



Étude en modèle réduit de l'impact de filets 3D sur la dynamique hydro-sédimentaire en zone côtière

Olivier BOUCHER^{1,a}, Damien PHAM-VAN-BANG^{1,b}, Philippe SERGENT^{1,c},
Dominique MICHON²

1. CEREMA/DTEMF : Centre d'études et d'Expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, Direction Technique Eau, Mer et Fleuves,
a Laboratoire Génie Côtier et Environnement, Technopôle Brest Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, 29280 Plouzane, France. olivier.boucher@cerema.fr
b Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, 6 quai Watier, 78401 Chatou, France.
c directeur scientifique, 134 rue de Beauvais, 60280 Margny-lès-Compiègne, France.
2. Inventeur, entrepreneur, SARL Able, 23 rue du pont de chat, 44490 Le Croisic, France. dmichon.able@wanadoo.fr

Résumé :

L'entreprise *S-Able* a développé et breveté un dispositif destiné à contrôler le transport du sable en milieu côtier. Il s'agit d'un ensemble de filets assemblés en une structure tridimensionnelle, dont le but est de générer de la turbulence dans les écoulements pour les amortir. Afin d'observer et comprendre le fonctionnement du dispositif, des essais en modèle réduit ont été effectués dans un canal à houle sur une maquette au 1/10^{ème}. Le transport sédimentaire induit par les vagues est simulé avec un sable de silice de 700 µm de diamètre. La morphologie des fonds est suivie grâce à un procédé optique non intrusif de photogrammétrie. Les tests comparatifs effectués avec et sans la maquette du dispositif mettent en évidence l'impact des filets sur la dynamique hydro-sédimentaire en zone côtière.

Mots-clés : Modèle physique, Modèle réduit, Environnement littoral, Sable, Erosion, Filets, Turbulence.

Abstract:

S-Able company has developed a patented device for sediment control in coastal zone, which consists in a trawl net assembled as a 3D pattern. The aim is to generate turbulence in the flow to break currents responsible for sediment transport. Flume experiments were performed at 1/10 scale in order to understand the way this device works. A 700 µm diameter sand was used to simulate sediment transport under waves. Bottom bathymetry was monitored through an optical method based on photogrammetry. Comparative tests with and without the device show that the trawl net has an effective impact onto coastal hydro-sedimentary dynamics in coastal zone.

Keywords: Physical model, Reduced scale model, Coastal environment, Sand, Erosion, Trawl net, Turbulence.

1. Introduction.

La houle est une onde gravitaire (CIRIA *et al.*, 2009) caractérisée par son amplitude H et sa période T . En fonction de la profondeur h , sa longueur d'onde L varie. La cambrure d'une vague γ est définie par le rapport H/L . Lorsque qu'une vague arrive à la côte et que la profondeur diminue, sa cambrure augmente progressivement jusqu'à ce que se produise le déferlement. On définit ainsi la zone de *set-up* où les vagues lèvent, et la zone de *surf* où les vagues déferlent (BONNEFILLE, 1994). Le passage d'une vague induit des courants qui sont à l'origine d'un transport sédimentaire. Dans la zone de *set-up*, la houle est asymétrique ; le courant induit par les vagues en direction de la plage est plus intense que le courant orienté vers le large (VOROPAYEV, 2003), ce qui oriente le flux sédimentaire en direction de la côte. En zone de *surf*, le comportement de l'onde est modifié. Lors du déferlement, les orbitales ne sont plus fermées et une grande quantité d'eau est transportée vers la plage. L'équilibre s'effectue par la mise en place d'un *courant de retour* (SVENDSEN, 1987), localisé vers le fond, qui génère un transport sédimentaire orienté vers le large. Finalement, selon une coupe *cross-shore* (perpendiculaire à la côte), il résulte à l'interface des deux zones une accumulation de sédiments, qui coïncide avec le point de déferlement. Cette accumulation est dénommée *barre*, et sa position évolue en fonction des conditions de mer (GALLAGHER, 1998).

