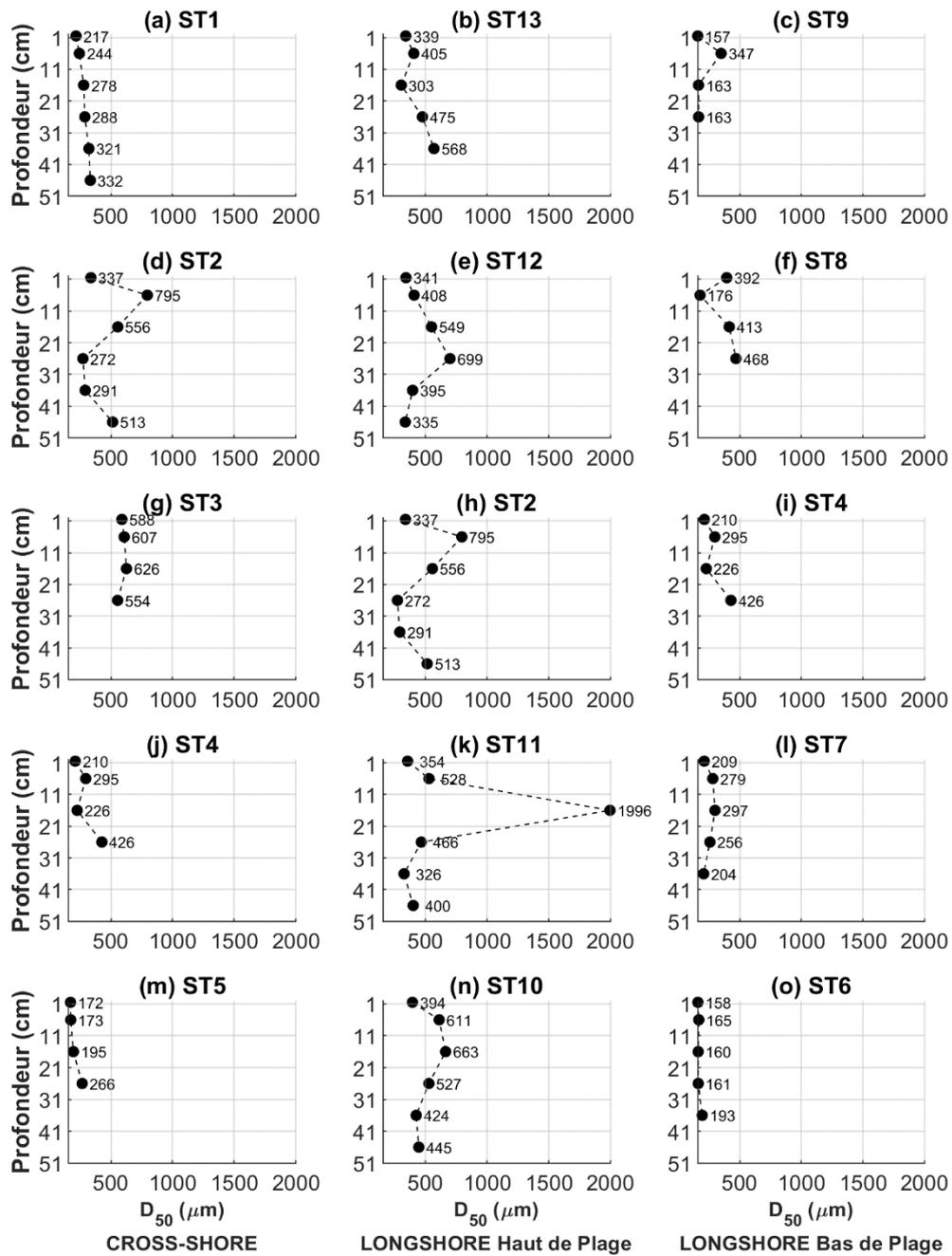
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20210331



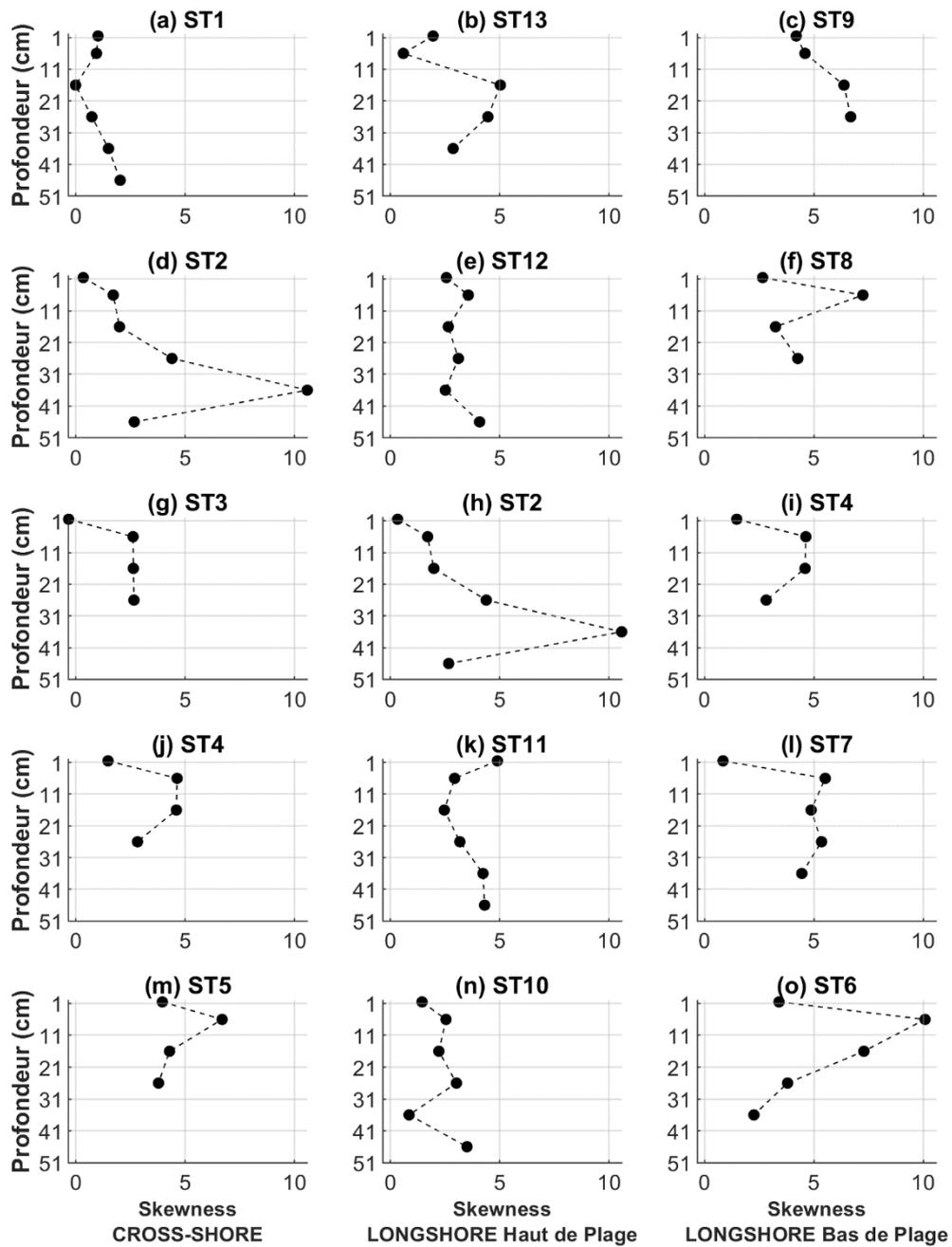
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20210910



