



# Travail de fin d'étude

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2017-2018

Voie d'approfondissement :  
CELVN

Soutenu le 30 août 2018

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Jean-Pierre Mattossi
- Tuteur : Pierre Farnole
- Expert : Jean-Christophe Ascione

Par

**Yohann Evain**

**Etude sur une nouvelle technologie d'atténuateur de houle  
en expérimentation dans la baie de Villeneuve-Loubet**

**Organisme d'accueil  
Biobamb**

# Notice analytique

| AUTEUR                          |  |                            |                    |
|---------------------------------|--|----------------------------|--------------------|
| Nom                             | Evain  |                            |                    |
| Prénom                          | Yohann   |                            |                    |
| ORGANISME D'ACCUEIL             |  |                            |                    |
| Nom de l'organisme et Localité  | Biobamb à Nice   |                            |                    |
| Nom du Tuteur                   | Mr Pierre Farnole  |                            |                    |
| ANALYSE DU TFE                  |  |                            |                    |
| Titre (français)                | Etude sur une nouvelle technologie d'atténuateur de houle en expérimentation dans la baie de Villeneuve-Loubet   |                            |                    |
| Titre (anglais)                 | Study on a new wave attenuator technology in experiment in the Villeneuve-Loubet bay.  |                            |                    |
| Résumé (français)               | <p>L'aléa de submersion marine est un phénomène qui menace de plus en plus le littoral. De nouvelles technologies innovantes et originales sont mises au point pour réduire les risques liés à cet aléa tout en étant éco-responsable. Dans le cadre de la protection de la plage des Maurettes de Villeneuve-Loubet, Mr Farnole a conçu un système atténuateur de houle en bambou qui serait capable d'amortir les vagues. Après des essais en canal à houle, l'expérimentation se poursuit grandeur nature dans la baie. Les premiers retours sur l'influence du récif artificiel sont encourageants mais le suivi va encore se poursuivre pendant plus de deux ans pour confirmer l'efficacité du dispositif.</p> |                            |                    |
| Résumé (anglais)                | <p>Marine submergence is more and more threatening. New green technologies are trying to reduce the risks. To protect the Maurettes beach in Villeneuve-Loubet, Mr Farnole developed a wave attenuator made with bambous. After some tests the experiment is continuing directly in the bay. The first results are encouraging but the monitoring will continue at least two years to confirm the efficiency of the device.</p>  |                            |                    |
| Mots-clés (français, 5 maxi)    | Atténuateur de houle, bambous, submersion marine, protection littorale   |                            |                    |
| Mots-clés (anglais, 5 maxi)     | Wave attenuator, bambous, marine submergence, littoral protection  |                            |                    |
| Termes géo-graphique (français) | Villeneuve-Loubet, Côte d'Azur   |                            |                    |
| COLLATION                       |  |                            |                    |
|                                 | Nb de pages  | Nb d'annexes (nb de pages) | Nb de réf. biblio. |
|                                 | 53   | 11                         | 16                 |

# Sommaire

---

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Notice analytique .....  | 2  |
| Sommaire .....   | 3  |
| Liste des illustrations.....   | 5  |
| Résumé.....  | 7  |
| Introduction : .....   | 8  |
| 1. L'érosion littoral est un phénomène augmentant le risque de submersion marine :.....                            | 10 |
| 1.1 L'influence de la granulométrie : .....  | 10 |
| 1.2 La houle est un phénomène important dans le transport sédimentaire :.....                                      | 11 |
| 1.2.1 Formation et propagation de la houle : .....   | 11 |
| 1.2.2 Le déferlement des vagues sur la côte : .....  | 13 |
| 1.2.3 Le courant littoral induit par la houle transporte des sédiments : .....                                     | 15 |
| 1.2.4 Les mouvements sédimentaires dans le profil de la plage : .....  | 18 |
| 1.3 Les courants généraux, les courants de marée et le vent provoquent également un transport de sédiments : ..... | 19 |
| 1.3.1 Les courants généraux méditerranéens : .....   | 19 |
| 1.3.2 Les courants de marée : .....  | 20 |
| 1.3.3 Le transport éolien : .....  | 20 |
| 1.4 Un déséquilibre dans les transports sédimentaires peut provoquer un recul du trait de côte :.....              | 21 |
| 1.4.1 Les apports sédimentaires des fleuves sont primordiaux pour recharger naturellement les plages .....         | 21 |
| 1.4.2 Des obstacles peuvent limiter le transport de sédiments : .....  | 21 |
| 2. Etude du site et définition des objectifs de protection.....  | 23 |
| 2.1 L'enjeu principal pour le département est de limiter la submersion de la route : .....                         | 23 |
| 2.1.1 Paramètres du site : .....   | 23 |
| 2.1.2 Estimation du run-up et influence du niveau moyen de la mer : .....  | 25 |
| 2.1.3 La stabilisation du trait de côte peut empêcher la situation de se dégrader davantage :.....                 | 27 |
| 2.2 Les retombées d'un projet de protection peuvent être intéressantes pour la zone : .....                        | 29 |
| 3. Elaboration d'une idée originale et premiers tests en canal à houle :.....                                      | 31 |
| 3.1 Elaboration d'une solution adaptée aux objectifs fixés par le département :.....                               | 31 |
| 3.1.1 A la recherche d'idées originales et innovantes : .....  | 31 |
| 3.1.2 L'utilisation du bambou dans les aménagements littoraux : .....  | 32 |
| 3.2 Test du procédé REBAMB© avant sa mise en application :.....  | 34 |
| 3.2.1 Conditions générales des expérimentations : .....  | 34 |
| 3.2.2 Les différents dispositifs : .....   | 35 |
| 3.2.3 Les résultats obtenus après les essais en canal à houle : .....  | 37 |
| 3.2.4 Conclusion des essais .....  | 39 |
| 3.3 Vers une expérimentation sur site : .....  | 40 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.  | Conception, installation et suivi de Rebamb : .....               | 41 |
| 4.1 | De l'idée d'un récif en bambou à sa concrétisation sur site ..... | 41 |
| 4.2 | L'organisation du suivi .....                                     | 44 |
| 4.3 | Premières analyses des données disponibles .....                  | 46 |
| 4.4 | Critique du suivi : .....   | 50 |
|     | Conclusion : .....  | 52 |
|     | Sources .....   | 53 |
|     | Annexes .....   | 54 |

# Liste des illustrations

---

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 Panorama de la politique nationale de gestion des risques inondations (source : plaquette ministère de l'écologie Novembre 2011) .....  | 9  |
| Figure 2 Echelle de Wentworth .....  | 10 |
| Figure 3 Graphique présentant la contrainte de cisaillement minimale à appliquer sur un grain de sable pour le mettre en mouvement (Source : Artélia 2018) .....                           | 11 |
| Figure 4 Photo d'une bouée du réseau CANDHIS (source : CANDHIS) .....  | 12 |
| Figure 5 Trajectoires de particules au passage d'une houle au large.....   | 13 |
| Figure 6 Schéma présentant les 5 zones/étapes du déferlement d'une onde solitaire sur une plage (Source : Coastal engineering volume 1 1978).....  | 14 |
| Figure 7 Schéma de présentation des types de déferlements des vagues (Source : Sophie Ancel, Propagation de la houle, 2018) .....  | 15 |
| Figure 8 Schéma présentant les phénomènes à l'origine du transit littoral des sédiments (Source : Artélia, 2018) .....   | 16 |
| Figure 9 Schéma des paramètres pour le calcul du transit littoral (Source : Artélia 2018).....   | 16 |
| Figure 10 Exemple de profil littoral obtenu après calcul par un logiciel du transit littoral.....  | 17 |
| Figure 11 Schéma décrivant l'évolution sédimentaire saisonnière d'une plage .....  | 18 |
| Figure 12 Carte des courants marins généraux en Méditerranée (Source : UVED) .....   | 19 |
| Figure 13 Photo de la dune du Pilat et de sa végétation (Source : Pixabay) .....   | 20 |
| Figure 14 Schéma de la formation d'un bouchon vaseux à l'embouchure d'un fleuve .....  | 21 |
| Figure 15 Photo aérienne de la côte entre Cannes et Mandelieu montrant l'influence des épis sur la largeur de plage (Source : Google Map).....   | 22 |
| Figure 16 Photographie aérienne du site soumis à la submersion dans la baie entre Villeneuve-Loubet et Cannes (Source : Google Map) .....  | 23 |
| Figure 17 Schéma de la répartition des évènements de submersion marine.....  | 24 |
| Figure 18 Rose des vents au large de Villeneuve-Loubet .....   | 24 |
| Figure 19 Graphique représentant le run-up des houles en fonction de la période.....   | 26 |
| Figure 20 Données numériques sur l'évolution du trait de côte au niveau de la plage des Maurettes ...  | 27 |
| Figure 21 Schéma bilan des mouvements principaux de sédiments aux alentours du site d'étude.....   | 28 |
| Figure 22 Carte localisant les herbiers de Cymodocées au large de la plage des Maurettes .....   | 29 |
| Figure 23 Carte localisant les récifs artificiels installés le long de la côte méditerranéenne française ....  | 31 |
| Figure 24 Photo de l'expérience du Cap Ferret (Source : Biobamb) .....   | 32 |
| Figure 25 Photo d'un brise-lame en bambou installé dans la province de Phuket en Thaïlande (Source : Dreamstime) .....   | 33 |
| Figure 26 Exemple de courbes obtenues après traitement Matlab, montrant les profils à l'aval des dispositifs testés en canal à houle .....   | 34 |
| Figure 27 Schéma de l'organisation de la structure à haie fixe (Source: Biobamb).....  | 35 |
| Figure 28 Photo du dispositif de haies mobiles dans le canal à houle .....   | 36 |
| Figure 29 Graphique représentant le lien entre houle transmise (Hst) et houle incidente (Hsi) .....  | 37 |
| Figure 30 Profil aval lors des tests avec haies fixes .....  | 38 |
| Figure 31 Profil aval lors des tests avec haies mobiles .....  | 38 |
| Figure 32 Graphique présentant le run-up des vagues en fonction de la hauteur et de la période de la houle en prenant en compte l'amortissement d'un récif à haies de bambou mobiles ..... | 39 |
| Figure 33 Photo d'une charpente en bambou en Thaïlande (Source : 123RF) .....  | 41 |
| Figure 34 Schéma d'implantation du procédé Rebamb au niveau de la plage des Maurettes .....  | 42 |
| Figure 35 Schéma de principe de la structure avec ancien ancrage (Source : étude préliminaire Biobamb) .....   | 43 |
| Figure 36 tableau récapitulatif des interventions des différents acteurs pour le suivi de l'expérimentation .....  | 45 |
| Figure 37 Comparaison bathymétrique entre les relevés de septembre 2017 et mai 2018 .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 38 Profil topo/bathymétrique comparatif de la plage des Maquettes .....   | 48 |
| Figure 39 Photographie du littoral près de Beaulieu sur mer (06).....  | 52 |
| Figure 40 Corrélogramme Hm0/Tp de la bouée CANDHIS de Monaco donnant des données sur les houles les plus fréquentes .....  | 54 |
| Figure 41 Formulaire lié au modèle d'Airy tiré du RP-C205 .....  | 55 |
| Figure 42 Tableau de recensement des périodes de fermeture de la RD6098 entre 1993 et 2008 (Source : Biobamb) .....  | 56 |
| Figure 43 Tableau récapitulatif des données de houles utiles pour l'étude du projet (Source: Biobamb) .....  | 56 |
| Figure 44 Résultats de modélisation numérique des courants et des houles arrivant dans la baie lorsqu'elle est soumise à une houle d'Est de période de retour T=1 an (Source : Biobamb)..... | 57 |
| Figure 45 Récapitulatif des résultats obtenus lors des essais en canal à houle des récifs artificiels en bambou (Source : Biobamb).....  | 58 |
| Figure 46 Graphique liant le nombre de Reynolds au coefficient de traînée (Source : Techniques de mouillages de J-P Girardot de l'université de Brest).....                                  | 59 |
| Figure 47 extrait d'une publicité de Platipus expliquant le fonctionnement de l'ancre.....   | 60 |
| Figure 48 Profil bathymétrique comparatif du Sud de la plage des Maquettes .....   | 61 |
| Figure 49 Profil bathymétrique comparatif du Nord de la plage des Maquettes .....  | 62 |
| Figure 50 Profil topographique comparatif du Nord de la plage des Maquettes .....  | 63 |
| Figure 51 Profil topographique comparatif du Sud de la plage des Maquettes .....   | 64 |
| Figure 52 Code Scilab permettant de comparer numériquement les données topographiques ou bathymétriques .....  | 65 |
| Figure 53 Macro excel permettant le recensement et l'analyse de tempêtes dépassant un certain seuil .....  | 66 |

# Résumé

---

Les phénomènes marins qui influencent le littoral sont nombreux et complexes. De nombreuses études et l'aide des nouvelles technologies permettent d'accroître en permanence nos connaissances dans ce domaine. Ces connaissances sont ensuite remobilisées dans le cadre de projet littoraux visant à aménager la côte en suivant les stratégies de gestion intégrée des zones côtières et littorales.

Dans ce cadre, le département des Alpes-Maritimes a souhaité protéger la route littorale reliant Villeneuve-Loubet à Antibes. En effet, cette route est soumise à des phénomènes de submersion qui entraînent sa fermeture plusieurs jours par an. Ce phénomène est de plus en plus problématique puisque l'érosion que subit la plage des Maquettes rend la route de plus en plus vulnérable.

Afin de répondre à ce problème, le bureau d'étude de Mr Farnole a proposé au département une solution originale et innovante : un atténuateur de houle en bambou. A partir d'essais réalisés en canal à houle, une structure de récif artificiel composé de haies mobiles a été pensée. Le mouvement des haies permettrait de réduire la force de la houle pour limiter la submersion de la route. De plus, cet amortissement entraînerait un dépôt de sédiments qui peuvent recharger la plage et donc limiter, voir annuler son érosion.

Un projet expérimental a donc vu le jour. Liant le CNRS, le département et Biobamb, ce projet sur 3 ans vise à tester l'efficacité du dispositif directement sur le site des Maquettes. Le récif a ainsi pu être installé durant le mois de février 2018. Depuis, un suivi méticuleux a lieu pour mesurer l'influence du récif dans la baie. Des relevés bathymétriques, topographiques, granulométriques, biologiques ont lieu et vont encore avoir lieu au cours de ces trois années.

Après cinq mois de suivi, quelques données bathymétriques et topographiques sont disponibles. Bien que ne permettant pas de déterminer si le dispositif est efficace ou non, ces résultats sont encourageants pour la suite. Le suivi se poursuivra donc encore deux ans et demi et il est possible que d'ici quelques années d'autres atténuateurs de houles en bambous soient installés sur nos côtes ou ailleurs.

# Introduction :

---

Les risques d'inondations sont de plus en plus importants avec le changement climatique. Elles peuvent mettre en péril les activités humaines et parfois même les personnes. Les causes des inondations peuvent être très diverses : fortes précipitations, crues de cours d'eau, submersions marines ou encore ruptures de barrages.

Afin de prévenir les aléas et de mieux gérer les risques liés à l'inondation, l'Etat a élaboré une stratégie nationale à trois échelles depuis Novembre 2011. A l'échelle nationale, cette stratégie prévoit en particulier la définition d'objectifs en termes de réduction de vulnérabilité et met en place des outils nationaux et des plans d'actions permettant une bonne communication aux échelles inférieures.

Au niveau territorial, c'est la surveillance, la prévision et les orientations territoriales de gestions qui sont prédominantes toujours dans le but de diminuer la vulnérabilité à l'échelle des grands bassins hydrographiques. Pour l'échelle local, l'objectif est de répondre aux attentes des deux échelles supérieures, en appliquant des actions concrètes pour réduire la vulnérabilité sur des sites précis mais aussi d'élaborer la gestion de crise.

En ce qui concerne l'aléa de submersion marine, celui-ci peut se présenter sous trois formes. La première est le franchissement par paquets de mer : l'eau franchit un ouvrage ou une berme ponctuellement à l'arrivée des vagues. Les points bas en arrière se retrouvent donc inondés et peuvent devenir des lagunes. Il peut également y avoir débordement lorsque le niveau marin devient plus haut que les ouvrages, les berges ou les hauts de plages. Enfin, la submersion peut avoir lieu lorsqu'un ouvrage ou un cordon dunaire rompt sous la violence d'une tempête.

Le risque lié à l'aléa de submersion marine peut être réduit grâce à l'action de l'homme. Tout d'abord, il est possible d'aménager les espaces littoraux de manière à adapter aux risques (protections globales et à l'échelle de l'habitant). L'intégration de l'habitant dans ces démarches est importante pour lui permettre de comprendre le risque et d'améliorer la culture du risque au sein de la population. De plus, la connaissance de l'aléa reste un élément central (prévisions, périodes de retours) pour élaborer une gestion de crise efficace. Enfin, si le risque est trop grand, la solution de supprimer ou de relocaliser l'activité n'est pas à écarter.

La baie entre Villeneuve-Loubet et Antibes dans les Alpes-Maritimes est soumise à l'aléa de submersion. En effet, de nombreux jours par an, la route située à environ 50 mètres du trait de côte est submergée. Malgré l'importance de l'axe en termes de trafic, la route est donc fermée durant ces épisodes puisque les vagues projettent sable et galets pouvant blesser les usagers.

Ce risque de submersion est aggravé avec l'érosion qui ne cesse de grignoter la plage qui protège un peu la route. Le département a alors décidé de réagir pour gérer ce risque. La solution de relocalisation n'a pas été retenue puisque relocaliser la route et la voie de chemin de fer coûterait trop cher.

La société Biobamb a donc proposé une solution de protection originale au département : un atténuateur de houle en bambou. Ce système doux est donc en expérimentation depuis février 2018 pour une durée de trois ans après un avis positif du Cerema et du CNRS. On peut alors se demander quels sont les objectifs du département pour cette plage et comment évaluer qu'ils soient atteints d'ici 2021.

### LÉGENDE

- Niveau d'intervention
- Démarches
- Outils existants, Procédures, Plans d'actions

## Politique nationale de gestion des risques inondation

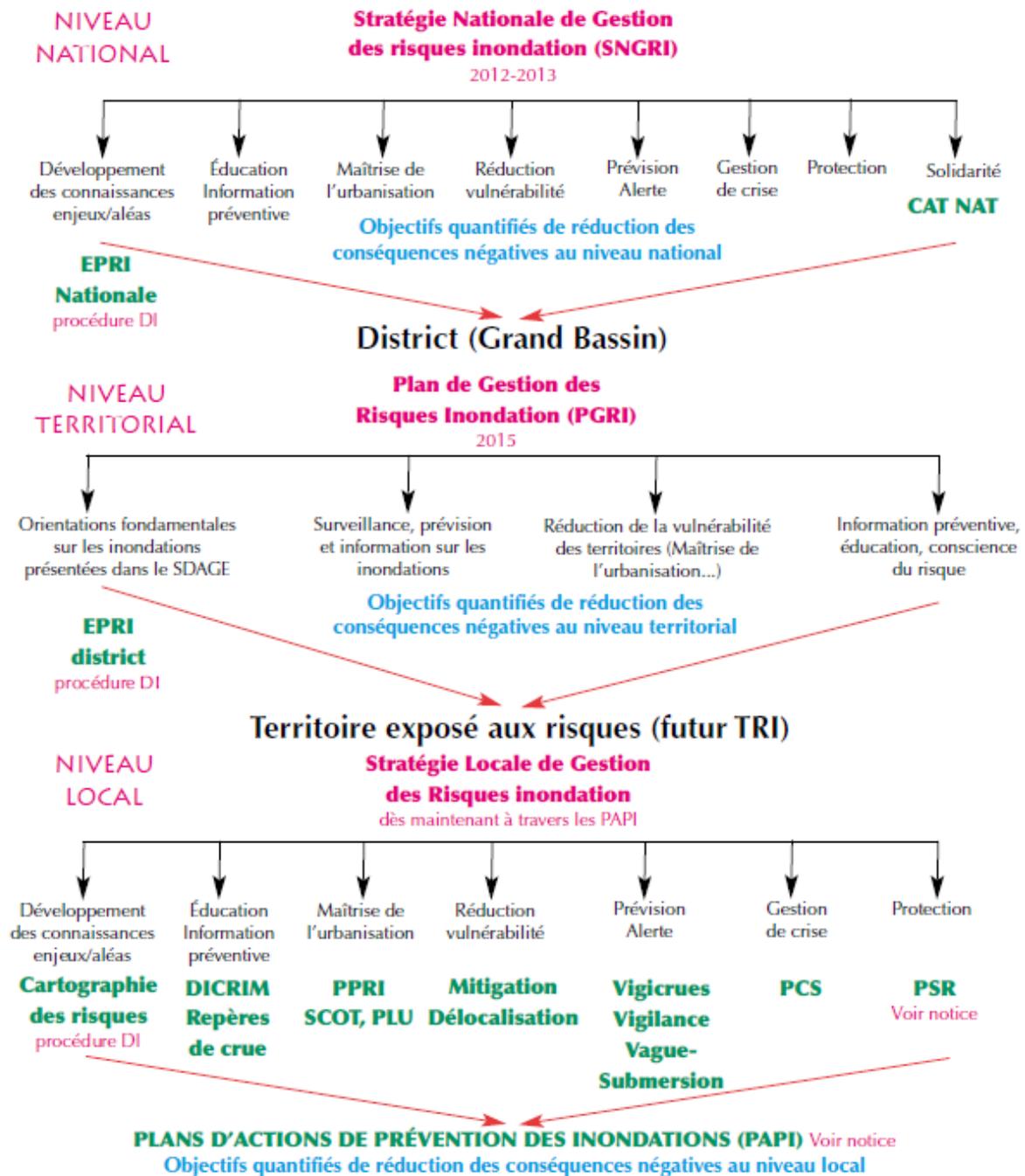


Figure 1 Panorama de la politique nationale de gestion des risques inondations (source : plaquette ministère de l'écologie Novembre 2011)

# 1. L'érosion littoral est un phénomène augmentant le risque de submersion marine :

L'érosion résulte d'un déséquilibre dans le transport sédimentaire lorsque les apports sont inférieurs aux départs de sédiments. Il existe différents phénomènes à l'origine de transports sédimentaires qui peuvent entraîner l'érosion de certaines zones littorales.

Nous allons dans un premier temps parler des sédiments eux-mêmes avant de discuter des différents phénomènes pouvant les déplacer.

## 1.1 L'influence de la granulométrie :

La granulométrie des sédiments joue un rôle important dans le phénomène de l'érosion. C'est pourquoi il existe des classifications diverses des sédiments. L'échelle de Wentworth est la plus utilisée en séparant les classes de sédiments en fonction du diamètre.

|                           | TYPE                 | mm              |
|---------------------------|----------------------|-----------------|
| Rudites                   | Blocs                | > 250           |
|                           | Pierres              | 64 – 250        |
|                           | Cailloux (galets)    | 16 - 64         |
|                           | Graviers             | 4 - 16          |
|                           | Granules             | 2 - 4           |
| Arénites (sables)         | Très grossier        | 1 - 2           |
|                           | Grossier             | 0,5 - 1         |
|                           | Moyen                | 0,25 – 0,50     |
|                           | Fin                  | 0,125 – 0,250   |
|                           | Très fin             | 0,064 – 0,125   |
| Lutites (limons et vases) | Silts (limons)       | 0,004 – 0,064   |
|                           | Précolloïdes (vases) | 0,00012 – 0,004 |
|                           | Colloïdes            | < 0,00012       |

Figure 2 Echelle de Wentworth

Les forces nécessaires pour mettre en suspension ces sédiments sont différentes en fonction du diamètre mais également du caractère cohésif ou non des sédiments. Un sable non cohésif va être plus facile à mettre en mouvement qu'une vase cohésive dans laquelle l'eau peut difficilement circuler. Dans cette partie nous allons parler des sédiments non-cohésifs, la plage des Maurettes que nous allons étudier par la suite étant constituée de sable et de galets.

Suivant la vitesse de l'écoulement, les sédiments peuvent être transportés selon trois modes. Pour une vitesse relativement faible les sédiments sont charriés. Les grains roulent ou sautent sur le fond en restant près du fond. Les grains entrent souvent en collisions et ralentissent les mouvements. Ce mode de déplacement entraîne en général la formation de rides sur le fond.

Lorsque l'énergie est suffisante, les sédiments sont mis en suspension dans des couches plus hautes que pour les charriages. Les chocs entre les grains et le fond sont donc limités et le poids des particules est entièrement supporté par le fluide. Les formations sédimentaires associées sont également des rides mais celles-ci peuvent devenir des dunes en cas d'apport assez importants.

Enfin, à partir d'une certaine vitesse d'écoulement, les forces induites par le fluide peuvent entraîner un gommage des rides ou des dunes de fond. Le fond est alors aplati avec une couche supérieure de sédiments qui sont en mouvement et très concentré.

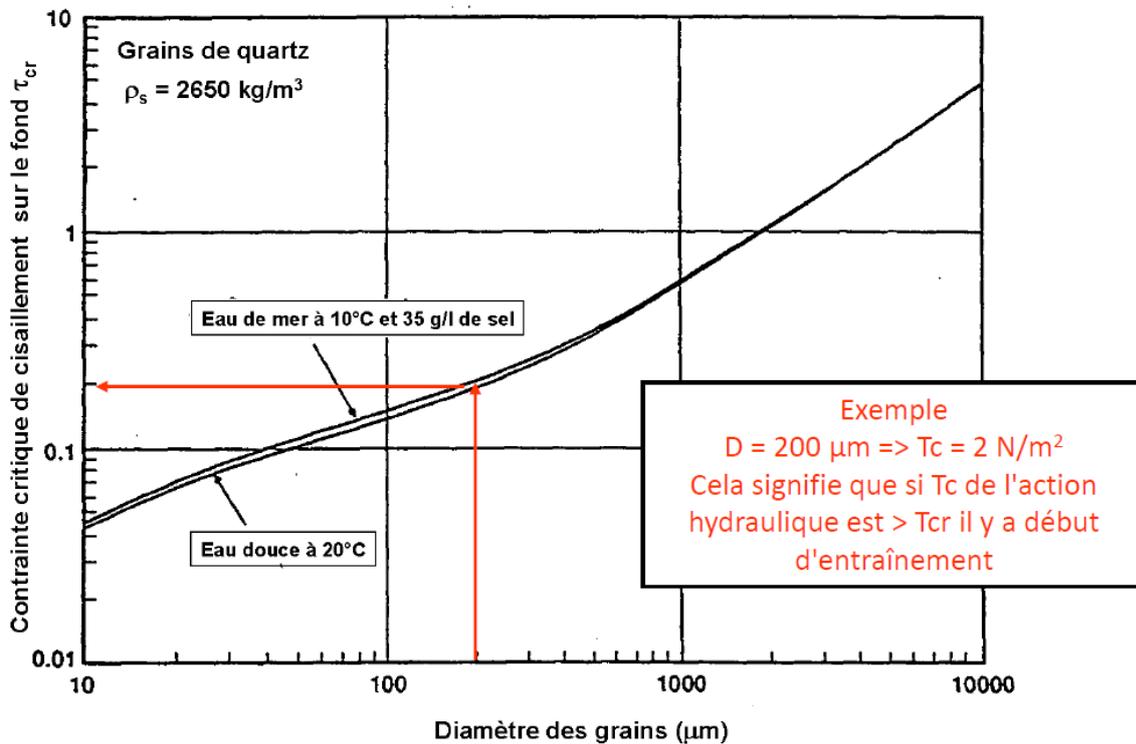


Figure 3 Graphique présentant la contrainte de cisaillement minimale à appliquer sur un grain de sable pour le mettre en mouvement (Source : Artélia 2018)

## 1.2 La houle est un phénomène important dans le transport sédimentaire :

### 1.2.1 Formation et propagation de la houle :

Une houle est un système de vagues qui s'est formé sous l'action du vent et qui se propage loin de son lieu de création. Afin d'étudier les houles, différents paramètres sont importants à définir comme la Hauteur Significative  $H_s$  qui est la hauteur moyenne (moyenne sur 15-20 vagues bien formées) ou encore la période de pic  $T_p$  qui est la période moyenne du système de vague. D'autres paramètres telle la vitesse ou la direction sont également primordiaux.

