



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Ecole nationale polytechnique d'Alger  
Département hydraulique

**Mémoire de Fin d'Etude pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Hydraulique**

Présenté par

**Ahlem HASNAOUI**

Sujet

Etude de la protection du rivage de la plage de  
Club des Pins :

Etude sur modèles réduits physiques

Proposé par : Mr BENAÏSSA Zouhair

Chef du Centre d'Essais sur Modèles L.E.M

Dirigé par : Dr BENMAMAR Saadia

Maitre de conférence (A) E .N.P

Mr BENAÏSSA Zouhair

Chef du Centre d'Essais sur Modèles L.E.M

## Résumé

Dans le cadre de la protection de la plage de Club des Pins contre l'érosion, des brise-lames immergés en géotubes et un rechargement artificiel de la plage sont recommandés par le laboratoire d'études maritimes. Des essais en modèles réduits physiques ont été exécutés : des essais en bassin à houle à fond fixe pour déterminer la stabilité des géotubes face aux houles de tempête et des essais en canal à houle à fond mobile pour connaître le comportement du rechargement.

**Mots Clés :** Houle – Maritime – Erosion- Géotubes- Canal à houle- Bassin à houle

## ملخص

في إطار حماية الشاطئ نادي الصنوبر ضد التآكل، إقتراح مختبر الدراسات البحرية حماية امواج مغمورة مكون من اكياس ثابتة مدى ثابتة تدعى جيوتوب وتجديد الشاطئ الاصطناعي. إختبارات على نماذج مصغرة تم تنفيذها: إختبار في حوض بلقاع مقاومة لتحديد إستقرار جيوتوب وإختبار في قناة بلقاع متحركة لتحديد تجديد الشاطئ.

**الكلمات الرئيسية :** الحولة - البحرية - التآكل - القناة الموجة - حوض الموجة

## Abstract

Under the protection of the “Club des Pins” beach against erosion, the breakwaters submerged in geotubes and artificial recharge of the beach are recommended by the Laboratory for Maritime Studies. The physical model tests were performed: the tests in wave basin with fixed bottom to determine the stability of geotubes against the storm swells and the tests in wave channel with mobile bottom for know the resistance of reloading.

**Keywords:** Wave - Maritime - Erosion- Geotubes-Channel Wave-Wave Basin

## Remerciements

*Je me demande comment ces brèves lignes suffiront pour témoigner toute ma gratitude.*

*Avant tout, ce travail n'est pas le résultat d'une seule personne mais la collaboration, le partage et le soutien de toute une communauté.*

*Ma profonde gratitude s'adresse à ma directrice de thèse M<sup>elle</sup> S. BENMAMAR, Docteur à l'école nationale polytechnique, pour son engagement des plus rigoureux et pour avoir pris le temps de m'enseigner sa rigueur scientifique.*

*Je tiens à remercier mon encadreur M<sup>er</sup> Z. BENAÏSSA, chef du Centre d'Essais sur Modèles, de m'avoir suivi et encadrer depuis le point de départ de ma thèse.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à M<sup>er</sup> F.ZEMMOUR qui a su être disponible quand j'en avais besoin et pour sa patience avec mes questions « Bêtes ».*

*Je remercie vivement l'ensemble du personnel du CEM : M<sup>me</sup> L.BAKRI, M<sup>me</sup> A.FISSAH, M<sup>me</sup> M.BELKASSA, M<sup>elle</sup> N.MAHDID et M<sup>er</sup> O.OKBA. Je remercie M<sup>me</sup> T. MATOUK ainsi que les ingénieurs du département d'aménagement portuaire avec qui je partageais le bureau : M<sup>me</sup> F. KALFOUN, M<sup>me</sup> M. ARIS et M<sup>er</sup> A. ISYAKHAM.*

*Enfin, cordialement, je remercie l'ensemble de mes professeurs du département hydraulique à l'école nationale polytechnique : M<sup>er</sup> A.BERMAD, chef du département hydraulique, M<sup>er</sup> NEBBACH, M<sup>er</sup> BENZIADA, P<sup>r</sup> A.KETTAB, M<sup>er</sup> MOULOUDI, , M<sup>er</sup> BELHADJ et M<sup>er</sup> MESSAHLI.*

*En espérant que je n'ai oublié personne, mes derniers remerciements s'adresseront tout d'abord aux premiers encadreurs de ma vie : mes parents. Je les remercie cœur et âme de m'avoir inculqué cette éducation et aujourd'hui si j'en suis là ce n'est que grâce à leur dévouement total. Je n'oublierai pas bien sur mes sœurs, GRAND merci à la plus grande de m'avoir déposé à maintes reprises au LEM, et ma seconde sœur pour ses mots encourageants. Sans oublier bien entendu mon unique frère qui, contrairement aux autres, n'a tenu aucun mot encourageant mais qui, sans lui, l'équilibre familial serait rompu. Enfin une pensée à mes amis qui se reconnaîtront.*

*Je remercie vivement leur présence à ma soutenance de thèse tous ceux qui ont fait le déplacement.*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : Généralité sur la houle</b> .....	3
1. Théorie de la houle.....	4
2. Déformation de la houle.....	4
2.1. Déferlement de la houle.....	4
2.2. Réfraction de la houle.....	5
2.3. Diffraction de la houle.....	6
2.4. Réflexion de la houle.....	6
3. Analyse spectrale de la houle.....	7
3.1. Spectre de Jonswap.....	7
3.2. Spectre de Pierson Moskowitz.....	8
4. Différentes protection des côtes.....	8
4.1. Protection douce.....	8
4.2. Protection dure.....	9
5. Transport sédimentaire au niveau des plages.....	10
5.1. Mouvements sédimentaires perpendiculaires au littoral.....	10
5.2. Transit littoral.....	11
<b>Chapitre 2 : Description du projet de la protection de la plage de Club des Pins</b> .....	12
1. Présentation de la zone d'étude.....	12
1.1. Situation géographique.....	12
1.2. Aspect morphologique de la baie d'El Djamila.....	12
2. Paramètres climatiques.....	13
2.1. Températures.....	13
2.2. Précipitations.....	14
2.3. Vents.....	14
2.4. Données océanographiques.....	15
2.5. Houles à la côte.....	18
2.6. Houles extrêmes.....	21
2.7. Les Courants.....	22
3. Evolution du trait de côte.....	22
3.1. Facteurs d'érosion.....	24
3.2. Acquisition des données.....	26
4. Etude sédimentologique.....	28
4.1. Analyse bathymétrique.....	28
4.2. Estimation du transit littoral.....	28
4.3. Description de l'ouvrage de protection.....	31

<b>Chapitre 3 :</b>	<b>Similitude hydraulique</b>	30
1.	Similitude hydraulique	40
1.1.	Introductions aux essais sur modèles réduits physiques	40
1.2.	Lois de similitude	41
1.2.1.	Similitude géométrique	41
1.2.2.	Similitude cinématique	41
1.2.3.	Similitude dynamique	42
2.	Similitude sédimentologique	46
<b>Chapitre 4 :</b>	<b>Etude de stabilité des géotubes en bassin à houle a fond fixes</b>	48
1.	Objectif de l'étude	48
2.	Conditions d'essais	48
2.1.	Directions de houles	49
2.2.	Niveau d'eau	49
2.3.	Conduite des essais	49
2.4.	Calibration (réglage hydraulique du modèle)	49
2.5.	Génération de la houle	49
2.6.	Technique de mesure	50
2.7.	Distorsion	51
3.	Construction du modèle	52
3.1.	Choix de l'échelle	52
3.2.	Représentation des fonds	54
3.3.	Choix du matériau	55
3.4.	Observation des dégâts	55
3.5.	Moyens mis en œuvre pour les observations	55
3.6.	Description de l'installation	56
4.	Résultats des essais de stabilité et d'agitation	57
4.1.	Essais d'agitation en l'état actuel de la plage	57
4.2.	Essais préliminaires	58
4.3.	Description et résultats de la variante 1	61
4.4.	Description et résultats de la variante 2	64
4.5.	Description et résultats de la variante 3	67
<b>Chapitre 5 :</b>	<b>Etude en modèle à fond mobile en canal à houle</b>	70
1.	Etude en modèle à fond mobile : étude en canal à houle	71
1.1.	Description de l'installation	71
1.2.	Echelle de similitude dynamique et sédimentologique	72
2.	Rechargement de la plage	78
2.1.	Généralité	78
2.2.	Méthode de rechargement	78
2.3.	Profil de la plage	79
3.	Résultats des essais en canal à houle	81

3.1. Objet de l'étude .....	81
<b>Conclusion générale</b> .....	87
Bibliographie .....	89
Annexe .....	90

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Forme de la houle .....	3
<b>Figure 1.2</b> : Hypothèses de la houle.....	4
<b>Figure 1.3</b> : Différents types de déferlement .....	5
<b>Figure 1.4</b> : Réfraction de la houle.....	5
<b>Figure 1.5</b> : Schéma du transfert d'énergie.....	6
<b>Figure 1.6</b> : Diffraction des vagues à proximité d'une jetée .....	6
<b>Figure 1.7</b> : Réflexion sur une paroi inclinée .....	7
<b>Figure 1.8</b> : Comparaison entre les deux spectres.....	8
<b>Figure 1.9</b> : Mode de transport des particules sableuses.....	11
<b>Figure 2.1</b> : Présentation de la zone d'étude.....	12
<b>Figure 2.2</b> : Diagramme ombrothermique de la région d'étude.....	14
<b>Figure 2.3</b> : Rose des vents représentant les différentes directions de la houle.....	15
<b>Figure 2.4</b> : Graphique représentant les fréquences annuelles d'apparition de la houle.....	17
<b>Figure 2.5</b> : Photo aérienne montrant le recul du trait de côte entre 1972 et 1999 .....	23
<b>Figure 2.6</b> : Photos des rejets urbains de la plage de Club des Pins .....	23
<b>Figure 2.7</b> : Direction des courants dans la zone du Club des Pins .....	24
<b>Figure 2.8</b> : Rejet urbains dans la zone du Club des Pins .....	25
<b>Figure 2.9</b> : Carte bathymétrique de la plage du Club des Pins.....	28
<b>Figure 2.10</b> : Géotube sur un tapis anti-affouillement.....	36
<b>Figure 2.11</b> : Profil des brise-lames immergés en géotube.....	37
<b>Figure 2.12</b> : Schéma initial de la plage et schéma du rechargement désiré .....	38
<b>Figure 4.1</b> : Plan de sondes du brise-lames dans les trois directions .....	58
<b>Figure 4.2</b> : Vue d'une batterie de géotubes .....	60
<b>Figure 4.3</b> : Plan de sondes de la variante 1 .....	62
<b>Figure 4.4</b> : Hauteur des houles générées dans le bassin en fonction du temps de retour .....	63
<b>Figure 4.5</b> : Plan de sondes de la variante 2 .....	64
<b>Figure 4.6</b> : Hauteur des houles générées dans le bassin en fonction du temps de retour .....	65
<b>Figure 4.7</b> : Plan de sondes de la variante 3 .....	68

<i>Figure 4.8</i> : Hauteur des houles générées dans le bassin en fonction du temps de retour .....	68
<i>Figure 5.1</i> : Canal à houle .....	71
<i>Figure 5.2</i> : Rechargement de la plage .....	78
<i>Figure 5.3</i> : Schéma représentant les profils d'été et d'hiver .....	81
<i>Figure 5.4</i> : Profil du rechargement de la plage en canal à houle. ....	82
<i>Figure 5.5</i> : Profils du rechargement en fonction de la longueur de la plage. ....	85



## Liste des tableaux

<b>Tableau 2-1:</b> Moyennes mensuelles des températures en °C période 1993-2003 .....	13
<b>Tableau 2-2 :</b> Moyennes mensuelles des précipitations en mm période 1993-2003 .....	14
<b>Tableau 2-3 :</b> Fréquences mensuelles de la houle au large par direction.....	16
<b>Tableau 2-4 :</b> Répartition des états de mers par période.....	17
<b>Tableau 2-5 :</b> Relation état de mer – Hauteur de l’agitation.....	17
<b>Tableau 2-6 :</b> Hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance .....	18
<b>Tableau 2-7 :</b> Houle annuelle .....	19
<b>Tableau 2-8 :</b> Houles extrêmes.....	20
<b>Tableau 2-9 :</b> Résultat du calcul des houles de récurrence annuelle .....	21
<b>Tableau 2-10 :</b> Résultats de calcul des houles de récurrence pluriannuelle.....	21
<b>Tableau 2-11 :</b> Moyennes des résultats obtenus par direction et par période.....	29
<b>Tableau 2-12 :</b> Fréquence d’observation et durée d’action de la houle .....	30
<b>Tableau 2-13 :</b> Récapitulatif du bilan d’énergie annuel par direction et par période .....	30
<b>Tableau 2-14 :</b> Récapitulatif du calcul de l’angle et de la fonction $f(\alpha)$ .....	30
<b>Tableau 2-15 :</b> Récapitulatif du transit par période et par direction .....	31
<b>Tableau 3-1 :</b> Rapports de similitudes des différentes grandeurs physiques.....	45
<b>Tableau 4-1 :</b> Hauteurs de la houle près de la côte (à -10 m) .....	48
<b>Tableau 4-2 :</b> Exemple de sortie de résultat.....	50
<b>Tableau 4-3 :</b> Caractéristiques des matériaux.....	55
<b>Tableau 4-4 :</b> Hauteur de houle avant l’implantation des géotubes dans la direction N315° .....	57
<b>Tableau 4-5 :</b> Hauteur de houle avant l’implantation des géotubes dans la direction N360° .....	57
<b>Tableau 4-6 :</b> Hauteur de houle avant l’implantation des géotubes dans la direction N270° .....	57
<b>Tableau 4-7 :</b> Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 270° .....	59
<b>Tableau 4-8:</b> Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 270° .....	59
<b>Tableau 4-9 :</b> Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 270° .....	59
<b>Tableau 4-1 :</b> Mesure des hauteurs de houle en bassin dans la direction N270° .....	54
<b>Tableau 4-10 :</b> Hauteurs des houles mesurées pour la variante 1 .....	61
<b>Tableau 4-11:</b> Hauteurs des houles mesurées pour la variante 2 .....	64
<b>Tableau 4-12:</b> Hauteurs des houles mesurées pour la variante 3 .....	67