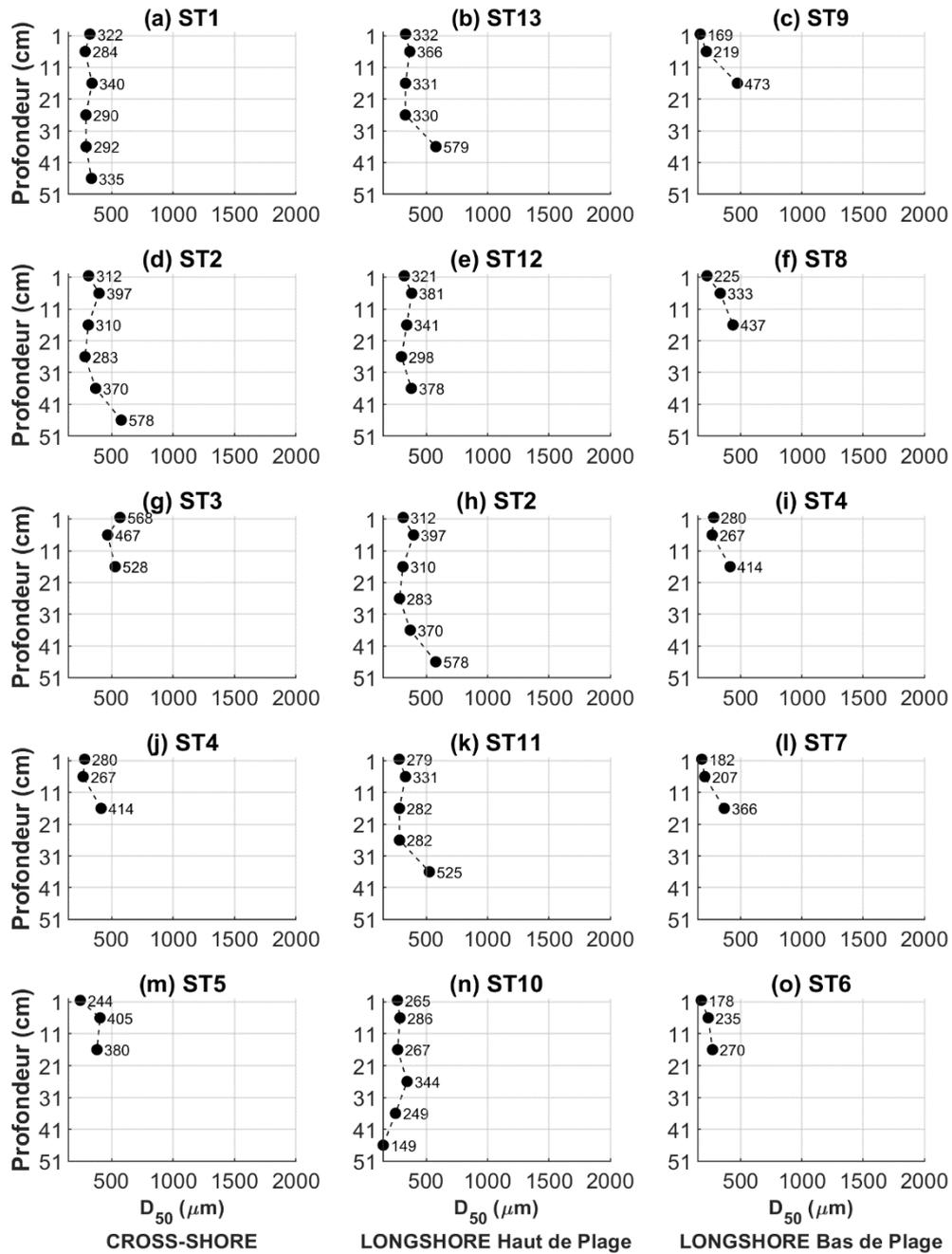
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20210910



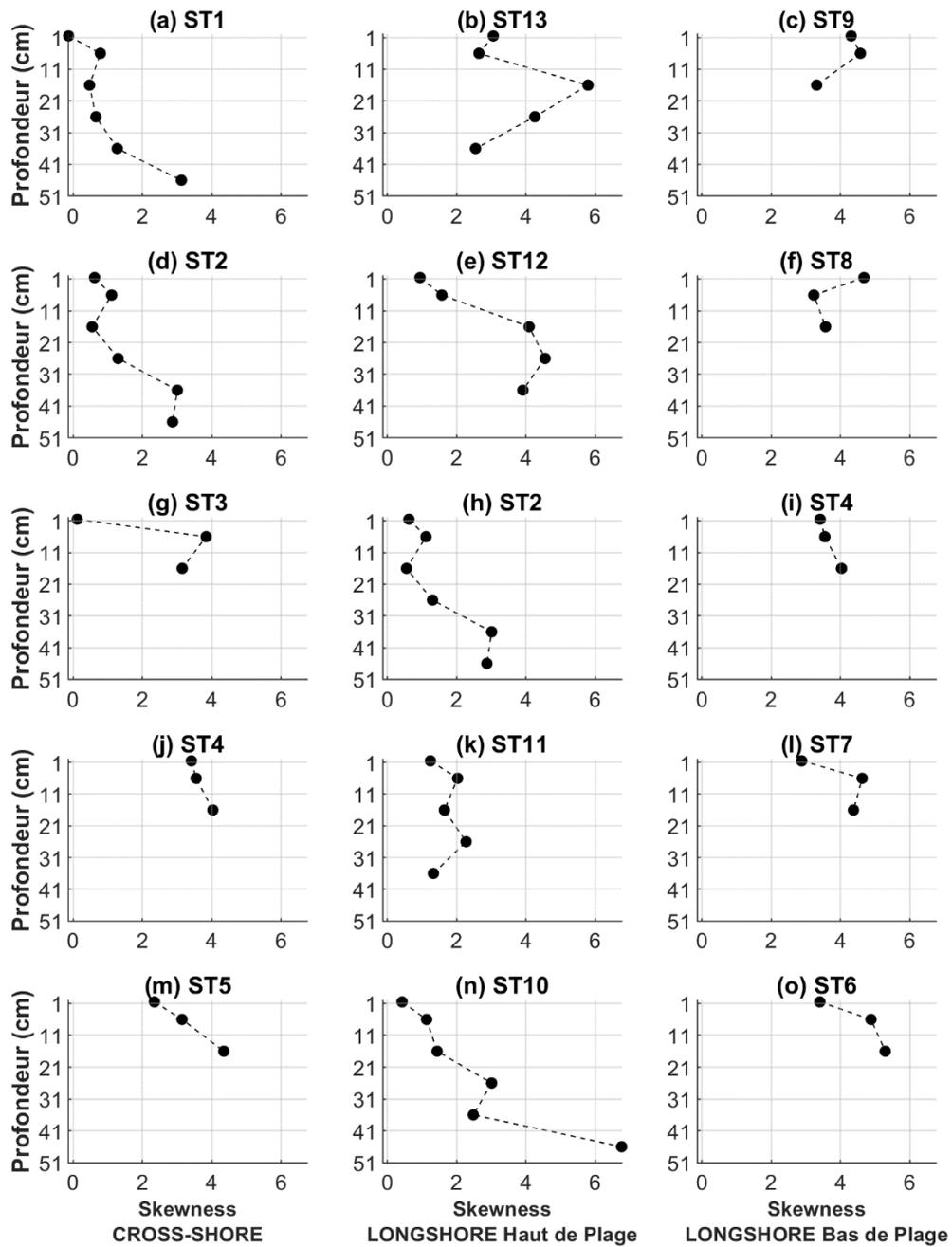
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20220330



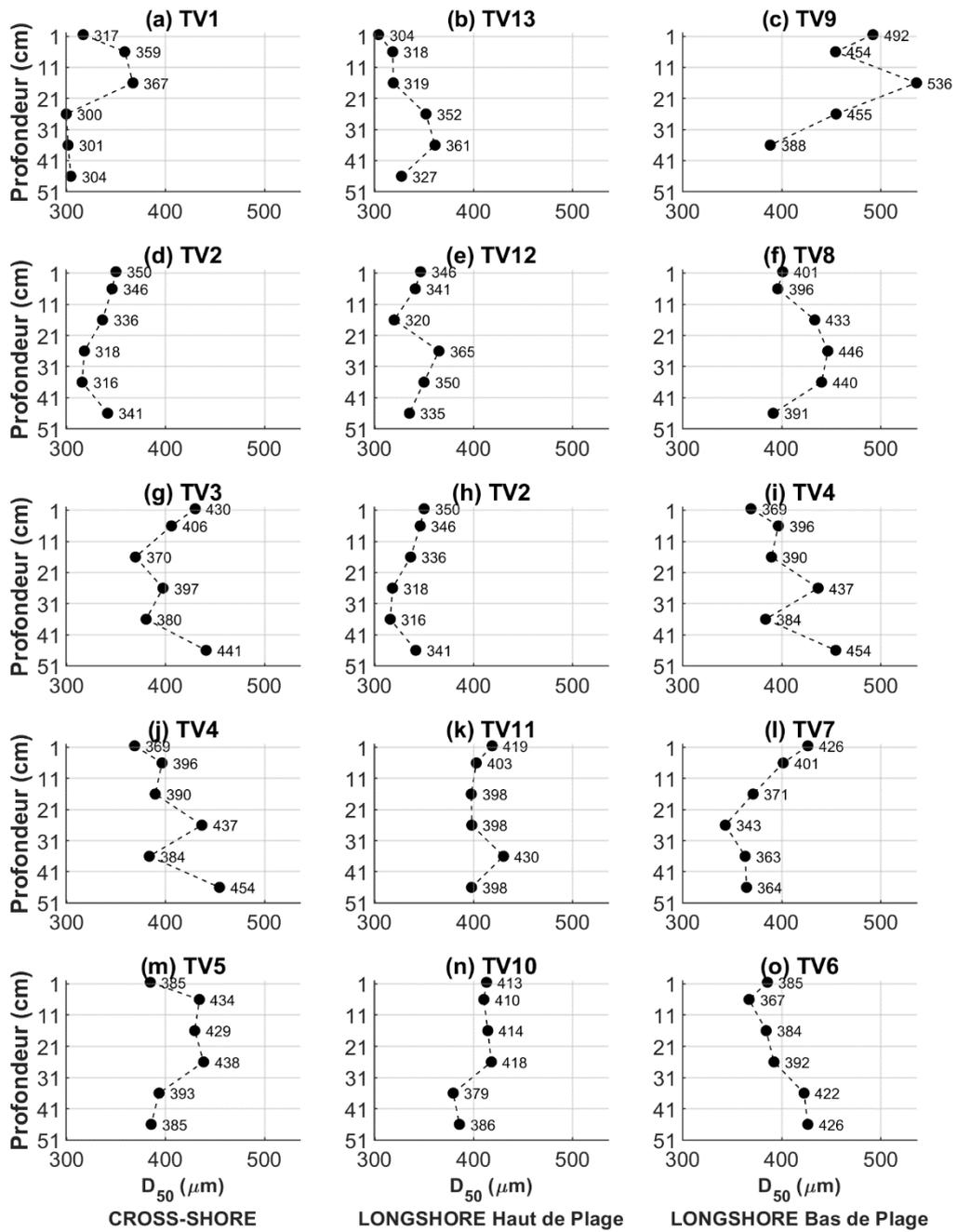
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# ST-20220330