Afin de mesurer ces caractéristiques de houle, il existe différentes méthodes qui peuvent être in situ ou à distance. En effet, des mesures par radar haute fréquence ou par des altimètres embarqués à bord de satellites sont possibles. Pour les mesures in-situ, l'instrumentation est diverse entre les perches à houles, les bouées, les sondes capacitatives ou encore les capteurs de pression.

Plusieurs réseaux de mesures de houles ont ainsi vu le jour avec notamment, la mise en place de bouées qui font des relevés toute l'année. On peut par exemple citer le réseau CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ). Ce réseau possède des bouées de mesure sur tout le littoral français pour mesurer les hauteurs, les vitesses, les directions, les périodes des houles arrivants sur nos côtes mais aussi d'autres paramètres climatiques comme les variations de pression par exemple. Les mesures sont accessibles tout comme les traitements statistiques de ces mesures (corrélogrammes : voir annexe, histogrammes) sur le site de CANDHIS.

Les données récoltées sont analysées grâce à des traitements statistiques. Il existe de très nombreux traitements statistiques qui sont utilisés selon les caractéristiques du point de mesure ou suivant ce que l'on veut obtenir après traitement. Les hauteurs de vagues sont réparties suivant une loi de Rayleigh (hors zone littorale), cela permet d'avoir une idée des hauteurs de houle susceptible de se former près du point de mesure par exemple.

Malgré tout, les seuls outils statistiques ne permettent pas de développer des modèles numériques très fiables et c'est pour cela que les houles font souvent l'objet d'une analyse spectrale. Les houles, après leur formation, se propagent à la surface de l'océan et peuvent se rencontrer les unes les autres. Ainsi, un signal de surface libre peut se décomposer en différentes ondes sinusoïdales appelées composantes formées par l'interaction de différentes houles. Cette approche permet de continuer à calculer les paramètres de houle dans un mode spectral tout en séparant les différents systèmes de vagues qui se rencontrent dans un même état de mer.

Au large, on préférera utiliser le modèle spectral pour analyser les houles puisqu'il y est fiable et plus précis. Cependant, il n'est plus aussi fiable en zone côtière et c'est pourquoi les modèles statistiques restent encore très utilisés pour les études de projet côtiers.

Les houles se propagent à la surface des océans en faisant osciller les particules d'eau. L'énergie fournie par le vent lors de la formation de la houle est transmise de proche en proche par les particules d'eau qui présentent des trajectoires circulaires lors du passage d'une onde (voir figure 2). Ces trajectoires circulaires s'aplatissent en ellipses lorsque la houle commence à être influencée par le fond.

L'énergie transmise de proche en proche se décompose en énergie cinétique et énergie potentielle. Au large, ces deux énergies sont assez proches et on peut utiliser la formule suivante d'après Mattarolo et al. :

$$E_p = E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2$$

Avec  $\rho$  la masse volumique de l'eau,  $g$  l'accélération de la pesanteur (9.81) et  $H$  la hauteur de la houle.

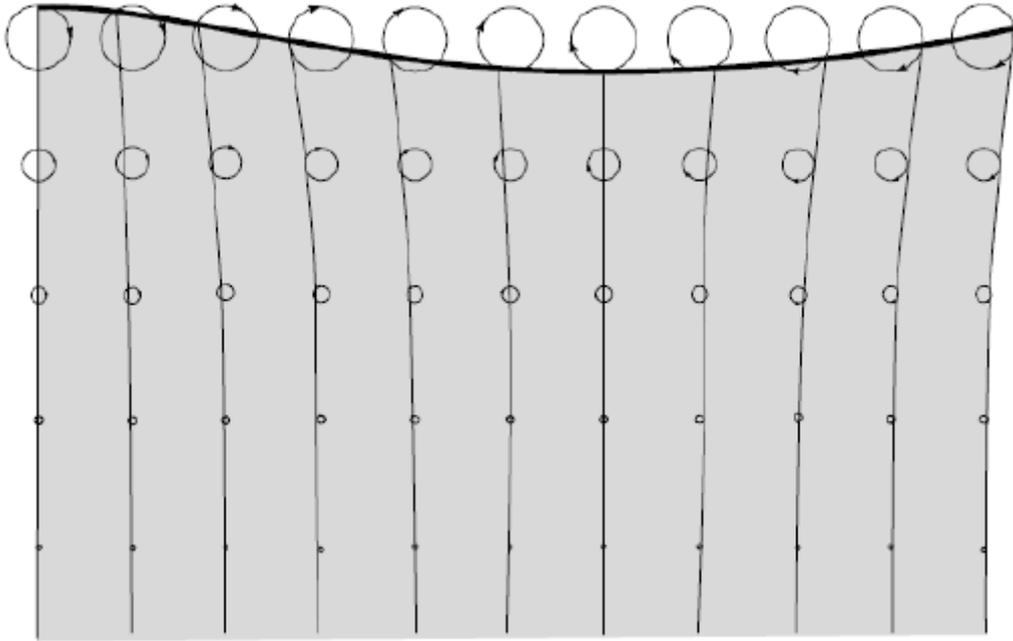
On peut alors définir un flux d'énergie de la forme :

$$F = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g$$

Avec  $C_g$  la vitesse de propagation du groupe de vague formant la houle.



Figure 4 Photo d'une bouée du réseau CANDHIS (source : CANDHIS)



**Figure 5 Trajectoires de particules au passage d'une houle au large**

Au cours de leur propagation, les vagues peuvent ressentir l'influence des fonds. On estime que les ondes commencent à subir cette influence lorsque la profondeur devient inférieure à une demi longueur d'onde (distance entre deux ondes). La transformation due au fond se traduit principalement par des variations de hauteur de vague et de la direction de la propagation.

À ces faibles profondeurs, on peut utiliser le modèle d'Airy pour déterminer les nouvelles caractéristiques de la houle. Ce modèle permet de linéariser le problème en faisant un développement à l'ordre 1 des conditions limites (rappel : les trajectoires des particules à ces profondeurs sont elliptiques).

Hypothèses du modèle d'Airy :

- Fluide considéré parfait
- Fluide considéré irrationnel (moment cinétique nul en tout point)
- Fluide considéré incompressible
- On néglige la tension superficielle
- Amplitude inférieure à la longueur d'onde
- Amplitude inférieure à la profondeur

Faire ces hypothèses permet le calcul de nombreux paramètres comme la vitesse horizontale et verticale des particules ou encore le flux d'énergie (voir formulaire en annexe). La connaissance de ces paramètres est essentielle pour dimensionner convenablement les aménagements côtiers.

### **1.2.2 Le déferlement des vagues sur la côte :**

Lorsqu'elle arrive sur la côte, la houle possède une énergie pouvant être très importante. Une partie de cette énergie se dissipe en partie avec les efforts tangentiels avec le fond. Le principal mécanisme de dissipation de l'énergie des vagues est le déferlement.

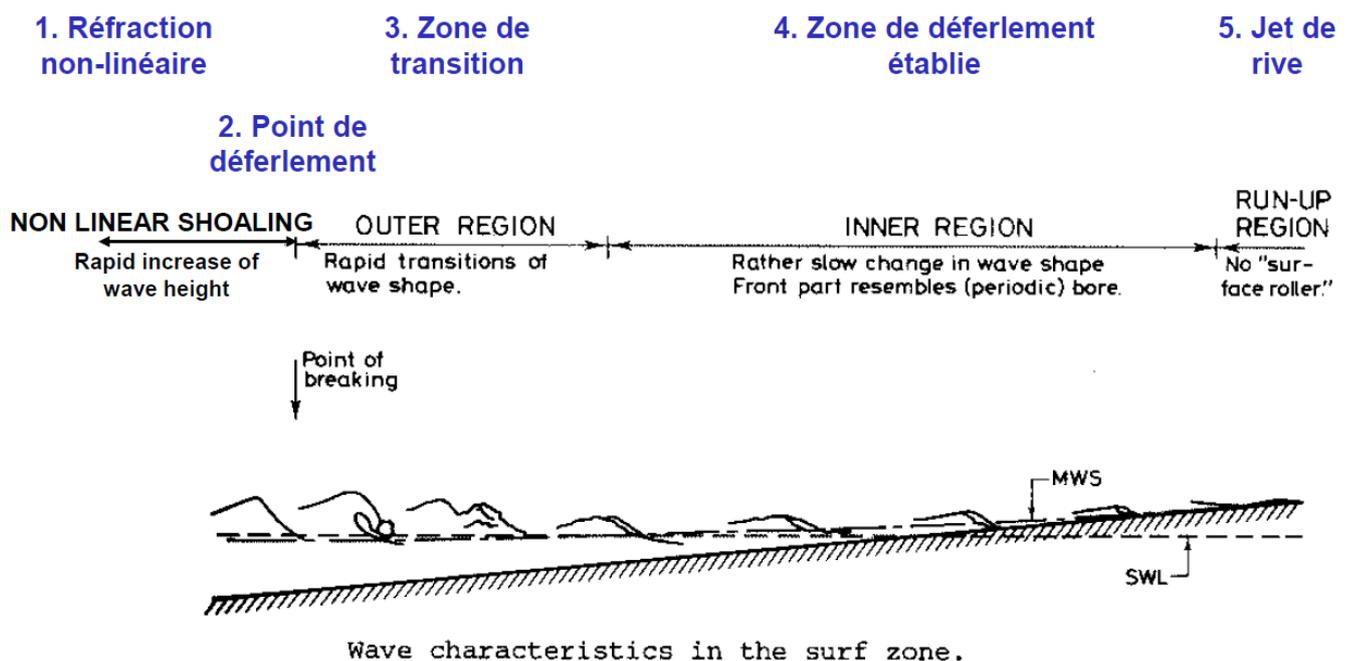
C'est l'interaction entre le fond et l'onde qui provoque le déferlement des vagues. La vague passe par cinq étapes avant que la dissipation de l'énergie soit totale. La première étape est une augmentation de la hauteur de la vague par réfraction non-linéaire sur le fond. Vient ensuite un point de déferlement, point pour lequel la hauteur de la vague devient si grande qu'elle commence à s'effondrer sur elle-même. La vague arrive ensuite en zone de transition au cours de laquelle elle continue de s'effondrer mais progresse à une vitesse assez élevée. La vague ralentit ensuite dans la zone de déferlement qui

correspond à la zone où l'énergie de la vague se dissipe le plus. Enfin la vague va réaliser un run-up ou jet de rive, avec le surplus d'énergie qu'il lui reste.

Pour décrire ces étapes il est important de définir la notion de cambrure de la vague. La cambrure correspond au rapport entre la hauteur de la vague et la longueur d'onde soit la distance entre deux vagues successives. Ce paramètre est important puisqu'il va permettre de suivre la stabilité de la vague durant sa progression vers la plage. Yamada et ses collaborateurs ont tiré une expression du critère de déferlement pour les houles régulières de la forme :

$$H = K1h$$

Avec H la hauteur de la houle, h la profondeur et K1=0.8261.



réf. ICCE (1970)

**Figure 6 Schéma présentant les 5 zones/étapes du déferlement d'une onde solitaire sur une plage (Source : Coastal engineering volume 1 1978)**

Revenons sur les étapes du déferlement. Ces étapes sont décrites par le comportement de la vague mais les phénomènes physiques qui entraînent ces variations sont très complexes et la recherche est encore très active dans ce domaine.

La première étape consiste donc à une augmentation de la hauteur de la vague. Le phénomène à l'origine de cette surélévation est la réfraction non-linéaire. Nous avons vu que la propagation d'une houle est due à un mouvement des particules d'eau sur la hauteur de la houle. A l'arrivée sur la côte, les particules en mouvement en profondeur vont entrer en contact avec le fond ; à la manière d'ondes lumineuses, une partie de l'onde va poursuivre sa progression sur le fond et une partie incidente va être réfléchi par le fond dans toutes les directions. C'est cette partie réfléchi vers le haut qui provoque la surélévation de la vague. L'accroissement de la vague n'est donc pas linéaire puisque l'influence de la pente sur le phénomène est importante, malgré tout il a été montré empiriquement que le phénomène est d'autant plus important que la cambrure de la vague est faible.

Lorsque le critère de déferlement est atteint pour une vague elle est au point de déferlement. La vague a atteint sa hauteur maximale et commence à s'effondrer sur elle-même. Dans la zone de transition, le développement du rouleau de déferlement à lieu. Ce rouleau est en fait une masse d'eau « prélevée »

par la vague. Pendant cette phase de transition, la hauteur de la vague diminue mais sa vitesse augmente : il y a transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique.

L'influence de la vague sur la zone alentour va crescendo avec l'augmentation de sa vitesse. C'est pourquoi en zone de déferlement établie on observe une surélévation du niveau de la mer : c'est le set-up. En outre, la vague entre en contact avec le courant littoral, parallèle au rivage et des transferts d'énergie ont donc lieu. Enfin, un courant de retour proche du fond et perpendiculaire est présent (issue du déferlement de la vague précédente) pouvant ralentir la vague incidente. Il y a donc dans cette zone beaucoup d'interactions qui sont vraiment complexes à étudier et qui sont propres à chaque site.

Ces phénomènes sont d'autant plus compliqués à étudier qu'il existe différents types de déferlements selon le fond et la cambrure des vagues. Le déferlement peut être glissant : lorsque la pente du rivage est faible, la crête de la vague va plus vite que la vague elle-même et on observe de l'écume et des turbulences à ce niveau. La vague vient ensuite glisser sur la plage et la dissipation de l'énergie est relativement lente. Lorsque la pente est élevée, les vagues sont réfléchies et produisent un courant retournant vers le large, qui fait gonfler la vague suivante : c'est le déferlement gonflant. Pour les pentes intermédiaires, le déferlement est plongeant ; c'est dans ces conditions que l'on observe les rouleaux si prisés par les surfeurs. La partie supérieure se projette en avant et la dissipation de l'énergie est très rapide.

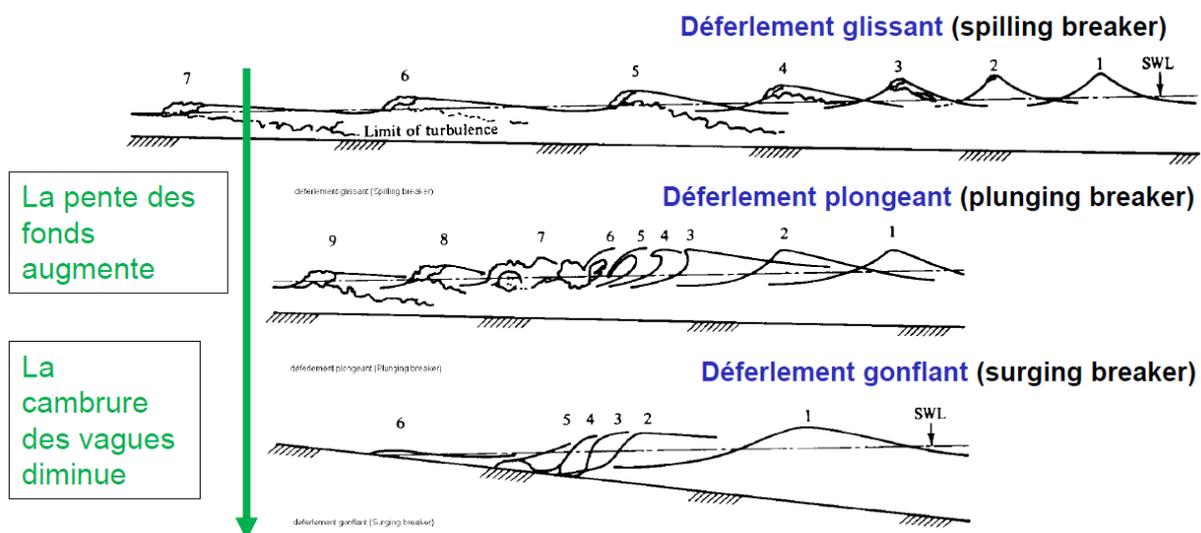


Figure 7 Schéma de présentation des types de déferlements des vagues (Source : Sophie Ancel, Propagation de la houle, 2018)

C'est la dissipation de l'énergie des vagues qui provoque la mise en suspension des sédiments côtier et qui contribue fortement au phénomène d'érosion en créant des courants côtiers.

### 1.2.3 Le courant littoral induit par la houle transporte des sédiments :

La houle ne déferle pas toujours de manière perpendiculaire au rivage. Ainsi, un courant parallèle au rivage se forme dans le sens de la houle. Le courant formé est localisé entre la zone de déferlement établie et la côte.

Différentes formules peuvent être utilisées pour estimer la vitesse du courant littoral issu des houles. La plus utilisée est celle de Longuet-Higgins (modifiée par le CERC : Coastal Engineering Research Center) :

$$V = 20.7 * m * (g * H)^{0.5} * \sin(2 * \alpha_d)$$

Avec m la pente moyenne des fonds, H la hauteur significative de la houle et  $\alpha_d$  l'angle d'incidence de la houle au déferlement.

Ce courant littoral va donc transporter les matériaux remis en suspension lors du déferlement des vagues. Les sédiments de bas de plage se déplacent également sous l'action directe des vagues. Lors du

run-up, la vague entraîne les sédiments dans le sens de la houle, mais lorsque l'eau se retire c'est la ligne de plus grande pente qui est suivie et les sédiments se trouvent donc déplacés (voir flèches rouges de la figure 7) : c'est le jet de rive. C'est deux phénomènes sont à l'origine d'un transit littoral des sédiments.

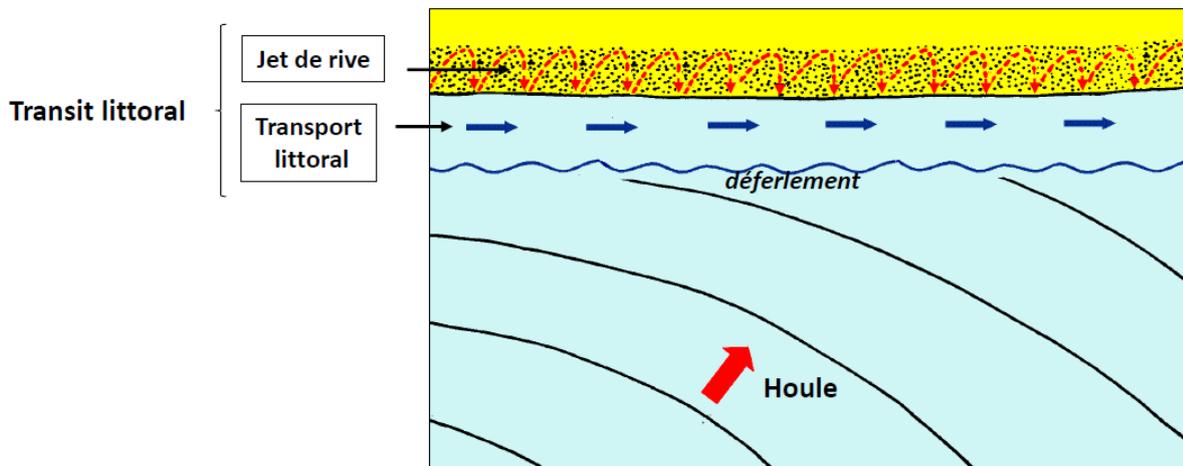


Figure 8 Schéma présentant les phénomènes à l'origine du transit littoral des sédiments (Source : Artélia, 2018)

Ce transit est une forme de transport sédimentaire au niveau des plages, il peut être intéressant à estimer pour l'étude d'un site maritime. Deux questions sont à se poser concernant ce transit : quel volume de sédiment est transporté et comment vont-ils se répartir plus loin sur la côte. Des mesures in-situ peuvent être réalisées (traceurs sur les sédiments, mesures de vitesses, mesure des volumes déposés au droit d'obstacles), cependant ces méthodes ne sont pas forcément pertinentes d'un point de vue quantitatif. Malgré tout, les indications qualitatives qu'elles fournissent sont intéressantes pour avoir un ordre de grandeur du transit et des informations comme le sens du courant.

Une nouvelle fois, de nombreuses formules peuvent permettre d'estimer la quantité de sédiments transportés par la houle le long de la côte. Le CERC recommande d'utiliser la formule suivante :

$$Q = \frac{K_1}{42} * (H_s^2 * C_g) * \sin(2 * \alpha_{bs}) * t$$

Avec  $C_g$  la vitesse de groupe de la houle,  $H_s$  la hauteur significative de la houle (en mètres),  $\alpha$  l'angle entre la crête des houles déferlantes et le trait de côte,  $t$  le temps d'action de la houle (en secondes) et  $K_1$  un coefficient empirique.

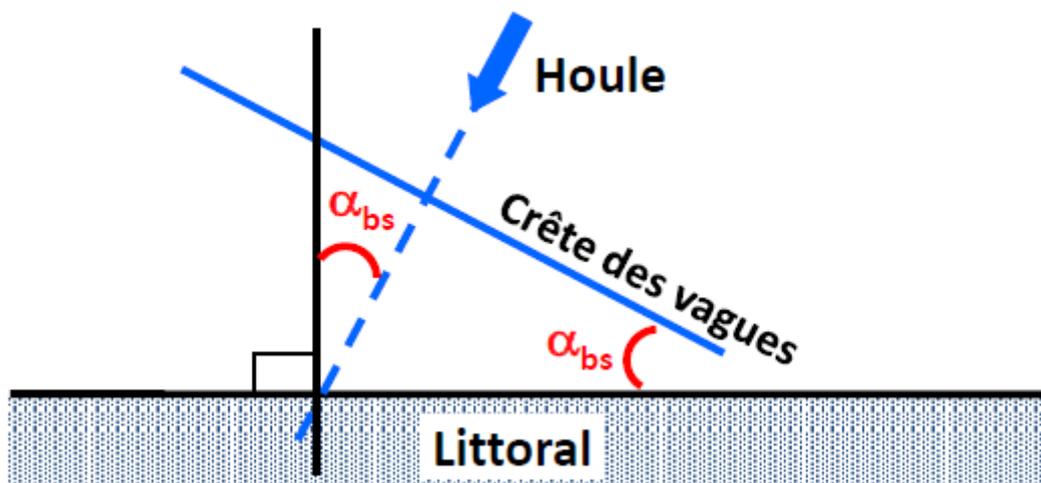


Figure 9 Schéma des paramètres pour le calcul du transit littoral (Source : Artélia 2018)

K1 est un paramètre qui dépend des sédiments et de la morphologie du site d'étude. Il peut varier entre 0.1 et 1 mais en l'absence de donnée il est recommandé par le CERC de prendre une valeur comprise entre 0.3 et 0.4. Ce coefficient peut être déterminé par corrélation entre des mesures de hauteurs et des conditions de houles. Certains logiciels peuvent réaliser ce travail et à partir des données de houles et de bathymétrie, estimer l'évolution du transit dans le temps et élaborer des profils de répartition des sédiments (voir figure 9).

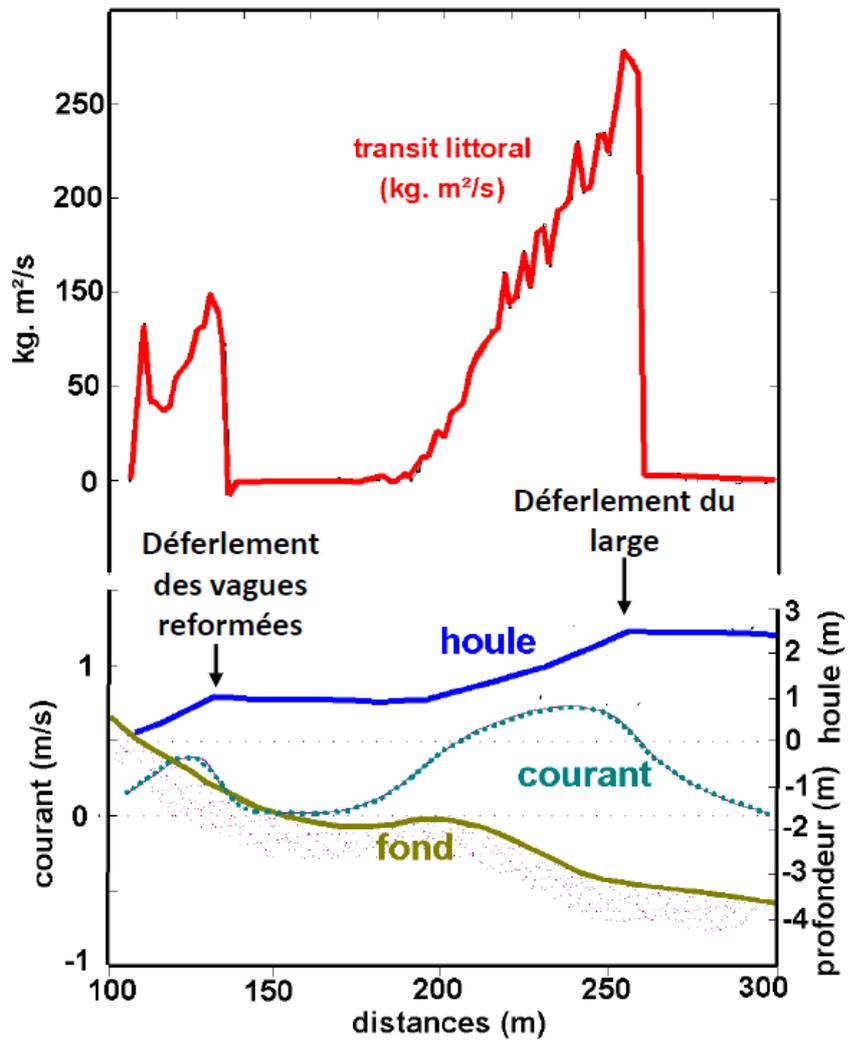


Figure 10 Exemple de profil littoral obtenu après calcul par un logiciel du transit littoral

#### 1.2.4 Les mouvements sédimentaires dans le profil de la plage :

En plus du transit littoral, parallèle à la côte, les sédiments se déplacent également dans le profil de la plage c'est-à-dire de la plage vers le large ou inversement, du large vers la plage. Durant la période hivernale, les coups de mers sont relativement fréquents. Ces phénomènes très énergétiques érodent les plages et entraînent les sédiments vers le large. Ces matériaux vont alors s'accumuler sous la forme d'une barre immergée associée à une fosse.

En été, les houles sont moins énergétiques. Elles sont cependant assez fortes pour remonter par charriage les sédiments de la barre formée en hiver. On observe alors l'apparition d'une berme, amas de matériaux formant un talus. Les plages sont donc soumises à des variations saisonnières des stocks sédimentaires.

Cette forme d'érosion n'a pas une grande influence sur le stock total de sédiments mais des sédiments sont « perdus » lorsqu'ils sont emmenés trop au large. Nous avons vu que la houle subit l'influence du fond assez proches du littoral, ainsi si les sédiments sont amenés au-delà de la zone d'influence de la houle, ils ne pourront pas être remonté par les houles d'été. On dit alors que ces sédiments ont passé la profondeur de fermeture.