<b>Tableau 5-1</b> : Tableau des diamètres du grain naturel et artificiel.....	73
<b>Tableau 5-2</b> : Rapports de similitude .....	76
<b>Tableau 5-3</b> : Réfraction de la houle à -10m de profondeur.....	77
<b>Tableau 5-4</b> : Répartition des temps d'action des houles durant les deux cycles.....	77
<b>Tableau 5-5</b> : Résultats de la réfraction de la houle à -10m de profondeur .....	82
<b>Tableau 5-6</b> : Tableau de mesure des profils de la plage en canal à houle .....	83

## Liste des symboles

Symbole	Nom	Unité
D	Diamètre caractéristique du grain	mm
d	Profondeur	m
F	Force d'inertie	N
F <sub>1</sub>	Force d'inertie du prototype	N
F <sub>2</sub>	Force d'inertie du modèle	N
F <sub>t</sub>	Force de turbulence	N
f	Fréquence du spectre de houle	Hz
g	Accélération de la pesanteur	m.s <sup>-2</sup>
H	Hauteur ou creux de la houle	m
H <sub>i</sub>	Amplitude de la houle incidente	m
H <sub>r</sub>	Amplitude de la houle réfléchie	m
H <sub>1/3</sub>	Hauteur significative des vagues de l'enregistrement	m
K	Coefficient de réfraction	(Sans unité)
L	Longueur d'onde	m
L <sub>1</sub>	Dimensions linéaires du prototype	m
L <sub>2</sub>	Dimensions linéaires du modèle	m
m	Masse d'une particule	g
P	Profondeur maximale dans le prototype	m
r	Rayon de courbure m	m
S (f)	Valeur du spectre d'énergie associée à la fréquence f	(Sans unité)
T	Période de la houle	s

$T_p$	Période du pic du spectre	s
$t_1$	Temps du prototype	s
$t_2$	Temps du modèle	s
$v_1$	Vitesse du prototype	$m.s^{-1}$
$v_2$	Vitesse du modèle	$m.s^{-1}$
$\varepsilon$	Densité relative du matériau	(sans unité)
$\gamma$	Coefficient de surélévation du pic du spectre	(sans unité)
$\lambda$	Echelle du modèle	(sans unité)
$\lambda_a$	Echelle des accélérations	(sans unité)
$\lambda_{fi}$	Echelle des forces d'inertie	(sans unité)
$\lambda_{fv}$	Rapport des forces de viscosité	(sans unité)
$\lambda_g$	Echelle des forces de gravités	(sans unité)
$\lambda_m$	Echelle des masses	(sans unité)
$\lambda_t$	Echelle des temps	(sans unité)
$\lambda_v$	Echelle des vitesses	(sans unité)
$\lambda_p$	Echelle des masses volumiques	(sans unité)
$\sigma$	Paramètre qui caractérise la largeur du pic du spectre	(sans unité)
$\nu$	Viscosité cinématique de l'eau	Pa
$\zeta$	Côte de la pression a la surface du fluide	m

## Terminologies

**Baie** : Echancrure de la côte. Petit Golf.

**Barre** : Haut fond étiré parallèlement au littoral et construit par l'accumulation de débris sédimentaires (galet, sables, vase) ou organique.

**Bathymétrie** : Mesure des profondeurs d'eau et traitement des données correspondantes.

**Brise-lames** : Ouvrage de défense à l'entrée d'un port ou sur une côte pour amortir ou supprimer l'effet gênant des vagues.

**Cap** : Partie saillante du littoral. Un cap élevé et escarpé est un promontoire.

**Courant marin** : Déplacement d'eau de mer caractérisé par sa direction, sa vitesse et son déplacement.

**Coordonnées Lambert** : Projection conique de Lambert : projection analytique de la surface terrestre sur un cône tangent (ou légèrement sécant) selon un parallèle central. La projection de Lambert est directe et conforme. Elle est utilisée pour la carte de France à 1/25000.

**Dérive littoral** : Courant parallèle au rivage et formé par tout les mouvements qui y parviennent.

**Estran** : Partie du littoral alternativement couverte et découverte par la mer.

**Fetch** : Il s'agit de la zone au sein de laquelle sont générées les vagues qui constituent la houle.

**Houle** : Oscillation régulière de la surface de la mer, indépendant du vent local, dont la période est de l'ordre de la dizaine de seconde.

**Houlographe** : Appareil enregistrant l'amplitude et la période de la houle.

**Isobathe** : Lieu des points d'égale profondeur.

**Lames** : Masse d'eau comprise entre deux creux de vague ou de houle successifs.

**Ligne de crête** : Lieu des points ou un instant donné l'élévation de l'eau est maximale dans le mouvement de la houle.

**Marnage** : La différence des hauteurs d'eau d'une pleine mer et d'une basse mer.

**Marée** : Mouvement périodique de montée et de descente de la mer, de période voisine de 12 à 24h ou quelques jours due à l'attraction de la lune et du soleil.

**Mascaret** : Haute vague déferlante progressant vers l'amont dans certain estuaires. Il résulte de la propagation par faible profondeur d'une onde.

**Orthogonale de la houle** : Lignes orthogonales aux lignes de crêtes de la houle.

**Plan de vague** : Figure représentant l'ensemble des positions occupées successivement par une crête d'une houle monochromatique. Les plans de vagues comprennent les lignes de crêtes et les orthogonales de la houle.

# INTRODUCTION GENERALE

Plus de la moitié des zones côtières du monde font l'objet de pressions environnementales exercées par la croissance démographique et le développement économique. La montée de la pollution menace les mers. Les pêches côtières et océaniques — qui fournissent la moitié des aliments naturels du monde — sont en train de s'épuiser rapidement.

Selon une étude effectuée en 1995 par le World Resources Institute (WRI), la croissance démographique et le développement exercent sur la moitié environ de toutes les zones côtières des pressions allant de modérées à considérables. Les zones côtières des pays les plus développés — notamment le Japon, l'Australie, les USA, l'Europe et la zone européenne de la Russie — sont dégradées. Les pays en développement sont un peu moins touchés.

La moitié environ de la population mondiale occupe une bande côtière large de 200 kilomètres — soit 1 % seulement de la surface de la terre. Les deux-tiers de la population mondiale vivent à une distance de 400 kilomètres de la mer. En raison d'une telle densité de population, près de 70 % des plages mondiales subissent, du fait des activités humaines, une érosion supérieure à la normale. L'érosion est un phénomène naturel, mais elle peut empirer si le développement des côtes prend la forme de construction, d'expansion des villes, de dragage du sable et de l'utilisation des récifs de corail comme matériau de construction.

Les zones humides côtières sont en train de disparaître dans le monde. Environ 182.000 kilomètres carrés de terres humides à palétuviers sont l'habitat de plus de 2.000 espèces de poissons, coquillages, invertébrés et plantes. Durant le siècle dernier plus de la moitié des zones à palétuviers ont été détruites ou dégradées, ont été converties en terres agricoles ou en aleviniers, ou encore ont été victimes du développement urbain et industriel.

Les herbiers marins disparaissent eux aussi. Ces véritables prés océaniques font vivre toute une série d'espèces de poissons et de coquillages qui ont une importance commerciale. Bien qu'on ne dispose pas d'estimations générales des dégâts qui ont été commis, ces écosystèmes semblent être en train de se réduire dans la quasi-totalité des zones côtières habitées. C'est le cas de la côte Ouest Algéroise qui subit depuis peu les impacts d'une pollution longtemps ignorée. (*Information & Knowledge for Optimal Health (INFO) Project*)

C'est à la demande du gouvernement Algérien et suite à l'approbation par la 10<sup>ème</sup> réunion ordinaire des parties contractantes à la convention de Barcelone (Barcelone 1995), que le plan d'Action de la Méditerranée (PAM) a décidé de formuler et mettre en œuvre un programme d'aménagement côtier (PAC) pour la zone côtière Algéroise.

Le phénomène du recul du trait de côte (érosion côtière) prend de plus en plus d'ampleur sur la côte algérienne en général et dans le secteur PAC en particulier. L'étude PAC dans sa phase Diagnostic a mis en évidence des niveaux de recul critiques menaçant même jusqu'aux activités en zone côtière. La diversité des services qu'offrent les plages et la zone littorale en général s'amenuise avec le temps sous l'effet de cette érosion. En effet, en moyenne la côte algéroise perd 2.25 m/an ce qui est énorme.

Ce phénomène est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs, mais qui globalement est associé au déséquilibre dans le bilan sédimentaire entre la plage et la mer. Programme d'Aménagement Côtier (PAC), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement)

Suite à ces malheureux constats, la direction des travaux publics de la wilaya d'Alger a confié au laboratoire d'études maritimes l'étude intitulée « Etude de la protection du rivage du site du Club des Pins » qui s'inscrit dans un cadre global de réhabilitation et de protection de toute la côte Ouest d'Alger.

En effet d'autres études sont menées en parallèles pour protéger les plages de Palm Beach, Morreti , Ain Benian, etc...

A noter que d'autres études ont été exécutées et qui commencent à avoir un effets positif sur la côte de Zeralda.



# **Chapitre 1**

## **Généralité**

## Chapitre 1

# GENERALITE SUR LA HOULE

## 1. THEORIE DE LA HOULE

La surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations parallèles presque identiques qui se propagent de façon sensiblement uniforme vers le rivage.

On appelle *houle* cet ensemble d'ondulation ou de vagues.

Plus précisément, on appelle *creux* ou *hauteur*  $H$ , la dénivellation maximale entre une crête et un creux successif, *longueur d'onde*  $L$  la distances qui sépare deux crêtes successives, la *cambrure* le rapport  $H/L$ . La *période*  $T$  de la houle est le temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe. La vitesse moyenne de propagation des crêtes, c'est à dire  $L/T$ , est appelée *célérité*.  $d$  désigne la *profondeur*.

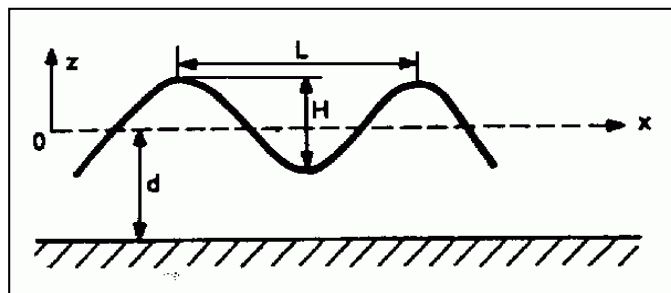


Figure 1.1 : Forme de la houle

Les hypothèses de base sont le fluide parfait, homogène et pesant, et le mouvement cylindrique. Le problème est plan ; l'axe des  $x$  est horizontal, l'axe des  $z$  vertical ascendant : l'origine des coordonnées est prise sur la surface de repos du fluide.

La pression à la surface est agitée, de côté  $\zeta$ , est la pression atmosphérique supposée partout constante ; il n'y a pas d'autres contraintes agissant sur la surface libre ; le vent a donc cessé de souffler. Le fond imperméable, à la distance  $d$  sous la surface libre, est supposé horizontal ; mais les théories, qui ne sont qu'approchées, restent valables dans une certaine mesure même si la profondeur varie très lentement.

Le problème à résoudre est de déterminer le ou les mouvements des particules fluides telle que la surface libre présente une suite d'oscillation périodique se propageant dans une direction donnée, ici celle des  $x$  positifs (*Bonnefille, 1980*).

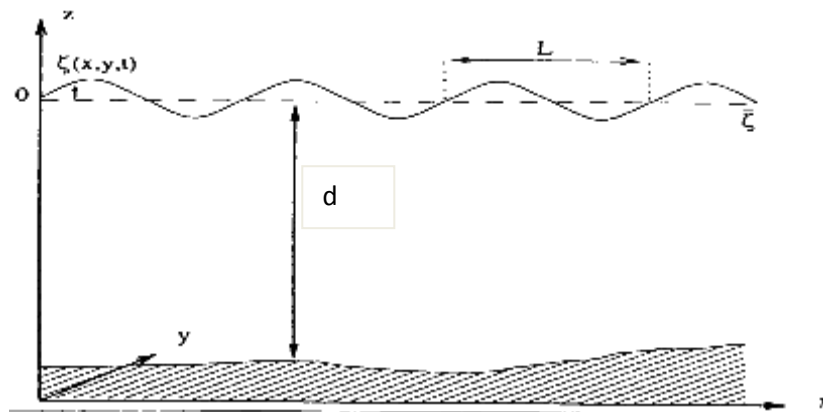


Figure 1.2 : Hypothèses de la houle

## 2. DEFORMATION DE LA HOULE

Le creux de la houle ne peut pas prendre une valeur trop élevée, les vagues ne sont plus stables lorsque leur cambrure atteint une valeur limite. Cette valeur limite de la cambrure peut être atteinte soit par accroissement local du creux soit par réduction de la longueur d'onde par suite de la diminution de la profondeur. Alors la vague est partiellement ou totalement détruite : **la houle déferle**.