Les filets développés et brevetés par la société Able sont destinés à être disposés en zone d'estran, ou en subtidal proche de la côte. Ils sont constitués de plusieurs couches de filets assemblés en vé inversé, fixés au fond par un ensemble de chaînes et d'ancres. Le déploiement vertical de la structure tridimensionnelle est assuré par des flotteurs, qui génèrent une tension par le haut lorsque le dispositif est submergé. Le milieu poreux ainsi constitué génère de la turbulence, qui amortit les courants responsables du transport sédimentaire et favorise la sédimentation du sable dans les filets, selon une proportion qu'il reste à caractériser. Ce procédé est novateur et il n'existe à ce jour aucun retour d'expérience documenté. Dans la littérature, les publications consacrées aux filets concernent essentiellement les forces de traînée des chaluts tractés derrière un navire de pêche (BALASH, 2009 ; BALASH, 2012). On y relève que le principal facteur d'influence sur la traînée est le *solidity factor* S_d , défini au sein d'une maille comme le rapport de la surface de fibre sur la surface totale de la maille ; plus S_d est grand et plus les filets génèrent de traînée.

2. Matériel et méthode

2.1 Installations et métrologie

Les moyens d'essais sont un canal à houle du LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement, EDF R&D, Chatou, France) de 45 m de long, 0,6 m de large et 0,8 m de hauteur. Il est équipé d'un batteur de type piston, à absorption active. La houle générée peut être aléatoire ou régulière. La mesure de la houle est

effectuée au moyen de sondes résistives. La chaîne d'acquisition comporte le logiciel GEDAP, qui dépouille les signaux temporels en grandeurs statistiques usuelles, telles que $H_{1/3}$, H_{max} , H_{moy} , ...

La bathymétrie est relevée à partir de photographies prises selon un axe transversal, normal à la paroi de verre lisse qui compose la partie terminale du canal. Comme le ratio longueur/largeur est élevé (75:1), les phénomènes physiques qui y sont simulés sont proches du 2D. Nous utilisons un appareil photo de type reflex, modèle CANON EOS450D, monté sur un trépied fixe. Il est équipé d'un objectif grand angle Sigma 10-20 mm de type orthoscopique dont la conception compense les distorsions géométriques. Le logiciel permet de programmer les prises de vue à la cadence de 1 image/minute, enregistrées sur un PC portable puis posttraitées.

Le traitement appliqué aux images consiste à maximiser le contraste à l'interface sable-eau par ajustement des niveaux de gris. Puis les coordonnées de cette interface sont déterminées par moyennage et seuillage, en plusieurs itérations. La ligne de base représentant les fonds en dur est définie par l'opérateur. Les dimensions de la vitre étant fixes et connues, il est ensuite possible de calibrer les images puis de caler les résultats dans un référentiel orthonormé selon lequel : X est l'axe parallèle à la grande longueur du canal et orienté dans le sens de propagation de la houle, Z est l'axe perpendiculaire au fond du canal orienté vers le haut (hauteur), et Y l'axe perpendiculaire à la longueur (largeur). Les mesures sont ainsi effectuées dans le plan (X,Z) .

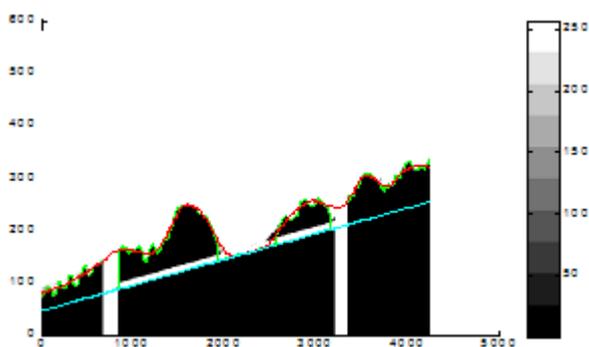


Figure 1. Traitement de la bathymétrie. En bleu la ligne de base (fonds en ciment), en vert la bathymétrie brute, en rouge la bathymétrie lissée à l'ordre 2 sur 600 pts (~6 cm).