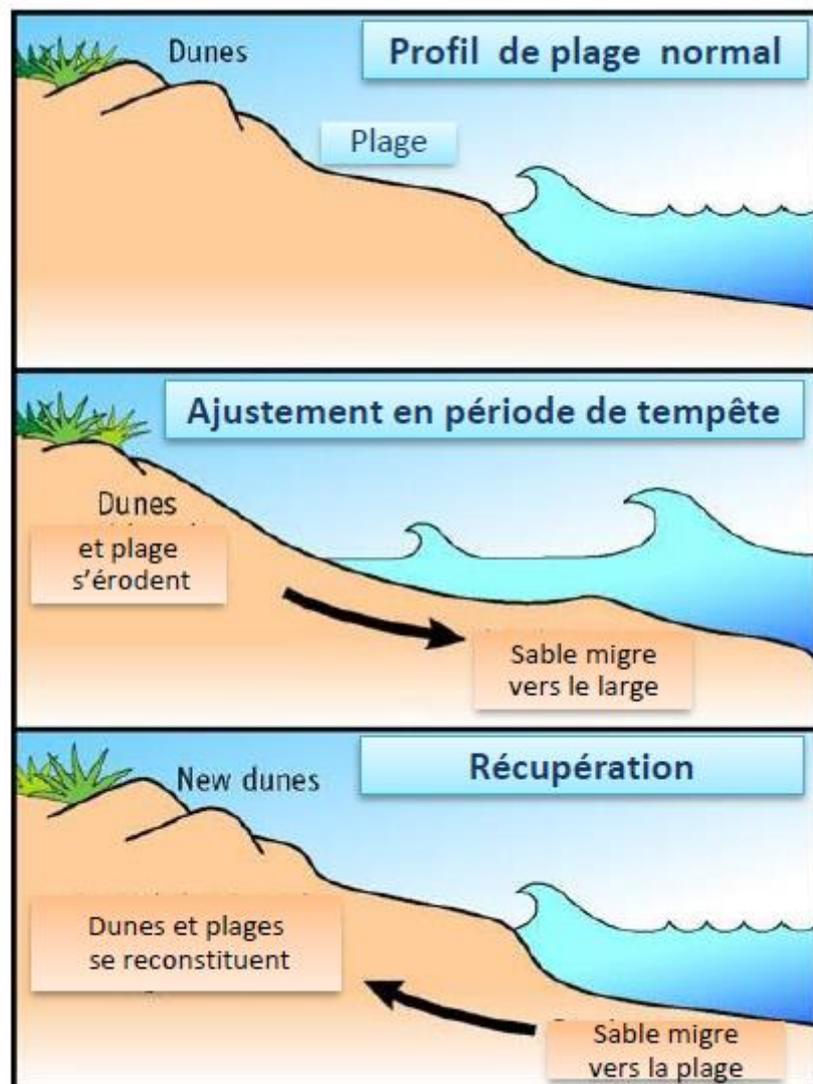


Figure 11 Schéma décrivant l'évolution sédimentaire saisonnière d'une plage

### 1.3 Les courants généraux, les courants de marée et le vent provoquent également un transport de sédiments :

La houle est le facteur principal des mouvements sédimentaires en zone côtière méditerranéenne. Cependant, d'autres phénomènes peuvent entraîner un transport sédimentaire à commencer par les courants généraux.

#### 1.3.1 Les courants généraux méditerranéens :

Les courants généraux sont les courants permanents ou saisonniers. Généralement faible, ils sont intéressants dans le cadre de la navigation notamment sur de longs parcours puisqu'ils modifient le temps de parcours ou la consommation d'essence. Ces courants naissent des effets combinés des vents, de la force de Coriolis et des paramètres de l'eau comme sa température ou sa salinité.

Ces courants forment à l'échelle planétaire des grands cycles principalement régulés par la température et la salinité de l'eau. Ils ont une influence majeure sur les différents climats observables sur la surface terrestre.

En Méditerranée, les courants principaux longent la côte dans le sens trigonométrique. En simplifiant grandement, l'eau de l'Atlantique peu salée entre par le détroit de Gibraltar en surface. Entraînée par les courants, elle se charge en sel et sa densité augmente. Avec la géométrie complexe de la Méditerranée, divisée en deux bassins (occidental et oriental), on estime que le temps de renouvellement moyen varie entre 50 et 100 ans. C'est le temps qu'il faut pour que l'eau présente dans le bassin à un temps  $t$  soit totalement remplacée par de l'eau provenant de l'Atlantique.

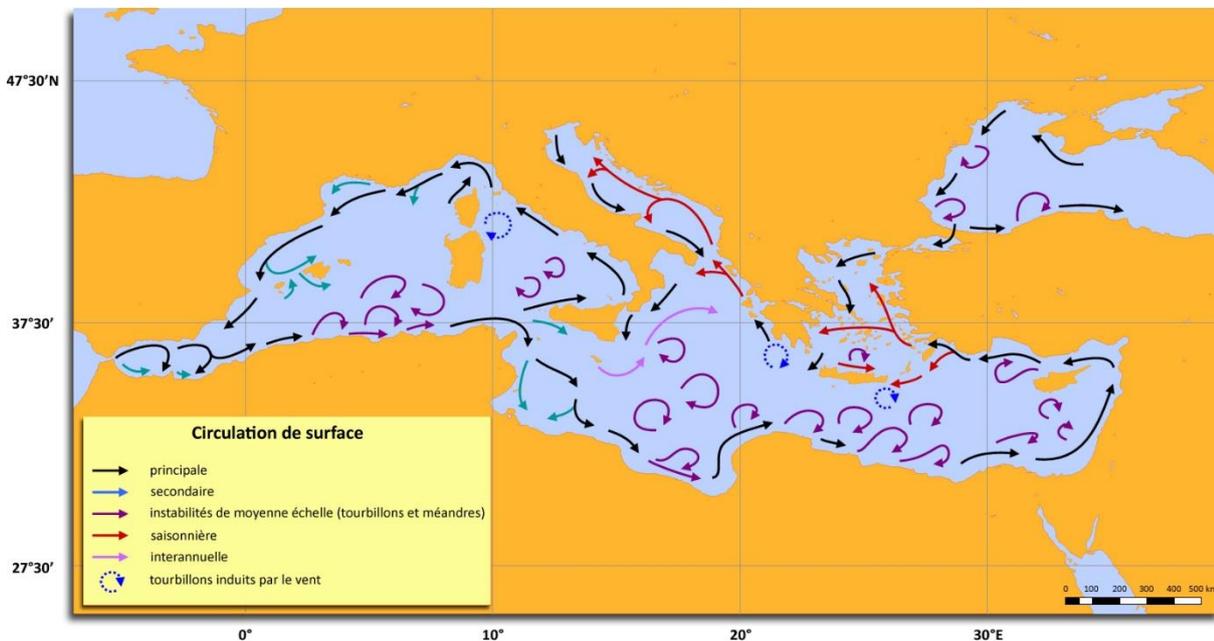


Figure 12 Carte des courants marins généraux en Méditerranée (Source : UVED)

Ces courants entraînent le déplacement d'importantes masses d'eau mais ont des vitesses très faibles. Ainsi, après les diverses interactions avec les côtes ou le fond, l'influence de ces courants peut être considéré comme négligeable en ce qui concerne le transport de sédiments.

### 1.3.2 Les courants de marée :

La marée est un phénomène naturel causé par la variation des interactions gravitationnelles entre la Terre, la Lune et le Soleil. Les mouvements des trois astres étant cycliques, les variations sur la force génératrice de la marée le sont également. Ainsi, la connaissance des positions et des mouvements des trois astres permet de calculer les courants de marées et même de les prédire après élimination des effets météorologiques.

Les courants de marée peuvent présenter des vitesses très élevées comme au niveau du Raz Blanchard où sa vitesse est parfois supérieure à 10 nœuds (Soit 18.5 km/h). Ces courants ainsi formés peuvent donc être à l'origine de transports sédimentaires, en particulier de transports dans le profil de la plage.

Dans le cas de Villeneuve-Loubet, les marées sont très faibles et peu énergétiques ainsi, les courants induits sont également négligeables en ce qui concerne le transport des sédiments.

### 1.3.3 Le transport éolien :

Le vent est également un transporteur de sédiments. Comme dans le cas aqueux, le vent peut transporter les sédiments par suspension dans l'air. Les sédiments ainsi transportés peuvent parfois parcourir des milliers de kilomètres avant de retomber au sol. Les grains de sable retombent généralement sous l'impulsion de la pluie, c'est pourquoi il n'est pas rare d'avoir des pluies sableuses dans le Sud de la France ; le sable étant transporté du Sahara vers nos côtes.

La saltation est la forme la plus régulière de transport éolien. De la même façon que dans l'eau, les grains sont mis en mouvement au ras du sol et les chocs les font rebondir les uns sur les autres. La vitesse minimale de mise en mouvement des grains provoquant leur saltation est appelée vitesse critique.

Enfin, le vent peut pousser les grains sans les faire décoller du sol ; c'est notamment le cas pour les particules sédimentaires plus grosses comme les petits galets ou le sable grossier. Les particules roulent sur le sol et s'entrechoquent. Les chocs conduisent les grains à se briser ou s'éroder faisant réduire leur taille les soumettant davantage à la saltation ou au transport en suspension.

Le transport éolien peut déplacer des volumes importants de sédiments et même être à l'origine de formations dunaires. Les obstacles comme la végétation ou certains aménagements comme des ganivelles peuvent stopper le transport des sédiments. Ils vont alors s'accumuler et former une dune perpendiculaire aux vents dominants. C'est pourquoi des stratégies de re-végétalisations et d'aménagements des dunes sont déployées sur les côtes françaises. En effet, les dunes jouent le rôle de rempart naturel contre les submersions et de stock sédimentaire pouvant recharger les plages.



Figure 13 Photo de la dune du Pilat et de sa végétation (Source : Pixabay)

## 1.4 Un déséquilibre dans les transports sédimentaires peut provoquer un recul du trait de côte :

Nous avons vu que les sédiments sont plus ou moins mobiles suivant leur taille et les phénomènes auxquels ils sont soumis. Ainsi une plage va perdre et gagner des sédiments sous l'action de la houle, des courants ou du vent.

### 1.4.1 Les apports sédimentaires des fleuves sont primordiaux pour recharger naturellement les plages

Lors de son parcours à travers le territoire terrestre, un cours d'eau charrie une quantité importante de sédiments. Ces sédiments sont petits à petits amenés jusqu'à l'embouchure des fleuves et sont « libérés » dans la mer. Ces sédiments sont alors répartis sur les côtes au gré des phénomènes vus précédemment.

Ces sédiments peuvent cependant se trouver bloquer dans l'embouchure. En effet, si la zone estuarienne est calme, les sédiments peuvent s'y déposer et s'y accumuler formant un bouchon vaseux. En plus de ces sédiments, les potentiels polluants (notamment les pesticides) peuvent s'y accumuler rendant la zone impropre à la vie de nombreuses espèces favorisant l'apparition d'espèces eutrophisantes. Comme son nom l'indique, un bouchon vaseux ferme l'embouchure d'un fleuve et empêche les sédiments d'atteindre la mer pour se répartir sur les côtes. Cet apport peut donc manquer aux plages et créer un déséquilibre sédimentaire. On observe notamment la formation de bouchon vaseux dans les zones littorales où la marée pénètre abondamment dans les terres, réduisant la vitesse de l'eau dans le fleuve. Une forte crue peut cependant faire sauter le bouchon et pousser les sédiments hors de l'embouchure les relâchant dans la mer.

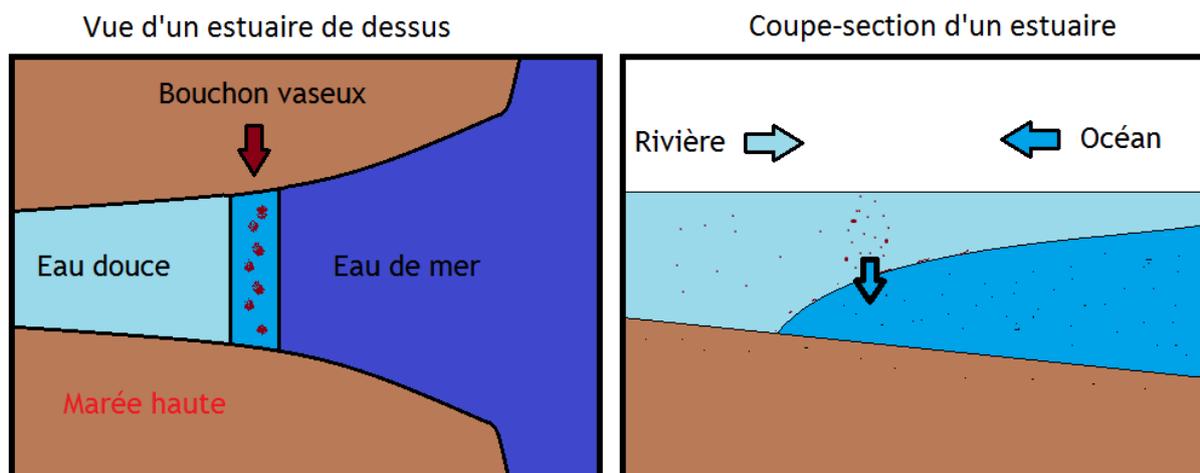


Figure 14 Schéma de la formation d'un bouchon vaseux à l'embouchure d'un fleuve

### 1.4.2 Des obstacles peuvent limiter le transport de sédiments :

Les littoraux sont des zones à forts enjeux pour les activités humaines, c'est pourquoi on retrouve de nombreux aménagements jalonnant le littoral. Ils ont été réalisés entre les années 1960 et les années 1990 dans le cadre de différents plans d'actions nationaux, régionaux, départementaux ou communaux afin de développer le territoire et notamment le tourisme dans les zones côtières. Nous pouvons parler par exemple de la mission Racine ou mission interministérielle d'aménagement touristique du littoral du Languedoc-Roussillon qui a conduit des travaux sur le littoral méditerranéen. C'est notamment lors de cette mission que la station balnéaire la Grande Motte ou de Port-Camargue ont vu le jour.

Mais ces aménagements peuvent être des obstacles au transport des sédiments qui se retrouvent bloqué d'un côté ou de l'autre de celui-ci. Les épis sont un exemple parfait d'obstacle au transport sédimentaire. En effet, les sédiments vont s'accumuler d'un côté de l'épi. L'autre côté lui ne va plus recevoir d'apport alors qu'il subit également des phénomènes réduisant son stock sédimentaire. Ce déséquilibre est également visible de part et d'autre d'un port, d'une digue ou d'un tombolo de brise-



**Figure 15** Photo aérienne de la côte entre Cannes et Mandelieu montrant l'influence des épis sur la largeur de plage (Source : Google Map)

lame.

Nous avons vu que l'érosion était la conséquence d'un déséquilibre sédimentaire. Les différents phénomènes que nous avons vus sont à l'origine du transport des sédiments et de manière naturelle ou artificielle, des déséquilibres peuvent apparaître localement. Quand les apports sont plus importants que les départs, la zone s'engraisse et cela peut conduire à une avancée du trait de côte dans la mer. Si le déséquilibre est dans l'autre sens, le stock sédimentaire diminue et cela conduit à un retrait progressif du trait de côte pouvant augmenter le risque de submersion marine.

## 2. Etude du site et définition des objectifs de protection

### 2.1 L'enjeu principal pour le département est de limiter la submersion de la route :

#### 2.1.1 Paramètres du site :

La plage située entre Villeneuve-Loubet et Antibes subit assez fortement l'érosion littorale. En période hivernale, au moment où le stock sédimentaire est à un niveau bas, il est fréquent que la route départementale 6098 soit submergée et devienne impraticable. Or, cette route est essentielle puisque le trafic routier y est important. C'est pourquoi une fermeture de la route plusieurs jours par an est problématique (Voir inventaire des périodes de fermeture en annexe). De plus, une voie de chemin de fer est située juste derrière cette route et il devient urgent de réagir pour que la situation n'empire pas.

Sur toute la largeur de la plage, il a été observé que la submersion est concentré côté Villeneuve-Loubet à la plage des Maurettes et côté Antibes directement après le fort Carré (voir figure 17).

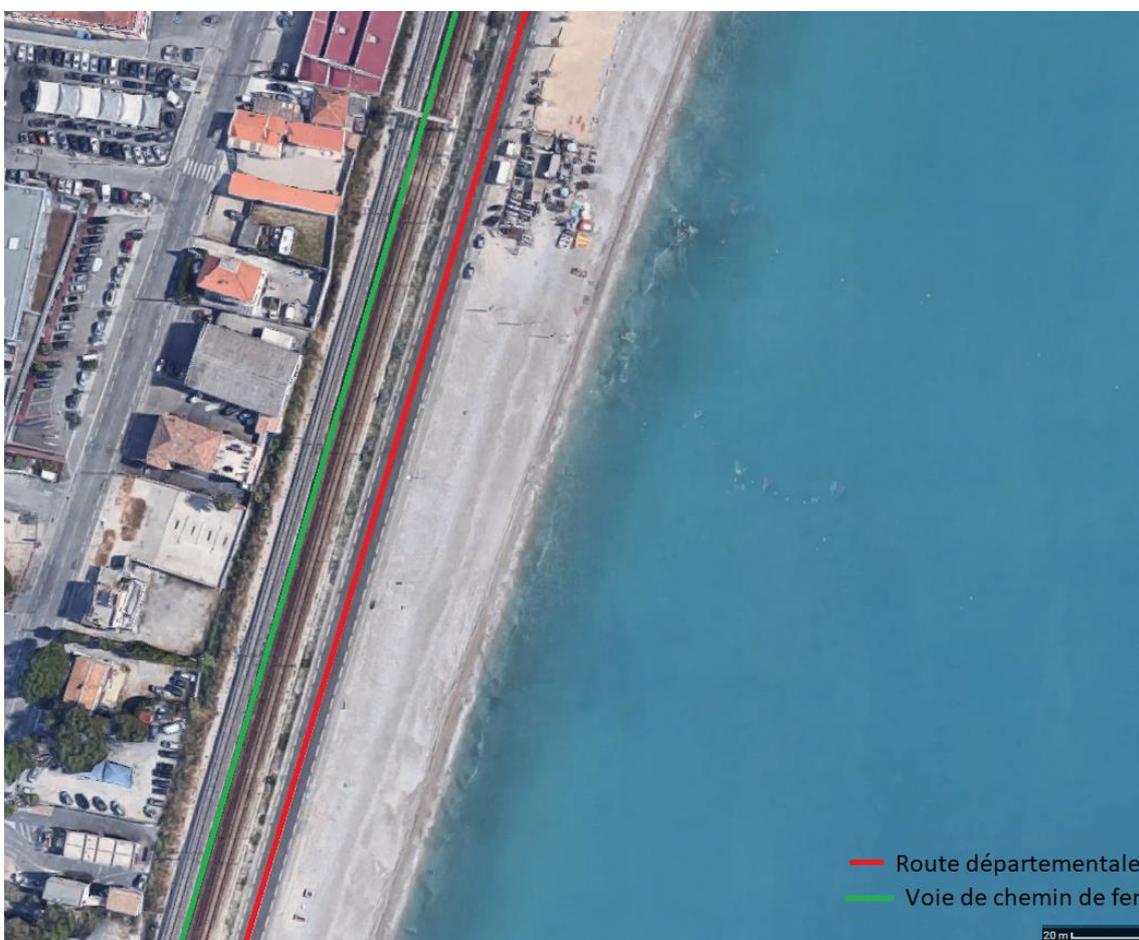
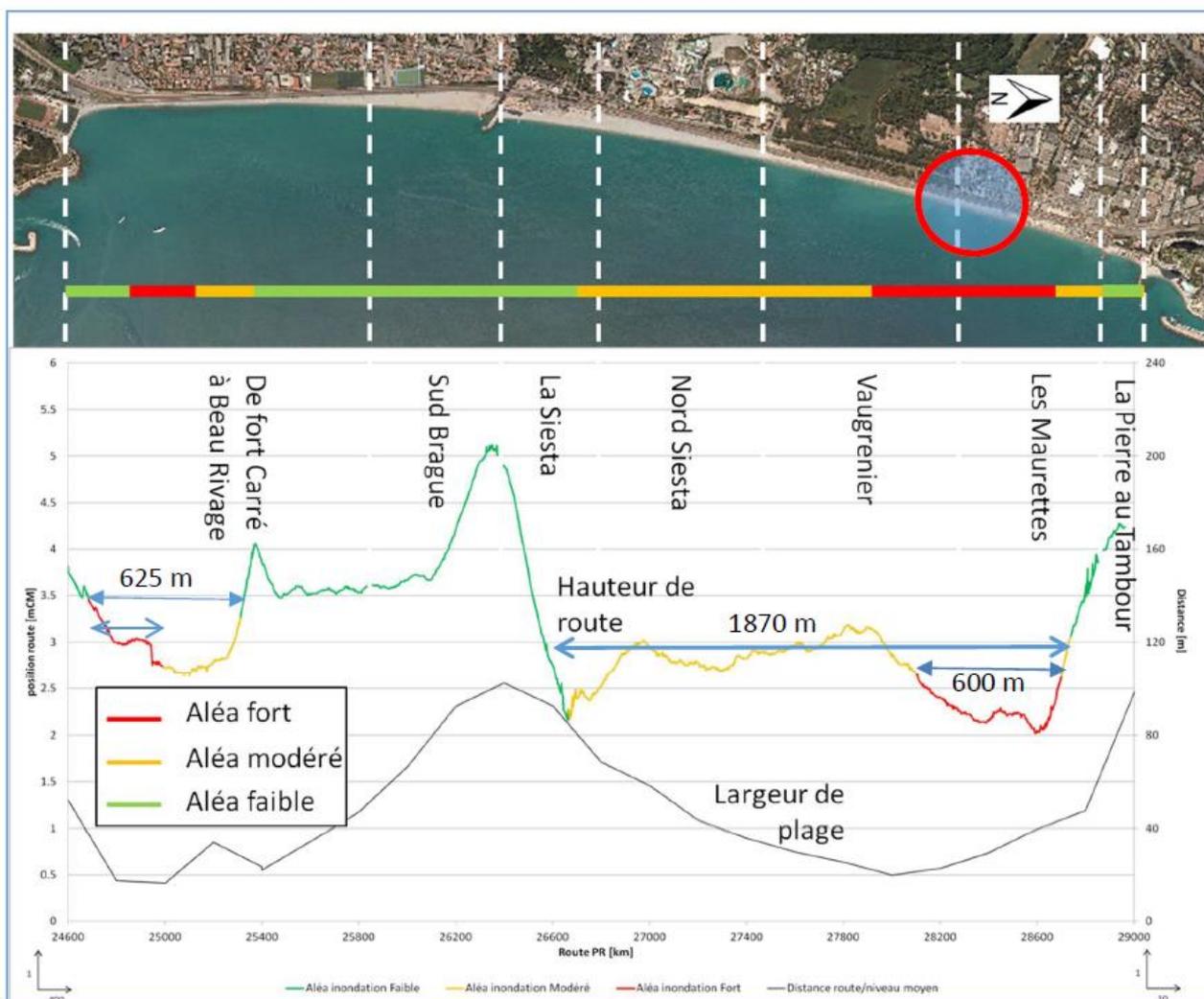


Figure 16 Photographie aérienne du site soumis à la submersion dans la baie entre Villeneuve-Loubet et Cannes (Source : Google Map)

Le vent est un paramètre important lorsqu'on cherche à étudier un site littoral. Une station d'échantillonnage est présente au large de Villeneuve-Loubet et indique que les vents les plus forts proviennent du Nord-Est ou du Sud-Ouest. Les vents venant de l'Est génèrent régulièrement une mer de vent ; c'est-à-dire un système de vague qui se propage à faible distance du vent qui l'a créé. Les vents du Sud-Ouest quant à eux, ne semblent pas avoir une influence majeure sur le phénomène de submersion auquel est soumise la route départementale.



**Figure 17 Schéma de la répartition des évènements de submersion marine**

A partir des données de houles récoltées par les bouées CANDHIS de Monaco et Globocéan d'Antibes, on peut déduire que les houles d'Est sont les plus fréquentes sur la plage des Maurettes. Des houles de Sud sont également présentes mais leur influence semble plus réduite. D'après les mesures réalisées lors des événements de submersion, le run-up de la houle peut atteindre la route avant même les conditions décennales de hauteur et de période de houle. Pour les houles d'Est, la hauteur significative décennale est de 3.9 mètres pour une période de 8 à 10 secondes. La houle de Sud décennales est légèrement plus haute à 4.3 mètres pour une période de 10 à 12 secondes. Plus d'informations sur ces houles sont disponibles en annexe.

### 2.1.2 Estimation du run-up et influence du niveau moyen de la mer :

La cause de la submersion de la route est le run-up des vagues qui entraîne le sable et les galets jusqu'à celle-ci. Il est donc primordial d'estimer ce run-up en fonction des houles pour se fixer des objectifs d'amortissement permettant de limiter la submersion.

Différents théoriciens ont élaboré des formules permettant d'estimer le run-up. R. Miche en 1951 a établi une expression théorique donnant le run-up sur un talus de pente régulière :

$$\frac{R_u}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}}$$

Avec  $R_u$  le Run-up,  $H_0$  la hauteur de houle et  $\beta$  la pente de la plage

En 1959, I.A. Hunt a proposé une relation empirique permettant de trouver le run-up en fonction du nombre d'Iribaren-Battjes noté  $\xi_0$  :

$$\frac{R_u}{H_0} = \xi_0$$

Ce paramètre  $\xi_0$  est lui-même fonction de la pente de la plage et de la cambrure de la vague. Ainsi,

$$\frac{R_u}{H_0} = \xi_0 = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

A partir de la formule de Hunt nous avons pu déduire les houles qui peuvent provoquer la submersion de la route. L'objectif étant de limiter la submersion à une fois par an pour des houles de période de retour 10 ans, celles-ci sont repérées sur le graphique en figure 19.

Les trois points rouges du graphique représentent la fourchette de houles décennales venant de l'Est, les points jaunes sont les houles de Sud-Est décennales pour la zone que nous étudions. On peut observer que ces points sont au-dessus de la ligne de référence qui correspond à la hauteur de la route départementale. Ainsi, sans aménagements, la quasi-totalité des houles décennales de Sud-Est vont entraîner une submersion de la route.

C'est pourquoi sur la base des données sur la fermeture de la route entre 1993 et 2008, on détermine une moyenne de 14 jours de fermeture par an. De plus, il est important de considérer la surcote qui peut être forte en période de tempête. Au niveau de Villeneuve-Loubet la surcote annuelle est de l'ordre de 0.52 mètre et de 0.66 mètre en condition décennale. Ce phénomène de surcote est lié à la dépression liée à tempête et qui conduit à une élévation locale du niveau moyen de la mer.

Il ne faut également pas sous-estimer l'influence du changement climatique. La fonte des glaces entraîne une surélévation des océans atteignant environ 5 mm par an depuis une quinzaine d'années (Météo France). Selon les scénarios élaborés par le GIEC en 2013, l'élévation des océans sera comprise entre 26 et 82 cm. C'est autant de cm qu'il faudra retirer au run-up minimal conduisant à la submersion de la route.

De plus, bien que le site d'étude soit en Méditerranée, il ne faut pas négliger la marée. La marée entraîne des variations de plusieurs dizaines de centimètres du niveau moyen de la mer. Cette marée est certes petite comparée à celles en Manche par exemple. Malgré tout, elle n'est pas du tout négligeable en regard de la faible hauteur et largeur des plages de la baie.

Ces phénomènes sont donc importants lorsqu'on considère la submersion de la route. La surcote à elle seule peut représenter une « perte » de 25% de la hauteur de la plage. C'est comme si la plage n'était qu'à deux mètres et non à deux mètres cinquante.