Lorsque la houle se propage dans un milieu à profondeur variable sa célérité varie. La vitesse n'est pas la même tout le long du front de la houle ; les crêtes se déforment en plan : **la houle réfracte**.

Lorsque la houle aborde une paroi imperméable, elle se réfléchit partiellement. La houle réfléchiée en se combinant à la houle incidente donne naissance à des oscillations stationnaires appelées **clapotis**.

Lorsqu'un ouvrage n'arrête qu'une partie du front de la houle, des oscillations se manifestent derrière l'ouvrage ; la houle contourne l'obstacle : **elle diffracte (Bonafille, 1980)**.

### 2.1. Déferlement de la houle

Le déferlement survient lorsque la houle arrive près de la côte (phénomène de réfraction). En effet, lorsque la houle se rapproche du rivage, sa célérité ne dépend que de la profondeur locale et diminue avec cette dernière. La longueur d'onde de la houle, étant liée à la célérité diminue aussi avec la profondeur locale. Par conséquent, ces lignes de crêtes ont tendance à se resserrer près de la côte. Ainsi, la densité d'énergie par unité de surface augmente (par conservation de l'énergie), ce qui entraîne l'augmentation de la hauteur de la vague. La hauteur augmente jusqu'à une certaine limite. En effet, lorsque la hauteur atteint 0.78 fois la profondeur, la vague devient instable et déferle.

En résumé, le déferlement est un phénomène au cours duquel l'onde est partiellement ou totalement détruite ; il est caractérisé par un haut degré de turbulence et une grande dissipation de l'énergie.

Différents types de déferlement sont observés. D'une part, le déferlement au large causé soit par une barre au niveau de laquelle le fond remonte brusquement, soit en hauts-fonds avec

deux vagues se superposant, soit par le vent. D'autre part, le déferlement se produit lorsque la houle arrive sur la côte. Ce dernier peut être décomposé en trois types :

- le déferlement glissant ou déversant par pente faible,
- le déferlement plongeant par pente plus forte,
- le déferlement gonflant ou frontal par pente forte.

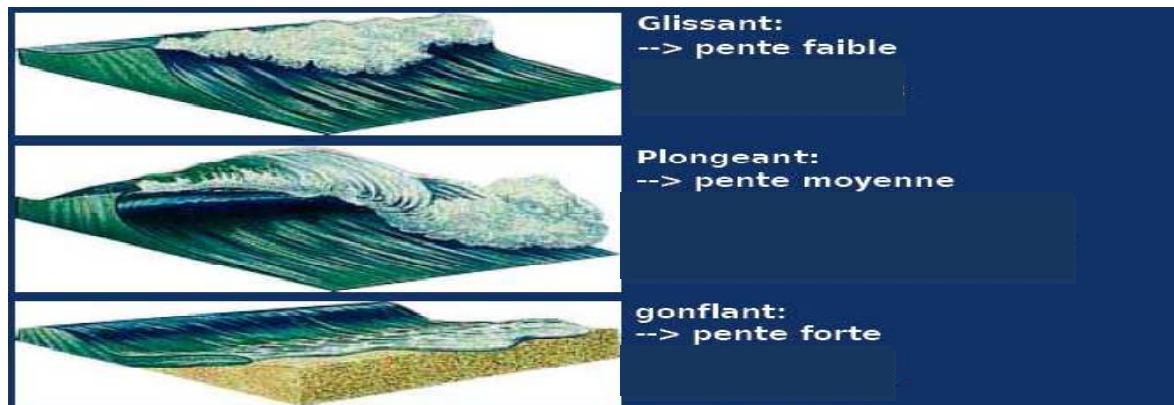


Figure 1.3 : Différents types de déferlement (Zorkani M., 2009)

### 2.2. Réfraction de la houle

Elle a lieu principalement en eau peu profonde où l'onde sent la bathymétrie c'est - à-dire la célérité de l'onde varie avec la profondeur d'eau : la vitesse de phase diminue quand la profondeur est moindre. Il en résulte que les fronts d'onde (les lignes d'égale phase comme les lignes de crête par exemple) changent d'orientation en s'approchant par conséquent des lignes d'égale profondeur (isobathes).

Les lignes orthogonales peuvent converger où diverger selon la bathymétrie (vers un cap, on a en général une convergence des orthogonales : focalisation de l'énergie comme une lentille convergente et l'inverse pour une baie qui se comporte par analogie comme une lentille divergente) il en résulte une diminution ou une augmentation de l'amplitude de l'onde le long d'une même ligne de crête (Zorkani, 2009).

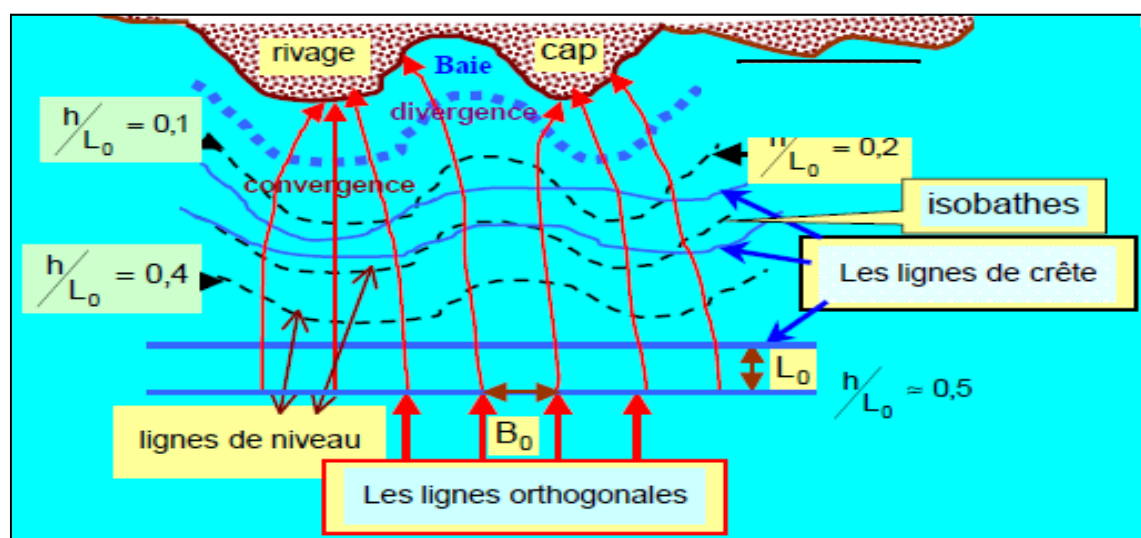


Figure 1.4 : Réfraction de la houle (Zorkani M., 2009)

### 2.3. Diffraction de la houle

La diffraction se produit quand l'amplitude d'une onde est plus grande en un point le long d'une ligne de crête qu'en un point adjacent, causant ainsi un transfert d'énergie transversal le long de cette ligne dans la direction où l'amplitude est décroissante (sens opposé du gradient de l'amplitude) et la nature cherche ainsi à rendre l'amplitude uniforme le long de cette ligne de crête. (Schéma ci-dessous)

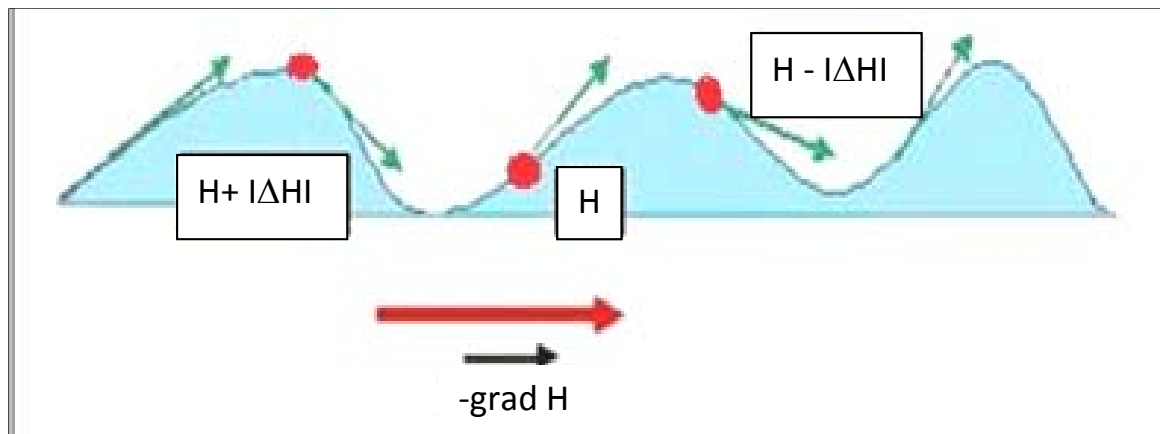


Figure 1.5 : Schéma du transfert d'énergie

La figure 1.6 (ci-dessous) représente le schéma de la diffraction des vagues à proximité d'une jetée.

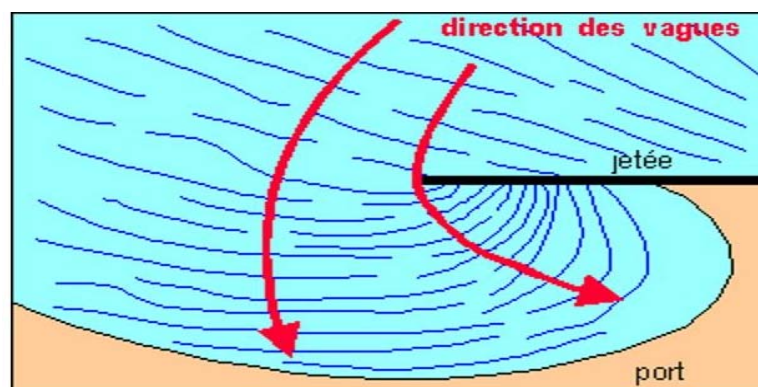


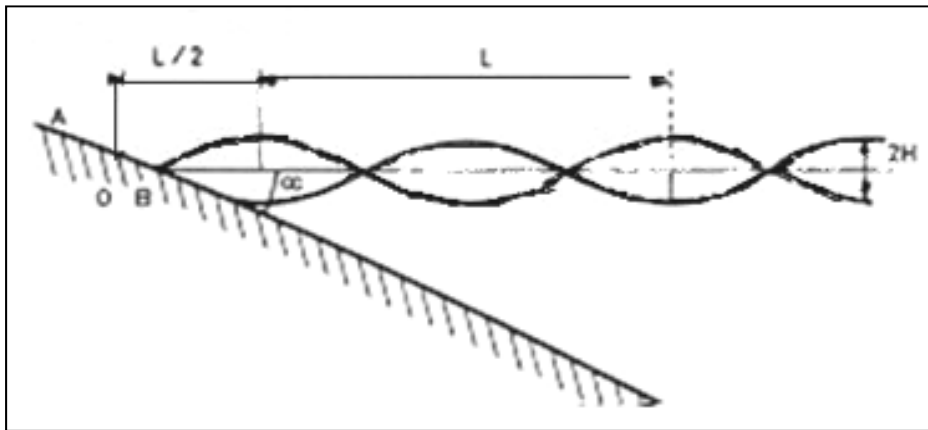
Figure 1.6 : Diffraction des vagues à proximité d'une jetée

La diffraction se produit avec un obstacle en eau profonde, comme une jetée, une remontée brutale de fond. Elle est importante car elle explique clairement la fonction d'un brise-lames qui joue le rôle à la fois d'atténuateur de houle et de piège à sédiments.

### 2.4. Réflexion de la houle

Quand la houle rencontre un obstacle, elle peut être partiellement ou totalement réfléchi ; le rapport entre l'amplitude de la houle réfléchi  $H_r$  et l'amplitude de la houle incidente  $H_i$  représente alors le coefficient de réflexion :  $K = \frac{H_r}{H_i}$ .

Comme nous l'avons défini précédemment, le clapotis est une combinaison de la houle réfléchiée et de la houle incidente.



**Figure 1.7 :** Réflexion sur une paroi inclinée (La houle et les ouvrages en mer, [www.enseeiht.fr](http://www.enseeiht.fr))

### 3. ANALYSE SPECTRALE DE LA HOULE

Avec l'apparition de moyens de calculs de plus en plus performants, il a été possible de procéder à l'analyse spectrale d'enregistrement de houle et ainsi d'obtenir une représentation de la densité d'énergie en fonction de la fréquence.

Cette méthode présente l'avantage de mettre en évidence de façon directe les fréquences prédominantes de la houle considérée.

Une houle irrégulière est définie par un spectre, représentant la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence. On parle de fréquence ou période pic, la fréquence ou période pour laquelle l'énergie est maximale. (CETMF)

Les formules de spectres les plus couramment rencontrées lors de l'analyse spectrale des enregistrements sont peu nombreuses, les spectres les plus couramment utilisés sont :

#### 3.1. Spectre de Jonswap

Goda a proposé une expression analytique du spectre de Jonswap qui ne dépend que des paramètres internes. On oppose les paramètres internes qui caractérisent les vagues, comme les hauteurs significatives et la période du pic du spectre, aux paramètres externes qui caractérisent le champ de vent, comme la vitesse du vent et la longueur du fetch.

Cette formulation est la suivante :

$$S(f) = \alpha_G \left[ \frac{H_{1/3}}{T_p^2} \right]^2 f^{-5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right\} \gamma^{\exp \left[ \frac{T_p f - 1}{2\sigma^2} \right]^2}$$

Avec,  $\alpha_G = \frac{0,0624}{0,230 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}}$

S (f) est la valeur du spectre d'énergie associée à la fréquence f ;

$H_{1/3}$  est la hauteur significative des vagues de l'enregistrement ;

$T_p$  est la période du pic du spectre ;

$\gamma$  est le coefficient de surélévation du pic du spectre ; il varie entre 1 et 7 et sa valeur moyenne est 3,3.