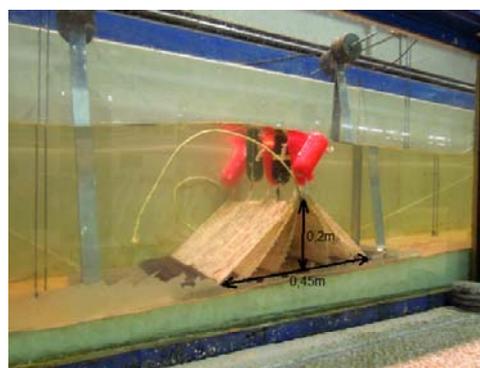


Figure 2. Maquette implantée sur la pente des fonds, dans la partie terminale du canal. Il s'agit ici de la v1 en test préliminaire, sans sédiments.

2.2 Modèle réduit

L'échelle retenue pour la maquette est le $1/10^{\text{ème}}$. Ce choix a été effectué à partir de la taille de la houle qu'il est possible de générer dans le canal et de l'échantillon de filets existant pour fabriquer la maquette. De géométrie triangulaire, ses dimensions sont

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

20 cm en hauteur (déployé), et 45 cm à la base. Sept flotteurs de polystyrène de forme cylindrique, de 14 cm de long et 6 cm de diamètre permettent de tendre les filets. L'ancrage est réalisé par un treillis en acier inox de 8 mm. Enfoui dans le sable, il n'induit pas de perturbation sur la propagation de la houle. Les sédiments sont constitués de sable de silice dont le D_{50} vaut 700 μm . Il s'agit d'un choix contraint par le budget et par les délais. Des sédiments artificiels de densité plus faible auraient été préférables pour que l'essai soit plus représentatif de la réalité.

2.3 Similitudes

La houle est générée en similitude de Froude, ce qui implique que les amplitudes suivent le rapport d'échelle géométrique $n=10$, tandis que les périodes suivent un rapport d'échelle $n^{1/2}=3,16$. Le principe du dispositif étant basé sur la turbulence, il faut également respecter la similitude de Reynolds, qui ne peut pas être rigoureusement satisfaite dans un modèle dimensionné en similitude de Froude. Nous avons donc estimé la valeur du Reynolds (tableau 1) en prenant le diamètre de la fibre du filet comme longueur d'écoulement, et en utilisant la composante de vitesse horizontale donnée par la théorie linéaire de la houle (CASTELLE, 2004).

Tableau 1. Calcul du Reynolds dans le modèle et en nature pour un cas représentatif des essais réalisés. La composante de vitesse horizontale max est calculée au niveau du fond tq $U_{0,max} = (\pi T)/\sinh(kh)$ avec $k=2\pi/T$ puis sa valeur RMS $U_{RMS} = U_{max}/\sqrt{2}$.

Paramètre	Désignation	Nature	Mod. 1/10è
H	amplitude de la houle (m)	1,5	0,15
h	profondeur (m)	2,5	0,25
T	période de la houle (s)	6	1,8
L	longueur d'onde (m)	27	2,7
d	diamètre de fibre (m)	0,008	0,0009
U_{max}	vitesse hor. Max (m/s), fond	1,27	0,40
U_{rms}	vitesse hor. RMS (m/s), fond	0,90	0,28
Re	nombre de Reynolds	7184	255

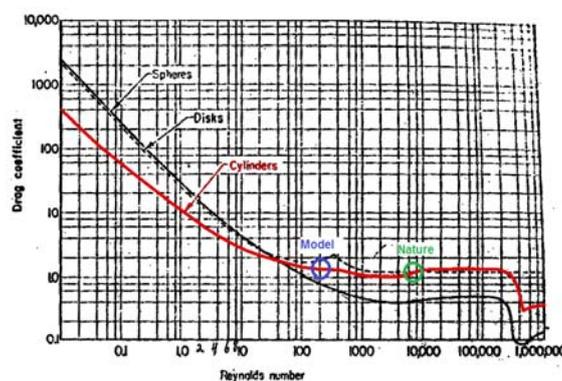


Figure 3. Coefficient de frottement d'un cylindre (LAPPLE & SHEPHERD, 1940) en fonction de Re .