Run-up en fonction de la hauteur et de la période de la houle

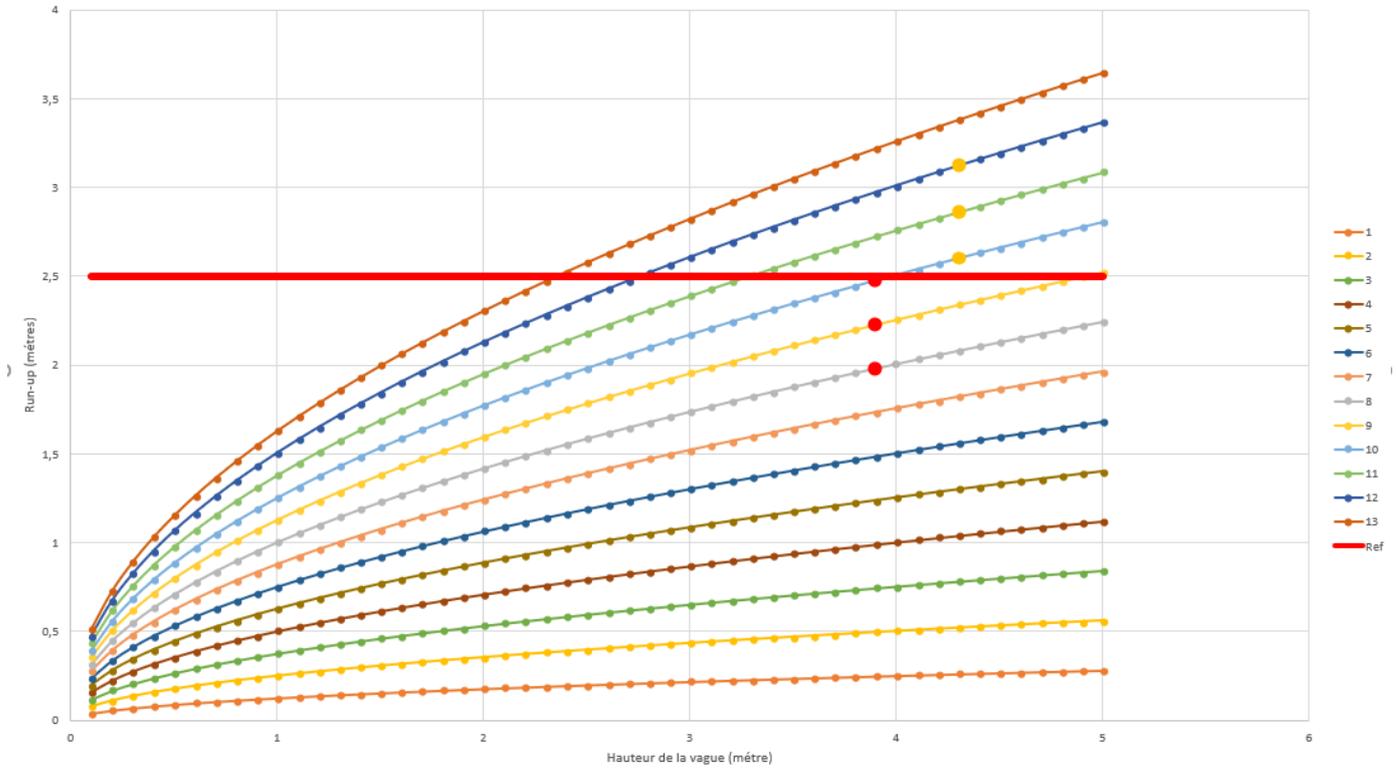


Figure 19 Graphique représentant le run-up des houles en fonction de la période

### 2.1.3 La stabilisation du trait de côte peut empêcher la situation de se dégrader davantage :

Les observations du trait de côte sur ce littoral nous indiquent que depuis 1924, la largeur de la plage s'est considérablement réduite. Nous avons vu plus haut que l'érosion est une conséquence d'un déséquilibre entre apport et départ des sédiments il est donc intéressant de se pencher sur le transport des sédiments au niveau de la baie.

| Profils | Distance de la route à la laisse de mer : dr [m] – Secteur Nord |           |           |           |           |           |           |           |           | dri-dri-1 [cm/an] |           |           |
|---------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|
|         | 1924-1950   | 1950-1965 | 1965-1974 | 1974-1983 | 1983-1990 | 1990-1999 | 1999-2004 | 2004-2009 | 2009-2012 | 1924-2012         | 1924-1983 | 1983-2012 |
| Plm 9   | -28   | -27       | -6        | -7        | -9        | -20       | -62       | -70       | 0         | -20               | -21       | -17       |
| Plm 10  | -30   | -8        | -70       | -24       | -48       | -86       | 17        | -73       | 0         | -35               | -30       | -45       |
| Plm 11  | -23   | 4         | -197      | -33       | -24       | -113      | 43        | -161      | 0         | -40               | -44       | -32       |

Tableau 2-6 : Estimation du recul ou de l'avancée de la laisse de mer pour les profils 9, 10, 11



Figure 2-6 : Evolution du trait de côte entre 1924 et 2012 -secteur Vaugrenier-Maurette

#### Figure 20 Données numériques sur l'évolution du trait de côte au niveau de la plage des Maurettes

La plage des Maurettes au Nord de la baie étant la zone la plus soumise aux submersions, c'est sur cette zone que l'étude se centre par la suite.

La Brague est un fleuve se jetant dans la mer au niveau de la Siesta (voir figure 21) soit à peu près au milieu de la baie. Les sédiments amenés par le cours d'eau auraient pu venir recharger la plage des Maurettes mais les houles dans la baie étant principalement d'Est, les courants entraînent les sédiments vers le Sud et le fort carré (voir annexe). Seules les houles de Sud peuvent être amenées à créer un courant contraire ramenant des sédiments vers les Maurettes, mais les quantités ne sont pas très importantes.

Un autre cours d'eau aurait pu recharger la plage : le Var. Malheureusement, les sédiments, principalement constitués de galets n'atteignent pas la plage. En effet, malgré la bonne orientation des courants, l'infrastructure portuaire de la marina Baies des Anges bloquent quasi intégralement leur transport. Le constat est le même pour le Loup, un fleuve de plus petite taille juste au Nord de la marina.

Les apports de ces deux cours d'eau auraient pu être très intéressants mais la plage ne peut pas compter dessus pour recharger son stock sédimentaire. En plus de cela, elle n'est pas à l'abri du transit littoral qui emporte des sédiments le long de la côte, ni du transport dans le profil.

La formule du CERC permet de calculer le transport de sédiments le long de la côte. Ainsi, une tempête avec des houles décennales emporterait près de 20 000 mètres cubes de sédiments en deux jours d'action. Plus concrètement, le coup de mer qui a eu lieu entre le 20 et le 22 mars 2018, pour des houles de 2.4 mètres de haut a entraîné le transport d'environ 7 000 mètres cubes de sédiments.

Il ne faut également pas oublier le transport dans le profil de la plage qui peut faire varier sa hauteur. Malgré le fait que globalement les sédiments emmenés au large en hiver reviennent durant l'été, la vulnérabilité de la route évolue avec ces mouvements sédimentaires.

Il est également important de rappeler qu'aucun rechargement de plage n'a été entrepris sur la plage des Maurettes. Cette plage n'a donc aucun apport naturel ni artificiel et les courants littoraux réduisent petit à petit son stock sédimentaire. C'est pourquoi on observe une érosion et un recul du trait de côte.



Figure 21 Schéma bilan des mouvements principaux de sédiments aux alentours du site d'étude

## 2.2 Les retombées d'un projet de protection peuvent être intéressantes pour la zone :

Nous avons vu que l'objectif du département est de sécuriser la route départementale et la voie de chemin de fer longeant la côte. Malgré tout, l'atteinte de cet objectif n'aura pas seulement comme conséquence la conservation de ces axes importants.

Des restaurants de plage et des clubs nautiques sont installés au niveau de la plage des Maurettes. Il est évident que lorsque la route subit une submersion, ces installations sont également touchées et les coûts peuvent parfois être relativement élevés. La mise en place d'un aménagement de protection permettrait de les protéger tout autant que la route.

De plus, une plage, même sans aménagements, participe au dynamisme d'un territoire en attirant les populations souhaitant profiter de la mer. En termes d'économie, cela peut représenter beaucoup, surtout pour une commune de la côte d'azur comme Villeneuve-Loubet qui attire un nombre important de touristes.

En outre, la zone aquatique au large de la plage des Maurettes est peuplée de *Cymodocea nodosa*. Cette herbacée vivace présente des feuilles en forme de ruban qui sont regroupées à leur base dans une gaine. Les différents pieds sont reliés par leurs rhizomes à la manière des fraisiers et leurs stolons. Ces herbiers forment un écosystème important qui abrite de nombreuses espèces.

En plus de concentrer une biodiversité, ces herbiers peuvent jouer un rôle protecteur sur les plages. En effet, lorsque ces herbiers se retrouvent arrachés par les houles, les plantes vont se déposer en bancs le long des plages créant une barrière naturelle protégeant les sédiments de la plage. Ces herbiers sont assez présents dans la baie aux environs de 10 mètres de profondeurs et se rarifient plus au large (voir figure suivante).

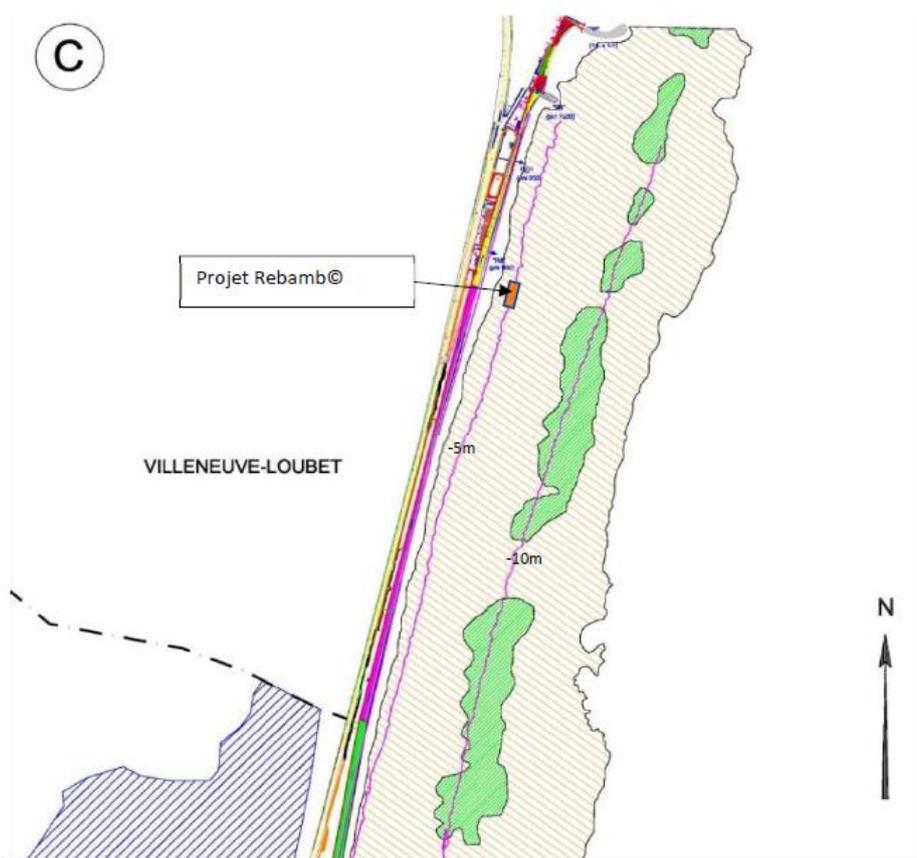


Figure 22 Carte localisant les herbiers de Cymodocées au large de la plage des Maurettes

Après avoir étudié le site en lui-même et défini des objectifs, le département a lancé un appel à projet. Le bureau d'étude Eramm (devenu Biobamb) a répondu à cet appel et fait des propositions pour atteindre les objectifs du département. Nous allons voir dans la partie suivante comment une solution a pu être trouvée pour satisfaire ces besoins dans le respect du cahier des charges de la DDTM 06.

### 3. Elaboration d'une idée originale et premiers tests en canal à houle :

Nous avons vu que la plage des Maurettes a besoin d'un aménagement de protection, sans quoi la route départementale risque d'être submergée plus souvent et la situation de se détériorer. Le département a donc lancé un appel d'offre auquel la société Eramm a tenté de répondre.

#### 3.1 Elaboration d'une solution adaptée aux objectifs fixés par le département :

Afin de répondre à l'appel d'offre du département le bureau d'étude Eramm a proposé tout d'abord un aménagement en enrochement. Cet aménagement était un brise-lame qui aurait permis de protéger la plage de la houle limitant ainsi l'établissement du courant littoral à l'origine du transport des sédiments hors de la plage des Maurettes.

Malheureusement, un aménagement de ce type coûte cher (plus de 15 millions d'euros) et le budget limité du département a éliminé cette option. Le bureau d'étude a donc cherché de nouvelles solutions à proposer au département.

##### 3.1.1 A la recherche d'idées originales et innovantes :

La difficulté pour le bureau d'étude a donc été de trouver une solution suffisamment efficace pour protéger la plage mais assez peu cher pour qu'il puisse être réalisé par le département. Une technologie est de plus en plus utilisée pour la protection des littoraux : le récif artificiel. Ce sont des structures immergées placées au fond imitant les caractéristiques des récifs naturels. Un tel récif peut atténuer l'énergie des houles arrivant sur la côte et même initier le déferlement des vagues pour dissiper un maximum d'énergie.

C'est une stratégie nationale qui a permis le développement de cette technologie et aujourd'hui elle est utilisée sur toute la côte Méditerranéenne française. L'avantage de ces récifs artificiels est d'atteindre plusieurs objectifs en plus de la protection littorale comme la production halieutique ou encore la reconstitution des biocénoses marines.



Figure 23 Carte localisant les récifs artificiels installés le long de la côte méditerranéenne française

Afin d'être réalisés, ces récifs nécessitent une concession d'utilisation du domaine public maritime en dehors des ports selon le décret n°2004-308 du 24 mars 2004 du code général de la propriété des personnes publiques. En effet, ces aménagements sont réalisés dans le domaine public maritime qui est régi par ce code général.

Un suivi est obligatoire lors de l'immersion des récifs artificiels et c'est le maître d'ouvrage qui doit le réaliser ou le prévoir sur toute la durée de la concession. Ce suivi doit s'articuler autour de 7 composantes principales :

- la structure et la qualité des fonds
- l'évolution de la structure immergées
- un suivi ichtyologique
- un suivi de la faune et de la flore fixées
- un suivi des pêches
- un suivi des activités développées autour des récifs
- un suivi des milieux sensibles d'intérêt patrimonial

Afin de réaliser ce suivi, le maître d'ouvrage est libre d'utiliser les protocoles et les méthodes qu'il souhaite.

Etant donné que ces récifs sont dans le domaine public, le titulaire de la convention doit prévoir la réversibilité de l'installation c'est-à-dire la remise en état du site. La convention pour un récif artificiel peut être renouvelée un an avant la fin de l'autorisation encore en cours. La convention peut ne pas être renouvelée et le titulaire de la convention non renouvelée doit remettre en état le site.

### 3.1.2 L'utilisation du bambou dans les aménagements littoraux :

Des entreprises ont développé des systèmes de récifs artificiels sous-marins sous forme de haies. Des tiges en fibre de verre sont ancrées sur un support en béton et doit servir de refuge pour des écosystèmes pouvant s'y installer. La faune et la flore se fixe et se développe sur et autour des éléments filiformes et sur l'armature béton.

Un récif de ce type a été installé à Toulon en sortie d'une station d'épuration pour savoir si des écosystèmes pouvaient se développer dans ses eaux traitées. L'expérience a été une réussite et la vie s'est développé autour de la structure artificielle. Le même type d'expérience a été réalisé au Cap Ferret avec des bambous à la place des tiges en fibre de verre. Le bambou présente l'avantage d'être imputrescible et résistant.



Figure 24 Photo de l'expérience du Cap Ferret (Source : Biobamb)

Le bambou n'est pas seulement utilisé dans le cadre de récif pouvant accueillir des écosystèmes. En effet, en Thaïlande, la population utilise le bambou pour former des murs parallèles à la côte pour la protéger. Ces murs jouent alors le rôle de brise-lame cassant les vagues pour dissiper un maximum d'énergie avant leur arrivée sur le littoral. Malheureusement, ce système de construction soumet les bambous à des forces très violentes et fortes qui causent leur rupture et l'entretien des murs est important. Ce système est particulièrement utilisé pour protéger les mangroves qui subissent les attaques des houles et qui diminuent de plus en plus.

C'est à partir de ces expériences que le bureau d'étude Eramm a voulu développer un système de récif artificiel en bambou capable d'agir suffisamment sur les conditions hydrodynamiques pour atteindre les objectifs du département des Alpes Maritimes pour la plage des Maurettes.

Pierre Farnole a alors inventé un procédé, Rebamb©, atténuateur de houle. Ce procédé consiste à ancrer un assemblage de cannes de bambou dont l'architecture lui permettra de dissiper une partie de l'énergie de la houle. En plus d'être facile à cultiver, le bambou est très résistant et flexible. En plus, un tel système aurait une emprise sur le fond réduite, serait facile à mettre en place pour un coût assez faible. L'installation présente un intérêt écologique et elle est facilement réversible.

Tous ces avantages ont fait que le projet était intéressant pour une application à la plage des Maurettes. Afin de tester ce procédé et pouvoir l'améliorer si besoin, des essais en canal ont été réalisés. Ces essais ont notamment servi au dimensionnement de la structure et à l'estimation de son efficacité en termes d'amortissement de la houle et de transport sédimentaire.



**Figure 25** Photo d'un brise-lame en bambou installé dans la province de Phuket en Thaïlande (Source : Dreamstime)

## 3.2 Test du procédé REBAMB© avant sa mise en application :

Afin de vérifier que le procédé inventé par Mr Farnole fonctionne bien, des tests ont été réalisés en canal à houle au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) de l'Université du Havre. Différents dispositifs ont été testés pour déterminer si le procédé est plus efficace, notamment avec des haies fixes ou mobiles et également estimer le nombre de haies à installer à la plage des Maurettes.

### 3.2.1 Conditions générales des expérimentations :

Le canal à houle du LOMC mesure 35 mètres de longueur pour 0.9 mètre de largeur et 1 mètre de haut. La plage d'amortissement fait 9 mètres laissant une veine d'essai de 26 mètres. Le canal en béton possède des fenêtres latérales permettant de visualiser le déroulement de l'expérience.

Un batteur permet de générer les houles souhaitées, qu'elles soient régulières ou irrégulières avec des périodes comprises entre 0.5 et 2.5 secondes et une hauteur comprise entre 0.05 et 0.3 mètre. A l'autre extrémité, la plage d'amortissement en mousse permet d'amortir la houle avec un angle de 12° avec la surface libre de l'eau (assez proche de la pente de la plage des Maurettes).

En ce qui concerne le fond sableux il a été uniformisé avec une épaisseur de 5 centimètres. Cette épaisseur permet aux potentielles formations sédimentaires de se former sans ensabler les structures. A l'échelle 1/7, le sable présente un  $d_{50}$  de 111 micromètres ce qui correspond à un sable grossier à échelle réelle, comparable à celui de la plage des Maurettes.

Les mesures réalisées lors des tests ont porté notamment sur les houles et l'amortissement généré par les dispositifs. Les houles ont donc été mesurées à l'aide de sondes résistives à l'amont et à l'aval des dispositifs. La mise en place de quatre sondes aval et quatre sondes amont permet de déduire la hauteur de la houle réfléchiée en aval et celle renvoyée par réflexion par la plage. L'article de M. Sanchez et C. Chevalier sur la *Séparation des houles incidente et réfléchiée en canal à houle* donne des informations intéressantes sur le sujet.

L'aspect sédimentaire était également un point central dans ces essais. L'objectif était de faire des mesures et des prises de vue pour voir l'ampleur des phénomènes sédimentaires et en particulier, vérifier la formation d'une zone d'accumulation à l'aval immédiat des dispositifs. De nombreux repères ont été positionnés pour que les erreurs d'expérimentations soient le plus limitées possibles (lecture des mesures, précision des outils de mesures, évaluation d'un niveau moyen) et c'est le même opérateur qui a réalisé l'ensemble des mesures pour que l'erreur liée à la lecture soit la même pour toutes les itérations de l'expérience.

Un grand nombre de photos ont été prises pour observer les formations sédimentaires se formant au fond lors des essais. Ces prises de vues et les mesures avec les repères sont complétées par un système de mesure depuis l'extérieur du canal. Un laser est positionné avant l'essai de manière à représenter la position initiale du fond sableux. Une caméra filme alors l'essai et on peut comparer le fond sableux au terme de l'essai à celui initial toujours représenté par le laser. Après traitement par le logiciel Matlab, on obtient des courbes comparables à la figure 26.

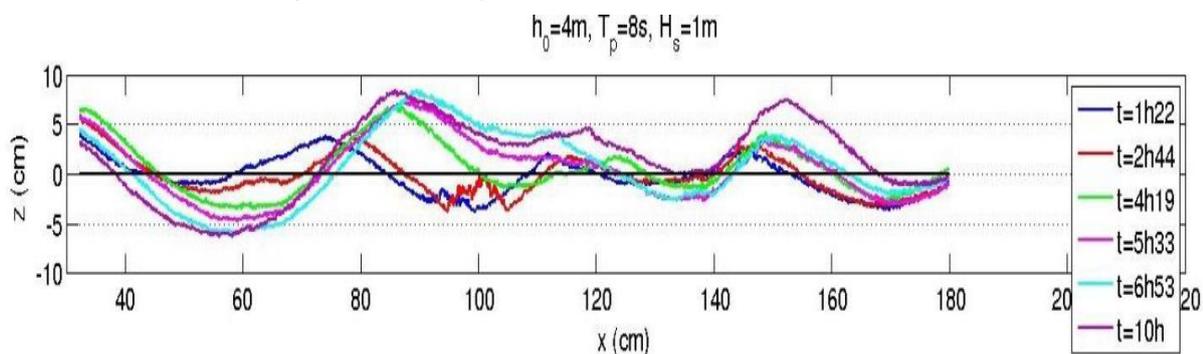


Figure 26 Exemple de courbes obtenues après traitement Matlab, montrant les profils à l'aval des dispositifs testés en canal à houle

### 3.2.2 Les différents dispositifs :

Un premier type de récif a été testé : les haies fixes. Des joncs sont fichés dans un cadre en béton servant d'ancrage. Les joncs font environ 2 mètres de haut et sont organisés sur 3 rangées sur le bloc de 6x3 mètres en béton (voir figure 27).

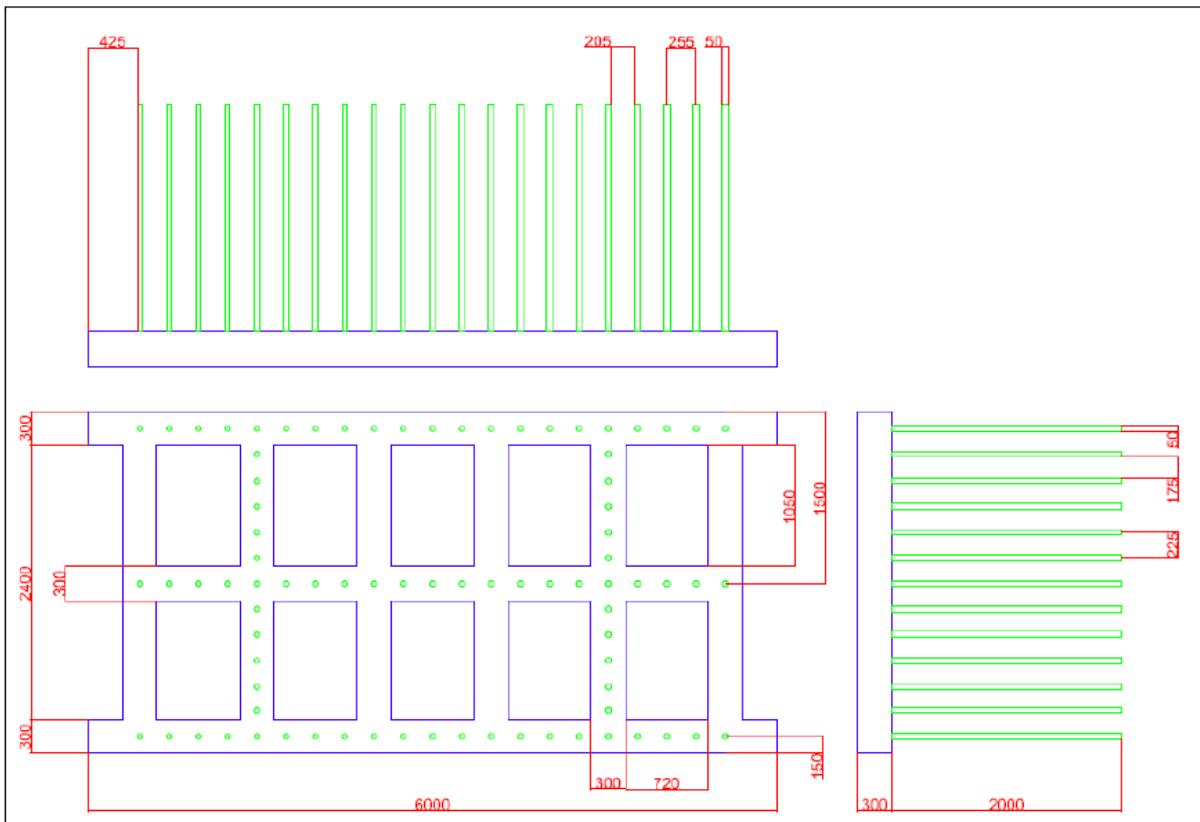


Figure 27 Schéma de l'organisation de la structure à haie fixe (Source: Biobamb)

Pour les expériences, cette structure a été reproduite trois fois à l'échelle 1/7 avec une base en PVC. Les trois blocs sont ensuite fixés au fond du canal et le fond sableux installé avant la mise en eau. Cette structure a été testé pour deux configuration différentes :

- Configuration 1 : réseau de trois haies fixes consécutives
- Configuration 2 : Réseau de deux haies fixes distantes

Trois variables ont intéressé les testeurs : la hauteur d'eau au-dessus de la structure, les conditions de houle et la largeur du récif. L'influence de ces trois paramètres a dont été étudié au cours de ces essais.

Un deuxième dispositif a été étudié lors de ces essais. En effet, le procédé Rebamb© utilise des cannes de bambous mobiles accompagnant le mouvement de la houle. Deux configurations ont été testé selon la masse volumique des tiges formant les haies :

- Configuration 3 : trois rangées de haies mobiles de masse volumique  $\rho_1=980 \text{ kg/m}^3$
- Configuration 4 : trois rangées de haies mobiles de masse volumique  $\rho_2=840\text{kg/m}^3$

Les tiges verticales sont en PVC et c'est en les perçant que leur masse volumique a été modifié. Le but est ici le même que pour les haies fixes mais la modification de la masse volumique permet de vérifier la solidité du dispositif. En effet, les haies mobiles vont osciller en fonction des actions hydrodynamiques de la houle et seront donc moins soumises à des forces de torsion susceptibles de les rompre, mais la pérennité de la structure a tout de même été vérifié. Cette modification de la masse volumique permet également d'évaluer l'impact du mouvement des récifs sur la propagation de la houle.

Les rangées de haies mobiles sont espacées de 4 mètres pour éviter que les tiges de 2 mètres de haut ne s'entrechoquent.