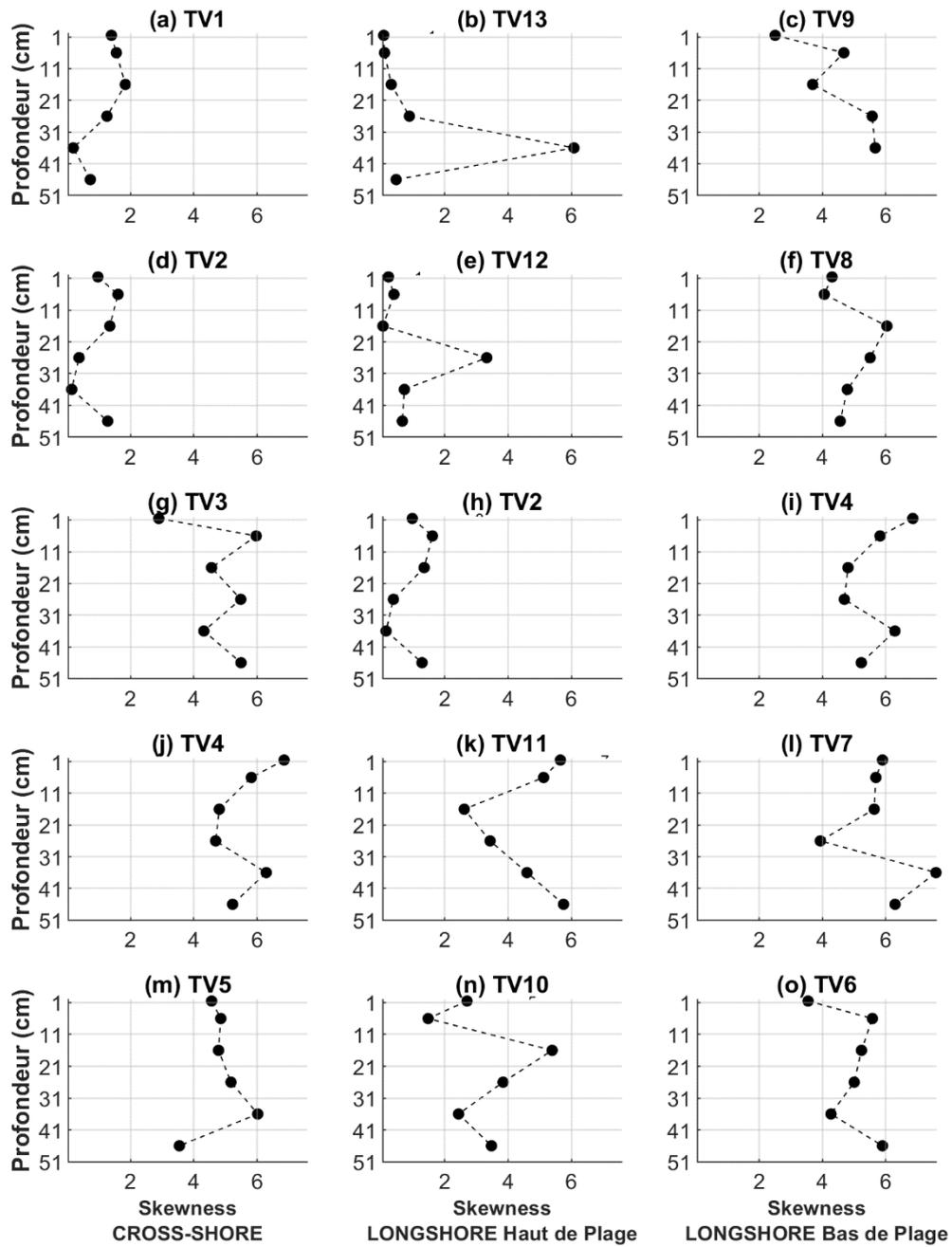


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20200918

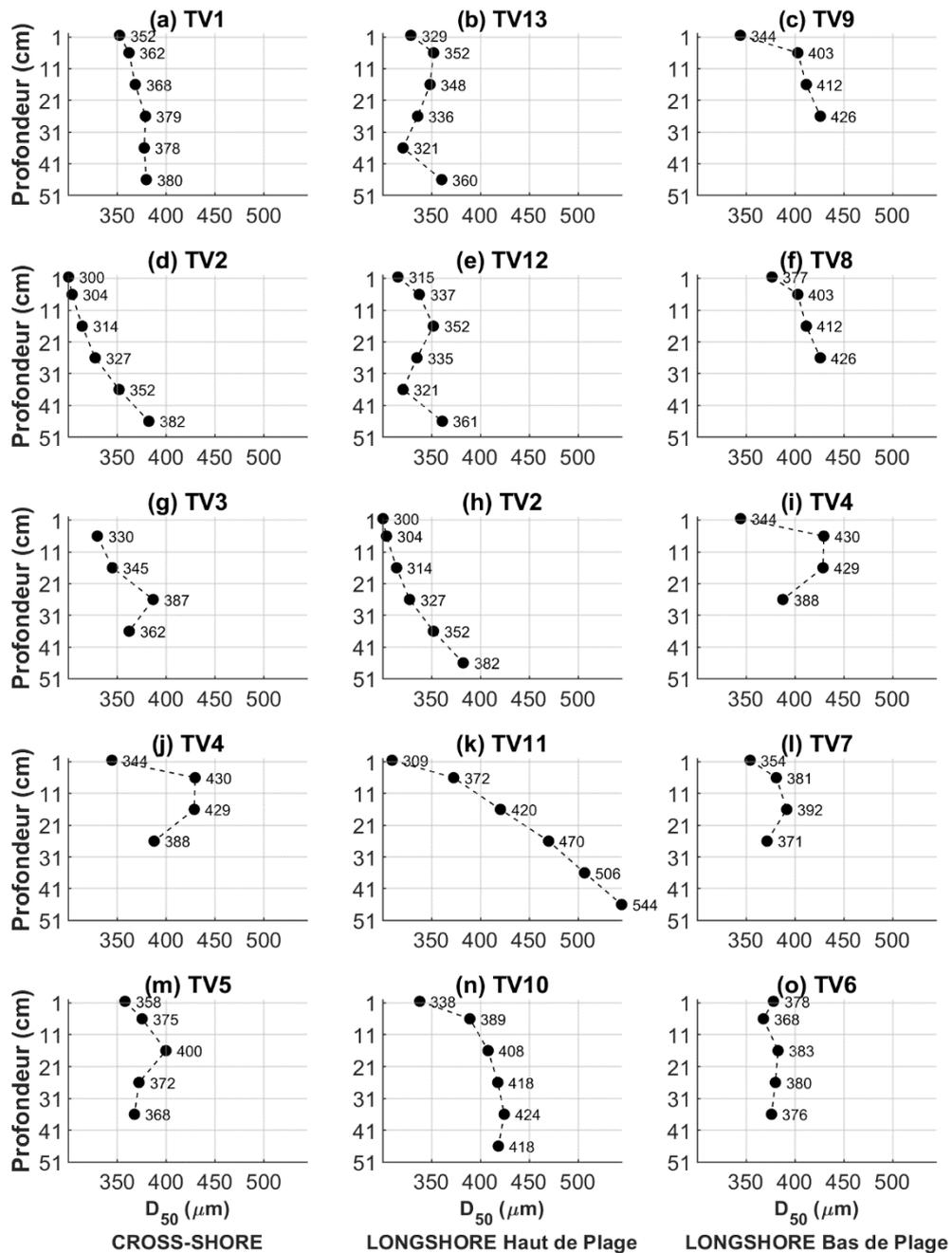


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.