$\sigma$  est le paramètre qui caractérise la largeur du pic du spectre. :

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07 & f \leq f_p \\ \sigma_b = 0,09 & f > f_p \end{cases}$$

Au final, le spectre de Jonswap ne dépend que de trois paramètres :  $H_{1/3}$ ,  $T_p$  et  $\gamma$ .

### 3.2. Spectre de Pierson-Moskowitz

Le spectre de Jonswap se réduit au spectre de Pierson-Moskowitz lorsque  $\gamma = 1$

$$S(f) = \alpha_G \left[ \frac{H_{1/3}}{T_p^2} \right]^2 f^{-5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} (T_p f)^4 \right\}$$

Le spectre de Pierson-Moskowitz ne dépend plus que du seul paramètre  $T_p$ , période du pic.

Dans le cas où l'hypothèse de l'établissement d'une mer complètement développée est admise, il suffit de calculer un seul des deux paramètres pour déterminer complètement le spectre de Pierson-Moskowitz.

Le spectre de Jonswap caractérise le mieux l'état de mer des tempêtes, sa pseudo-cambure est  $\frac{H_{1/3}}{T_p} = 0,05$ , et la valeur de la surélévation est  $\gamma = 16$ .

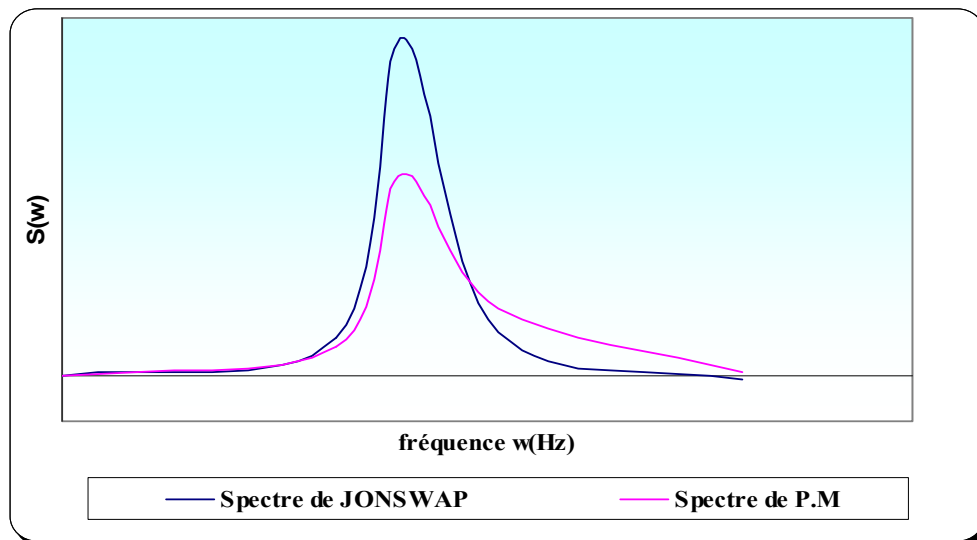


Figure 1.8 : Comparaison entre les deux spectres (Schmied L., 1993)



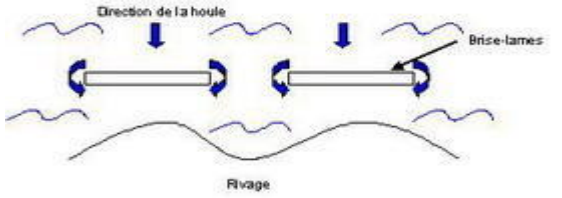
## 4. DIFFERENTES PROTECTIONS DES COTES

Le phénomène d'érosion des côtes est amplifié par ce que l'on appelle la dérive littorale. Celle-ci correspond à un courant parallèle à la côte qui permet le transport des sédiments selon sa direction et son sens.

Il existe deux types de protection des côtes :

- Protection dure
- Protection douce

4.1. Protection dure

<p><b>a) Les ouvrages de défenses verticaux :</b></p>	<p><b>les épis</b></p>
<p>Ce sont des ouvrages perpendiculaires à la côte dont le but premier est de stabiliser une plage. Il se produit un engraissement d'un côté et une érosion de l'autre. Il faut donc en placer successivement. Quand l'engraissement atteint la tête de l'épi, les sédiments passent et seront bloqués par l'épi suivant. On voit donc que les épis ralentissent le transport mais ne sont pas capables de l'arrêter définitivement. (Dr H.Tabet, université du Havre)</p>	 <p>Epis au Cap May, New Jersey</p>
<p><b>b) Les ouvrages de défenses longitudinaux</b></p>	
<p>La construction d'ouvrages s'impose dans le cas de défense d'ouvrages de haut de plage fortement sollicités par des houles frontales. Ce sont des <b>murs de protection</b> destinés à stabiliser le haut du rivage afin de protéger les constructions de l'action de la mer, notamment lors des tempêtes. Le problème est qu'ils interrompent les échanges sédimentaires entre le haut de plage et le rivage, d'où l'émergence de déséquilibres. De plus, ils ont tendance à amplifier l'énergie des vagues qui ne peuvent plus se dissiper, d'où un accroissement de l'érosion. (Dr H.Tabet, université du Havre)</p>	 <p>Protection des plages, Riprap : Enrochements</p>
<p><b>c) Les ouvrages immergés ou partiellement immergés</b></p>	
<p>Ils ont pour rôle de provoquer le déferlement de la houle et d'absorber une partie de son énergie ; il faut prendre garde à d'éventuelles conséquences pour la navigation. Ils sont situés parallèlement au rivage et sur les petits fonds.</p> <p><a href="http://www.u-picardie.fr/beauchamp/littoral/GRENOBLE-4.html">http://www.u-picardie.fr/beauchamp/littoral/GRENOBLE-4.html</a></p>	 <p>Brise-lames</p>



### 4.2. Protection douce

- a) *L'alimentation artificielle des plages* est possible, mais elle nécessite que le matériel utilisé soit aussi proche que possible du matériel en place (granulométrie notamment). Ces solutions sont coûteuses mais efficaces si l'on respecte la nature des sédiments en place.
- b) **La protection des dunes** s'effectue par la pose de ganivelles (petites palissades en bois) et de filets brise-vent. Cumulé à l'implantation d'espèces psammophiles (adaptées au sable), ce procédé permet de stabiliser la formation dunaire.

D'autres solutions existent ou sont à l'étude comme : le by-passing (rétablissement du transit littoral), le stabiplage ou encore l'ecoplage. Certains pensent même que le recul stratégique sur les littoraux à côtes basses est indispensable en raison de l'élévation du niveau moyen de la mer. En effet, sur le long terme, il coûterait vraisemblablement moins cher de reloger les populations plus loin dans les terres que d'entamer des travaux de lutte contre les éléments naturels.

Des solutions naturelles peuvent avoir l'effet de protection des plages contre l'érosion comme la formation de barre et les massifs coralliens.

## 5. TRANSPORT SEDIMENTAIRE AU NIVEAU DES PLAGES

Sous l'action des facteurs hydrodynamiques, les sédiments peuvent être mobilisés et transportés dans la zone littorale. Ces mouvements sédimentaires sont à l'origine de l'évolution de la morphologie littorale. Ils peuvent provoquer des érosions, des sédimentations ou également la modification des profils de la plage et des petits fonds.

La direction du transport sédimentaire dépend des courants induits par les vagues.

Il est reconnu que des conditions de vagues énergétiques produisent généralement un transport vers le large alors que des conditions plus modérées transportent le sédiment vers la côte.

La dynamique sédimentaire s'exprime essentiellement par deux phénomènes types :

- **Les mouvements dans le profil** liés à la conservation de l'équilibre avec la force hydrodynamique des houles.
- **Le transit littoral** induit par l'obliquité des houles lors du déferlement.

### 5.1. Mouvements sédimentaires perpendiculaires au littoral

– **L'évolution morphologique** : aux abords du littoral, principalement dans le domaine du déferlement de la houle, les quantités de sédiments remobilisés sont importantes. Il en résulte des modifications marquantes et continues du niveau des fonds en fonction de l'alternance des périodes d'agitation et de beau temps.

Lors des périodes d'agitation, les vagues fortement cambrées, déferlent violemment sur la barre pré-littorale. L'agitation érode la plage aérienne jusqu'au pied de la dune bordière et entraîne, par suspension, les sédiments dans le courant de retour (Rip-currents) vers la barre.

A l'inverse, en période de houles de beau temps, les sédiments progressent par charriage dans la couche limite. La petite barre de déferlement par  $-1$  m se rapproche peu à peu de la

laisse. Elle vient s'y joindre, pour former une berme (ou berge) submersible, lors des légères variations journalières du niveau de l'eau.

– **Paramètres du mouvement sédimentaire dans le profil :** Les sables subissent un remaniement sous l'action des courants alternatifs induits par les vagues.

Dans des profondeurs de -12 m, la limite des mouvements des sables est atteinte pour des vagues de 2 m à 3 m. Ainsi, lors des principales périodes d'agitation, l'ensemble des fonds, de la zone littorale jusqu'à l'herbier de Posidonies, peut être mobilisé.

Par -4 m, les rides symétriques, témoins des mouvements sédimentaires des fonds, ont une longueur d'onde générale de 0,4 m. Elles sont formées par des vagues de 2 m.

Entre la zone du déferlement et le trait de la côte, elle atteint un maximum de 9 cm pour une houle de 3m.

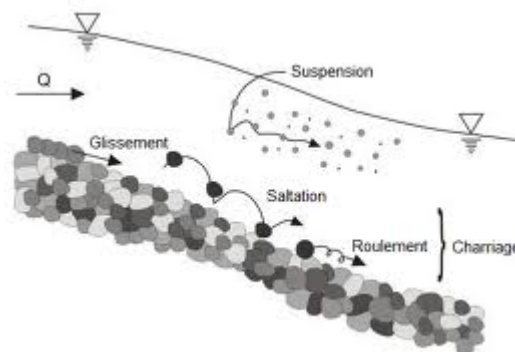
En général, les quantités transportées dans le profil perpendiculairement à la côte atteignent des valeurs comprises entre 30 000 m<sup>3</sup>/an/km et 50 000 m<sup>3</sup>/an/km.

### 5.2. Transit littoral

Le transit des matériaux parallèlement au littoral est un processus important à considérer pour définir le régime d'une côte. Celle-ci est considérée en état d'érosion, d'équilibre ou d'accrétion, suivant que les quantités de matériaux, traversant la section littorale, sont supérieures, égales ou inférieures à la quantité y pénétrant.

Le transit littoral le long des plages sableuses se décompose en deux types de transports :

– **Un transport en suspension** s'effectue aux abords de la barre pré-littorale par -3m et correspond à 75% du transport total.



**Figure 1.9 :** Mode de transport des particules sableuses

– **Un transit au pied du talus de la plage** se manifeste par un mouvement en dent de scie. Il est induit par l'obliquité des houles faiblement cambrées, dites de beau temps. Ce type de transit est facilement observable mais ne représente qu'une part négligeable du régime sédimentaire total d'une côte. (*Etude du plan d'occupation de la page de Yasmine Hammamet*)

## **Chapitre 2**

Description du projet de la  
protection de la plage de  
club des Pins

## Chapitre 2

# DESCRIPTION DU PROJET DE LA PROTECTION DE LA PLAGE DE CLUB DES PINS

## 1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### 1.1. Situation géographique

La zone d'étude « Club des Pins » s'inscrit dans la baie d'El Djamila qui se situe à une trentaine de kilomètres à l'Ouest d'Alger. Cette baie présente un linéaire d'environ 6Km. Il s'agit d'une côte sableuse basse dont le rivage est orienté globalement Sud Ouest – Nord Est, limitée à l'Ouest de la presqu'île de Sidi Fredj, à l'Est par Ras Acrata et au nord par la mer méditerranée. Ses coordonnées Lambert sont :

- $2^{\circ}53'42.792$  longitude Est et  $36^{\circ}48'5.796$  latitude Nord : Ras Acrata ;
- $2^{\circ}50'54.744$  longitude Est et  $36^{\circ}45'43.092$  latitude Nord : Port de sidi Fredj.



*Figure 2.1* : Présentation de la zone d'étude

### 1.2. Aspect morphologique de la baie d'El Djamila

D'après la carte géomorphologique élaborée par Ayme (1960) le littoral compris entre Sidi Fredj et Ras Acrata se caractérise par une importante accumulation sableuse actuelle et subactuelle. La côte Ouest de la baie comprise entre l'embouchure de l'Oued Beni Messous et la pointe de Sidi Fredj est bordée par un cordon de sable dunaire limité par des plages plus ou moins importantes (Staoueli et Club des Pins).

Le seul Oued se déversant dans la baie est situé à environ cinq Kilomètres à l'Est de Sidi Fredj, c'est l'Oued de Beni Messous ; il prend source dans le grand Cheraga, traverse les commune de Bouzaréah, Dely Ibrahim et Ain Benian et débouche au niveau de la plage « *les Dunes* » à environ 2 Kilomètres à l'Ouest du port d'El Djamila. Du coté Est de cette embouchure, le littoral est taillé en falaise qui dominant la mer par endroit.

**a. Dunes littorales**

Les dunes littorales sont des accumulations des sables d'origine marine. Les dunes littorales de la baie d'El Djamila constituent le prolongement littoral d'un cordon dunaire prenant naissance à l'embouchure de l'Oued Mazafran et se continue jusqu'à l'Ouest de l'Oued Béni Messous. Le cordon atteint une largeur maximale sur les plages de Staoueli et Club des Pins.