Figure 2-4 : Haies mobiles dans le canal à houle

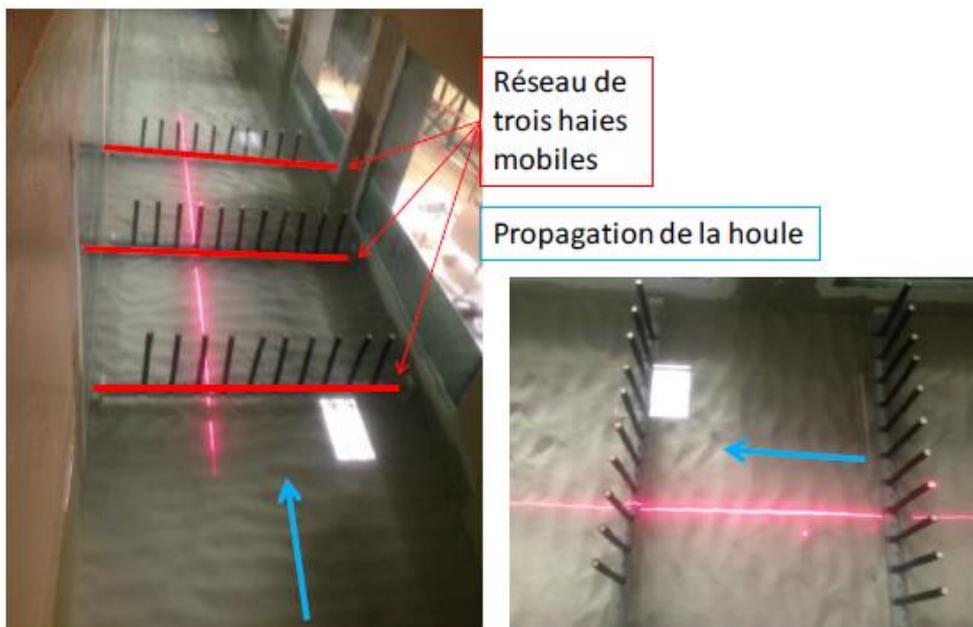


Figure 28 Photo du dispositif de haies mobiles dans le canal à houle

### 3.2.3 Les résultats obtenus après les essais en canal à houle :

Plus de trente essais ont été réalisés pour tester les 4 configurations définies plus haut. L'ensemble de ces résultats est compilé dans un tableau que vous pouvez retrouver en annexe.

Le premier facteur à être étudié a été la réflexion de la houle. En effet, la pente de la plage et ses caractéristiques granulométrique la rendent très réfléchissante. Malgré tout, le coefficient de réflexion est inférieur à 20% dans 83% des essais ; l'analyse des résultats n'est donc pas remise en cause. Cependant, il est difficile d'exploiter le coefficient de réflexion à l'amont du dispositif testé à cause des installations de mesures notamment.

Le coefficient de transmission est également important. Ce coefficient permet de se rendre compte de l'amortissement généré par le dispositif testé sur la houle. Pour la configuration 1, le coefficient de transmission est compris entre 98.5 et 89.1% et on remarque que ce coefficient est plus bas lorsque la hauteur d'eau au-dessus du dispositif est plus réduite. Ainsi, en moyenne 95% de la hauteur de la houle est transmise avec 3 mètres d'eau au-dessus du dispositif, contre 94% avec seulement deux mètres d'eau.

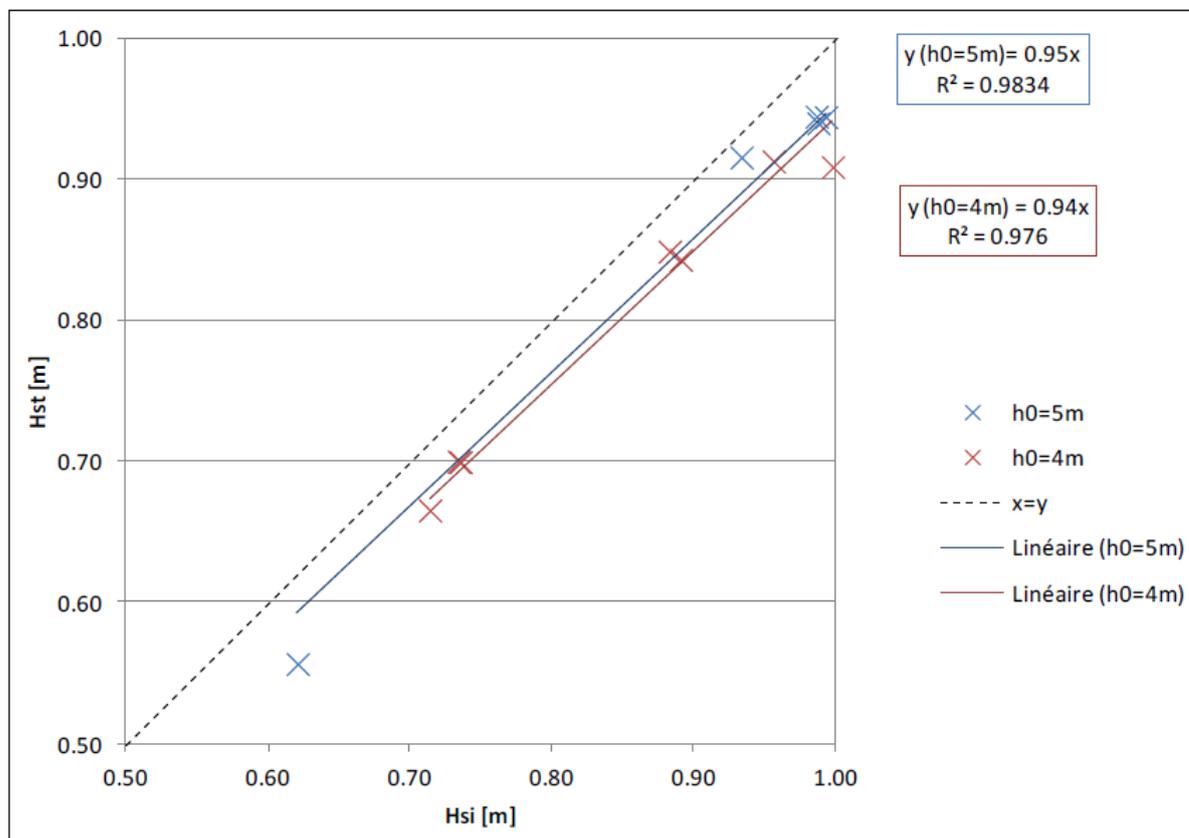


Figure 29 Graphique représentant le lien entre houle transmise (Hst) et houle incidente (Hsi)

On peut également remarquer que le récif fixe est plus efficace pour les faibles périodes avec presque 11% d'atténuation pour une houle de période 5 secondes.

En comparant les configurations de haies fixes, on se rend compte que les résultats sur les coefficients de transmission sont assez similaires. Cependant, le coefficient de réflexion à l'amont du dispositif est plus fort lorsque les haies sont plus écartées en configuration 2. La configuration 2 est donc plus réfléchissante que la première et cela peut causer des problèmes de perturbations à éviter en cas de pratiques nautiques.

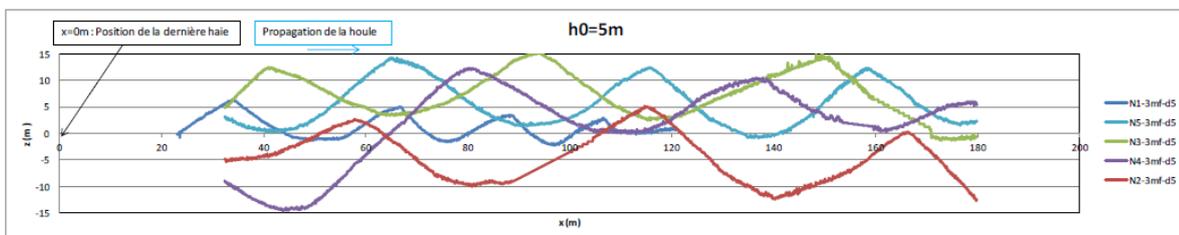
En ce qui concerne la configuration 3, le coefficient de transmission semble dépendre de la hauteur d'eau puisqu'il est plus élevé pour 3.5 mètres et plus bas pour 4 mètres d'eau. C'est l'inverse du cas fixe et l'origine s'explique par le comportement dynamique totalement différent des deux types de dispositifs. En configuration 3, le coefficient de transmission est compris entre 89 et 97%.

En ce qui concerne la configuration 4, l'influence de la hauteur d'eau ne semble plus exister puisque les résultats sont identiques pour les deux hauteurs d'eau. Son coefficient de corrélation est estimé à 96%.

Pour une installation en baie, il est recommandé d'avoir au moins deux mètres d'eau au-dessus d'un récif pour éviter les dommages pouvant être causés par les bateaux ou les nageurs. Si l'on compare donc les deux configurations avec cette caractéristique, la configuration 4 est meilleure avec un coefficient de transmission de 89% contre 98% avec la configuration 3 sous une houle de période de 6 secondes. Cela s'explique par le fait que les tiges plus lourdes sont plus longues à se relever après le passage d'une houle et ont donc moins d'influence par la suite en comparaison aux tiges de la configuration 4.

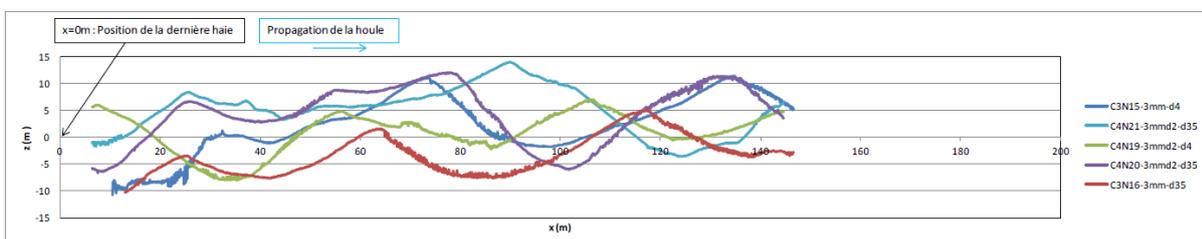
Après avoir étudié le coefficient de transmission il est primordial de se pencher sur l'évolution des fonds. D'un point de vue global, les essais présentent une élévation moyenne des fonds à l'aval des systèmes testés.

Dans le cas des haies fixes, des rides se forment à l'aval. Ces rides sont assez régulières et symétriques. La période pic de houle semble avoir un lien fort avec l'élévation du niveau moyen des fonds. En effet, l'élévation du niveau moyen croît avec la période.



**Figure 30 Profil aval lors des tests avec haies fixes**

Pour les haies mobiles, les rides de sable qui se forment sont dissymétriques. La première ride après le système est petite et elles grandissent en s'éloignant du récif. Le mouvement de va et vient des tiges doit créer un courant qui provoque cette dissymétrie et cette évolution des rides. Ce courant est également à l'origine de transport des sédiments au niveau du récif qui lui permet de s'autoentretenir et de limiter son enfouissement. Pour les haies mobiles, la longueur d'onde semble avoir une influence assez importante : les dépôts sont plus importants pour les grandes longueurs d'onde. Les dépôts sont moins importants que dans le cas des haies fixes.



**Figure 31 Profil aval lors des tests avec haies mobiles**

Les dispositifs sont donc des atténuateurs de houle qui n'interrompent pas le transport des sédiments. Les sédiments sont entraînés vers la plage et favorise donc la stabilisation des fonds sableux près de la côte.

### 3.2.4 Conclusion des essais

Les essais ont montré que tous les types de dispositifs favorisent la stabilisation des fonds sableux à proximité de la plage. En ce qui concerne la transmission de la houle, les résultats des haies fixes et mobiles sont assez proches.

Pour faire le choix entre haies mobiles et haies fixes d'autres paramètres ont donc été pris en compte. Tout d'abord, le fait que les haies mobiles sont à l'origine d'un courant qui autoentretient la zone est un point intéressant. En effet, le département possède un budget limité et réduire les dépenses en entretien peut permettre d'économiser de l'argent pour d'autres éléments.

De plus, les haies mobiles sont soumises à des forces moins fortes que les haies fixes. En effet, un peu comme dans la fable de La Fontaine « Le chêne et le roseau », les haies fixes luttent sans plier contre les courants alors que les haies mobiles peuvent « plier » comme le roseau dans la fable. Pour les coups de mer la structure fixe semble plus fragile que la structure en haie mobile qui accompagne le mouvement des houles. Ainsi, le choix d'une structure en haies mobiles semble plus efficace quant à la pérennité de l'ouvrage.

L'implantation d'un récif en haies mobiles de ce type, permettrait de réduire la houle suffisamment intensément pour limiter fortement les submersions par les houles d'est. En effet, sans considérer de surcote forte, les houles d'est décennales ne seraient plus assez énergétiques pour produire un run-up atteignant la route.

Malgré ces résultats encourageants, le système atténuateur de houle n'est pas encore un système dont on est sûr de l'efficacité pour le site de Villeneuve-Loubet (notamment sur la limitation de la submersion de la route comme le montre la figure 32). En effet, différents paramètres peuvent avoir une influence sur les résultats en canal et « gonfler » les résultats obtenus. Deux paramètres ont particulièrement retenu l'attention du bureau d'étude : la durée de l'expérimentation en canal qui est limitée dans le temps et la rugosité des haies qui ne serait pas la même sur site. De plus, des erreurs ou approximations sont toujours possibles par la configuration du canal lui-même, le matériel et la lecture des résultats.

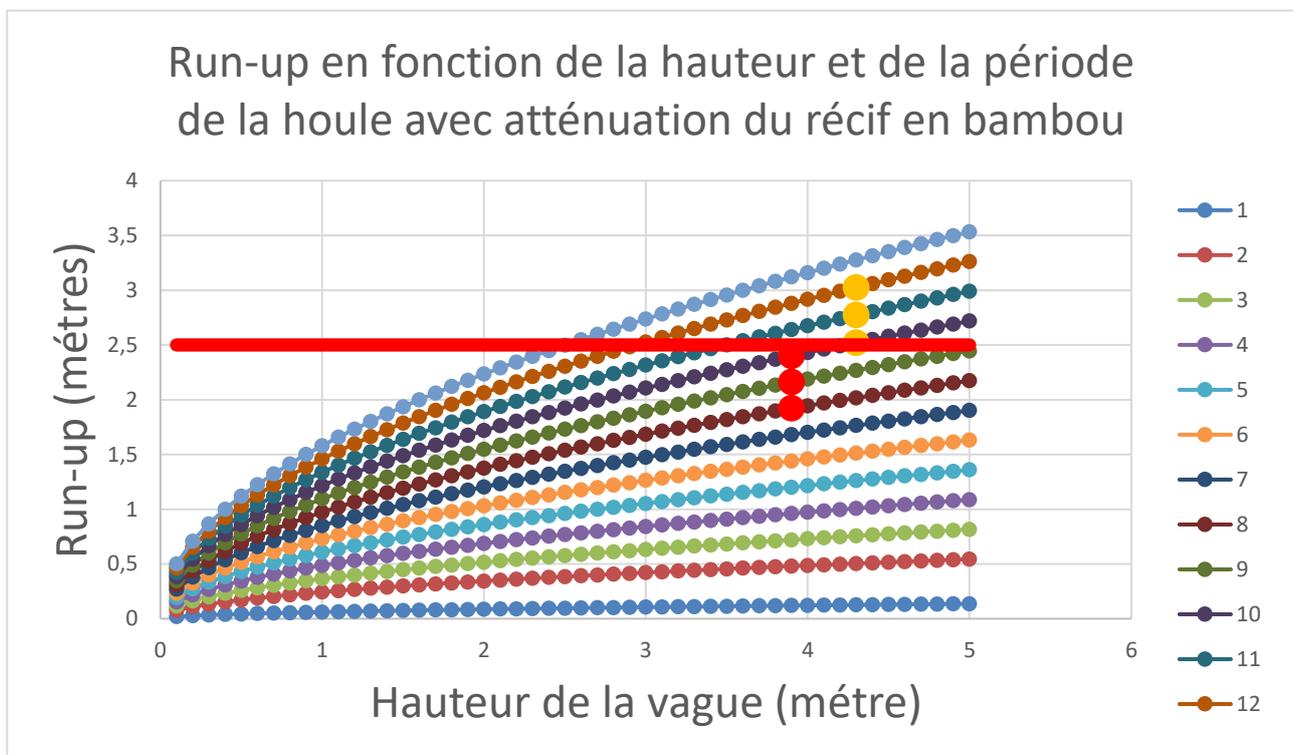


Figure 32 Graphique présentant le run-up des vagues en fonction de la hauteur et de la période de la houle en prenant en compte l'amortissement d'un récif à haies de bambou mobiles

### 3.3 Vers une expérimentation sur site :

Après ces essais, l'idée fut de tester directement un dispositif de haies mobiles en bambou dans la baie pour vérifier l'efficacité du système et commencer l'action sur le site après plusieurs années de discussions.

La proposition de Biobamb au département a donc été d'installer un récif artificiel sur la base du procédé à haies mobiles testé en canal à houle. Le département a alors demandé avis auprès de divers services techniques qui ont pu le rassurer sur l'intérêt de la démarche. Ainsi le CNRS et le Cerema ont donné un avis favorable à l'installation de ces haies en rappelant notamment ses avantages par rapport aux solutions plus conventionnelles qui jalonnent la côte méditerranéenne.

L'expérimentation sur site présente de multiples objectifs comme la vérification de la diminution de l'énergie des vagues, la stabilisation sédimentaire de la plage, la diminution de l'aléa de submersion ou encore le test d'un système d'ancrage pour ce type de dispositif.

Une convention a alors été construite et signée par les différents partis à savoir le département, Biobamb©, le Cerema et le CNRS. Cette convention a pour objectif de cadrer le déroulement de l'expérimentation sur le site en précisant le rôle des différents acteurs au cours de la démarche. Celle-ci a été découpée en 4 phases :

- La phase 0 d'étude de faisabilité consiste à l'élaboration du système qui sera mis en place dans le détail (quels ancrages ? quelle structure de haie etc.)

- La phase 1 est réglementaire (autorisations administrative, organisation du financement)

- La phase 2 consiste à la réalisation des travaux en partant de l'acheminement des bambous jusqu'à l'installation par cinq mètres de profondeur

- La phase 3 de suivi vise à faire les vérifications décrites plus haut grâce à de l'instrumentation et des relevés réguliers qui doivent être réalisés sur le site

Nous allons voir maintenant comment ces phases se sont déroulées et se déroulent encore en ce qui concerne le suivi.

## 4. Conception, installation et suivi de Rebamb :

Le déroulement de l'expérimentation est donc découpé en quatre phases. Ce phasage permet de cadrer les acteurs au cours de l'avancée du projet et d'organiser le travail entre eux-ci. En effet, l'expérimentation doit durer trois ans et sans plan d'action le projet ne peut pas être efficace

### 4.1 De l'idée d'un récif en bambou à sa concrétisation sur site

La phase d'étude de faisabilité est prépondérante dans le déroulement de l'expérimentation de Rebamb©. En effet, elle conditionne la phase de travaux en définissant les plans de construction, les matériaux et l'équipement nécessaire à la production du récif et à son installation. La forme de la structure a également une influence sur le suivi de l'expérimentation.

Tout d'abord, il a fallu trouver une espèce de bambou qui se prête bien au cahier des charges. L'avantage du bambou est qu'il est imputrescible, c'est-à-dire qu'il ne pourrit pas ; cependant, tous les bambous ne résistent pas de la même manière aux efforts et aux chocs. Le *Dendracalamus Asper* ou bambou géant est très utilisé en Asie du Sud-Est et en Amérique centrale et latine. En effet, c'est cette espèce qui est utilisée pour fabriquer les épis que nous avons cités dans la deuxième partie de ce rapport. Il est également très utilisé, par les populations d'Asie du Sud-Est en particulier, pour réaliser des constructions capables de résister à des conditions climatiques extrêmes comme la mousson par exemple.



Figure 33 Photo d'une charpente en bambou en Thaïlande (Source : 123RF)

Cette espèce a donc été la candidate parfaite pour l'expérimentation avec ses 12 mètres de haut et jusqu'à 20 centimètres de diamètre pour une canne mature. Biobamb a ensuite trouvé une pépinière capable d'acheminer les bambous depuis la Thaïlande. Une fois le matériau choisi et un fournisseur trouvé, il faut encore savoir comment monter le récif.

Au vu des résultats obtenus en canal à houle, une structure à haies mobiles avec une hauteur d'eau d'environ 1 mètre au-dessus a été choisie. Comme nous l'avons vu en fin de troisième partie, les haies mobiles présentent des avantages que l'on ne retrouve pas pour les haies fixes. Avec les bambous disponibles et les conditions du littoral, des structures de 4 mètres de haut installées entre 5 et 6 mètres de profondeur était un choix convenable. Cela permettait d'installer la structure dans une zone désertique d'un point de vue écologique pour éviter les troubles lors de la mise en place du récif. De plus, la zone ainsi choisie est assez éloignée de la plage pour limiter les potentielles dégradations par vandalisme.

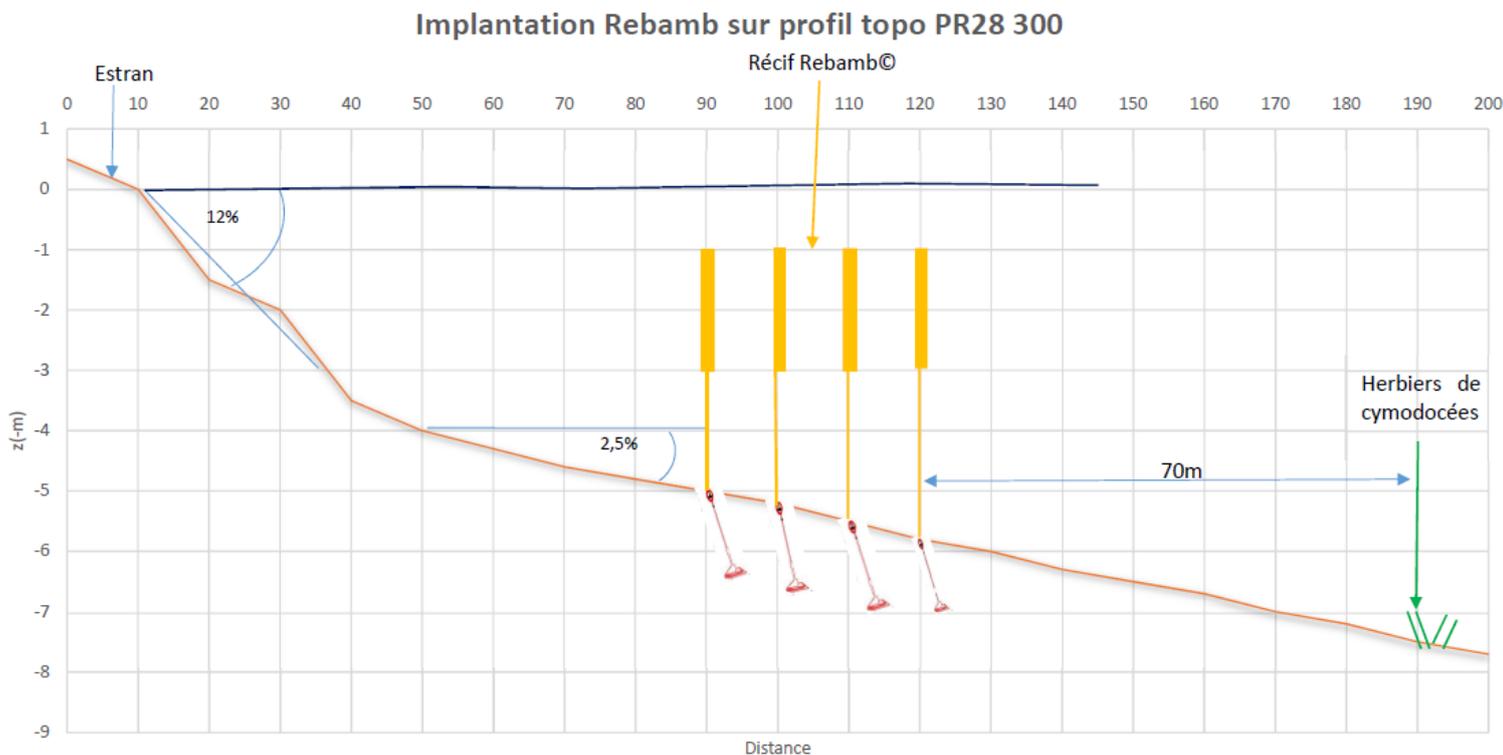


Figure 34 Schéma d'implantation du procédé Rebamb au niveau de la plage des Maurettes

En ce qui concerne l'architecture, un assemblage des bambous a été pensé dans le but d'accroître l'amortissement estimé à environ 6% pour les réseaux de 4 haies mobiles lors des essais en canal. L'idée fut de fixer sur une canne de 4 mètres deux cannes latérales de 2 mètres sur la partie haute, à l'aide de tiges filetées. La surface d'interaction entre structure et houle est donc augmentée et la trajectoire des particules d'eau en est d'autant plus perturbée. Ces unités sont reliées deux à deux par des cannes transversales de 2 mètres permettant de stabiliser les unités et d'éviter qu'elles ne tournent. Ces cannes sont fixées sur les unités grâce à des colliers de serrages.

Quatre configurations de cannes transversales ont été testées. La majorité des couples possèdent deux cannes transversales parallèles ; cinq couples d'unités sont reliés par deux cannes qui se croisent ; la troisième configuration mélange les deux précédentes avec deux renforts parallèles et une canne en travers (10\*2 unités) ; enfin la dernière configuration utilise un unique bambou transversal au sommet fixé grâce à un caoutchouc. La présence de ces différentes configurations dans le projet permettra peut-être d'identifier celle qui résiste le mieux aux efforts de torsion notamment afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

Cette organisation des bambous permet l'installation de 102 couples d'unités sur 4 rangées d'environ 100 mètre de long et séparées de 10 mètres. L'emprise au sol se limite donc à un rectangle de 30 mètres par 100 mètres. Les couples sont installés en quinconce pour optimiser l'interaction houle/récif. La première rangée possède ainsi 26 couples et la deuxième 25 ; la troisième à nouveau 26 et la dernière 25.

Il a ensuite fallu déterminer l’ancrage des bambous. Le caractère mobile des haies exclue l’enfouissement d’une partie du bambou. Le système d’ancrage a donc été pensé de manière à fixer le bambou tout en le laissant accompagné le mouvement de la houle. Grâce à des bout, chaque unité est ainsi reliée à une chaîne qui court au fond de l’eau et qui parcourt une rangée. C’est cette chaîne qui est ensuite ancrée dans le sable. Afin de choisir l’ancrage adapté, il a fallu estimer les forces qui s’exercent sur les bambous. Etant mobile et flottant, les seules forces subies par les bambous sont la poussée d’Archimède et la force de traînée. Cette dernière se détermine à l’aide de la formule suivante :

$$T = \frac{1}{2} * \rho * C_d * S * V^2$$

Avec T la force de traînée en N,  $\rho$  la masse volumique du fluide (1020 kg/m<sup>3</sup>),  $C_d$  le coefficient de traînée hydrodynamique (abaque fonction du nombre de Reynolds en annexe), S la surface du maître-couple en m<sup>2</sup> et V la vitesse du courant en m/s

La force de traînée a ainsi été estimée à 1159 Newton. La poussée d’Archimède n’est également pas à négliger. En effet, de la mousse expansive doit être injectée dans les bambous pour qu’ils flottent et fassent front aux houles. Le poids des bambous déduits, la poussée d’Archimède « pousse » les bambous vers le haut avec un poids de 126 kg.

Ainsi, en prenant compte la poussée d’Archimède et la force de traînée, la fixation doit avoir une résistance à plus de 2500N. Pour reprendre cet effort, un ancrage Platipus® a été considéré dans un premier temps (voir annexe) ; cette technologie d’ancre n’a cependant pas été retenue pour des raisons de budget et de mise en œuvre. Ce sont donc des ancres à vis enfoncées jusqu’à 1,20 mètres de profondeur qui ont été utilisées pour fixer les bambous.

Un fois l’architecture défini et les matériaux et équipements choisis et disponibles, il ne restait plus qu’à faire le montage des bambous, les amener sur place et les installer au large de la plage des Maurettes. Etant donné que les haies doivent être installés à des profondeurs comprises entre 5 et 6 mètres, les bambous sont assemblés par unité (petit groupe de 3 bambous décrit plus haut) directement à la pépinière. Les colliers de serrages sont également montés.