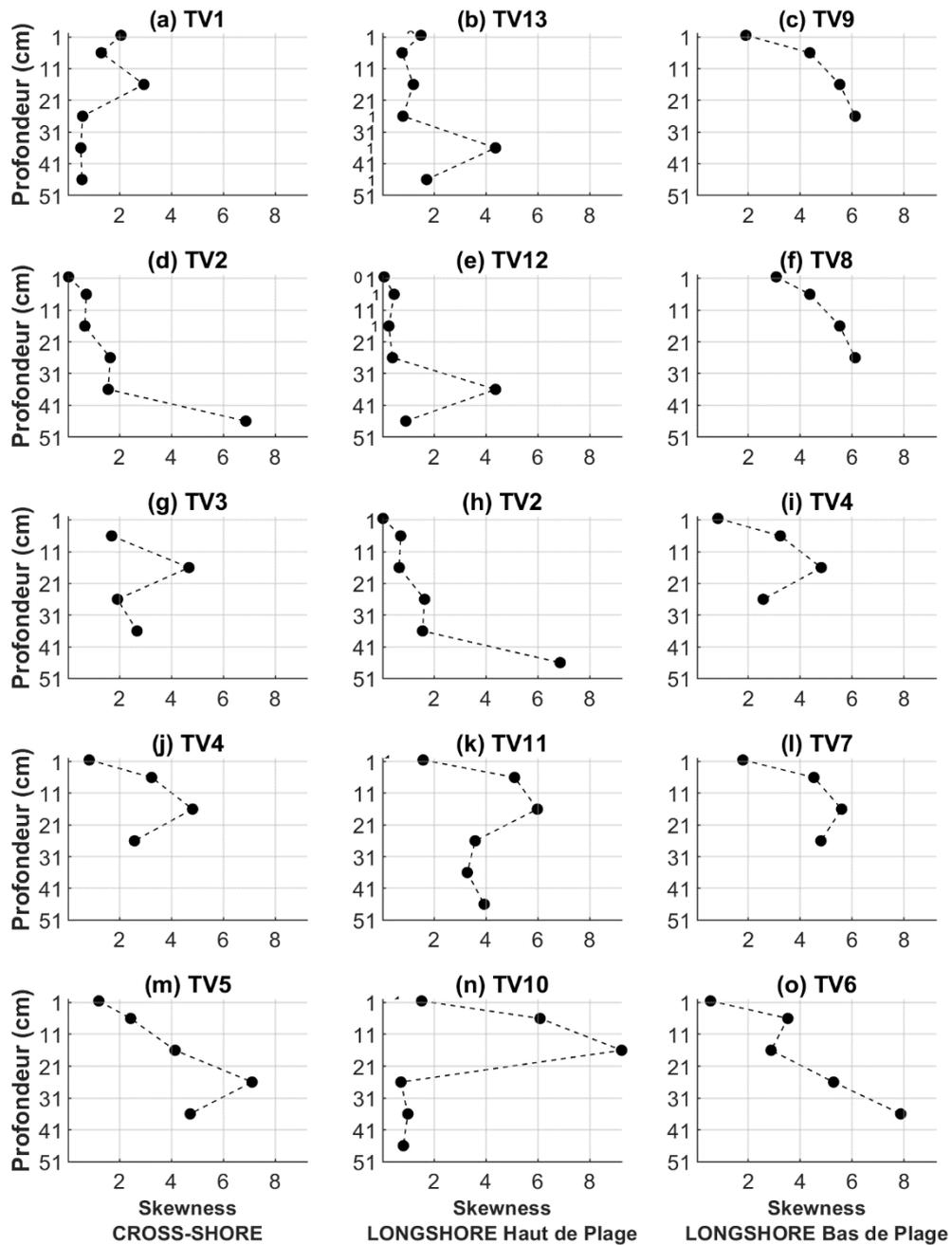
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20210329



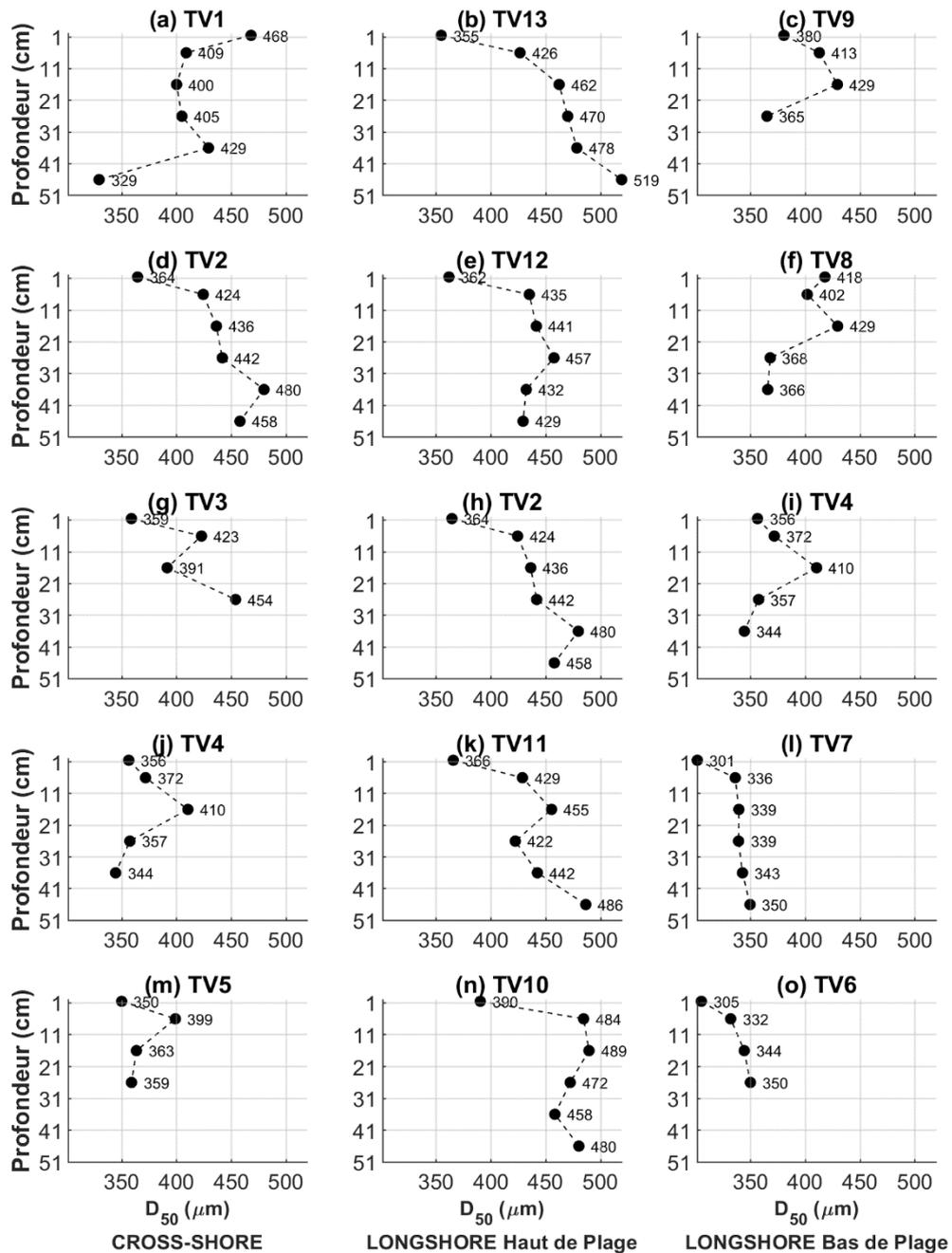
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20210329