Ces dunes ont une extension et une morphologie très variable en fonction de la direction des vents dominants.

En effet, il existe deux bandes littorales parallèles à la côte. L'une borde la haute plage, c'est la zone des dunes mobiles, l'autre se situe vers l'intérieure des terres, et est caractérisée par une couverture végétale dense ; c'est la zone des dunes fixes.

**b. Plages**

A la suite du cordon dunaire et à l'Est de la jetée Sud du port Sidi Fredj, s'étale une zone de plage sableuse de granulométrie variable, parallèle à la côte qui rétrécit vers le Sud-Est.

Le développement des dunes littorales est atteint en arrière des plages de Staoueli et Club des Pins. Une importante déstabilisation des phénomènes d'apport et de dépôt a vu le jour dans la baie de Bou Ismail, due à des carrières d'exploitation de ces sables entre l'Oued Mazafran et Ras Acrata.

**c. Platiers rocheux**

De nombreux platiers rocheux affleurent au niveau de l'estran et se poursuivent sous l'eau jusqu'à des profondeurs de 4 à 5 m sur la plage de Moretti et Club des Pins.

Actuellement, certains affleurements sont recouverts par l'ensablement de la zone adjacente à la jetée sud du port.

**2. PARAMETRES CLIMATIQUES**

L'analyse de l'évolution des paramètres climatologiques a été effectuée à partir des données de la station de Dar El Beida, sur une période de 10 ans (1993-2003).

**2.1. Température**

Les valeurs moyennes mensuelles de la température exprimées en °C sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 2-1:** Moyennes mensuelles des températures en °C période 1993-2003

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sép	Oct	Nov	Dec
T°C	11,15	11,2	13,4	14,86	19,01	22,76	25,24	26,39	23,35	19,77	15,77	12,21

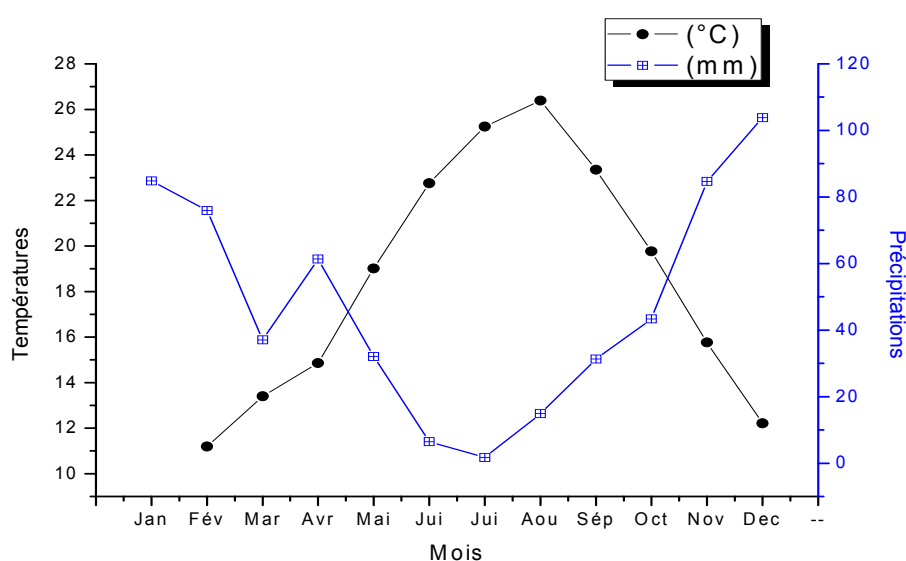
## 2.2. Précipitation

Les valeurs moyennes mensuelles de la précipitation exprimées en mm sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 2-2** : Moyennes mensuelles des précipitations en mm période 1993-2003

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sép	Oct	Nov	Dec
<b>P<sub>Moy</sub> (mm)</b>	84,82	75,92	37,06	61,36	32,09	6,47	1,73	14,9	31,31	43,37	84,7	103,81

Les valeurs moyennes mensuelles de la température et de la précipitation sont représentées dans le diagramme ombrothermique suivant :



**Figure 2.2** : Diagramme ombrothermique de la région d'étude

## 2.3. Vents

L'analyse du régime des vents est effectuée à partir de deux sources de données météorologiques :

### a. Données du Summary of Synoptic Meteorological Observation (S.S.M.O 1914 à 1970)

Les résultats des observations des vents effectuées au large des côtes Algériennes, sont rapportés sous forme des roses de vents pour chaque trimestre et pour toute l'année.

Ces roses montrent, que pendant l'hiver (Octobre à Mars) les vents des secteurs Ouest et Sud-Ouest sont dominants et qu'une grande partie de ces vents présentent une vitesse supérieure à 16 nœuds.

Les vents d'Est et Nord dominant au cours de l'été, mais la majorité de ceux-ci ont des vitesses inférieures à 16 nœuds.

Les vents des secteurs Nord-Est et Est se distinguent beaucoup plus par leur fréquence que par leur vitesse. Par contre, les vents du secteur Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest sont appréciables par leur force mais non par leur fréquence.

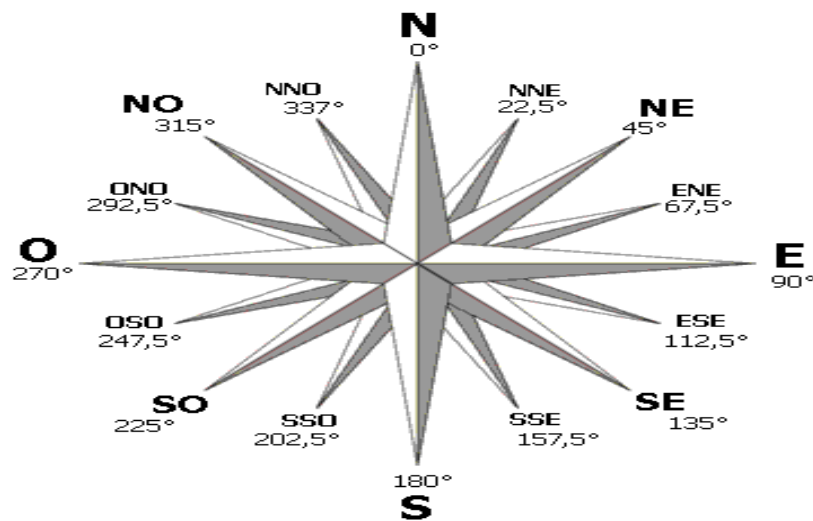


Figure 2.3 : Rose des vents représentant les différentes directions de la houle

### b. Données de la station de Dar El Beida (période de 1975 à 1984)

Ces enregistrements montrent que :

- Les vents de direction N360° (Fréquence 12%), présentent une répartition constante durant toute l'année ;
- Les vents de direction N45° (Fréquence 10%) sont dominants en période estivale s'étalant de Mai à Septembre ;
- Les vents de direction N225° (Fréquence 14,5%) et N270° (Fréquence 11,5%) sont dominants en période hivernale qui s'étale d'Octobre à Avril.

## 2.4. Données océanographiques

### a. Marée et les variations du niveau marin

L'amplitude de la marée astronomique est généralement faible en méditerranée malgré quelques écarts notables suivant la période lunaire, elle est le plus souvent masquée par la surélévation ou l'abaissement du niveau de l'eau engendré par des variations de conditions climatologiques (marée barométrique).

En moyenne la marée de pleine lune est de 25 à 30 cm et celle de la nouvelle lune de 5 à 15cm. D'autres phénomènes peuvent se superposer à cet effet astronomique tel que les pressions atmosphériques, les seiches,...

De forts vents marins locaux peuvent aussi, par action directe sur la surface de la mer, entraîner au rivage un gonflement du plan d'eau que l'on nomme onde de tempête (Storm surge).

Le niveau de la surface de la mer pourrait ainsi atteindre une surélévation maximale de 1m environ, du fait des phénomènes cités ci-dessus.

**b. Houle au large**

Observations du SSMO

Les données de la houle au large sont reprises d'un document intitulé « SUMMARY OF SYNOPTIC METEOROLOGICAL OBSERVATIONS » (S.S.M.O Tome 2, zone Algiers). Ces données s'étalent sur une période de 7 ans de 1963 à 1970.

Une analyse statistique de ces données de base permet de définir les secteurs de la houle prédominants et leurs amplitudes respectives. Des roses de houles sont établies trimestriellement et annuellement.

**Tableau 2-3** : Fréquences mensuelles de la houle au large par direction

Mois	N(%)	NE(%)	E(%)	SE(%)	S(%)	SO(%)	O(%)	NO(%)
<b>Janvier</b>	8,1	12,9	18,2	5,0	6,5	13,2	28,8	7,3
<b>Février</b>	8,8	10,3	12,6	4,0	6,1	16,9	35,6	5,8
<b>Mars</b>	11,3	12,6	15,8	3,6	4,5	12,3	30,5	9,2
<b>Avril</b>	11,7	15,4	16	2,0	4,4	13,7	26,7	10,2
<b>Mai</b>	8,2	26,3	31,9	3	3,3	7,2	13,9	6,2
<b>Juin</b>	9,2	29,1	29,8	1,8	1,4	8,2	16,4	4,2
<b>Juillet</b>	5,9	32,5	35,1	1,4	1,0	5,9	16,3	2,0
<b>Aout</b>	8,8	27,7	37,3	1,9	1,1	5,0	13,4	4,9
<b>Septembre</b>	6,7	26,4	40,5	2,2	2,3	4,6	14,8	2,5
<b>Octobre</b>	7,8	14,1	20,3	3,2	4,2	14,8	28,8	6,8
<b>Novembre</b>	5,5	5,8	10	5,1	8,0	15,9	40,4	9,4
<b>Décembre</b>	10,2	6,2	9,4	4,6	7,5	15,0	37,1	10,0
Fréquence annuelle de la houle	8,5	18,2	23,0	3,1	4,1	11,0	25,2	6,5

Les houles de Nord- Est, d'Est et d'Ouest, sont les plus fréquemment observées. Les fréquences d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques (Est : 23,0% et Ouest:25,2%) avec toutefois une légère prédominance du secteur Ouest. Les fréquences d'apparition sont plus faibles pour les secteurs Nord et Nord-Ouest. Le secteur Nord a une répartition assez régulière durant l'année.

On peut observer le pourcentage d'apparition des directions de houle selon le graphique suivant :



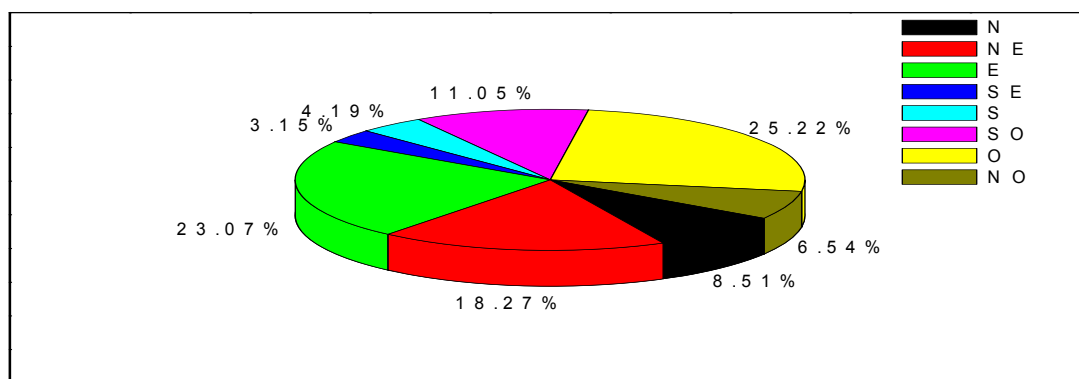


Figure 2.4 : Graphique représentant les fréquences annuelles d'apparition de la houle

- Relation période – amplitude de la houle au large

La répartition des périodes de la houle est donnée par état de mer dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2-4 : Répartition des états de mers par période

Etat de la mer	Période de la houle	< à 6 s	6 à 7 s	8 à 9 s	10 à 11 s	11 à 12 s	13 s
Calme		5,2%	0,1%	-	-	-	-
Degré 0		20,8%	1,9%	0,4%	-	-	-
Degré 1		24,6%	13,1%	2,7%	0,5%	0,2%	-
Degré 2		2,6%	5,4%	3,1%	0,9%	0,2%	-
Degré 3		0,4%	1,1%	1,0%	0,6%	0,2%	-
Degré 4		0,1%	0,5%	0,3%	0,3%	0,3%	-
Total		53,7%	22,1%	7,5%	2,3%	0,9%	-

Les houles observées ont pour la majorité une période courte (Pour 75% des cas la période est inférieure ou égale à 7s) et seul 3% des houles ont une période comprise entre 10 et 13 s.

La relation entre état de mer et hauteur fait l'objet du tableau ci-après :

Tableau 2-5 : Relation état de mer – Hauteur de l'agitation

Degré	Amplitude (m)	Etat de la mer
Calme	< 0,25	Ridée ou belle
Degré 0	0,25 – 0,75	Ridée ou belle
Degré 1	0,75 – 1,75	Modérée
Degré 2	1,75 – 2,75	Agitée
Degré 3	2,75 – 3,75	Forte
Degré 4	➤ 3,75	Très forte ou supérieure

L'agitation provenant des secteurs Ouest et Est est la plus fréquente, néanmoins par forte houle le secteur Ouest prédomine. Les houles de tempête proviennent essentiellement du secteur Ouest. Pour les secteurs Nord et Nord - Est les fréquences d'apparition sont très faibles.