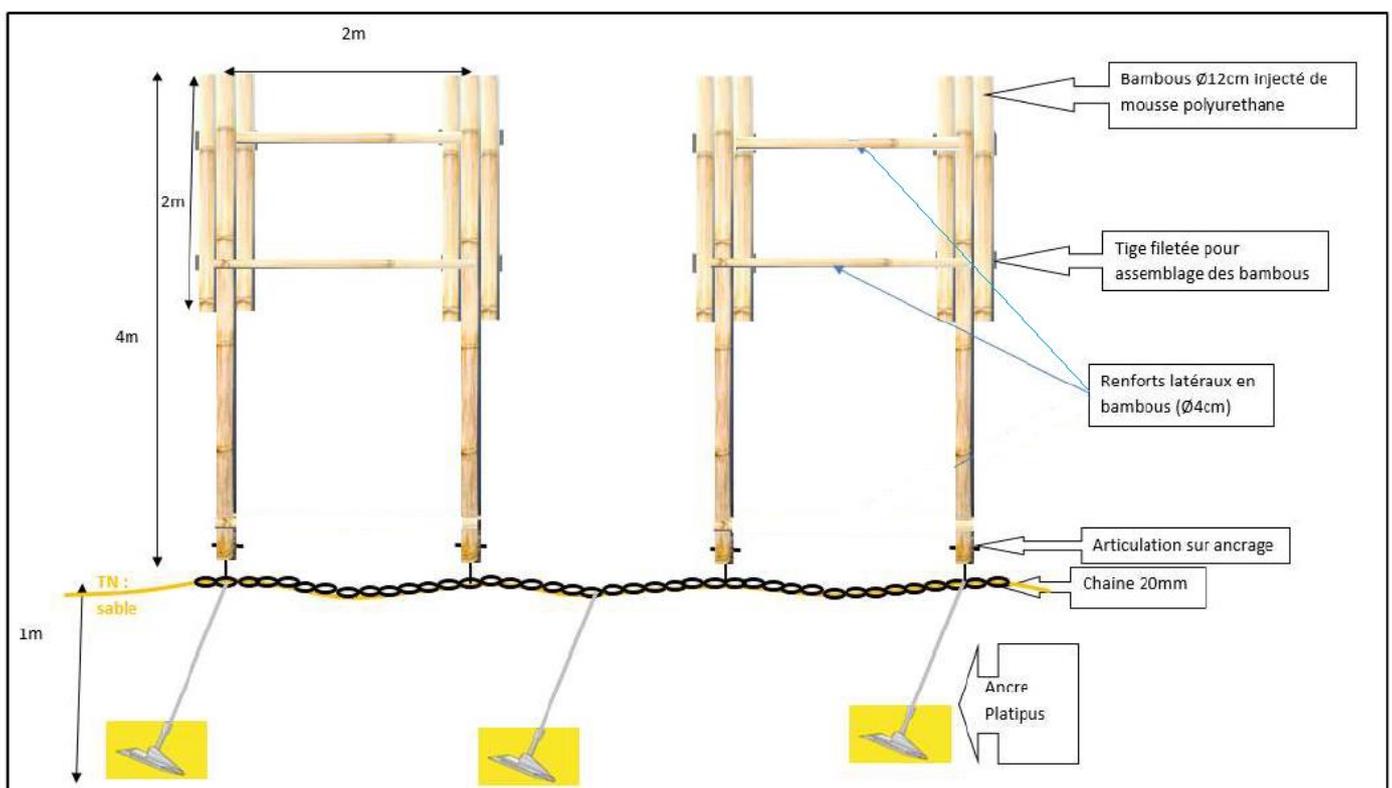


Figure 35 Schéma de principe de la structure avec ancien ancrage (Source : étude préliminaire Biobamb)

Sur le site, les ancrages sont installés. Les bambous sont ensuite amenés et fixés aux ancrages et les cannes transversales positionnées. Ces travaux ont nécessité l'action de plongeurs et l'aide du port des marina baies des anges qui a proposé la location d'un espace pour le stockage des bambous le temps de leurs installations durant le mois de février 2018.

## **4.2 L'organisation du suivi**

Une fois l'installation réalisée, le projet est entré dans sa phase de suivi. Un protocole a été établi pour permettre de suivre le projet de manière scientifique et tenter de vérifier si les objectifs établis dans la convention sont réalisés. Le suivi concerne donc de nombreux domaines : sédimentaires, hydrodynamiques ou encore le domaine des risques de submersion.

Cinq critères de suivi ont été identifiés et sont étudiés grâce aux interventions des différents acteurs du projet. Les trois premiers critères sont très fortement liés car ils concernent les aspects sédimentologiques. On retrouve ainsi : l'évolution morphologique des fonds marins, l'évolution du trait de côte et l'évolution sédimentologique.

Afin d'étudier ces aspects sédimentaires, de grosses interventions sont prévues/réalisées comme des relevés bathymétriques (Mesuris Monaco) ou des relevés topographiques réalisés par l'unité Drone du département. Ces interventions permettent notamment d'observer l'évolution morphologique du site et notamment des petits fonds, de la ligne de rivage ou encore étudier l'évolution du stock sédimentaire. La granulométrie est également étudiée conjointement par le CNRS et Biobamb pour déterminer quels sédiments viennent recharger la plage ou quitte la plage. Ce suivi est également important pour savoir si la diminution de la taille des sédiments se poursuit sur la plage.

L'étude de la houle est également centrale dans le suivi en lien avec la submersion de la route départementale : ce sont les deux derniers critères majeurs soulevés pour le suivi. Le suivi des houles permettra peut-être d'identifier quelles sont les houles les plus influencées par le récif ou d'estimer l'amortissement de la houle. De plus, en comparant ces données avec les données sur la submersion de la RD, il sera possible de déterminer si le récif atteint ou non les objectifs du département en termes de limitation de la fermeture de la route départementale. Malheureusement, les moyens financiers des acteurs ne permettent pas de réaliser des mesures de houle ou de courant directement sur le site ; les données de houle se limiteront donc à celles disponibles grâce à la bouée CANDHIS de Monaco et à la bouée Cote d'Azur DYFAMED. En outre, l'atténuation visée par le dispositif étant faible, la marge d'erreur de la mesure risquait d'être trop importante.

Les aspects biologiques sont également intéressants et suivis. Le CNRS se penchera en particulier sur les herbiers de Cymodocées déjà observés et étudierons leurs évolutions. Biobamb analysera la colonisation du récif qui peut subvenir et qui peut donner des indices sur l'état hydrodynamique de celui-ci. Enfin, il est important de garder un œil sur la structure et de vérifier régulièrement son intégrité.

| Acteurs                           | Biobamb   | Département   | CNRS                             |
|-----------------------------------|---|---|----------------------------------|
| <b>Aspect sédimentologique</b>    | -Suivi granulométrique<br>-Exploitation des données topographiques et bathymétriques                                    | -Relevé topographique par drone<br>-Commande des relevés bathymétriques | -Etude granulométrique           |
| <b>Aspect houle et submersion</b> | -Relevées de houles et analyses<br>-Limites de submersion<br>-Impact des submersions sur la RD                          |   |                                  |
| <b>Autres aspects</b>             | -Analyse de la colonisation du récif par la biodiversité<br>-Observations visuelles régulières de la pérennité du récif |   | Etude des herbiers de Cymodocées |

Figure 36 tableau récapitulatif des interventions des différents acteurs pour le suivi de l'expérimentation

### 4.3 Premières analyses des données disponibles

Cela fait maintenant quelques mois que le récif en bambou est installé et fonctionne. Le suivi a donc débuté et des relevés bathymétriques et topographiques ont été réalisés. Cependant, les premiers résultats que possède Biobamb ne permettent pas de valider l'efficacité du dispositif car cela fait trop peu de temps que le test est en cours. Ce qui suit n'a donc pas vocation à dire si le dispositif est efficace mais plutôt observer l'évolution du site et d'estimer si les données sont plutôt encourageantes ou non, l'influence du récif étant encore trop peu visible.

Concentrons-nous tout d'abord sur la bathymétrie. Un relevé a été effectué le 23 septembre 2017 pour servir de base de travail, de situation initiale. Un deuxième relevé a été effectué le 11 février 2018 et un troisième le 12 mai 2018. On peut ainsi comparer les différentes bathymétries pour observer l'évolution des fonds, en particulier entre le récif et la plage.

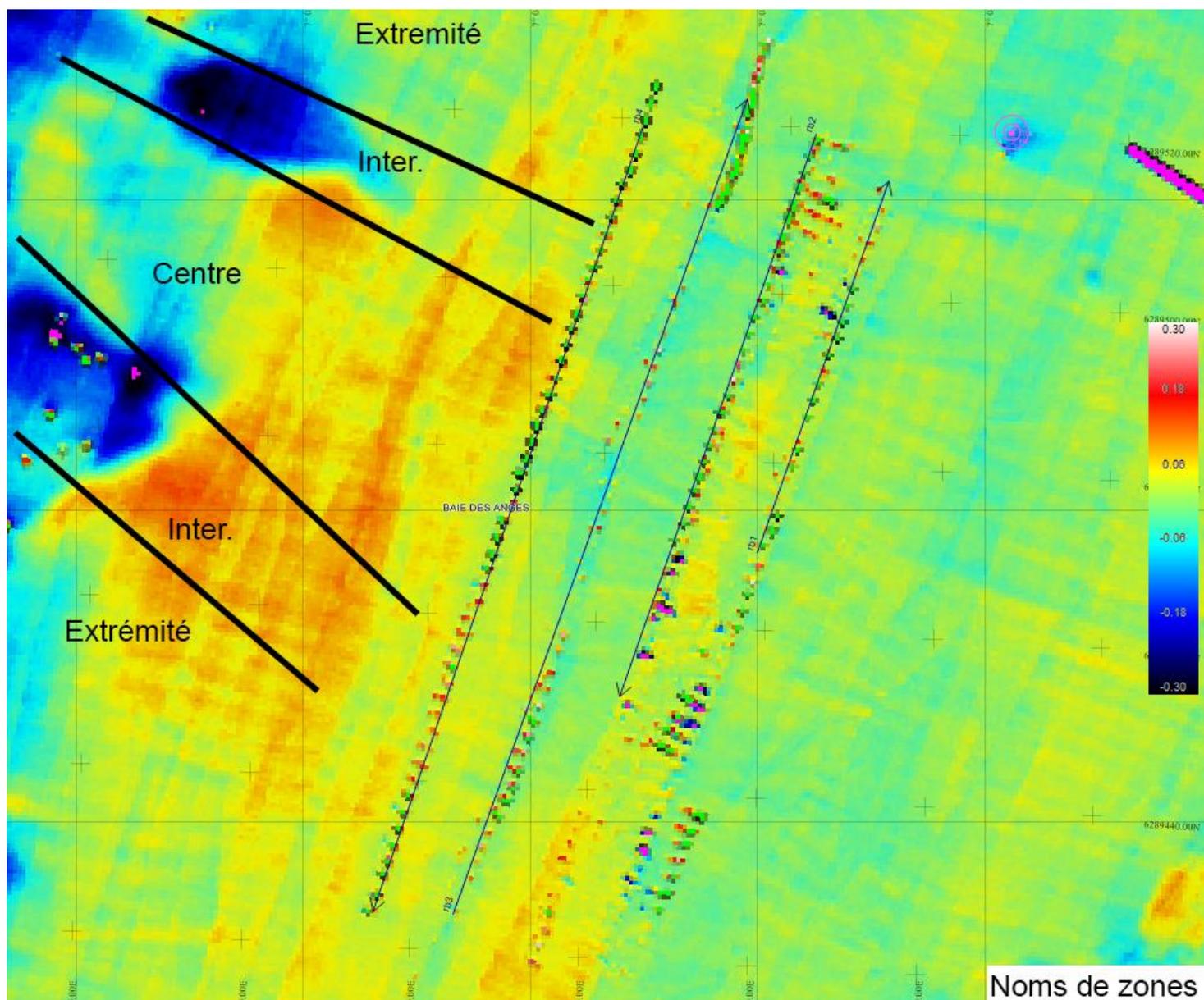


Figure 37 Comparaison bathymétrique entre les relevés de septembre 2017 et mai 2018

Si l'on compare les relevés de septembre et de mai, on remarque que la partie en pied de plage s'est effectivement érodé sous l'effet des coups de mer successifs notamment sur les extrémités alors que la partie centrale face au récif a été plus épargnée. On peut également observer une zone de dépôt plus au large dans la zone à l'aval du récif. Ce dépôt a l'air plus marqué au Sud qu'au Nord. Cette première

comparaison semble montrer le phénomène de transport dans le profil saisonnier évoqué en première partie du rapport. Malgré tout, ce n'est qu'une hypothèse puisqu'il nous est impossible de vérifier la provenance du sable déposé devant les bambous. Si l'on se place dans le cadre de cette hypothèse, ce résultat est donc plutôt encourageant puisque la partie centrale face aux bambous semble plus abritée des houles que les zones latérales.

Une nouvelle hypothèse apparaît lorsque l'on revient sur le dépôt plus important au Sud qu'au Nord ; ces sédiments ne pourraient-ils pas venir du Sud ? Une étude des houles de la région durant la période permet d'éprouver cette dernière hypothèse. En effet, les données de houles postées par CANDHIS et DYFAMED au cours de la période entre septembre 2017 et mai 2018 peuvent nous indiquer les houles majoritaires dans la région. La bouée CANDHIS étant directionnelle, nous pouvons donc évaluer la proportion de houle de Sud est en comparaison aux houles d'Est ou Nord-Est. Sur la période du 1 janvier 2018 au 1 mai 2018, 50% des houles mesurées provenaient du Sud ou du Sud-Est. Les périodes élevées favorisent le transport de sédiment et la moyenne des périodes des houles de Sud sur la période est d'environ 6.5 secondes. Ces informations sont intéressantes mais ne permettent pas à elles seules d'invalider ou de valider l'hypothèse d'une arrivée de sédiments depuis le Sud.

Des relevés topographiques ont également été réalisés tous les mois depuis février grâce à l'équipe Drone du département. Ces relevés nous donnent des indications sur l'évolution de la forme de la plage et sur l'évolution de son stock sédimentaire non immergé. On peut observer sur ces données que le profil de la plage a changé entre février et mai 2018. Les sédiments fins comme les sables ont pu être transportés par le vent pour donner sa nouvelle forme à la plage. L'influence humaine peut également être à l'origine de ce changement. Si l'on se penche sur le stock sédimentaire de la plage, celui-ci n'a pas beaucoup changé. Malheureusement, les relevés topographiques (et bathymétriques) dont nous disposons ne permettent pas de situer une ligne de rivage. En effet, les mesures sont « brouillées » par le déferlement des vagues et leurs run-up au moment de la mesure.

Il est tout de même possible de tracer un profil topo/bathymétrique partant de la plage et allant jusqu'aux bambous. Ce profil en page suivante, nous permet de remarquer que les premiers mètres de plage immergés ont évolué (entre 0 et 5 mètres de profondeur). On remarque qu'entre septembre 2017 et février 2018, la zone a été creusée. Cependant, entre février et mai 2018, certains trous se sont comblés, marqueurs d'un dépôt sédimentaire. Cette observation est également visible pour des profils plus au Nord et plus au Sud (voir annexe).

A partir des données numériques, il a été possible de déterminer ces variations en termes de volume sédimentaire. Nous avons également trouvé intéressant de faire le calcul par zone de profondeur : une zone entre plage et bambou, une zone correspondante à l'emprise des bambous et enfin la zone au large des bambous. Les calculs ont été fait grâce à un programme Scilab que vous pouvez retrouver en annexe. Les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2. On peut constater que depuis septembre 2017, la zone comprise entre la plage et les bambous (0 à 5.3 mètres de profondeur) a vu son stock sédimentaire augmenter. Au contraire les deux autres zones ont été érodées sur cette période.

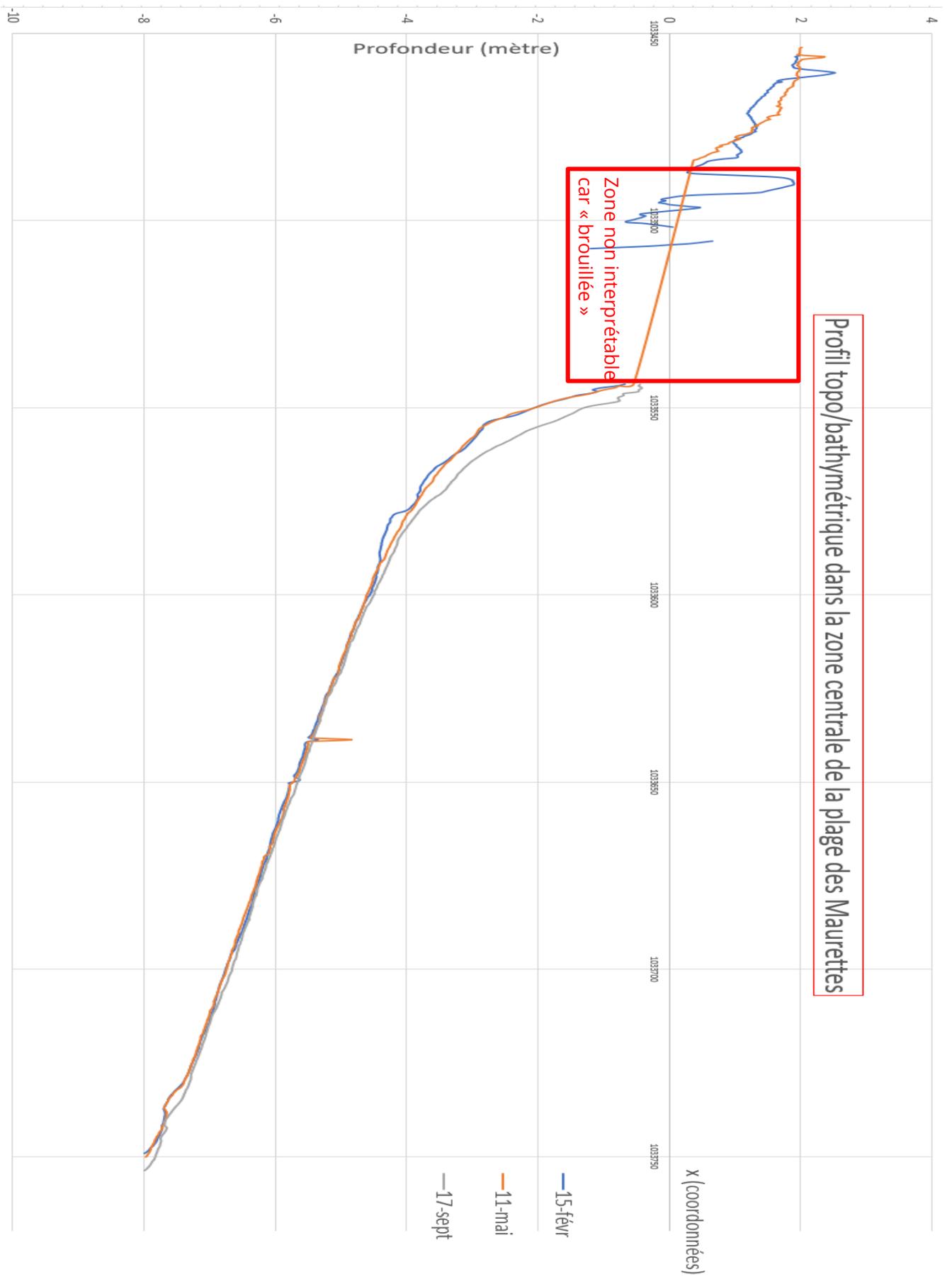


Figure 38 Profil topo/bathymétrique comparatif de la plage des Maurettes

Si l'on se concentre sur la période entre février et mai, il ressort que la zone au large des bambous s'est assez fortement rechargée. C'est d'autant plus surprenant que les tempêtes ont encore été fréquentes durant cette période ; nous avons recensé 16 tempêtes avec des houles avec des hauteurs de plus de 1.5 mètres. Ce recensement a été réalisé à l'aide des données CANDHIS, grâce à une macro excel que vous trouverez en annexe. L'implantation du récif semble donc avoir une influence sur cette zone puisque la tendance s'est inversée sans changement de régime climatique.

Il sera très intéressant de poursuivre les relevés bathymétriques pour voir comment se comporte cette zone. Ces sédiments qui auparavant devait être emporté par les courants littoraux, peuvent-ils servir de réserve, remontant vers la plage durant l'été ? Si oui, cet apport nouveau permettra-t-il d'équilibrer les apports et pertes sédimentaires de la plage ? Autant de questions dont il faudra chercher des réponses durant les deux années et demi de suivi qu'il reste.

**Tableau 1 Récapitulatif de l'évolution des stocks sédimentaires entre septembre 2017 et février, mai 2018**

|                | 11 février 2018      |                       |                        | 12 mai 2018          |                     |                      |
|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Profondeur (m) | 0 à 5.3              | 5.3 à 6.3             | 6.3 à 15               | 0 à 5.3              | 5.3 à 6.3           | 6.3 à 15             |
| 21 Sept 2017   | +1268 m <sup>3</sup> | -365.5 m <sup>3</sup> | -3757.5 m <sup>3</sup> | +1499 m <sup>3</sup> | -433 m <sup>3</sup> | -2493 m <sup>3</sup> |

**Tableau 2 Récapitulatif de l'évolution des stocks sédimentaires entre février et mai 2018**

|                 | 12 mai 2018         |                      |                        |
|-----------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| Profondeur (m)  | 0 à 5.3             | 5.3 à 6.3            | 6.3 à 15               |
| 11 février 2018 | +231 m <sup>3</sup> | -67.5 m <sup>3</sup> | +1264.5 m <sup>3</sup> |

**Tableau 3 Tableau récapitulatif du recensement des tempêtes entre février et mai 2018**

| Numéro Tempête | Date de fin  | Date de début | Moyenne H1/3 | Min H1/3 | Max H1/3 | Nombre de mesures | période moyenne | orientation |
|----------------|--------------|---------------|--------------|----------|----------|-------------------|-----------------|-------------|
| 1              | 02 Mai 07TU  | 02 Mai 02TU   | 1,66         | 1,6      | 1,7      | 5                 |                 | 5 S         |
| 2              | 30 Avr 19TU  | 29 Avr 23TU   | 1,752380952  | 1,6      | 2,2      | 21                | 6,545454545     | S           |
| 3              | 12 Avr 08TU  | 12 Avr 00TU   | 1,7125       | 1,6      | 2        | 8                 | 6,375           | S           |
| 4              | 11 Avr 23TU  | 11 Avr 04TU   | 1,994736842  | 1,6      | 2,3      | 19                |                 | 5 E-NE      |
| 5              | 08 Avr 15TU  | 07 Avr 23TU   | 2,09375      | 1,7      | 2,5      | 16                | 5,391304348     | E-SE        |
| 6              | 25 Mars 05TU | 24 Mars 23TU  | 1,733333333  | 1,6      | 1,9      | 6                 | 5,333333333     | E-SE        |
| 7              | 22 Mars 09TU | 20 Mars 08TU  | 2,391836735  | 1,7      | 3,4      | 49                | 5,959183673     | E           |
| 8              | 18 Mars 22TU | 18 Mars 16TU  | 1,75         | 1,6      | 1,9      | 6                 |                 | 9 S         |
| 9              | 17 Mars 18TU | 17 Mars 14TU  | 2            | 1,7      | 2,2      | 4                 | 5,111111111     | Inconnue    |
| 10             | 15 Mars 22TU | 15 Mars 12TU  | 1,81         | 1,6      | 2,1      | 10                | 5,909090909     | Inconnue    |
| 11             | 13 Mars 15TU | 11 Mars 10TU  | 2,416981132  | 1,6      | 3,3      | 53                | 6,698412698     | Inconnue    |
| 12             | 08 Mars 08TU | 08 Mars 00TU  | 2,055555556  | 1,6      | 2,5      | 9                 | 6,111111111     | Inconnue    |
| 13             | 05 Mars 10TU | 04 Mars 22TU  | 1,958333333  | 1,7      | 2,2      | 12                | 5,083333333     | S           |
| 14             | 03 Mars 18TU | 28 Fev 08TU   | 2,8          | 1,6      | 4,1      | 80                | 6,566666667     | E           |
| 15             | 27 Fev 06TU  | 24 Fev 11TU   | 2,234375     | 1,6      | 3,5      | 64                | 5,515625        | E           |
| 16             | 24 Fev 01TU  | 20 Fev 23TU   | 2,180555556  | 1,7      | 2,9      | 72                | 5,675675676     | E           |

**Tableau 4 tableau synthèse sur les tempêtes entre février et mai 2018**

| Nombre de tempêtes | Moyenne H1/3 (m) | Nombre de mesure moyen par tempête | Durée moyenne des tempêtes (h) |
|--------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 16                 | 2.03             | 27.125                             | 13.5                           |

En ce qui concerne la seule topographie de la plage, on peut constater qu'elle est différente entre le Nord et le Sud. En effet, au Nord la pente présente une pente assez régulière et n'a pas énormément changée, alors qu'au Sud une sorte de plateau semble s'être formé. Cette nouvelle forme de plage s'est établie après la mise en place des bambous, il est donc possible de supposer que le récif a influencé la forme de la plage. Cependant, cette influence est à relativiser puisqu'en terme de volume de sédiments, il n'y a pas eu de franc changement (-40 mètres cubes entre février et juin 2018).

Certes, l'ensemble de ces données ne nous permet pas de mesurer directement l'efficacité du système, mais l'influence de l'atténuateur de houle, bien que peu visible, semble être bénéfique à la plage. On observe un dépôt (certes pas très important mais présent) de sédiments même en période de tempête et le caractère « protégée » de la plage semble transparaître dans la bathymétrie. Les premières données récoltées lors du suivi nous permettent donc d'être optimiste quant à la suite de l'expérimentation. Malgré tout, la poursuite d'un suivi rigoureux et essentiel pour valider l'efficacité du récif et pour pouvoir justifier et argumenter pour une utilisation du dispositif dans d'autres baies.

A partir de ces résultats et de ceux des essais en canal à houle, Biobamb souhaite ajouter de nouvelles haies entre celles déjà présentes. L'objectif serait d'augmenter les performances du récif pour que ses effets soient plus rapides et plus importants. L'ajout de haies permettrait ainsi d'observer plus efficacement les effets du récif et ainsi de pouvoir interpréter plus facilement les données des futurs relevés, bathymétriques notamment.

Des calculs théoriques ont montré que l'espace entre deux haies déjà installées était largement suffisamment pour accueillir une nouvelle haie sans risque de chocs. En effet, même dans le cas d'une oscillation en opposition de deux haies consécutives, l'inclinaison des deux haies n'entraîne un rapprochement que de 3.8 mètres. Un écartement de 5 mètres suffit donc entre deux haies.

#### **4.4 Critique du suivi :**

Comme il est souligné plus haut, le suivi est essentiel pour la validation du dispositif. La rigueur du suivi l'est tout autant pour l'image du dispositif et sa reproductibilité.

Afin d'atteindre cette rigueur, une communication entre les différents acteurs est indispensable. Malheureusement, des efforts en ce sens me semblent encore nécessaires pour que les données soient transmises dès que disponibles aux services compétents du département, du CNRS ou de Biobamb. Cette observation est notamment visible par le temps qu'il a fallu attendre avant que Biobamb ne reçoivent les données des premiers relevés topographiques : au mois de juillet les données des 6 premiers relevés (un par mois depuis janvier 2018) ont été envoyés. Des échanges plus réguliers me semblent donc importants à engager.

Sur le plan technique, les relevés bathymétriques et topographiques sont très rigoureux et précis. Le traitement de ces données en est allongé (environ 7 heures de calcul pour l'estimation d'une différence de volume du tableau 1) mais la multiplicité des mesures permet de limiter les erreurs et les approximations. Un complément intéressant aurait été d'utiliser une plage plus au Sud comme témoin, ce qui aurait permis d'identifier les variations sédimentaires « saisonnières ».