L'écoulement est ainsi pleinement turbulent à l'échelle 1 ($Re \sim 10^4$), ce qui n'est pas garanti dans le modèle ($Re < 10^3$). Cela peut limiter l'efficacité du dispositif en modèle réduit. Toutefois, pour un cylindre, le plateau du coefficient de frottement (figure 3) correspondant au régime turbulent démarre à des valeurs de Reynolds plus faibles ($Re > 200$). Le régime sera donc turbulent lors des maximums de vitesse de courant.

La dernière similitude concerne le transport sédimentaire. L'objectif d'un modèle réduit est de conserver une mobilité des sédiments et une rugosité des fonds équivalentes à ceux rencontrés en nature. Or cette étude ne se reporte à aucun cas précis ; nous n'estimons donc que la représentativité du modèle par rapport aux sédiments utilisés. Van Rijn a proposé une méthode de dimensionnement des sédiments dans les modèles réduits (VAN RIJN, 2011), à travers l'équation suivante :

$$n_l/n_h = n_{D50}^{-0.5} n_{s-1}^{-0.5} n_h^{0.28}$$

où n_{s-1} est le rapport d'échelle des densités de sédiment, n_{D50} le rapport d'échelle des granulométries, et n_l et n_h les rapports d'échelle géométrique en plan et en vertical. L'application numérique avec $D_{50mod} = 700 \mu\text{m}$ donne $D_{50nat} = 2,54 \text{ mm}$, c'est à dire que le sédiment utilisé dans l'étude correspondrait à un sable grossier en nature.

2.4 Protocoles

Les essais sont réalisés en houle régulière car cela permet d'exercer une sollicitation plus intense qu'en houle irrégulière. L'impact du dispositif sur la dynamique sédimentaire est observé selon un mode comparatif ; pour chaque essai de paramètres (H, T) effectué avec le dispositif, les mêmes conditions sont simulées sans dispositif lors d'un essai dit de référence. Deux modes ont été testés : érosion et accrétion, ce qui porte à 4 le nombre total d'essais effectués. Les paramètres relatifs à ces essais sont renseignés dans le tableau 2.

Tableau 2. Paramètres utilisés pour les essais d'érosion et d'accrétion.

Essai	Type	Durée totale (min)	Niveau (m)	Période (s)	Hmoy max (m)
HR_MAR1	Érosion (avec filet)	129	0,35 à 0,50	1,8	0,203
HR_MAR3	Érosion (ref a vide)	127	0,35 à 0,50	1,8	0,197
HR_MAR2	Accrétion (ref a vide)	107	0,35 à 0,50	2,8	0,113
HR_MAR4	Accrétion (avec filet)	111	0,35 à 0,50	2,8	0,116

Les filets sont placés sur la pente des fonds, en position A' à une cote $z = +0,21 \text{ m}$ (tenant compte de l'épaisseur du lit de sédiment), correspondant au bas de la zone d'estran théorique (figure 6). Le sable est initialement déposé selon une couche homogène de 6 cm d'épaisseur. Au cours des essais, le niveau d'eau varie de 15 cm entre 0,35 m et 0,50 m de façon à simuler un cycle de marée, représenté sur la figure 5. Les amplitudes de houle incidente sont relevées par des sondes TDH placées avant le début de la pente des fonds ; l'utilisation d'un groupe de 3 sondes permet de calculer la composante incidente et réfléchie. Les données de bathymétrie ont été déterminées par post-traitement pour

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

chaque niveau qui est un multiple de 5 cm : 0,35-0,40-0,45-0,50 en distinguant les niveaux montants (indice U pour Up) des niveaux descendants (indice D pour Down).