- *Statistique de la houle au large*

Les caractéristiques des houles extrêmes sont, par secteur de provenance et pour toutes directions confondues, les suivantes :

**Tableau 2-6** : Hauteurs des houles extrêmes par secteur de provenance

Période de retour de la houle	Direction de la houle	Est	Nord – Est	Nord	Nord– Ouest	Ouest	Toutes les directions
Biennale		4,12 m	4,93 m	4,90 m	4,16 m	7,36 m	<b>7,44 m</b>
Quinquennale		4,7 m	5,67 m	5,75 m	4,87 m	8,43 m	<b>8,34 m</b>
Décennale		5,14 m	6,23 m	6,38 m	5,40 m	9,22 m	<b>9,02 m</b>
Vingtennale		5,59 m	6,79 m	7,02 m	5,94 m	10,02 m	<b>9,70 m</b>
Cinquantennale		6,17 m	7,53 m	7,87 m	6,65 m	11,08 m	<b>10,60 m</b>
Centennale		6,62 m	8,08 m	8,50 m	7,18 m	11,88 m	<b>11,27 m</b>

## Conclusion

En hiver les houles prédominantes sont de secteur Ouest et Nord – Ouest avec une période moyenne de 8 à 9 secondes, des périodes supérieures à 10 secondes, pouvant atteindre 13 s sont relevées lors de grandes tempêtes.

L'amplitude moyenne correspondante la plus fréquente est de 2 à 3 m, des houles peuvent atteindre des amplitudes maxima de 4 à 6 m.

La longueur d'onde des houles d'hiver les plus fréquentes est de 150 à 170 m avec une célérité de 14 m/s. Par « Gros temps » les valeurs sont plus élevées : longueur d'onde de 200m et célérité de 17 m/s. Dans ces conditions, la profondeur de déferlement peut être estimée entre 6 et 9m.

### 2.5. Houles à la côte

L'étude de la réfraction de la houle a pour objet l'exploitation des caractéristiques de la houle au large pour définir les caractéristiques de la houle à la côte.

Les données de la houle à la côte serviront de données d'entrée pour la conception des ouvrages maritimes, ainsi qu'une meilleure connaissance des amplitudes de houles à la côte.

#### a) *Principe de calcul de la réfraction de la houle*

Connaissant la climatologie au large, il est possible d'établir une statistique de la houle au large. Cette statistique est ensuite propagée vers la côte en utilisant des fonctions de transfert calculées suivant la bathymétrie représentée suffisamment au large, dans les fonds ou les houles ne sont pas réfractées. Le coefficient de réfraction est défini de la manière suivante :

$$K_r = \frac{H_{s\ local}}{H_{s\ large}}$$

Le calcul de la réfraction de la houle entre le large et la côte sont effectués par le modèle numérique SWAN (Simulating Waves Nearshore développé par l'université du DELFT) pour différentes conditions de houle au large (hauteur, période et direction). Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant notamment en compte le phénomène de :

- ✓ Réfraction, sur les fonds et autour des ouvrages;
- ✓ Frottement sur le fond;
- ✓ Déferlement.

**b) Données de base**

Données bathymétriques

La bathymétrie utilisée pour cette étude de réfraction est celle issue de la digitalisation de la carte SHOM n°3030 intitulée « carte Septentrionale d'Afrique partie comprise entre Alger et Cherchell \_ échelle 1/100500 » ainsi que celle issue de la campagne de reconnaissance sur site réalisée au moi de Juillet 2009 par le LEM dans le cadre de l'étude de protection du rivage du Club des Pins.

Données de houles au large

Les données du Summury of synoptic Meteorological Observations (SSMO) consistent en des observations de navire sur des périodes allant de 1963 à 1970.

Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de la houle par direction et par période.

Le choix des périodes est fait en fonction de la répartition des probabilités de dépassement d'une houle d'amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes (> 10 s), ont une probabilité d'apparition relativement faible. Les périodes de houle considérées dans le cadre de cette étude sont : 6, 8 et 10 secondes pour les houles annuelles. Pour les houles extrêmes la période a été calculée en fonction du H<sub>s</sub> correspondant.

Ci après sont présentés les tableaux portant sur les conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude :

**Tableau 2-7** : Houle annuelle

Période	Direction de la houle au large			
	N270°	N 315°	360°	45°
6s	H <sub>s</sub> = 1,2 m	H <sub>s</sub> = 1,1 m	H <sub>s</sub> = 1,0 m	H <sub>s</sub> = 1,1 m
8s	H <sub>s</sub> = 2,6 m	H <sub>s</sub> = 2,6 m	H <sub>s</sub> = 2,6 m	H <sub>s</sub> = 2,5 m
10 s	H <sub>s</sub> = 5,5 m	H <sub>s</sub> = 4,5m	H <sub>s</sub> = 4,9 m	H <sub>s</sub> = 5,0 m

**Tableau 2-8** : Houles extrêmes

Période de retour	Direction de la houle au large			
	N 270°	N 315°	N 360°	N 45°
Biennale	$H_s = 7,3 \text{ m}$	$H_s = 4,1 \text{ m}$	$H_s = 4,9 \text{ m}$	$H_s = 4,9 \text{ m}$
	$T_p = 13,2 \text{ s}$	$T_p = 10,0 \text{ s}$	$T_p = 10,8 \text{ s}$	$T_p = 10,9 \text{ s}$
Décennale	$H_s = 9,2 \text{ m}$	$H_s = 5,4 \text{ m}$	$H_s = 6,3 \text{ m}$	$H_s = 6,2 \text{ m}$
	$T_p = 14,5 \text{ s}$	$T_p = 11,4 \text{ s}$	$T_p = 12,3 \text{ s}$	$T_p = 12,2 \text{ s}$
Vingtennale	$H_s = 10,0 \text{ m}$	$H_s = 5,9 \text{ m}$	$H_s = 12,3 \text{ m}$	$H_s = 6,7 \text{ m}$
	$T_p = 14,9 \text{ s}$	$T_p = 11,9 \text{ s}$	$T_p = 12,9 \text{ s}$	$T_p = 12,7 \text{ s}$
Cinquantennale	$H_s = 11,0 \text{ m}$	$H_s = 6,6 \text{ m}$	$H_s = 7,8 \text{ m}$	$H_s = 7,5 \text{ m}$
	$T_p = 15,5 \text{ s}$	$T_p = 12,6 \text{ s}$	$T_p = 13,5 \text{ s}$	$T_p = 13,3 \text{ s}$
Centennale	$H_s = 11,8 \text{ m}$	$H_s = 7,1 \text{ m}$	$H_s = 8,5 \text{ m}$	$H_s = 8,1 \text{ m}$
	$T_p = 15,9 \text{ s}$	$T_p = 12,0 \text{ s}$	$T_p = 14,0 \text{ s}$	$T_p = 13,4 \text{ s}$

Les résultats de calcul de la réfraction de la houle de récurrence annuelle seront utilisés pour la capacité de transport des sédiments.

Les résultats issus du calcul de la réfraction des houles extrêmes seront utilisés comme données d'entrées au dimensionnement des ouvrages de protection.

#### Choix du secteur angulaire

Le secteur angulaire considéré correspond aux limites naturelles imposées d'une part, par la configuration géographique du site d'étude, et d'autre part, par le secteur d'intérêt des houles au large.

Ainsi quatre directions ont été retenues en tenant compte des tableaux de fréquence par direction des houles au large ainsi que l'incidence de ces houles par rapport à la zone d'étude :

- ✓ Une direction approximativement parallèle à la côte pour mesurer les effets d'une houle frontale (315°N) ;
- ✓ Trois directions de houle à incidence oblique (270°N, 360°N et 45°N).

#### **c) Résultats**

Les résultats de l'étude de propagation de la houle sont illustrés par :

- Les épures de réfraction qui montrent qualitativement comment la hauteur de houle et direction changent au cours de la propagation de la houle ;
- La détermination quantitative des conditions de la houle en quelques points, qui permet l'établissement de la statistique locale de la houle à cette profondeur qui sera utilisée pour l'estimation de la capacité de transport et pour le dimensionnement des ouvrages de protection.

Le coefficient de réfraction  $K_r$  a été calculé pour les houles annuelles pour chaque direction retenues à une profondeur d'environ 10m (la profondeur limite de la dynamique sédimentaire).

**Tableau 2-9** : Résultat du calcul des houles de récurrence annuelle

Les houles provenant des directions 270°N, 315°N et 360° sont peu réfractées, elles

Direction	Période (s)	Amplitude de la houle au large $H_s$ (m)	Coefficient de réfraction $K_r$ à -10m	Amplitude de la houle à -10m	Angle d'arrivée
N 270°	6	1,19	0,83	0,99	279
	8	2,67	0,79	2,11	286
	10	5,54	0,74	4,13	292
N 315°	6	1,10	0,91	1,01	315
	8	2,64	0,89	2,36	316
	10	4,53	0,88	4,00	316
N 360°	6	1,00	0,81	0,81	350
	8	2,67	0,78	2,09	344
	10	4,92	0,77	3,80	340
N 45°	6	1,09	0,36	0,40	7
	8	2,56	0,39	1,02	358
	10	5,05	0,45	2,28	352

présentent un coefficient de réfraction  $K_r$  compris entre 0,74 et 0,91. Ces houles gardent une bonne partie de leur énergie au large.

Par contre, les houles de direction 45°N sont beaucoup plus réfractées elles gardent moins de 50% de leur énergie au large ; le coefficient de réfraction oscille entre 0,36 et 0,45.

## 2.6. Houles extrêmes

Pour les houles de dimensionnement des ouvrages de protection le choix a été porté sur les houles ayant une période de retour de cinquante ans.

**Tableau 2-10** : Résultats de calcul des houles de récurrence pluriannuelle

Direction	Période de retour(s)	Amplitude de la houle au large $H_s$ (m)	Coefficient de réfraction $K_r$ à -3m	Amplitude de la houle à -3m
N 270°	50	11,08	0,19	2,18
N 315°	50	6,65	0,29	1,99
N 360°	50	7,87	0,25	2,01
N 45°	50	7,53	0,26	2,01

Le coefficient de réfraction  $K_r$  a été calculé pour les houles cinquantennales pour chaque direction retenue à une profondeur d'environ 3m, profondeur au pied des ouvrages projetés.

A des profondeurs de -3m, les houles provenant de toutes les directions sont réfractées avec un coefficient de réfraction  $K_r$  varie entre 0.19 et 0.29. En arrivant à la côte les houles perdent 80% de leurs énergies au large.

### 2.7. Courants

#### a. *Courant général*

Le courant atlantique (pénétration des eaux par le détroit de Gibraltar) longe, d'Ouest en Est, les côtes d'Afrique du nord ; sa vitesse est de l'ordre de 1,5 à 2 nœuds. Ce courant s'étale sur plusieurs milles nautiques et son action se fait sentir jusqu'à une profondeur de 200m. Encore très sensible au large de l'Algérois (vitesse = 0,7 nœuds), son action va diminuer dans l'Est du bassin méditerranéen. (1nœuds = 0,57m/s)

Le courant de surface est compensé en profondeur par un contre courant qui longe les côtes espagnoles. La vitesse de ces courants peut augmenter par régime de vent d'Ouest pour atteindre 2,5 à 3,0 nœuds. Les transferts côtiers sont surtout conditionnés par les différentes dérives littorales engendrées par la houle ; pendant l'hiver ils ont une direction Ouest-Est du fait de la houle dominante du NW, le reste de l'année les courants ont plutôt une direction Est-Ouest.

Sur les côtes Algériennes les courants de marées, du fait du faible marnage des marées, sont négligeables voir même inexistantes. Les courants de houle sont localisés dans la zone comprise entre le déferlement et la côte, lorsque la houle déferle avec une certaine obliquité par rapport au rivage. Lorsque la houle est frontale, les échanges importants peuvent se faire entre la côte et le large par des courants orientés vers les larges appelés courants de retour ou « rip currents », ces courants traversent la zone de déferlement. Ces courants peuvent être très importants et dépasser les m/s (2 nœuds).

#### b. *Courant mesuré in situ en Juillet 1977*

Selon le « Rapport sur la reconstitution des plages entre Sidi Fredj et Club des Pins » réalisé par NEDECO Ingénieurs conseils Néerlandais (la Haye) et le laboratoire hydraulique de Delft pour le compte du ministère du tourisme en 1977 une campagne de mesure de courant a été menée à l'aide de flotteurs. Ces mesures ont été étalées sur les 17, 19, 22, 23, 30 et 31 Juillet 1977 afin de pouvoir déterminer l'influence des conditions météorologiques.

Les mesures ont été effectuées à des profondeurs de 1m, 5m et 10m.

Les mesures effectuées dans la zone de déferlement indiquent que pour une hauteur de houle relativement faible ( $H_s = 0.7m$ ) il peut déjà se produire un important courant littoral, généré par les houles, ce qui peut avoir des conséquences pour le transit littoral.

## 3. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

D'une manière générale, le littoral de la baie d'El Djamila est globalement en recul. Le littoral de Club des Pins est soumis à une érosion de la plage. Ce phénomène s'accroît fortement aux endroits de la zone des habitations dont certaines se retrouvent en contact direct avec la mer.

Une comparaison des photos aériennes de l'institut national de cartographie et de télédétection (INCT) prise en 1972 et en 1999 avec la photo de Google Earth de l'année de 2004 couvrant la zone d'étude a permis de retracer l'évolution du trait de côte au niveau de la zone d'étude.



**Figure 2.5** : Photo aérienne montrant le recul du trait de côte entre 1972 et 1999

Sur une durée de 32 ans (1972-2004), le recul du trait de côte a été estimé en moyenne à 40 mètres, soit un recul de 125cm par an.