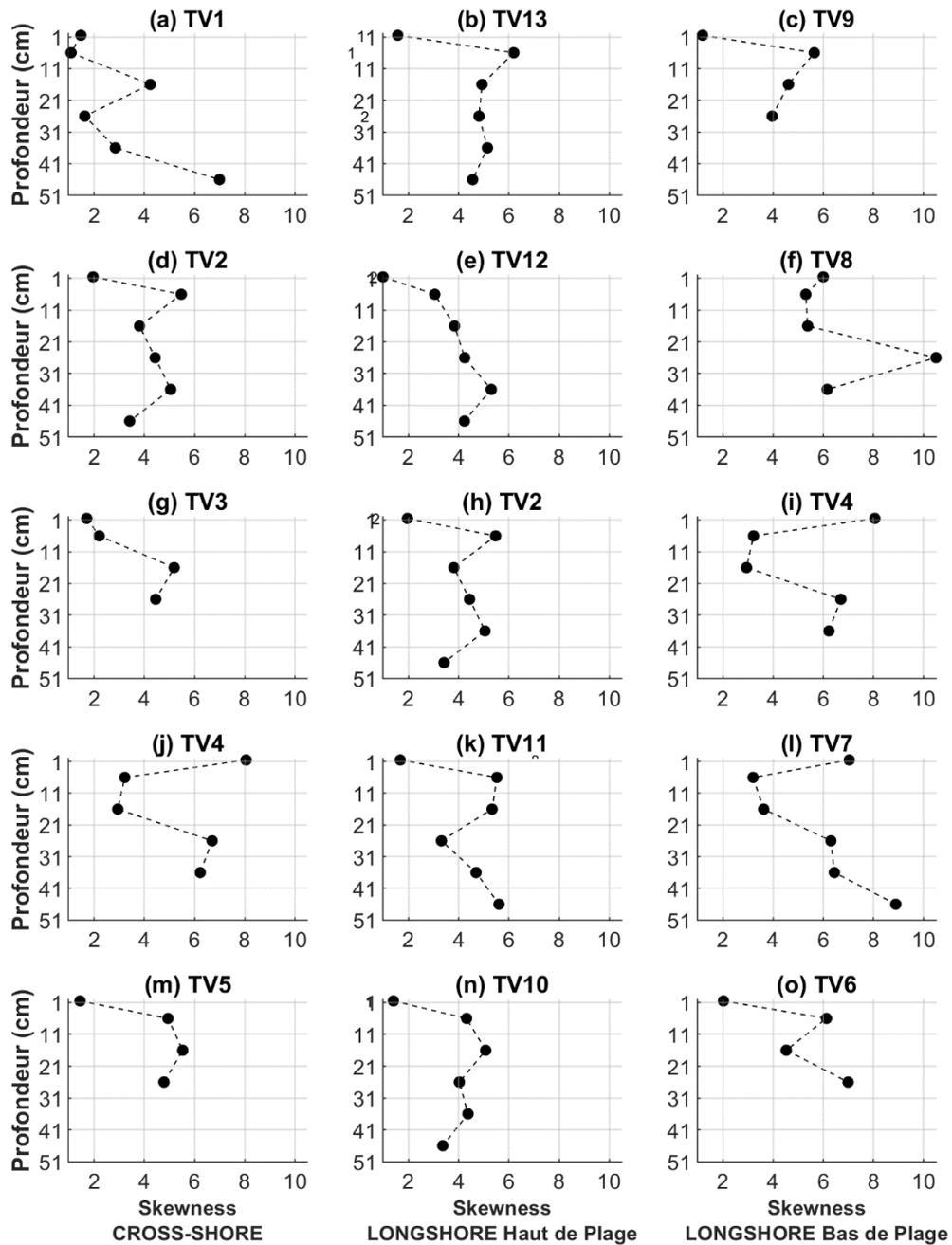


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20210908

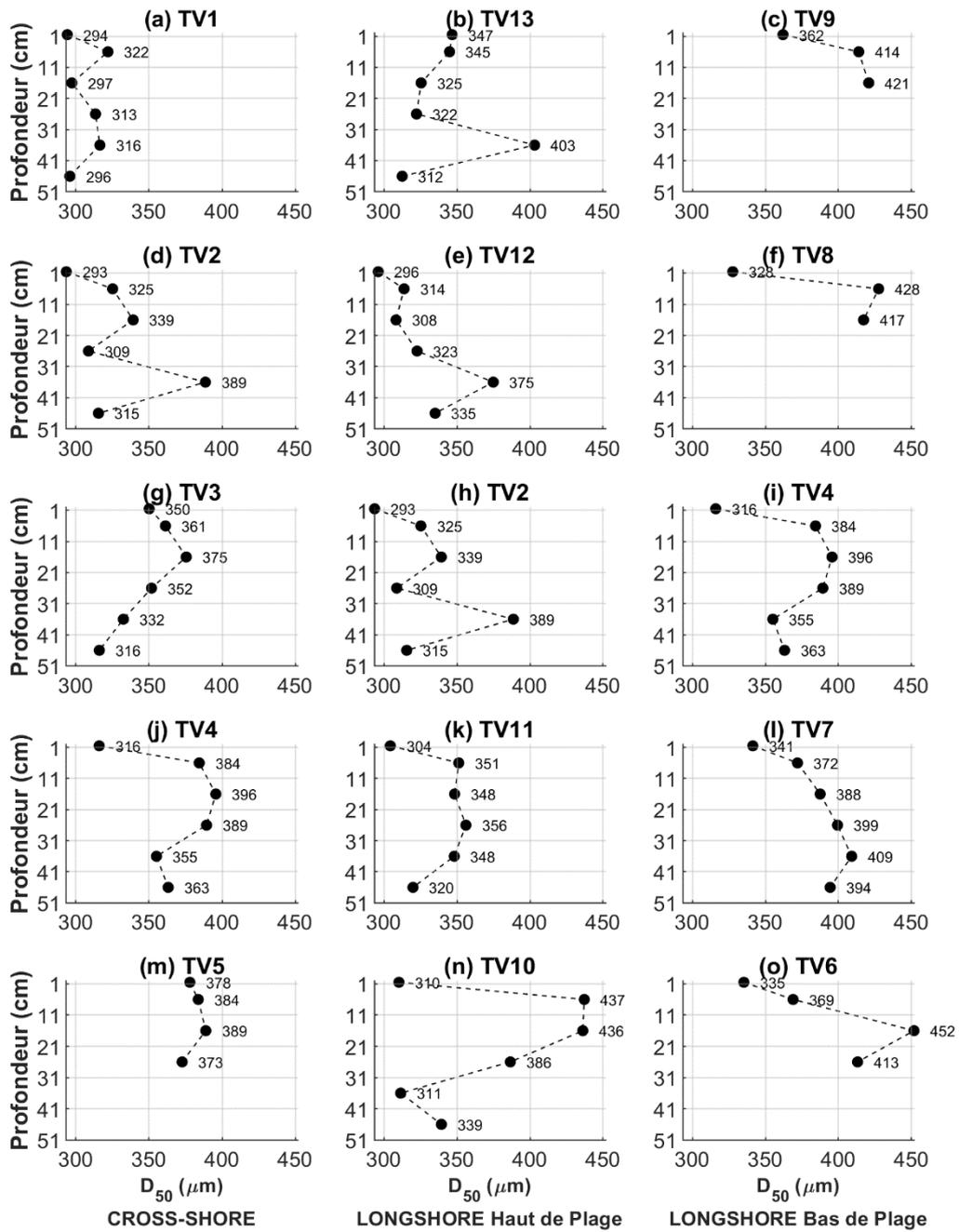


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.