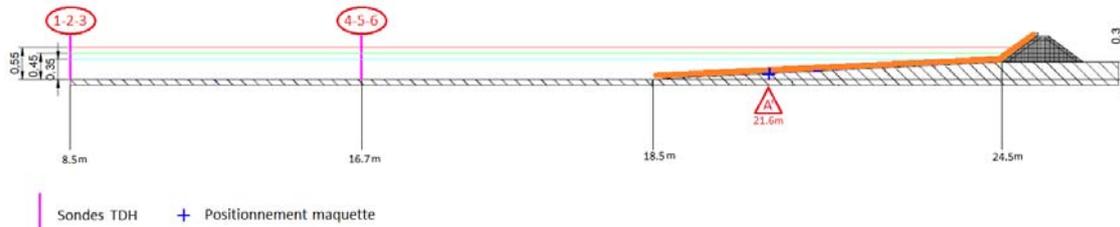


Figure 4. La pente des fonds en ciment débute à $X=18,5m$ selon une pente de 5%, ce qui amène les fonds en dur à la cote de $+0,3m$ en $X=24,5m$. Le dispositif est positionné en A' ($X=21,6m$) Le sable est disposé selon une couche de 6 cm sur les fonds en ciment. Au sommet de la pente des blocs de porphyre de 120 g disposés avec une pente de 1:3 servent à amortir les vagues. Les sondes TDH mesurant la houle incidente sont placées sur les fonds plats.

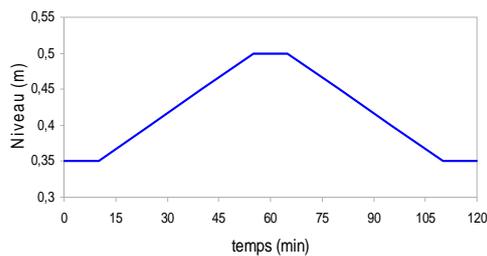


Figure 5. Variation du niveau au cours des essais. Les niveaux < 35 cm ne permettent pas une propagation suffisante de la houle.

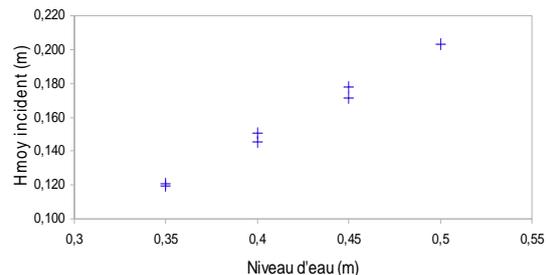


Figure 6. Amplitude moyenne de la houle régulière incidente à la sonde 4 au cours des essais d'érosion (calcul sur les sondes 4-5-6).

3. Résultats

3.1 Essais d'érosion

Sans dispositif (figure 7), une barre se forme rapidement sous l'effet du déferlement, de type plongeant. Cette barre migre vers la côte ou vers le large selon que le niveau monte ou descend, tout en s'engraissant progressivement des matériaux érodés en haut de plage. L'érosion s'intensifie lorsque le niveau atteint les valeurs les plus élevées, qui correspondent également aux amplitudes de houle incidente les plus fortes (figure 4). En présence du dispositif (figure 8) une barre se forme rapidement dans la partie avant des filets. Cette barre "artificielle" reste fixe même lorsque le niveau monte, mais son amplitude est inférieure à la barre "naturelle" observée lors de l'essai réalisé sans

dispositif. En haut de plage, comme lors de l'essai de référence, l'érosion s'intensifie nettement lorsque le niveau maximal est atteint. En revanche, elle semble moins forte dans la zone intertidale (entre les filets et le haut de plage), où l'on note l'apparition d'une barre secondaire ($x \sim 24\text{m}$) qui s'explique par le fait que la houle déferle partiellement sur le dispositif (la hauteur de houle est amortie de 10 à 15%), mais conserve assez d'énergie pour déferler une seconde fois plus près du bord.

Le calcul de la bathymétrie différentielle (figure 9) pour le niveau $N=0,40D$ (niveau décroissant) montre que l'érosion en haut de plage (5) et au large (1) sont équivalentes avec ou sans dispositif. La barre (2) est moins formée en présence des filets, mais en contrepartie l'érosion est moins forte dans la zone intertidale (3) et (4). Le sable reste donc globalement plus proche de la côte en présence des filets.