Sur le plan biologique, peu d'informations ont été collectées. En effet, des observations sur site montre que des espèces végétales se sont développées sur les bambous. L'identification des différentes espèces présentes peut peut-être donner des indices sur le régime hydrodynamique qui règne dans le secteur des bambous. Dans le même but, un inventaire des espèces animales peut être réalisé puisque des moules sont apparues sur les bambous, que des pieuvres s'installent au pied de ceux-ci... Ces observations sont d'autant plus remarquables que la zone était considérée comme très pauvre biologiquement avant le projet et que ces espèces fixées sur les bambous peuvent influencer sa rugosité et donc son efficacité à amortir la houle.

Il est également observable un pré-déferlement au niveau du récif lorsque la houle est suffisamment haute. Ce phénomène est très important pour la compréhension du fonctionnement du dispositif en site naturel. L'ajout de nouvelles haies devraient accroître le phénomène. De plus, l'ajout de haies devrait

également augmenter l'atténuation de la houle ; il pourrait alors devenir intéressant de faire des mesures de houles directement sur le site. L'amortissement présumé devrait devenir assez important pour outrepasser les erreurs d'imprécisions des bouées.

Pour terminer, quelques pépins ont eu lieu durant les premiers mois d'expérimentation. Une dizaine d'ancre se sont exhumées sous l'action des à-coups de la houle et quelques cannes transversales se sont cassées. En ce qui concerne l'ancrage, cela est certainement dû à une fragilité locale des sédiments liée à une mauvaise mise en place ; en effet le problème est apparu de manière disparate dans les différentes haies et non dans une zone définie. Pour les cannes transversales, il pourrait être intéressant de faire un inventaire précis de la casse et si possible, de localiser la rupture sur le bambou pour identifier ce qui aurait pu le briser (choc, torsion, simple sortie du collier de serrage).

Pour conclure, le suivi est bien lancé. Des détails peuvent être améliorés mais globalement il semble efficace. Il faudra cependant rester attentif à l'évolution du site et du dispositif pour pouvoir adapter et compléter le suivi en cas de besoin.

# Conclusion :

---

Dans ce rapport, nous avons vu que les phénomènes marins sont nombreux et complexes. Encore aujourd'hui, certains mystères subsistent dans la compréhension de l'ensemble de ces phénomènes et de leur gestion par l'homme. C'est pourquoi l'innovation est si importante dans le domaine littoral. Les risques de submersions marines ne vont cesser de croître avec la fonte des glaciers et l'élévation du niveau de la mer, il est donc essentiel de continuer à développer des systèmes de protection efficace.

L'atténuateur de houle en bambou imaginé par Mr Farnole tente de répondre à cette attente tout en étant respectueux de l'environnement. Notre littoral est pourvu d'innombrables aménagements de protection en béton ou en enrochements destructeurs du paysage et qui peuvent eux-mêmes conduire à des problèmes sédimentologiques. Il est donc primordial de se tourner vers des solutions plus responsables et plus efficaces sur la durée.

A partir d'une base solide d'essai en canal à houle, le dispositif en bambou a donc été installé au large de la plage des Maurettes. Les premiers retours ne nous permettent pas encore de juger de son efficacité mais l'analyse des données déjà disponibles donne bon espoir pour la suite de l'expérimentation. Pour ce qui est de l'aspect écologique, le récif a déjà atteint un stade satisfaisant en offrant un habitat à différentes espèces dans un lieu qui auparavant était très pauvre en biodiversité.

Le suivi va donc se poursuivre et croisons les doigts pour que les résultats soient au rendez-vous. D'ici printemps 2019, il sera certainement possible de se faire une idée de l'efficacité de la protection de l'atténuateur vis-à-vis du risque de submersion de la route départementale.

Quoi qu'il en soit, la diversité des projets innovants et originaux comme celui que nous venons d'étudier donne bon espoir quant à la découverte de solutions de protections littorales modernes. Cette diversité permettra d'adapter la solution à chaque site tout en préservant les paysages magnifiques que nous offre les côtes françaises et du monde entier.



Figure 39 Photographie du littoral près de Beaulieu sur mer (06)

# Sources

---

- 1/ Farnole, Pierre, Eve Ageorges, Julie Lebunetel, Gaële Perret, Jérôme Brossard, et Dominique Bordes Süe. « 2D PHYSICAL STUDY OF A SUBMERGED COMB-SHAPED ARTIFICIAL REEF ». *Coastal Dynamics*, n° 063 (2013): 10.
- 2/ GOHREN, HARALD. «ALFRED FUHRBOTER Technical University of Braunschweig », s. d., 3186.
- 3/ Jean, BLANC. « AMENAGEMENT ET PROTECTION », s. d., 204.
- 4/ « Caractéristique mécaniques du Bambou | Bambou Science et Innovation ». Consulté le 20 juin 2018. <http://www.bambouscience.fr/2011/06/24/caracteristiques-mecaniques-du-bambou/>.
- 5/ « CORR\_98000\_Global\_hm0\_tp.pdf ». Consulté le 21 juin 2018. [http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/publications/98000/CORR\\_98000\\_Global\\_hm0\\_tp.pdf](http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/publications/98000/CORR_98000_Global_hm0_tp.pdf).
- 6/ « DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads », 2007, 122.
- 7/ Arnaud, Gwendoline, Damien Sous, Julien Touboul, Fabrice Gouaud, et Vincent Rey. « Ecoulements stationnaires ou oscillants à travers un milieu poreux : effets de la surface spécifique », 21-30. Editions Paralia, 2014. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.003>.
- 8/ Lagrée, Pierre-Yves. « Erosion and Sedimentation of a Bump in Fluvial Flow ». *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIB - Mechanics* 328, n° 12 (décembre 2000): 869-74. [https://doi.org/10.1016/S1620-7742\(00\)01269-1](https://doi.org/10.1016/S1620-7742(00)01269-1).
- 9/ Sliti, Moncef, et Claude Viguiet. « Etude " in situ " du fonctionnement des brise-lames de protection du littoral sud du petit golfe de Tunis (Tunisie) ». *La Houille Blanche*, n° 5 (août 1992): 349-60. <https://doi.org/10.1051/lhb/1992032>.
- 10/ Arnaud, Gwendoline. « Houle à la côte: propagation, impacts et ouvrages innovants », s. d., 164.
- 11/ Farnole, Pierre, et Julie Lebunetel. « Les digues sous-marines en géotextiles pour la protection des plages : avantages et inconvénients », 45-48. Editions Paralia, 2011. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2011.010>.
- 12/ Francois, Sabatier, Marcel J. F. Stive, et Frederic Pons. « LONGSHORE VARIATION OF DEPTH OF CLOSURE ON A MICRO-TIDAL WAVE-DOMINATED COAST », 2327-39. World Scientific Publishing Company, 2005. [https://doi.org/10.1142/9789812701916\\_0187](https://doi.org/10.1142/9789812701916_0187).
- 13/ Martinez, Fabrice. « Modélisation physique Julie Lebunetel et Orens de Fommervault », s. d., 98.
- 14/ BLANC, JEAN JI. « RECHERCHES DE GEOLOGIE SEDIMENTAIRE SUR LES HERBIERS APOSIDONIES DU LITTORAL DE LA PROVENCE », s. d., 229.
- 15/ Sanchez, Martin, et Christophe Chevalier. « Séparation des houles incidente et réfléchiée en canal à houle grâce à l'étude des niveaux et des pentes de la surface libre en un point fixe », 51-60. Editions Paralia, 2000. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2000.006-S>.
- 16/ Kouakou, K. K.J., et P.-Y. Lagrée. « Stability of an Erodible Bed in Various Shear Flows ». *The European Physical Journal B* 47, n° 1 (septembre 2005): 115-25. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2005-00296-x>.

# Annexes

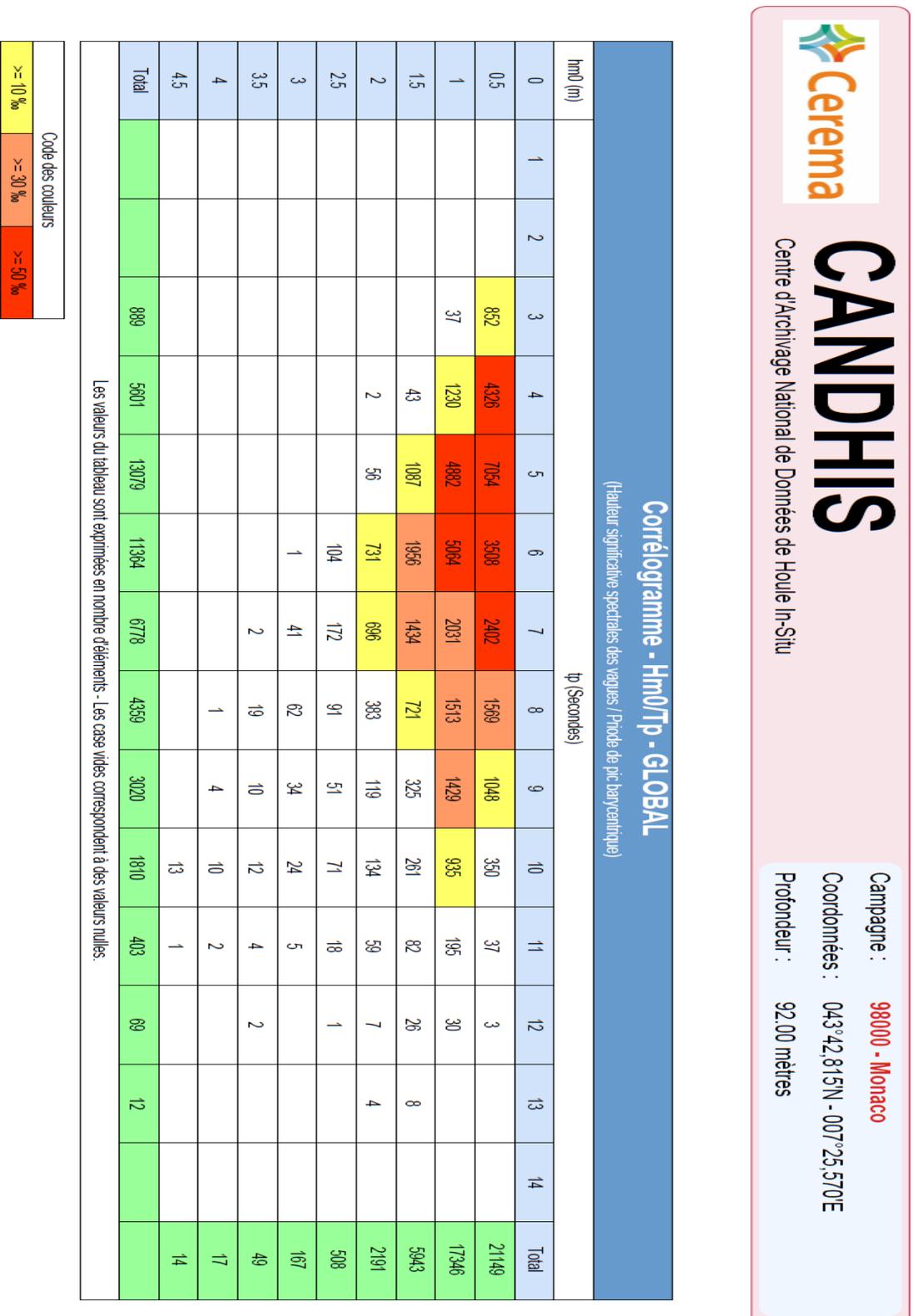


Figure 40 Corrélogramme Hm0/Tp de la bouée CANDHIS de Monaco donnant des données sur les houles les plus fréquentes

Table 3-1 Gravity wave theory

| Parameter                                 | Airy wave theory   |  | Stokes second-order wave theory   |
|---|--|--|---|
|   | General water depth  | Deep water   |   |
| Velocity potential, $\phi$                | $\frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$<br>= $\frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin \theta$ | $\frac{\pi H}{kT} e^{kz} \sin \theta$<br>= $\frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin \theta$ | $\phi + \frac{3}{8} \frac{\pi H}{kT} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)] \sin 2\theta}{\sinh^4(kd)}$<br>Note that in deep water the Stokes second-order wave potential is equal to the first order Airy wave potential.               |
| Phase velocity, celerity, $c$             | $\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$   | $gT/(2\pi)$  | $\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$  |
| Wavelength, $\lambda$                     | $cT$   | $gT^2/(2\pi)$  | $cT$  |
| Surface elevation, $\eta$                 | $\frac{H}{2} \cos \theta$  | $\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$   | $\eta + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta$  |
| Horizontal particle displacement, $\xi$   | $-\frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$   | $-\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$  | $\xi + \frac{H}{8} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^3(kd)} \left[ 1 - \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \right] \sin 2\theta$<br>+ $\frac{H}{4} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} (\alpha t)$ |
| Vertical particle displacement, $\zeta$   | $-\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$   | $\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$   | $\zeta + \frac{3H}{16} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$  |
| Horizontal particle velocity, $u$         | $\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$  | $\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$   | $u + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$  |
| Vertical particle velocity, $w$           | $\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$  | $\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$   | $w + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$  |
| Horizontal particle acceleration, $a$     | $\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$   | $\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin \theta$  | $\dot{u} + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$   |
| Vertical particle acceleration, $\dot{w}$ | $-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$  | $-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos \theta$   | $\dot{w} - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$   |
| Subsurface pressure, $p$                  | $-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \cos \theta$   | $-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H e^{kz} \cos \theta$                              | $p + \frac{3}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left[ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right] \cos 2\theta$<br>- $\frac{1}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \{ \cosh[2k(z+d)] - 1 \}$                              |
| Group velocity, $c_g$                     | $\frac{c}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$  | $\frac{c}{2}$  | $(c_g)$   |
| Average energy density, $E$               | $\frac{1}{8} \rho g H^2$   | $\frac{1}{8} \rho g H^2$   | $\frac{1}{8} \rho g H^2$  |
| Energy flux, $F$                          | $E c_g$  | $\frac{1}{2} E c$  | $E c_g$   |

Notation:  $d$  = mean water depth,  $g$  = acceleration of gravity,  $H$  = trough-to-crest wave height,  $k = 2\pi/\lambda$  = wave number,  $\lambda$  = wave length,  $T$  = wave period;  $t$  = time;  $x$  = distance of propagation;  $z$  = distance from mean free surface positive upward;  $\theta = kx - \omega t = k(x - ct)$ ;  $\omega = 2\pi/T$  = angular wave frequency. Subscript  $i$  denotes linear small-amplitude theory. (Continued) (Continued) (Continued)

Figure 41 Formulaire lié au modèle d'Airy tiré du RP-C205

| Secteur         | Nb d'observations | Nombre de jours fermeture | % d'observations | % de fermeture |
|-----------------|-------------------|---------------------------|------------------|----------------|
| [15°N à 45°N[   | 219               | 32                        | 20,9             | 3,1            |
| [45°N à 75°N[   | 353               | 153                       | 33,7             | 14,6           |
| [75°N à 105°N[  | 34                | 6                         | 3,2              | 0,6            |
| [105°N à 135°N[ | 0                 | 0                         | 0,0              | 0,0            |
| [135°N à 165°N[ | 0                 | 0                         | 0,0              | 0,0            |
| [165°N à 195°N[ | 15                | 8                         | 1,4              | 0,8            |
| [195°N à 225°N[ | 103               | 12                        | 9,8              | 1,1            |
| [225°N à 255°N[ | 282               | 0                         | 26,9             | 0,0            |
| [255°N à 285°N[ | 41                | 0                         | 3,9              | 0,0            |
| Total           | 1047              | 211                       | 100.0            | 20.2           |

Figure 42 Tableau de recensement des périodes de fermeture de la RD6098 entre 1993 et 2008 (Source : Biobamb)

| Hauteurs significatives Hs (m) de projet |                   |       |        |        |        |         |
|--|-------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Secteur d'intérêt                        | Période de retour |       |        |        |        |         |
|  | 1 an              | 5 ans | 10 ans | 20 ans | 50 ans | 100 ans |
| N70°-N90°                                | 2,9               | 3,5   | 3,8    | 4,1    | 4,5    | 4,8     |
| N90°-N120°                               | 3                 | 3,7   | 3,9    | 4,2    | 4,5    | 4,8     |
| N120°-N140°                              | 1,2               | 1,7   | 2      | 2,5    | 2,5    | 2,7     |
| N140°-N160°                              | 0,9               | 1,5   | 1,8    | 2,1    | 2,4    | 2,7     |
| N160°-N180°                              | 2                 | 2,6   | 2,9    | 3,2    | 3,5    | 3,8     |
| N180°-N210°                              | 3,1               | 3,9   | 4,3    | 4,6    | 5,1    | 5,4     |
| N210°-N230°                              | 2,5               | 3,4   | 3,7    | 4,1    | 4,6    | 5       |
| N230°-N250°                              | 1,2               | 1,4   | 1,5    | 1,6    | 1,8    | 1,9     |

| Périodes pic associées aux hauteurs significatives de projet |                   |         |          |          |          |          |
|--|-------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Secteur d'intérêt  | Période de retour |         |          |          |          |          |
|  | 1 an              | 5 ans   | 10 ans   | 20 ans   | 50 ans   | 100 ans  |
| N70°-N90°  | 6 à 7s            | 6 à 8s  | 7 à 9s   | 7 à 9s   | 7 à 10s  | 8 à 10s  |
| N90°-N120°   | 7 à 9s            | 7 à 10s | 8 à 10s  | 8 à 10s  | 9 à 10s  | 9 à 11s  |
| N120°-N140°  | 4 à 6s            | 5 à 7s  | 5 à 7s   | 5 à 7s   | 6 à 7s   | 6 à 7s   |
| N140°-N160°  | 3 à 5s            | 4 à 6s  | 5 à 7s   | 5 à 7s   | 6 à 8s   | 6 à 8s   |
| N160°-N180°  | 5 à 11s           | 7 à 10s | 7 à 10s  | 7 à 10s  | 7 à 10s  | 7 à 10s  |
| N180°-N210°  | 7 à 13s           | 8 à 12s | 10 à 12s | 10 à 11s | 10 à 11s | 10 à 11s |
| N210°-N230°  | 7 à 13s           | 9 à 12s | 10 à 12s | 10 à 12s | 10 à 11s | 10 à 11s |
| N230°-N250°  | 3 à 6s            | 4 à 6s  | 4 à 6s   | 4 à 6s   | 4 à 6s   | 4 à 6s   |

Figure 43 Tableau récapitulatif des données de houles utiles pour l'étude du projet (Source: Biobamb)

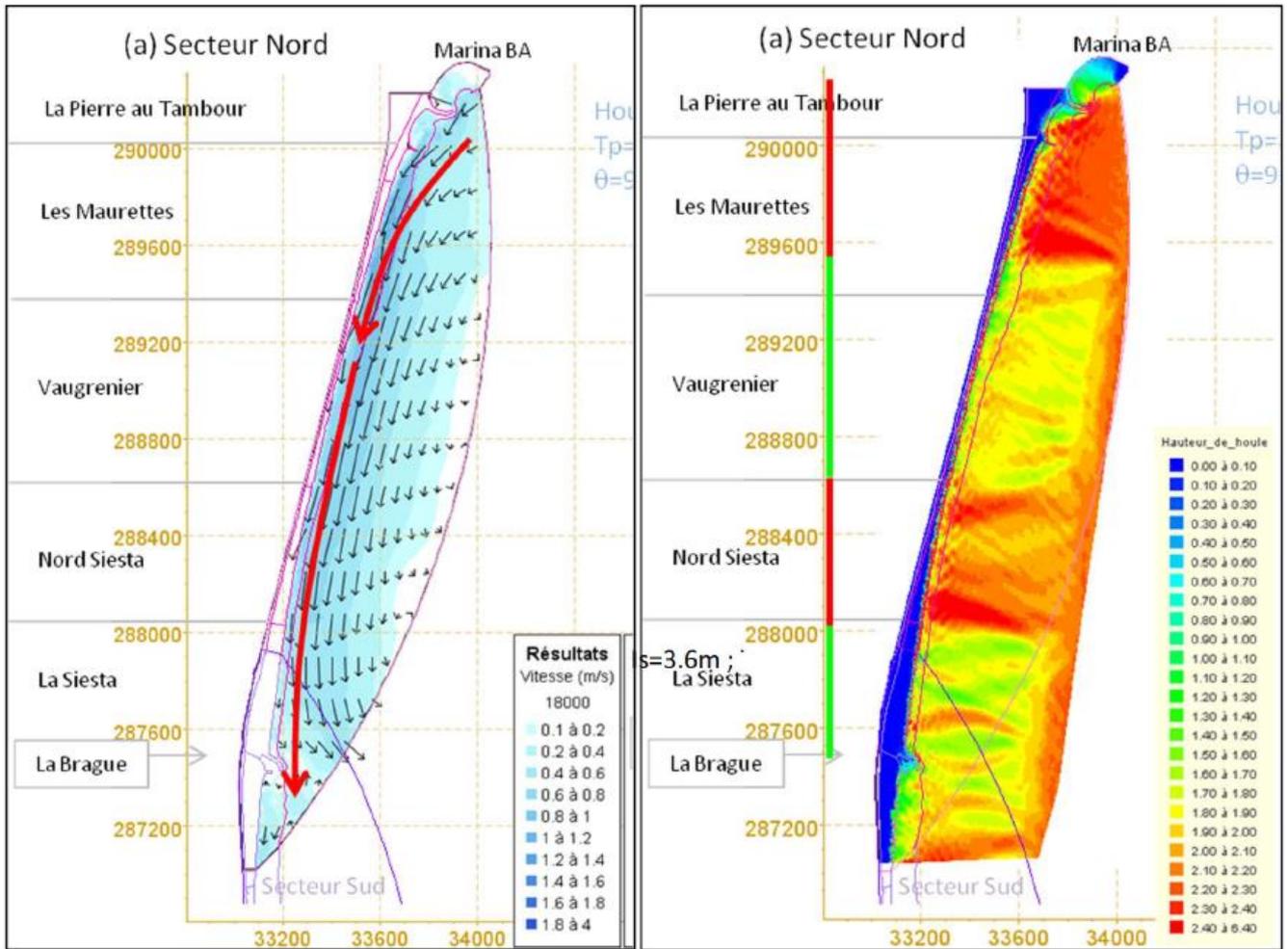


Figure 2-10 : Agitation et courants sur le secteur Nord Villeneuve-Loubet (Houle annuelle Est-Hs=3m-Tp=8s)

Figure 44 Résultats de modélisation numérique des courants et des houles arrivant dans la baie lorsqu'elle est soumise à une houle d'Est de période de retour T=1 an (Source : Biobamb)

| Date     | Config   | Test                 | Plage          | Commande batteur |        |        |          |         |         | Résultats amont |         |          |              | Résultats aval |      | Coefficients |      | Ct (%) |   |
|----------|----------|----------------------|----------------|------------------|--------|--------|----------|---------|---------|-----------------|---------|----------|--------------|----------------|------|--------------|------|--------|---|
|          |          |                      |                | h0 (m)           | Tp (s) | Hs (m) | T sr (h) | fe (Hz) | Hsl (m) | Hsr (m)         | Hst (m) | Hstr (m) | Cr amont (%) | Cr aval (%)    |      |              |      |        |   |
| 22/02/12 |          | Tests de calibration | Plage 1        | 5.0              | 9      | 1.0    | 1.28     | 3.55    | -       | -               | -       | -        | -            | -              | -    | -            | -    | -      | - |
|          |          |                      | Plage 1        | 5.0              | 9      | 1.0    | 1.28     | 3.55    | -       | -               | -       | -        | -            | -              | -    | -            | -    | -      | - |
|          |          |                      | Plage 1        | 5.0              | 9      | 1.0    | 1.28     | 3.55    | 0.12    | 0.04            | 0.11    | 0.03     | 24.0         | 30.0           | 24.0 | 30.0         | 94.8 |        |   |
| 24/02/12 |          |                      | Plage 1        | 5.0              | 9      | 1.0    | 1.28     | 3.55    | 0.99    | 0.26            | 0.95    | 0.26     | 26.0         | 28.0           | 26.0 | 28.0         | 95.7 |        |   |
|          |          |                      | Plage 1        | -                | -      | -      | -        | -       | -       | -               | -       | -        | -            | -              | -    | -            | -    | -      |   |
|          |          |                      | Plage 1        | -                | -      | -      | -        | -       | -       | -               | -       | -        | -            | -              | -    | -            | -    | -      |   |
| 27/02/12 | Config 1 |                      | N1-3mf-d5      | 5.0              | 5      | 0.8    | 5.69     | 1.60    | 0.62    | 0.10            | 0.56    | 0.07     | 15.6         | 12.0           | 15.6 | 12.0         | 89.7 |        |   |
|          |          |                      | N2-3mf-d5      | 5.0              | 9      | 1.0    | 10.24    | 1.78    | 0.99    | 0.33            | 0.94    | 0.29     | 33.3         | 30.9           | 33.3 | 30.9         | 95.2 |        |   |
|          |          |                      | N3-3mf-d5      | 5.0              | 7      | 1.0    | 7.96     | 1.14    | 0.99    | 0.17            | 0.94    | 0.17     | 16.7         | 18.0           | 16.7 | 18.0         | 95.1 |        |   |
|          |          |                      | N4-3mf-d5      | 5.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.99    | 0.21            | 0.94    | 0.22     | 21.7         | 23.6           | 21.7 | 23.6         | 95.8 |        |   |
|          |          |                      | N5-3mf-d5      | 5.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.93    | 0.21            | 0.92    | 0.24     | 22.0         | 26.4           | 22.0 | 26.4         | 98.1 |        |   |
| 29/02/12 |          |                      | N6-3mf-d4      | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.91    | 0.34            | 0.89    | 0.39     | 38.0         | 44.1           | 38.0 | 44.1         | 97.8 |        |   |
|          |          |                      | N7-3mf-d4      | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.73    | 0.08            | 0.70    | 0.06     | 11.5         | 9.1            | 11.5 | 9.1          | 95.4 |        |   |
|          |          |                      | N8-3mf-d4      | 4.0              | 9      | 1.0    | 10.24    | 1.78    | 0.71    | 0.17            | 0.67    | 0.24     | 23.2         | 35.6           | 23.2 | 35.6         | 93.2 |        |   |
|          |          |                      | N9-3mf-d4      | 4.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.88    | 0.18            | 0.85    | 0.16     | 20.0         | 18.9           | 20.0 | 18.9         | 96.1 |        |   |
|          |          |                      | N10-3mf-d4     | 4.0              | 7      | 1.0    | 7.96     | 1.14    | 0.96    | 0.08            | 0.91    | 0.07     | 8.0          | 8.1            | 8.0  | 8.1          | 95.5 |        |   |
| 01/03/12 |          |                      | N11-3mf-d4     | 4.0              | 7      | 1.5    | 1.00     | 4.57    | 1.40    | 0.17            | 1.31    | 0.15     | 12.1         | 11.5           | 12.1 | 11.5         | 93.8 |        |   |
|          |          |                      | N12-3mf-d4     | 4.0              | 7      | 2.0    | 1.00     | 4.57    | 1.58    | 0.22            | 1.49    | 0.18     | 14.0         | 12.1           | 14.0 | 12.1         | 94.3 |        |   |
|          |          |                      | N13-2mf-d4     | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.98    | 0.14            | 0.91    | 0.08     | 13.9         | 8.9            | 13.9 | 8.9          | 93.4 |        |   |
|          |          |                      | N14-2mf-d4     | 4.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.91    | 0.22            | 0.84    | 0.16     | 23.7         | 18.5           | 23.7 | 18.5         | 92.1 |        |   |
|          |          |                      | N15-3mm-d4     | 4.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.96    | 0.24            | 0.85    | 0.16     | 25.1         | 18.7           | 25.1 | 18.7         | 89.1 |        |   |
| 06/03/12 | Config 2 |                      | N16-3mm-d35    | 3.5              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.83    | 0.18            | 0.82    | 0.16     | 21.8         | 19.4           | 21.8 | 19.4         | 98.5 |        |   |
|          |          |                      | N17-3mm-d35    | 3.5              | 6      | 1.5    | 0.85     | 5.34    | 1.25    | 0.14            | 1.22    | 0.13     | 11.3         | 10.5           | 11.3 | 10.5         | 97.0 |        |   |
|          |          |                      | N18-3mm-d4     | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | -       | -               | -       | -        | -            | -              | -    | -            | -    |        |   |
| 07/03/12 | Config 3 |                      | N19-3mm-d2-d4  | 4.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.88    | 0.18            | 0.86    | 0.16     | 20.2         | 18.7           | 20.2 | 18.7         | 97.8 |        |   |
|          |          |                      | N20-3mm-d2-d35 | 3.5              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.65    | 0.14            | 0.63    | 0.12     | 21.6         | 18.6           | 21.6 | 18.6         | 96.4 |        |   |
|          |          |                      | N21-3mm-d2-d35 | 3.5              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.73    | 0.10            | 0.70    | 0.08     | 13.2         | 10.9           | 13.2 | 10.9         | 95.4 |        |   |
| 12/03/12 | Config 4 |                      | N22-3mm-d2-d4  | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.97    | 0.12            | 0.92    | 0.10     | 12.8         | 10.6           | 12.8 | 10.6         | 94.8 |        |   |
|          |          |                      | N23-3mf-d4     | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 1.00    | 0.12            | 0.91    | 0.10     | 12.4         | 10.5           | 12.4 | 10.5         | 91.1 |        |   |
|          |          |                      | N24-3mf-d4     | 4.0              | 6      | 1.0    | 6.83     | 1.33    | 0.89    | 0.18            | 0.84    | 0.16     | 20.3         | 18.8           | 20.3 | 18.8         | 94.7 |        |   |
| 19/03/12 | Config 1 |                      | N25-3mf-d4     | 4.0              | 8      | 1.0    | 9.10     | 2.00    | 0.74    | 0.08            | 0.70    | 0.06     | 10.4         | 8.6            | 10.4 | 8.6          | 95.1 |        |   |
| 20/03/12 |          |                      |                |                  |        |        |          |         |         |                 |         |          |              |                |      |              |      |        |   |