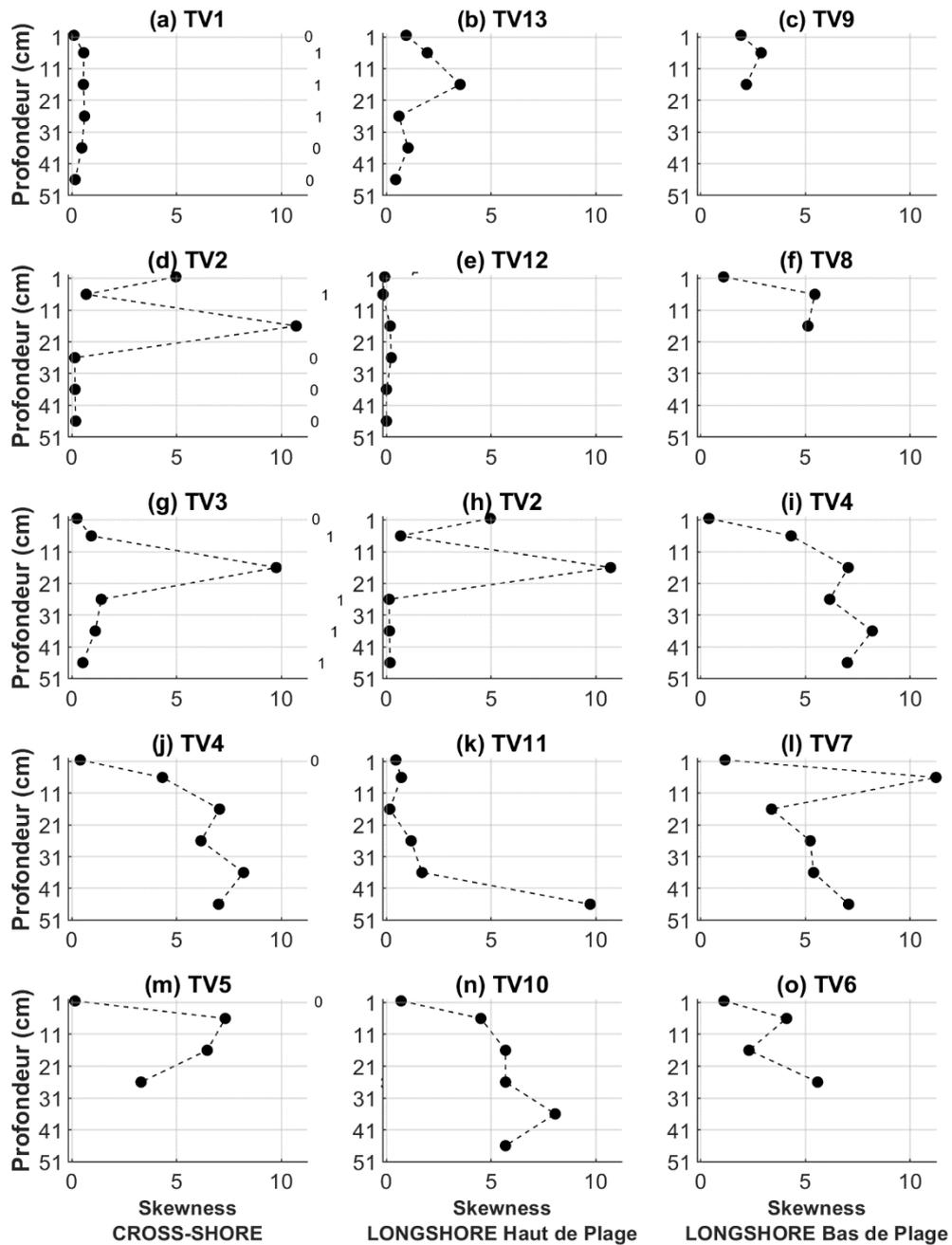
\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20220401



\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

# TV-20220401

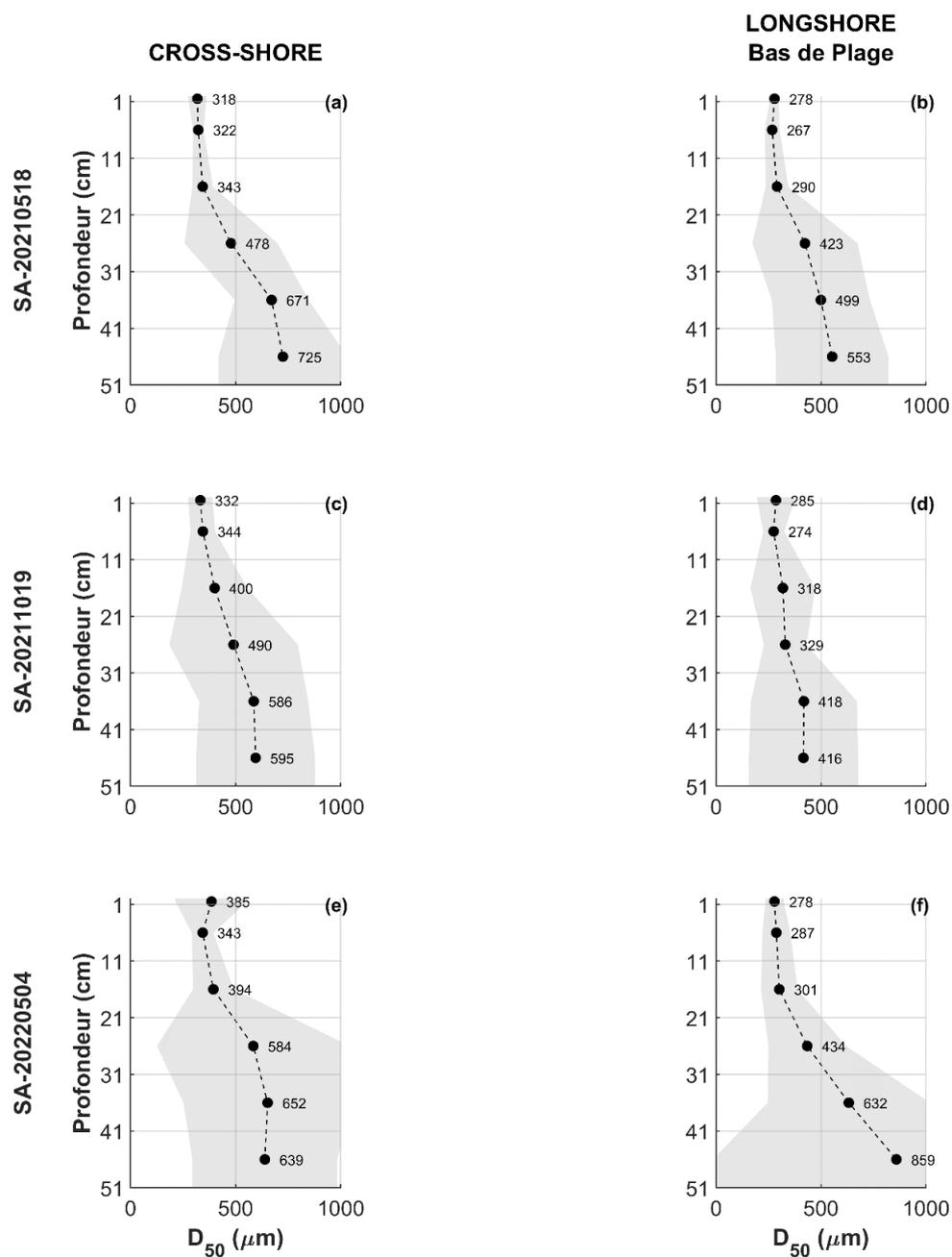


\* Respectivement, les stations AG2 et AG4 ont été dupliquées pour préserver la continuité des radiales *longshore* de la partie haute et basse de la plage.

## Annexe C

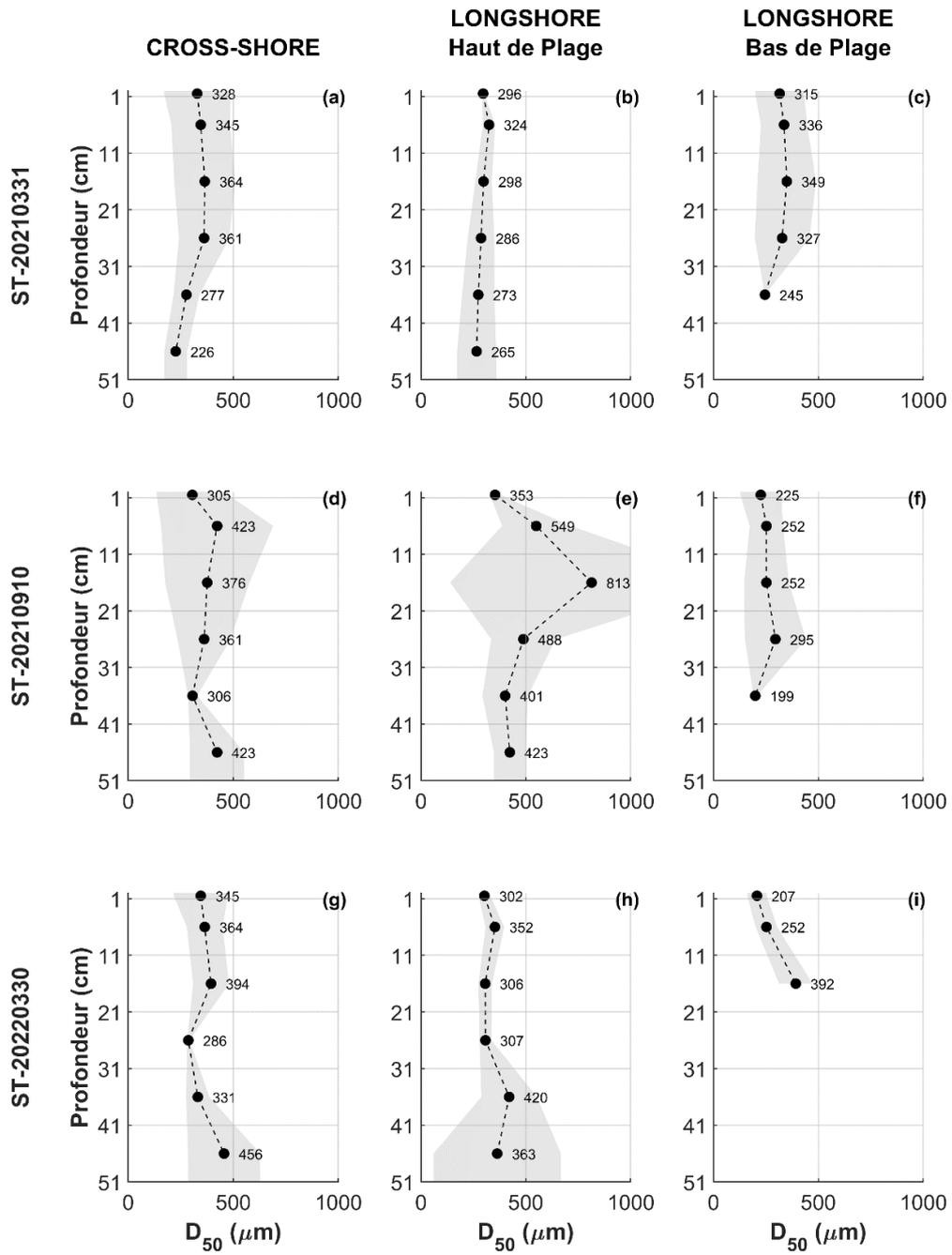
$D_{50}$  moyenné par strates et par radiales pour chacune des 3 campagnes in situ de la plage de Saint-Aygulf et chacune des 4 campagnes in situ de la plage de Saint-Trojan-les-Bains, pour tous les échantillons. Les dates correspondant à chaque campagne sont notées de la manière suivante : Plage-AAAAMMJJ.