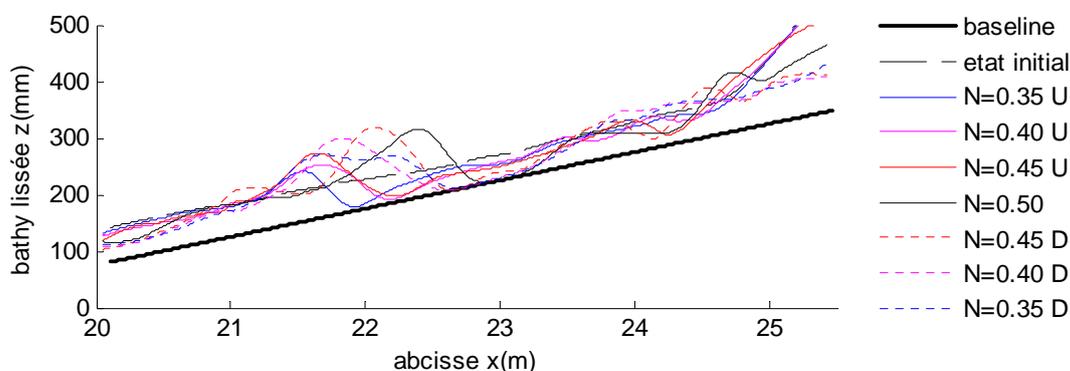


Figure 7. Evolution de la bathymétrie lors de l'essai érosion, sans dispositif (HR_MAR3).

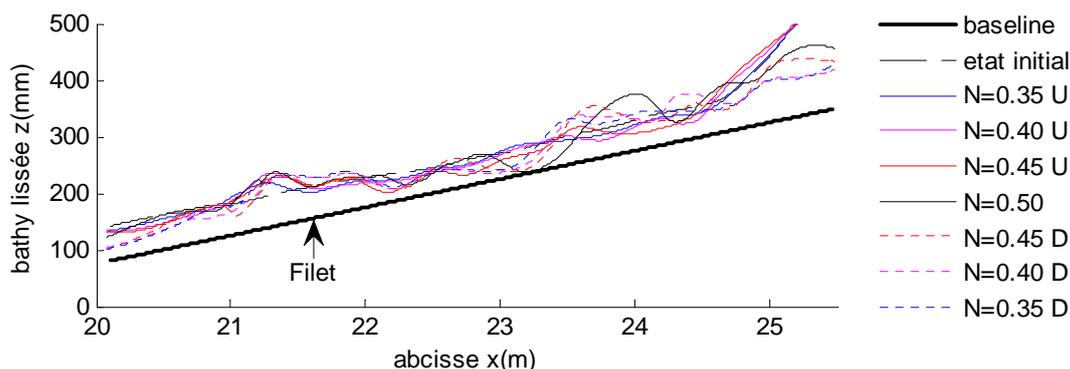


Figure 8. Evolution de la bathymétrie lors de l'essai d'érosion, avec dispositif (HR_MAR1).

3.2 Essais d'accrétion

En régime d'accrétion le déferlement est moins intense, de type glissant ou frontal selon le niveau d'eau et l'évolution de la pente de la plage. Lors de l'essai de référence (figure 10), le sable est transporté du niveau intertidal vers le haut de la plage, où une barre se

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

forme dans la zone de swash. Elle migre vers le haut de la plage en s'engraissant au fur et à mesure que le niveau monte. Lorsque suffisamment de sable s'est accumulé, une pente critique est atteinte et la morphologie de la plage n'évolue plus significativement.