Suites aux grosses tempêtes de l'année 2007, le site de Club des Pins a subi des dégradations importantes et un net recul du trait de côte comme le montrent les photos ci-dessous :



### 3.1. Facteurs d'érosion

#### a. Régime de houle

Les roses de provenance des houles au large de la baie indiquent qu'il existe deux régimes de houles distincts : les houles provenant de l'Ouest et les houles provenant du Nord-Est. La baie étant orientée au Nord-Ouest, il existe très peu de houle arrivant de manière frontale. La majorité des houles arrivent donc avec un angle d'incidence qui provoque une dérive littorale vers le Nord- Est ou vers le Sud-Ouest. Cependant, l'incidence de ces courants ne se fait ressentir qu'à partir du milieu de la Baie, d'un côté comme de l'autre du fait de la présence de deux caps (Sidi Fredj et Ras Acrata) qui créent une zone d'ombre. La figure ci-dessous présente une illustration de la résultante des courants engendrés par l'incidence oblique de la houle :



**Figure 2.6** : Direction des courants dans la zone du Club des Pins

On remarque sur la figure ci dessus que la conjonction du climat de houle et de la disposition de la Baie entraine le secteur situé au niveau du Club des Pins en position de sources de sédiments, mais jamais comme puits. Les extrémités de la Baie, le port de la Madrague et le port du Sidi Fredj, doivent pour leur part subir des phénomènes d'ensablement.

Par ailleurs, la réfraction de la houle tend à redresser les phénomènes de propagation des vagues perpendiculairement à la plage. Etant situé au milieu de la Baie, le secteur du Club des Pins est donc plus sujet à l'attaque des houles et au transit dans le profil lorsque les houles réfractées arrivent de manière presque frontale.

#### b. Urbanisation

Pendant très longtemps, pour assurer la protection du littoral, des ouvrages de haut de plage, constitués par une digue longitudinale plus ou moins réfléchissante ont été réalisés.

La réaction du littoral vis-à-vis de ces aménagements a montré qu'un tel système de défense, n'apporte pas d'améliorations, mais peut souvent porter préjudice à la stabilité de la plage si l'ouvrage est plus réfléchissant.

Les constructions trop proches du rivage constituent par elles mêmes des obstacles pour les houles d'incidence frontale entraînant ainsi la disparition des plages et la dégradation



permanente des habitations par déchaussement des fondations et par conséquent leur effondrement.

### c. *Pollution*

#### ❖ Rejets urbains

Il est important de noter l'existence de deux rejets urbains à l'Est et à l'Ouest de notre zone d'étude à ciel ouvert sans aucun traitement préalable des eaux de rejets. (Figure 2.7)



**Figure 2.7** : Rejets urbains dans la zone de Club des Pins

Les eaux usées du complexe de Club des Pins débouchent directement sur le haut de plage à ciel ouvert, constituant ainsi une source de pollution des eaux de baignade et peuvent avoir une incidence néfaste sur l'herbier de posidonie qui joue un rôle important dans le piégeage des sédiments.

#### ❖ Ports

Les deux ports de Sidi Fredj et d'El Djamila peuvent être à l'origine de plusieurs sources de pollution liées aux rejets des différentes activités qui s'y exercent. Trois types de pollutions potentielles peuvent être distingués :

- ✓ Pollution organique ou bactérienne due aux rejets clandestins par les bateaux habités, ou de rejets extérieurs (eaux pluviales);
- ✓ La pollution chimique due aux activités nautiques (résidus issus des opérations de carénage ou de peinture, détergent) ;
- ✓ La pollution par les macros-déchets flottants ;
- ✓ La pollution par les rejets de dragage en mer.

La pollution physico-chimique des eaux (par les émissaires et les ports) peut participer à la dégradation de la qualité des eaux et au recul des herbiers de Posidonies vers le large. Ces herbiers ont un rôle naturel de protection de la plage selon trois aspects : ils réduisent l'énergie de la houle lorsqu'elle se propage au dessus d'eux ; ils fixent les sédiments ; enfin, leurs masses mortes, lorsqu'elles s'échouent sur la plage, ont un rôle de maintien du sable.

Il faut tenir compte de la valeur intrinsèque de l'herbier à Posidonies considéré comme l'un des écosystèmes les plus productifs du littoral méditerranéen : production primaire exceptionnelle, base de nombreuses chaînes alimentaires, abris et frayères pour de nombreuses espèces d'intérêt économique, fixation des fonds meubles et protection contre l'érosion.

Au vu du caractère balnéaire du site d'étude il est impératif de mettre en place un dispositif visant à limiter la pollution, il faudra créer des stations d'épuration-au niveau des sources polluantes- qui limiteraient les effets des rejets en mer. Elles collecteraient les eaux usées urbaines et industrielles de toute la région.

Les rejets urbains industriels devraient être interdits en mer, afin de permettre le développement de la flore, qui joue un rôle très important dans la fixation des fonds sableux, et de la faune susceptible de fournir une quantité non négligeable de sédiments (coquilles et débris de coquilles).

L'Analyse chimique des sédiments montrent que les sédiments dans la zone d'étude ne montrent aucun indice de pollution. Tous les résultats sont nettement inférieurs aux normes Algériennes à l'exception du taux de mercure qui se rapproche toutefois de la valeur limite admise.

### **3.2. Acquisition des données**

#### ***a. Mode du levé topographique***

Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK) permet de mesurer un point à quelques centimètres près.

Ce récepteur mobile, porté par le topographe au moment du levé, fonctionne en mode RTK (Réal Time Kinematic), résolution des ambiguïtés en mode OTF. Il reçoit les données des satellites et de la station de référence simultanément et fournit instantanément la position tridimensionnelle du point à une précision inférieure à cinq centimètres (< 5 cm).

Le transfert et le traitement de ces données sont réalisés sur le logiciel TGO (Trimble Geomatic Office).

La visualisation de ces données permet de déceler les éventuelles anomalies et de détecter les zones non couvertes.

#### ***b. Mode du levé bathymétrique***

Le levé bathymétrique consisté à déterminer les coordonnées tridimensionnelles des points du fond marin dans le système géodésique WGD84 à l'aide d'un récepteur GPS et d'un échosondeur. Le récepteur GPS cinématique en temps réel (RTK) permet de mesurer un point à quelques centimètres près. Cette précision verticale permet de déterminer les corrections du niveau de l'eau (corrections des marées).

Donc pour la réalisation de cette tâche par GPS, il a été procédé à la mise en place du système suivant :

Une antenne GPS, qui reçoit les données par satellite, est fixée sur le point de référence. Le récepteur 5700 émet des données par liaison radio au récepteur mobile à l'aide d'un modem externe PACIFIC CREST et une antenne UHF.

Le récepteur mobile placé au bord de l'embarcation fonctionne en mode RTK (Real Time Kinematic, résolution des ambiguïtés en mode OTF). Il reçoit les données des satellites de la station de référence et fournit instantanément la position tridimensionnelle de l'antenne GPS.

L'embarcation est équipée d'une caisse métallique et d'un support vertical fixé sur le coté, qui maintient à la base le transducteur de l'échosondeur et en tête l'antenne GPS. Quelque soit la variation du plan d'eau, la longueur du support est constante, par conséquent tous les échos mesurés sont référencés par rapport à l'antenne GPS. La partie immergée du support ainsi que celle située hors de l'eau sont mesurées avant le début des levés.

Ce dispositif est interfacé par un micro ordinateur et le logiciel de navigation et d'acquisition de données « HYPACK ».

Le logiciel reçoit du récepteur GPS les coordonnées du point au niveau du plan d'eau, l'échosondeur calcule la profondeur à partir des mesures effectuées par le transducteur, le résultat de ces deux opérations aboutit à la connaissance des coordonnées du point bathymétrique mesuré.

### ***c. Point de contrôle***

Un point de contrôle est implanté à terre, ses coordonnées sont obtenues par observation statistique relativement à une des stations de référence.

Ce point de contrôle est mesuré avant le début de chaque levé. Les coordonnées affichées sur HYPACK sont comparées avec les coordonnées réelles. Afin de pouvoir entamer les levés, l'écart tolérable obtenu suite à cette comparaison doit être inférieur à cinq centimètres.

### ***d. Traitement des données***

Les données brutes acquises lors du levé bathymétrique sont traitées à l'aide du logiciel HYPACK. Le traitement consiste à supprimer les sondes résultantes de fausses mesures.

La souplesse du logiciel permet de générer un modèle numérique sur terrain MNT des données traitées grâce auquel sont visualisées les isobathes qui permettent de vérifier les données sur la base de la forme des courbes générées.

### ***e. Sonar Latéral***

Les levés du Sonar Latéral permettent d'avoir une image acoustique à l'aide du Sonar C MAX 2 et d'un GPS cinématique en temps réel qui permet le positionnement du levé utilisant la même méthodologie que celle du levé bathymétrique.

Sur la carte géomorphologique on remarque la présence de deux zones longeant le trait de côte.

La première représente des facies sableux et la deuxième un herbier de posidonies éparées. Dans la première zone on constate que le facies sableux est étendu de 400m plus ou moins perpendiculaire au trait de côte contenant quelques facies rocheux éparpillés longeant la côte.

La deuxième est une zone d'herbiers de posidonies éparses troublées par un affleurement éparpillés du substratum (qui est un faciès sableux avec faible présence d'herbier de posidonies) marqué par la rupture de pente locale pour les faciès sableux les plus éloignés de la côte et dont l'un présente un petit faciès rocheux.

La superposition de la carte bathymétrique et de la carte géomorphologique des fonds issue des données du Sonar Latéral (ci-dessus), montre que la limite supérieure de l'herbier de posidonie se situe aux environ des lignes bathymétriques -6m à -7m, soit à une distance variant de 430m à 550m de la côte.

## 4. ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

### 4.1. Analyse bathymétrique

Dans ce qui suit sont présentés les résultats de la campagne bathymétrique du mois de Juillet 2009. Sur la base des sondes relevées, un traitement numérique a été effectué à l'aide d'un logiciel spécifique pour établir la carte bathymétrique du site présenté ci-dessous.

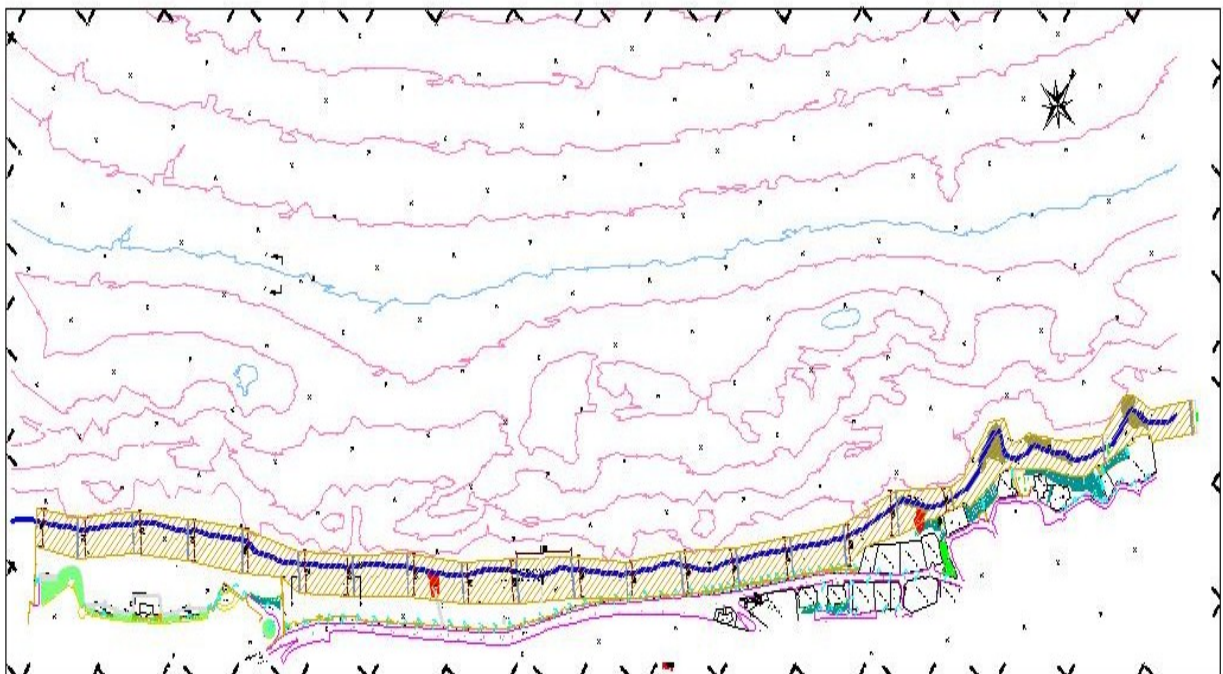


Figure 2.8 : Carte bathymétrique de la plage de Club des Pins

L'analyse globale de cette carte indique des fonds marins réguliers au-delà de - 5m avec des isobathes parallèles à la côte, et un fond plus ou moins chahuté entre 0 et -4m, ceci correspond à la zone de déferlement de la houle responsable des mouvements sédimentaire proche de la côte.

La pente en général des fonds est douce, elle est de l'ordre de 1,1%.

### 4.2. Estimation du transit littoral

L'estimation du transit littoral est réalisée par un calcul manuel en s'appuyant sur la formule du LCHF suivante :

$$Q = \frac{K}{C} * g * H_s^2 * T * t * f(\alpha)$$

Q : Volume du sable transporté (en m<sup>3</sup>) ; K : Coefficient de transport du sédiment (2,5 10<sup>6</sup>) ; g : accélération de la pesanteur (en m/s<sup>2</sup>) ; c : cambrure de la houle (0.03) ; H<sub>s</sub> : amplitude de la houle (en m) ; T : Période de la houle (en s) ; t : durée d'action de la houle (en s) et f(α) : fonction d'obliquité « α » de la crête de la houle avec la côte.