- **Saint-Aygulf**



**A noter :** La plage de Saint-Aygulf ne possède pas de radiale *longshore* en haut de plage.

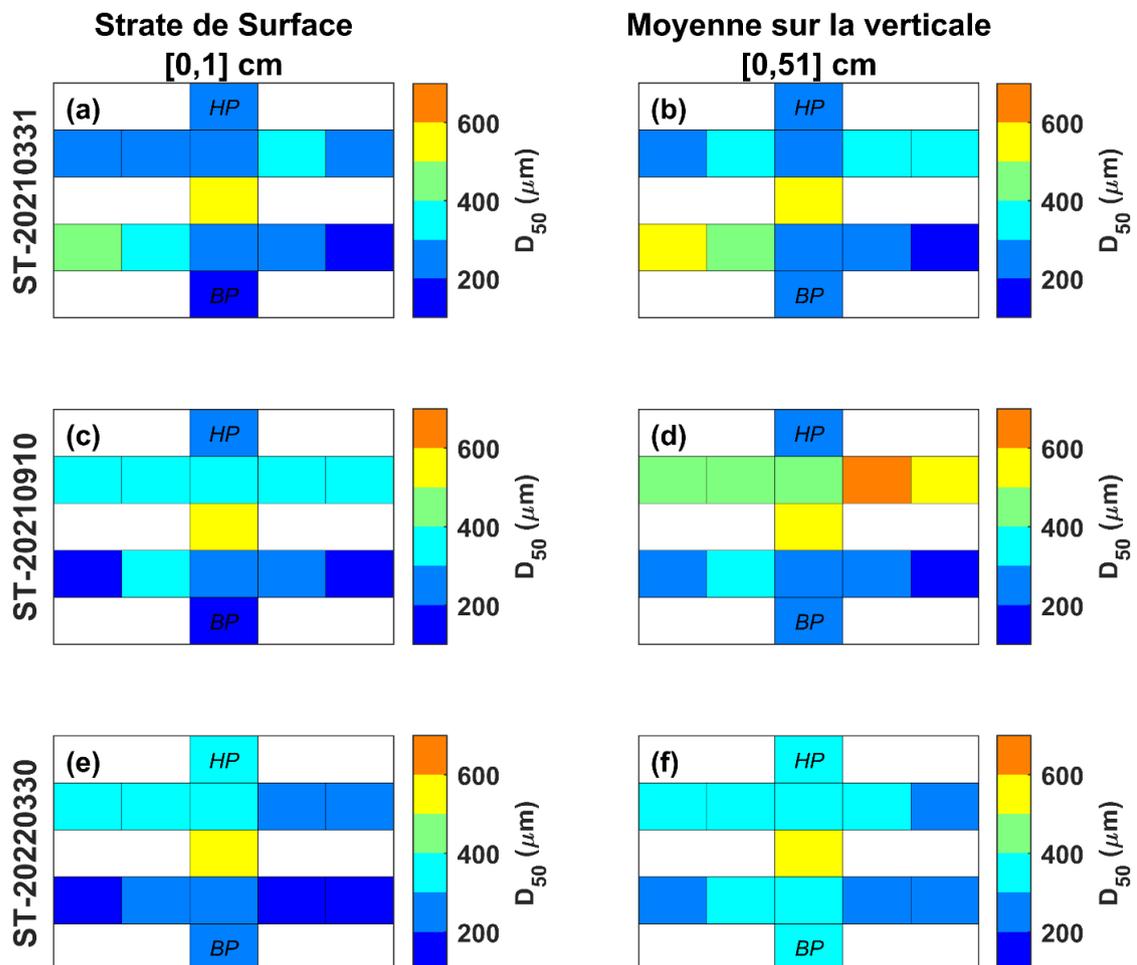
- **Saint-Trojan-les-Bains**



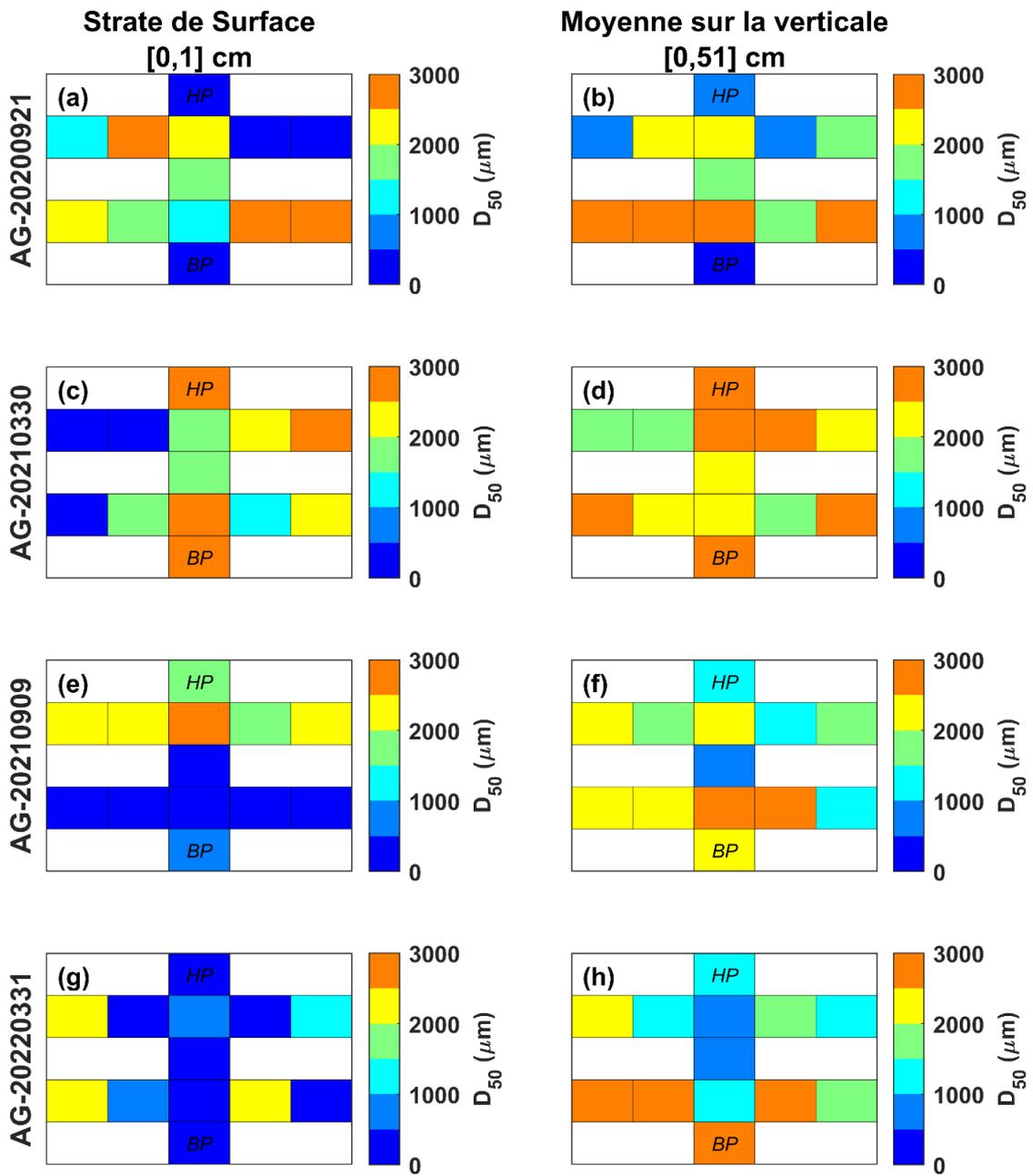
## Annexe D

Schéma simplifié illustrant la variation spatiale du  $D_{50}$  pour toutes les campagnes *in situ* : comparaison entre la couche de surface (colonne de gauche) et la moyenne des six couches sur la verticale (colonne de droite) des 13 stations de prélèvement suivant les radiale *cross-shore* et *longshore*. Les abréviations HP et BP signifient respectivement Haut de Plage et Bas de Plage. La plage et la date de la campagne sont annotées de la manière suivante Plage-AAAAMMJJ.