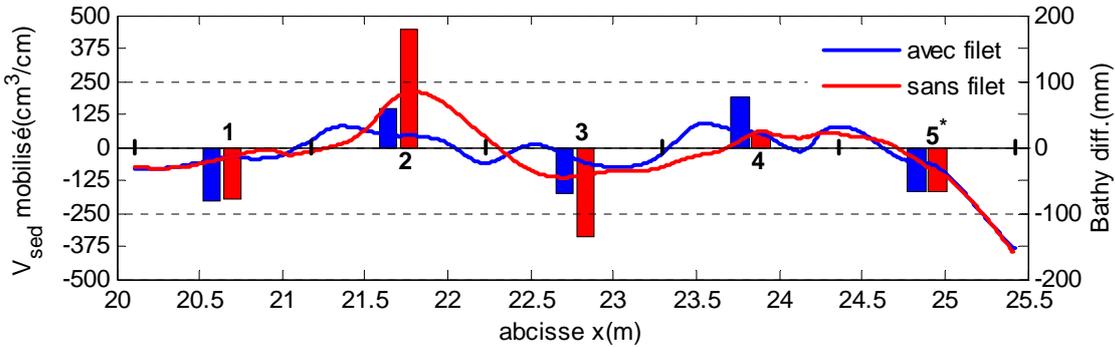


Figure 9. Bathymétrie différentielle entre l'état initial et $N=0,40m$ décroissant. Les histogrammes représentent l'aire sous la courbe, intégrée selon 5 tronçons.

*Pour le tronçon 5 un coefficient de 0,4 a été appliqué (porosité de l'enrochement).

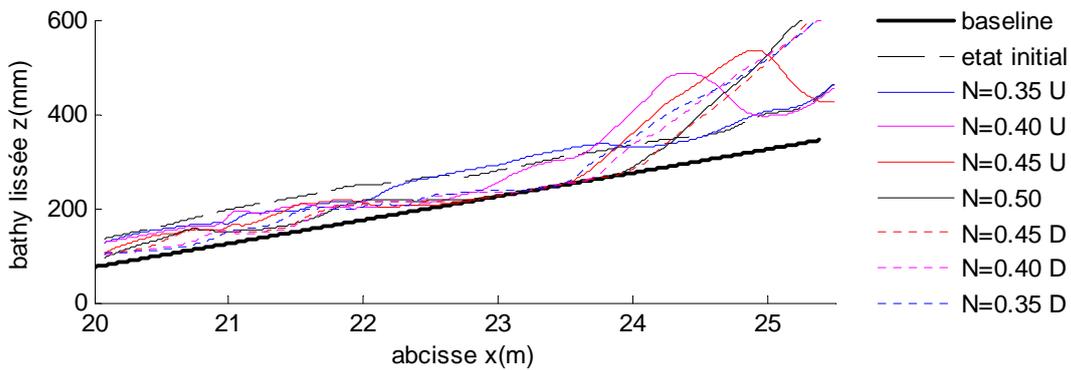


Figure 10. Evolution de la bathymétrie lors de l'essai d'accrétion, sans dispositif (HR_MAR2).

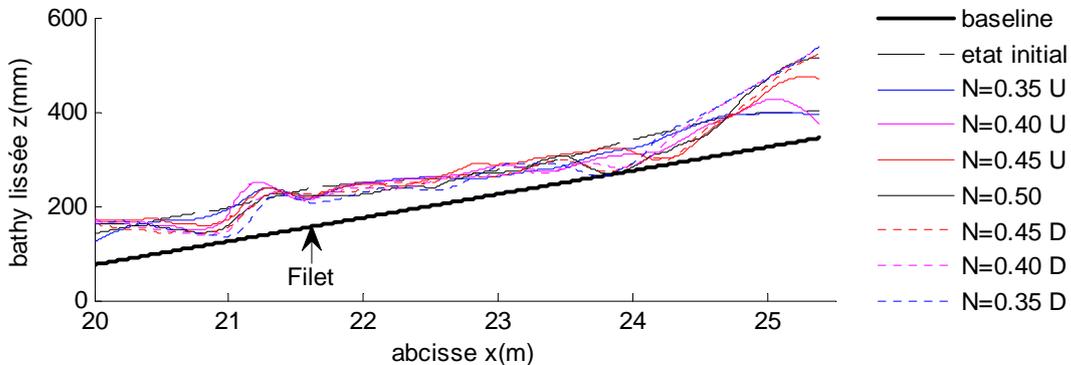


Figure 11. Evolution de la bathymétrie lors de l'essai d'accrétion, avec dispositif (HR_MAR4).