- ∅ Analyse SL
- Analyse SL partielle
- Tests de calibration

Figure 45 Récapitulatif des résultats obtenus lors des essais en canal à houle des récifs artificiels en bambou (Source : Biobamb)

Figure 6 : COEFFICIENT DE TRAINEE DE PRESSION D'UN CABLE

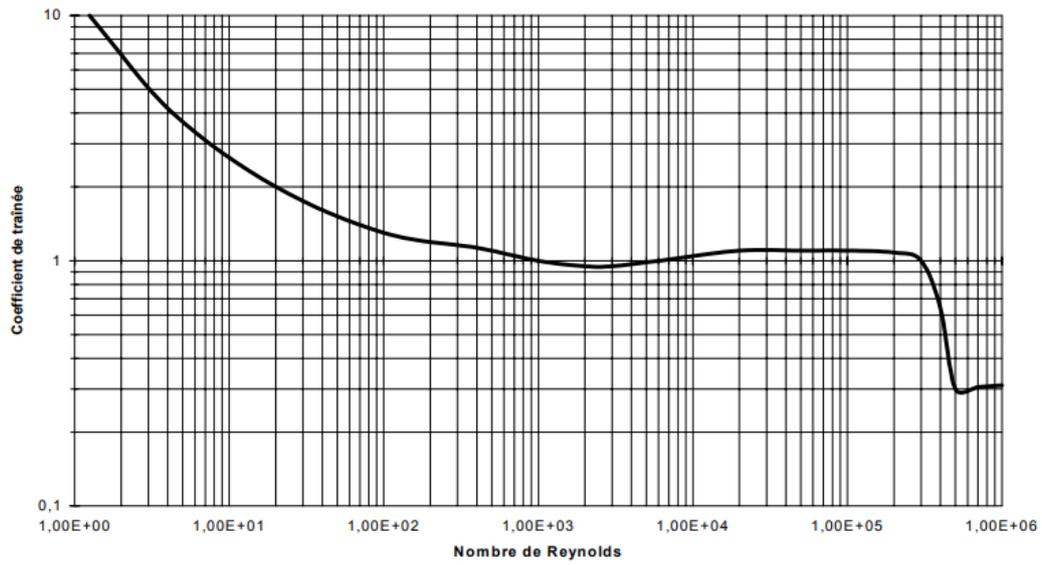
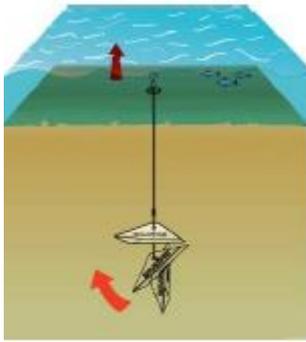
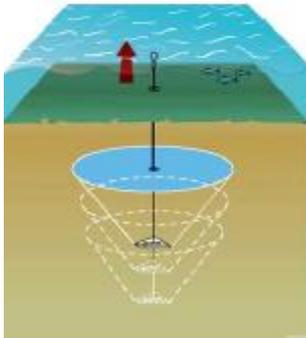
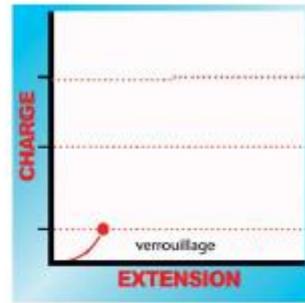


Figure 46 Graphique liant le nombre de Reynolds au coefficient de traînée (Source : Techniques de mouillages de J-P Girardot de l'université de Brest)



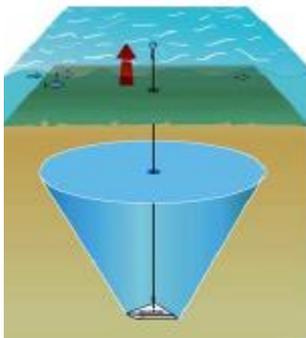
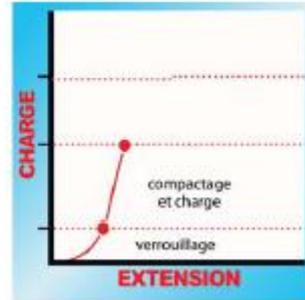
### VERROUILLAGE PAR TRACTION

Cette première représentation nous montre qu'en tirant sur l'ancre elle pivote et se bloque en remontant.



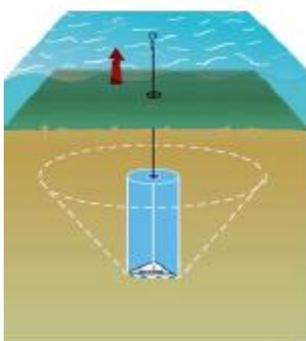
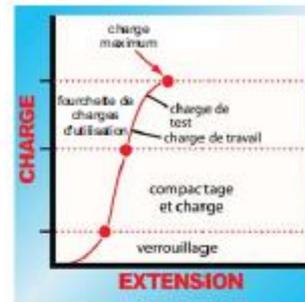
### COMPACTAGE ET MISE EN CHARGE

Cette deuxième représentation montre qu'en continuant à tirer sur l'ancre, le sol se compacte en créant une réelle résistance. A ce stade la charge augmente avec une faible remontée de l'ancre. La qualité du sol à une incidence sur la remontée ou pas de l'ancre.



### FOURCHETTE DE CHARGES D'UTILISATION

Cette troisième représentation montre le bon comportement de l'ancre dans sa phase de travail, sa phase de test et jusqu'à la dernière phase qu'il ne faut pas dépasser.



### ECHEC DE LA PORTANCE

Attention, en dépassant la charge maximum, la portance du sol ne sera plus suffisante, l'ancre remonte.

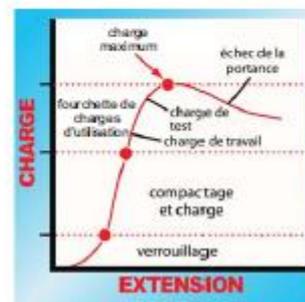


Figure 47 extrait d'une publicité de Platipus expliquant le fonctionnement de l'ancre

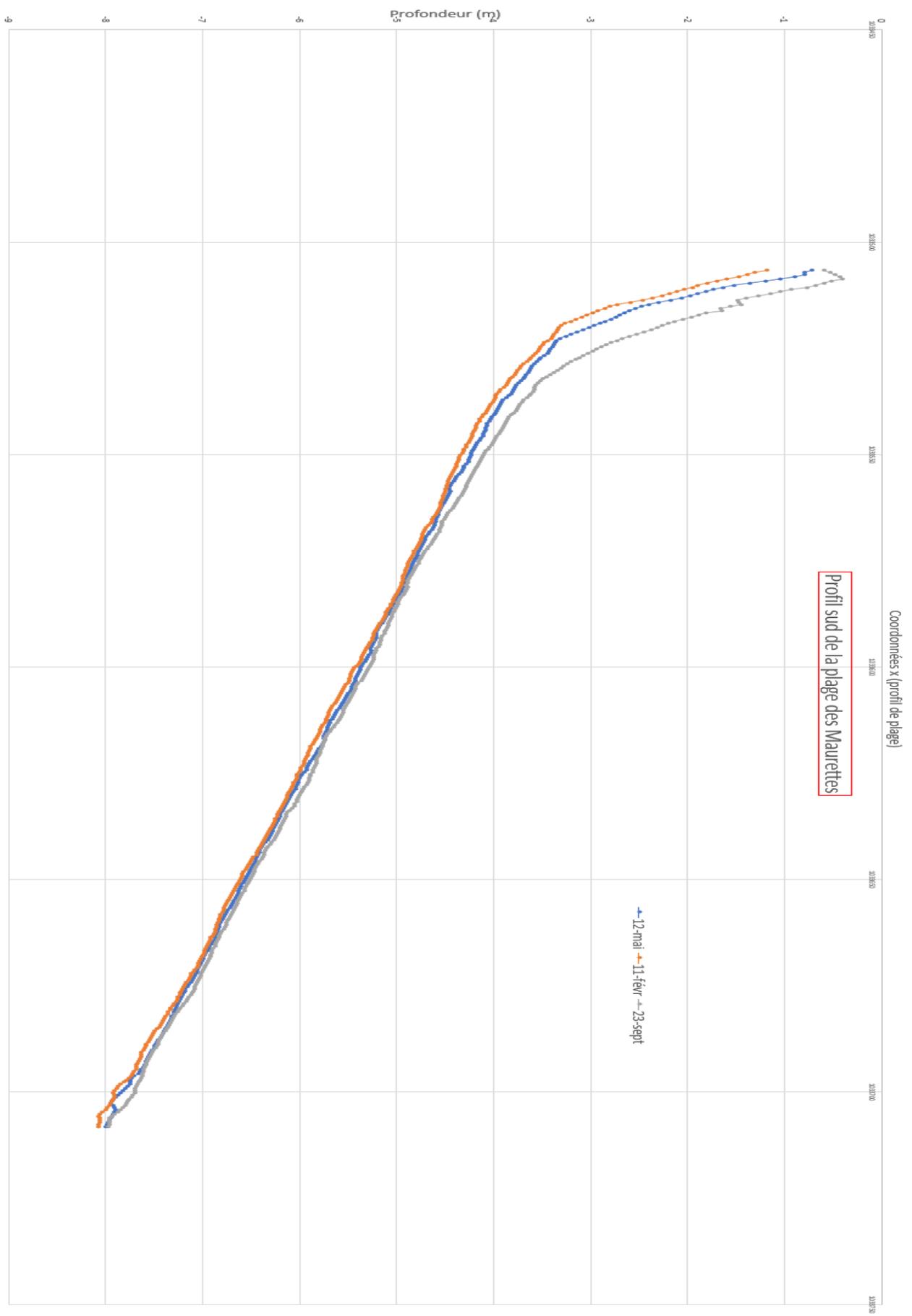


Figure 48 Profil bathymétrique comparatif du Sud de la plage des Maurettes

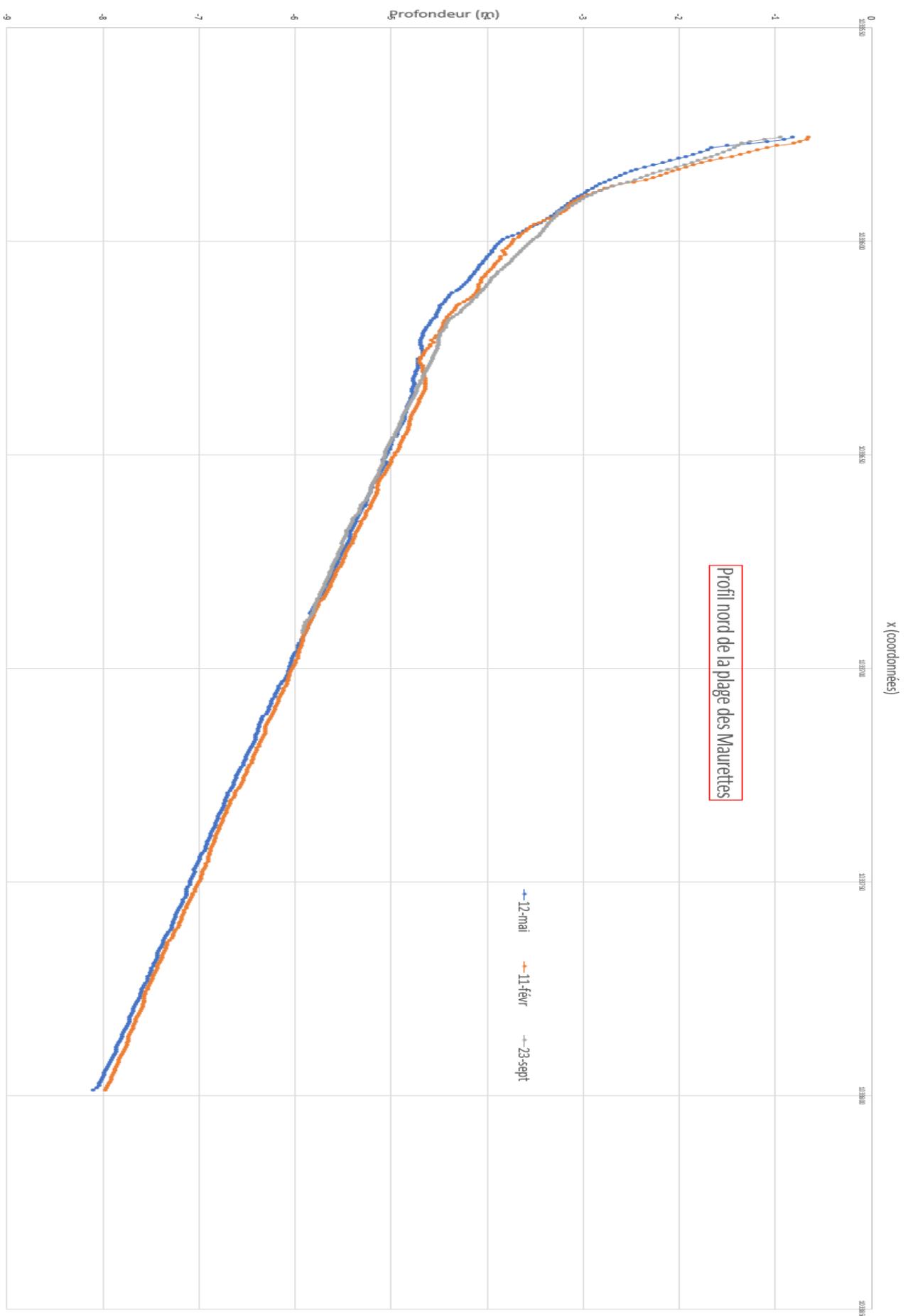


Figure 49 Profil bathymétrique comparatif du Nord de la plage des Maurettes

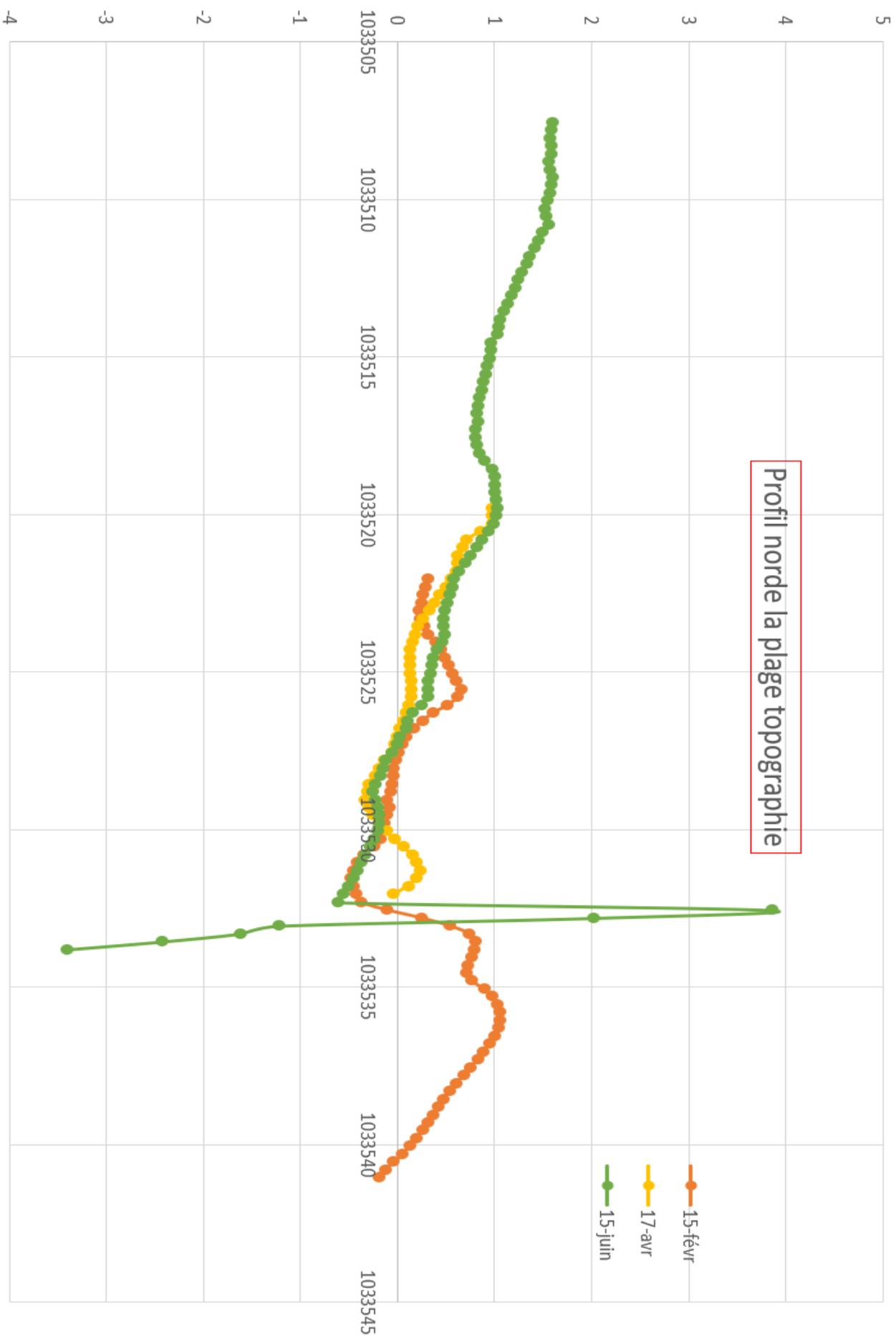


Figure 50 Profil topographique comparatif du Nord de la plage des Maurettes

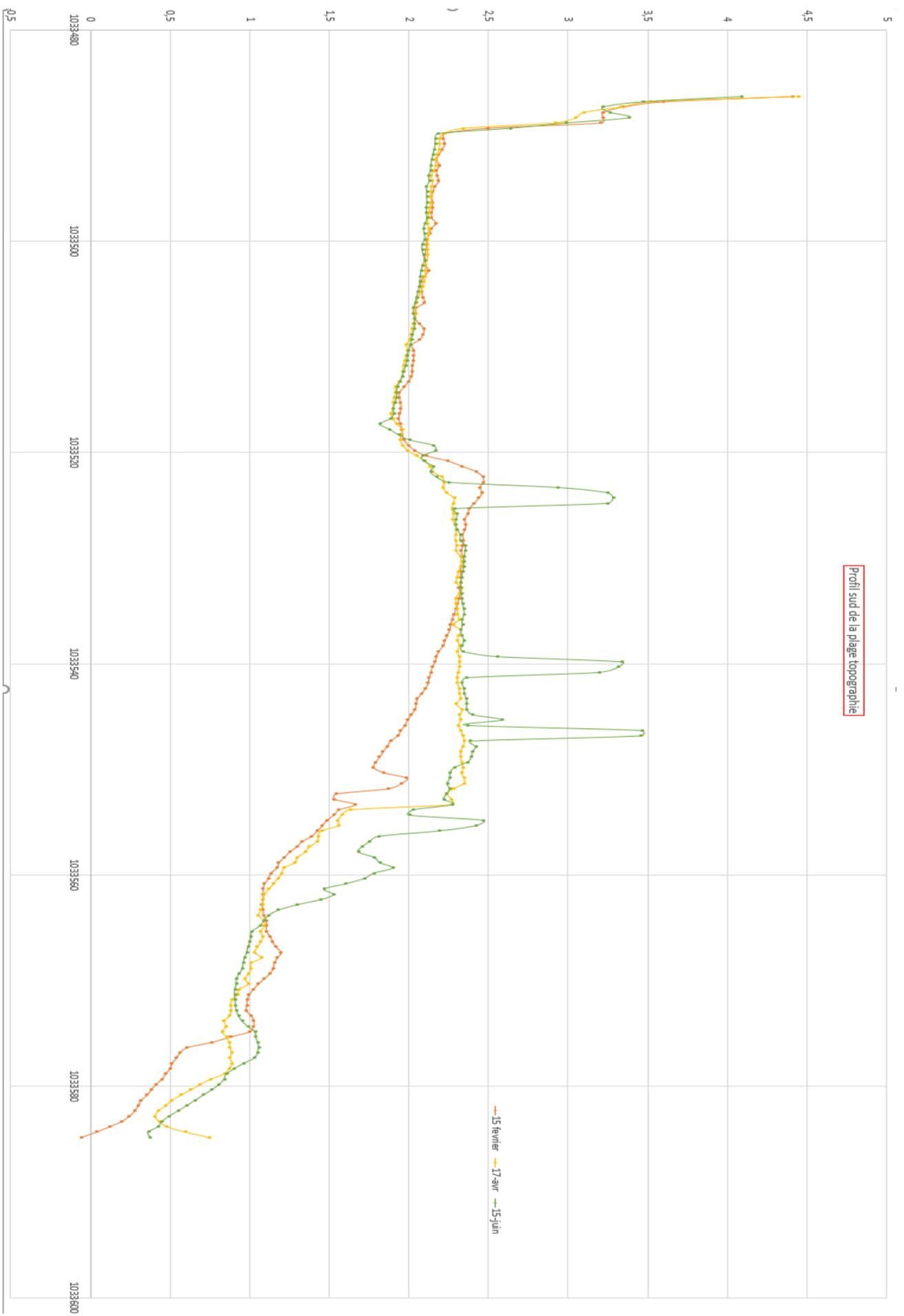


Figure 51 Profil topographique comparatif du Sud de la plage des Maquettes

```

// Traitement des données bathymétriques

// lecture des CSV... /\ au chemin d'accès

//A=[1 2 3; 3 2 1; 1 3 2; 2 1 3; 3 1 2];
M=mopen('MRIS_XYZ_VilleneuveLoubet_230917_L93_IGN69_0.5x0.5 en csv.csv') //On récupère les données à partir des fichiers
de coordonnées au format csv
[A]=fscanfMat('MRIS_XYZ_VilleneuveLoubet_230917_L93_IGN69_0.5x0.5 en csv.csv')
mclose(M)

//B=[1 2 4; 2 2 1; 3 1 6; 2 1 5; 1 2 4];
M=mopen('MRIS_XYZ_VilleneuveLoubet_110218_L93_IGN69_0.5x0.5 en csv.csv')
[B]=fscanfMat('MRIS_XYZ_VilleneuveLoubet_110218_L93_IGN69_0.5x0.5 en csv.csv')
mclose(M)

//Déclaration des variables
Difference=[];
I=[];
[L,S]=size(A)

for i = 1:L // parcours des éléments de la première matrice
    // sort les numéros des lignes de B dont les x,y sont identiques
    // à ceux de la ligne i de A
    I = find(A(i,1)==B(:,1) & A(i,2)==B(:,2));
    // comparaison (différence) pour tes les lignes où la condition est
    // vérifiée (égalité des x ET des y entre A et B)
    for j = 1:length(I)
        Difference = [Difference;i,I(j),A(i,1),A(i,2),A(i,3)-B(I(j),3)];
    end
end
disp(Difference)
// 1er colonne : numéro de la ligne de A
// 2em colonne : numéro de la ligne de B
// 3em colonne : valeur de x
// 4em colonne : valeur de y
// 5em colonne : différence entre les z (A-B)

// exemple de résultat :
// Difference =
// 1. 1. 1. 2. -1.
// 1. 5. 1. 2. -1.
// 4. 4. 2. 1. -2.
// 5. 3. 3. 1. -4.
// les x,y de la ligne 1 de A sont identiques à ceux de la ligne 5 de B
// valent respectivement 1 et 2
// la différence de z entre A et B à ces coordonnées vaut -1

// RQ : la fonction find devrait faire gagner pas mal de temps

```

**Figure 52 Code Scilab permettant de comparer numériquement les données topographiques ou bathymétriques**

```

Worksheets("Analyses Tempêtes").Activate
seuil = Cells(1, 4)
i = 0
Range("G4:M2000").ClearContents
last = 5 + Cells(1, 2) - 1
For k = 5 To last
  If Cells(k, 2) > Cells(1, 4) Then
    i = i + 1 'numéro de tempête
    D = k 'stockage de k
    M = 1 'stock le nombre de mesures
    Sum = Cells(k, 2) 'stock la somme des hauteurs de vagues pour le calcul de la moyenne
    Max = Cells(k, 2) 'stockage de la première valeur de vague
    Min = Cells(k, 2) 'stockage de la première valeur de vague
    While Cells(k + M, 2) > seuil 'On regarde la valeur suivante pour savoir si la tempête s'arrête
      lect = Cells(k + M, 2)
      If lect > seuil Then
        M = M + 1 'la tempête continue au pas de temps suivant dans ce cas
        Sum = Sum + lect 'on cumule les hauteurs de vagues
        If lect > Max Then
          Max = lect 'on remplace le max si la nouvelle valeur est supérieure
        End If
        If lect < Min Then
          Min = lect ' On remplace le min si la nouvelle valeur est inférieure au précédent min
        End If
      End If
    Wend
    Cells(3 + i, 8) = Cells(k, 1) 'écriture début de tempête
    Cells(3 + i, 7) = i 'écriture numéro de tempête
    Cells(3 + i, 9) = Cells(k + M, 1) 'On écrit la date de fin de la tempête
    Cells(3 + i, 10) = Sum / M 'calcul de la moyenne de la hauteur des vagues durant la tempête
    Cells(3 + i, 11) = Min 'On écrit le min
    Cells(3 + i, 12) = Max 'on écrit le max
    Cells(3 + i, 13) = M 'on stock le nombre de valeurs pour l'analyse ultérieure
  Else: i = i - 1 'Sinon on a compté une tempête qui n'en est pas une
  End If
  k = k + M 'on cherche la tempête suivante
Next 'on reprend la boucle après la tempête
End Sub

```

**Figure 53 Macro excel permettant le recensement et l'analyse de tempêtes dépassant un certain seuil**