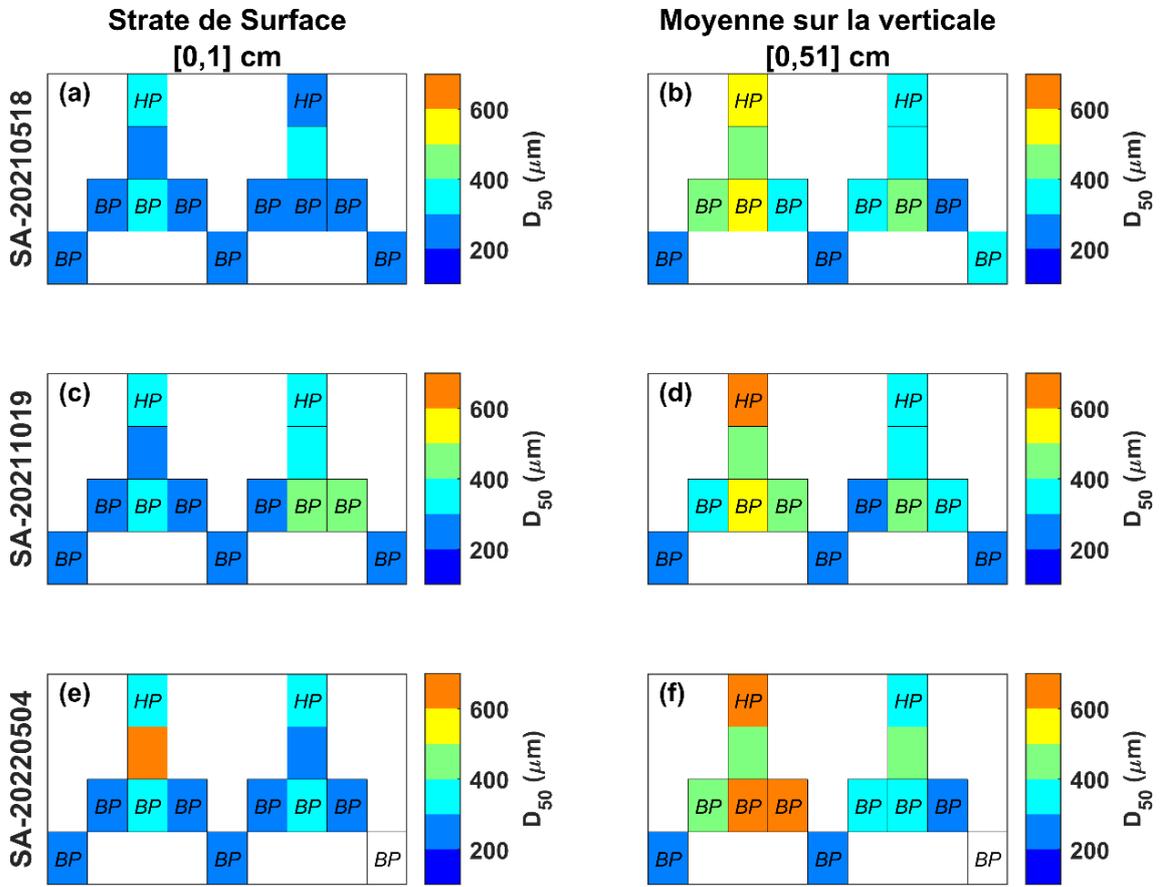
- Saint-Trojan-les-Bains



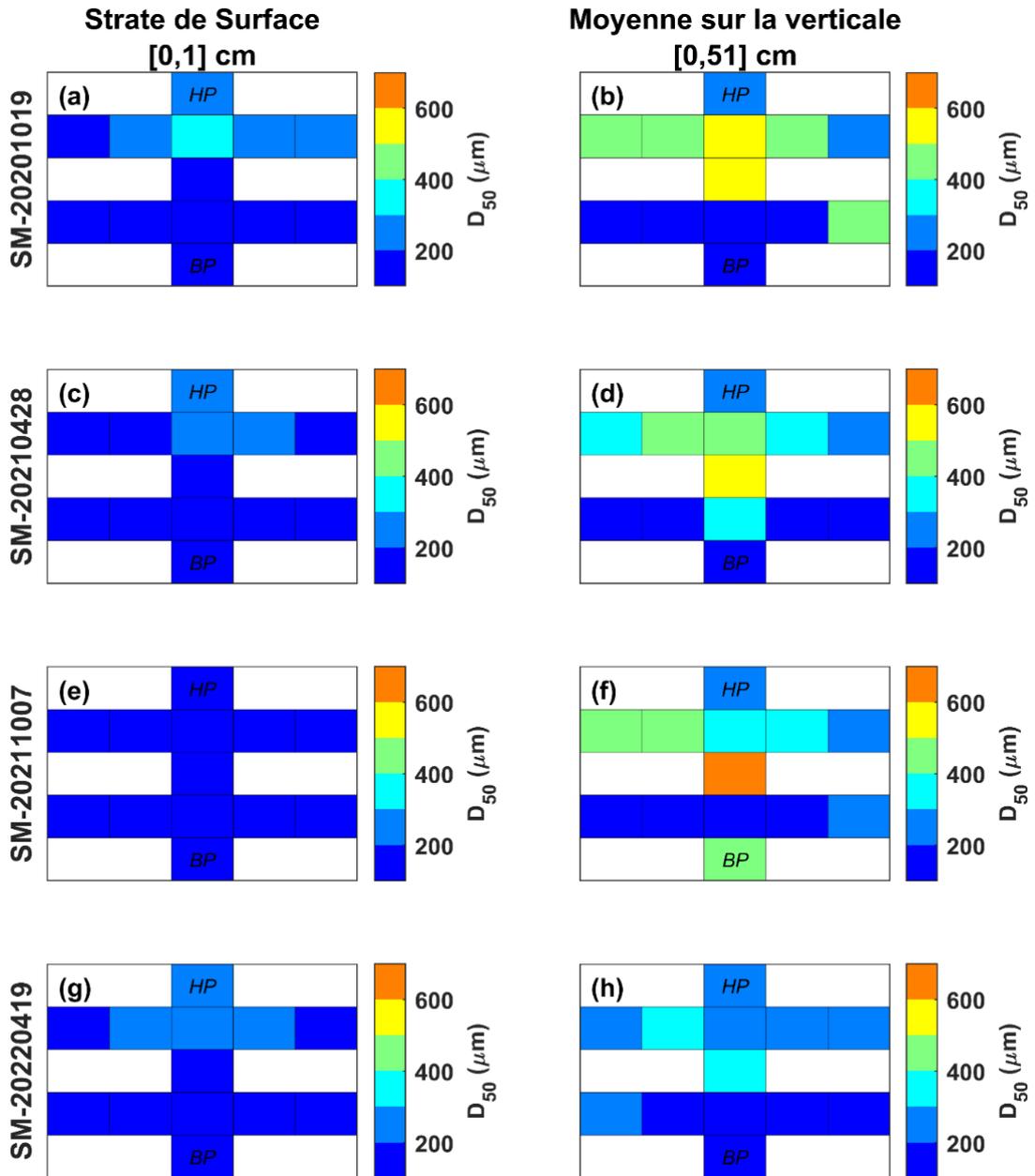
- Anglet



- Saint-Aygulf



- Saint-Malo



## Annexe E

Cette figure illustre un exemple échantillon bimodal collecté dans la partie supérieure de plage, dans la couche allant de 1 à 11 cm, sur la plage d'Anglet le 21 septembre 2020.