En présence du dispositif (figure 11) une petite barre se forme dans la partie frontale des filets. Sa position et son amplitude restent stables. Le processus d'engraissement du haut de plage est identique à celui observé en absence du dispositif, mais il semble moins dynamique, probablement parce que les filets atténuent l'énergie des vagues qui génèrent le transport.

4. Conclusions

Pour étudier le fonctionnement du dispositif *S-Able*, une maquette, dimensionnée au $1/10^{\text{ème}}$ en similitude de Froude et positionnée en bas de la zone d'estran, a été testée en canal à houle, en simulant un cycle de marée. Les conditions du test sont des vagues de 2 m et de période 6 s en nature pour le régime d'érosion, et des vagues de 1 m de période 9 s pour le régime d'accrétion. Le transport sédimentaire cross-shore est simulé à l'aide d'un sable de silice de 700 μm de diamètre, représentatif d'un sable grossier de 2,5 mm en nature. L'extrapolation des résultats pour des sites dont la granulométrie est fine n'est pas possible car les distorsions induites sont trop importantes. Les résultats qualitatifs montrent que le dispositif agit sur les processus hydro-sédimentaires côtiers. La formation d'une barre artificielle fixée au sein des filets est observée. Cette barre n'est pas assez développée pour prévenir l'érosion majeure qui peut se produire aux pleines mers, lorsque de fortes vagues arrivent à la côte. Mais en contrepartie, le dispositif maintient le stock de sable plus proche de la côte et mobilisable lors des périodes d'accalmie, propices à l'engraissement des plages. Dans la configuration testée, les filets ne jouent pas le rôle de barrière, mais plutôt celui de modérateur et de décanteur de sable. Un amortissement de la houle jusqu'à 15% est observé pour des houles fortement cambrées (CETMEF, 2013). Cet amortissement devra être mesuré de manière plus précise pour des événements extrêmes. Pour étayer les observations effectuées en modèle réduit, une campagne d'essai in-situ est aussi souhaitable.

5. Références bibliographiques

- BALASH C. (2009). *Aquaculture net drag force and added mass*. Aquacultural Engineering, Vol. 41, pp 14-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.04.003>
- BALASH C. (2012). *High porosity net drag at a low angle of attack in application to a representative prawn trawl*. 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2012-83083.
- BONNEFILLE R. (1994). *Mouvements de la mer*. Techniques de l'ingénieur, Vol. CB2, n° C4610, pp C4610.1-C4610.18.
- CASTELLE B. (2004). *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine*. Thèse Université Bordeaux I, Ecole doctorale Sciences du vivant, Géosciences, Sciences de l'Environnement.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

CETMEF (2013). *Etude en canal à houle d'un dispositif de filet structuré 3D*. Rapport d'étude, Direction Scientifique, Laboratoire des sciences de l'hydraulique, pp 43-45.

CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide enrochement, chapitre 4.2*. pp 328-417.

GALLAGHER E.L. (1998). *Observations of sand bar evolution on a natural beach*. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No C2, pp 3203-3215.
<http://dx.doi.org/10.1029/97JC02765>

LAPPLE C.E., SHEPHERD C.B. (1940). *Calculation of particle trajectories*. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 32(5), pp 605-617. <http://dx.doi.org/10.1021/ie50365a007>

SVENDSEN I.A. (1987). *Mass flux and undertow in a surf zone*. Coastal Engineering, Vol. 8, pp 347-365. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(84\)90030-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(84)90030-9)

VOROPAYEV S.I. (2003). *Morphodynamics and cobbles behavior in and near the surf zone*. Ocean Engineering, Vol. 30, pp 1741-1764. [http://dx.doi.org/10.1016/S0029-8018\(03\)00013-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00013-1)

VAN RIJN L.C. (2011). *Scaling laws for beach and dune erosion processes*. Coastal Engineering, Vol. 58, pp 623-636. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.008>