Le coefficient K pour les sables fins à moyen (D<sub>50</sub> de 0,2 à 0,5mm) varie de 2,5 à 5,0 10<sup>6</sup>.

Pour un sable de diamètre supérieur à 0.5mm le coefficient K peut s'exprimer par la relation suivante :  $K = 1,8 \cdot 10^6 \cdot d^{-1/2}$  avec d, diamètre en mm.

L'utilisation de cette formule conduit à définir :

- Le bilan énergétique annuel de transport caractérisé par :  $H_s^2 \cdot T \cdot t$  ;
- La fonction f(α) liée à l'obliquité de la houle  $f(\alpha) = \sin(\frac{7}{4}(\alpha))$ .

Dans ce qui suit seront représentés le calcul du bilan énergétique annuel et l'estimation du transit littoral.

**a. Donnée utilisée**

Les données nécessaires à l'établissement du transit sédimentaire proviennent des résultats de l'étude de réfraction de la houle réalisée dans le cadre de cette étude et sont obtenues par extraction de 22 points au large à partir du modèle SWAN.

Les résultats de réfraction de la houle à partir du modèle SWAN sont moyennés comme suit :

**Tableau 2-11** : Moyennes des résultats obtenus par direction et par période

Direction	45° N			360° N			315° N			270° N		
	H <sub>s</sub> (m)	T (s)	Angle d'arrivée θ°	H <sub>s</sub> (m)	T (s)	Angle d'arrivée θ°	H <sub>s</sub> (m)	T (s)	Angle d'arrivée θ°	H <sub>s</sub> (m)	T(s)	Angle d'arrivée θ°
6	0,4	6,2	7	0,8	5,9	350	1,0	5,9	315	0,9	5,9	379
8	1,0	7,7	358	2,0	7,7	344	2,3	7,7	316	2,1	7,7	286
10	2,2	10,3	252	3,8	10,3	340	4,0	10,3	316	4,1	10,3	292

**Calcul du bilan énergétique annuel**

- Calcul de la durée d'action de la houle « t »
- Le temps « t » est donné par la relation suivante :  $t = \frac{365j \cdot 24H \cdot 3600s}{100} \times f(\%)$

Avec f(%) fréquence d'observation.

La fréquence d'observation de la houle et de sa durée d'action sont donnés comme suit :

**Tableau 2-12:** Récapitulatif de la fréquence d'observation et de la durée d'action de la houle

Direction	45°N		360°N		315°N		270°N	
	f(%)	t(s)	f(%)	t(s)	f(%)	t(s)	f(%)	t(s)
6	17,0	5367427,2	7,5	2371507,2	5,7	1803859,2	19,9	6297739,2
8	1,2	3381585,6	0,9	296438,4	0,8	255441,6	4,6	1475884,8
10	0,1	34689,6	0,1	28382,4	0,0	9460,8	0,4	13,8758.4
<b>Total général :</b>		<b><math>H_s^2 \cdot T \cdot t = 168\ 812\ 174\ m^2s^2</math></b>						

Le bilan d'énergie annuel a été estimé comme suit :

**Tableau 2-13 :** Récapitulatif du bilan d'énergie annuel par direction et par période

Le bilan énergétique annuel est estimé à  **$16 \times 10^7\ m^2s^2$**

Direction	45°N	360°N	315°N	270°N
Période	$(H_s)^2 \cdot T \cdot t \cdot (m^2s^2)$	$(H_s)^2 \cdot T \cdot t \cdot (m^2s^2)$	$(H_s)^2 \cdot T \cdot t \cdot (m^2s^2)$	$(H_s)^2 \cdot T \cdot t \cdot (m^2s^2)$
6	5358839,32	9195640,11	10875090,11	36478967,86
8	3056912,77	9983467,55	1096075,10	50660765,60
10	1870026,42	4250060,05	1569735,94	24543593,15
Total	10285778,51	23429167,72	23413901,14	111683326,61

### Calcul du transit sédimentaire

- Calcul de l'angle «  $\alpha$  » angle que fait la crête de la houle avec la côte

$$f(\alpha) = \sin\left(\frac{7}{4}(\alpha)\right)$$

Le volume du transit est estimé comme suit :

**Tableau 2-14 :** Récapitulatif du calcul de l'angle et de la fonction  $f(\alpha)$

Direction	N 45°		N 360°		N31°		N27°	
	$\alpha^\circ$	$f(\alpha)$	$\alpha^\circ$	$f(\alpha)$	$\alpha^\circ$	$f(\alpha)$	$\alpha^\circ$	$f(\alpha)$
6	49	1,00	32	0,83	3	0,09	39	0,93
8	40	0,94	26	0,71	2	0,06	32	0,83
10	34	0,86	22	0,62	2	0,06	26	0,71

**Tableau 2-15** : Récapitulatif du transit par période et par direction

Direction	N 45°	N 360°	N 315°	N 270°	Total par direction	
Période (s)	Q (m <sup>3</sup> /an)	Q (m <sup>3</sup> /an)	Q (m <sup>3</sup> /an)	Q (m <sup>3</sup> /an)	Q (m <sup>3</sup> /an)	
6	-4382,1	-6251,3	815,9	27783,2	-10633,4	28599,2
8	-2355,5	-5838,9	549,1	34439,7	-8194,4	34988,8
10	-1321,2	-2169,4	78,5	14354,7	-3490,7	14433,2
Total par direction	-8058,9	1443,6	-14259,7	76577,6	-22318,6	78021,3
<b>Total général = 100 340 m<sup>3</sup>/an</b>						

Le transit sédimentaire dans la direction Ouest (+) = 78021,34 m<sup>3</sup>/an (315°N et 270°N)

Le transit littoral dans la direction Est (-) = 22318,67 m<sup>3</sup>/an (45°N et 360°N)

Le volume résultant des sédiments pouvant être déplacés de l'Ouest vers l'Est serait de 55 702,67 m<sup>3</sup>/an.

Rappel : par convention le signe (+) correspond à un transport Ouest → Est et le signe (-) correspond à un transport Est → Ouest.

#### ***b. Schéma probable de la dynamique sédimentaire***

Les houles constituent un facteur fondamental dans les problèmes de transports littoraux. Les forces qu'elles exercent sur les fonds peuvent provoquer une remise en suspension et un déplacement des matériaux ; la dynamique sédimentaire est régie par ces facteurs hydrodynamiques locaux.

Ainsi, les houles d'incidence frontale vont entraîner un transport de sédiments dans le profil, alors que celles ayant une incidence oblique vont par contre disperser les sédiments parallèlement à la côte sous l'action de la dérive littorale.

La côte de notre secteur d'étude est orientée Sud-ouest Nord-est, elle est bien exposée aux houles du secteur Ouest, Nord-ouest et Nord et plus au moins aux houles de secteur Nord-est.

Les houles du secteur Nord-ouest qui abordent la côte avec incidence plutôt frontale engendrent un courant de retour et assurent un transit des sédiments dans le profil.

Les houles des autres secteurs, à savoir celle du Nord, de l'Ouest et Nord-Est abordent la côte avec une incidence oblique et engendrent un courant de dérive littoral provoquant le transport sédimentaire parallèle à la côte.

### **4.3. Description de l'ouvrage de protection**

#### ***a. Choix du type de protection***

Comme il a été mentionné précédemment, la plage de Club des Pins subie depuis quelques années une érosion assez importante. Plusieurs solutions existent pour remédier à ce phénomène (vu dans le chapitre 1) comme la construction d'ouvrages de défense rigide

(brise-lames immergés ou émergés, les épis et les ouvrages de haut de plage) et l'engraissement artificiel de la plage.

Dans notre cas, nous cherchons à protéger la plage contre les houles dites de tempête. Par conséquent ni les épis (qui servent à stabiliser le transport sédimentaire mais pas à l'arrêter), ni les ouvrages de haut de plage (ils sont réalisés dans le cas où la plage a quasiment disparu et où les habitations sont en contact direct avec la mer, dans ce cas même de simples houles frontales peuvent endommager les habitations) correspondent à nos attentes. Par conséquent, nous optons pour une protection en brise-lames immergés pour atténuer les houles et pour stabiliser le trait de côte.

En plus des brise-lames immergés, un rechargement artificiel de la plage sera effectué par un déversement sur le rivage de quantités importantes de sédiments provenant de carrière de prélèvement située en mer ou sur terre afin d'agrandir et de stabiliser la plage menacée d'érosion. On compense ainsi par des apports extérieurs la réduction des apports naturels.

### ***b. Dimensionnement des brise-lames***

Il n'existe pas, actuellement, des critères bien définis quant aux caractéristiques optimales des brise-lames (hauteur, longueur, profondeur d'implantation), celles-ci dépendent de la houle (amplitude, période, longueur d'onde), de l'amplitude de la marée, de la pente de l'ouvrage, de la pente des fonds. Les brise-lames les plus efficaces apparaissent être ceux qui ne sont pas franchis par les vagues. Il semble qu'une série de brise-lames courts peut avoir la même efficacité qu'un brise-lames long.

#### **– Mer à marée/mer sans marée**

Le fonctionnement d'un brise-lames est très différent suivant qu'il est placé dans une mer à marée ou dans une mer sans marée ou à très faible marnage.

Dans une mer sans marée, où l'utilisation des brise-lames est courante, leur efficacité et leur hauteur peuvent être limitée en vue de n'écarter que les plus fortes vagues, toutefois, la recherche d'un maximum d'efficacité conduit le plus souvent à adopter des brise-lames émergents.

Dans une mer à marée, peu de réalisations sont connues : l'utilisation des brise-lames est beaucoup plus délicate, leur efficacité étant partielle par suite du passage périodique des vagues au-dessus de l'ouvrage, de manière d'autant plus importante que le marnage est grand et la hauteur du brise-lames faible.

La méditerranée est clairement reconnue comme une mer sans marée, donc les brise-lames seront beaucoup plus efficaces.

#### **– Données de houles nécessaires au dimensionnement**

Les comparaisons des photographies aériennes nous donnent une information de recul du trait de côte de 40m sur 32ans, soit une valeur de 125cm par an. Cette valeur n'est qu'une moyenne et ne donne pas d'indication sur les évolutions périodiques du trait de côte, à savoir si ce recul est continu (peu probable), ou si c'est une moyenne de période d'engraissement et de période d'érosion (plus probable). Une photographie aérienne après chaque tempête aurait permis de voir leur influence sur le trait de côte, et ainsi calculer la perte due aux coups de mer au bout d'une année.



Le manque de recul sur le fonctionnement morphodynamique de la zone d'étude, et par le peu d'informations recueillies sur le recul du trait de côte après chaque tempête, il est difficile de dimensionner les ouvrages par rapport à une houle de référence donnée. Cependant, on sait que les tempêtes de 2007 ont provoqué d'importants dégâts. Il est fort possible que ce soit la succession des tempêtes de Février et Mars 2007 qui aient engendré de tels dégâts, car une tempête isolée comme celle de 2008 n'a apparemment pas eu les mêmes effets.

Néanmoins, notre dimensionnement va se baser à titre complètement arbitraire, sur une réduction de 50% de la hauteur significative de la tempête de 2007, dont les caractéristiques au large sont les suivantes : la direction = N360°,  $H_s = 4,6\text{m}$  et  $T_p = 10\text{s}$  (Tableau 2-9).

Le tableau 2-9 indique que le coefficient de réfraction entre le large et la profondeur -10m, issu des plans de vagues réalisés avec SWAN, est de 0,77 pour une houle de direction N360° et une période  $T_p=10\text{s}$ . Ce qui conduit à une hauteur significative de la tempête de 2007 de  $H_s = 3,8$ .

### – Distance au trait de côte / Profondeur d'implantation

Outre la hauteur de la houle, un des paramètres les plus importants est sa longueur d'onde. Interviennent également l'obliquité, la fréquence des directions et la durée d'action.

Carpentier propose des formules approximatives qui donnent une marche à suivre plus qu'une méthode pour le cas des brise-lames implantés dans une mer sans marée à faible ou sans transit littoral. L'auteur précise que la profondeur optimale d'implantation doit être choisie de façon que la houle efficace provoquant le transport à piéger, déferle en deçà des brise-lames afin que celui-ci puisse intercepter la majorité du transit. La connaissance de  $H_s$  permet la détermination de la profondeur d'implantation qui peut être liée à  $H_s$  par  $Pr = 1,5 H_s$  et par voie de conséquence, la distance des ouvrages à la côte.

Dans notre cas,  $H_s = 3,8 \longrightarrow P = 5,7\text{ m}$  (Pour la houle de tempête de 2007)

Donc nous pouvons choisir une profondeur d'environ 5m pour implanter notre ouvrage.

En se référant à la carte bathymétrique du site du club des Pins, la profondeur -5m est correspond approximativement à 350m du rivage.

La houle au large de direction N360°,  $H_s = 4,9\text{m}$  et  $T_p = 10\text{s}$  possède une longueur d'onde  $\lambda_0 = 156\text{m}$  ( $\lambda_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi}$ ), ses caractéristiques à 5m de profondeur sont  $H_s = 4,2\text{ m}$  et  $\lambda = 67,7\text{m}$ .

### – Positionnement respectif/ Espacement

Des études faites au L.C.H.F montrent que pour qu'un brise-lames d'une longueur de L puisse provoquer la formation d'un tombolo se raccordant à l'ouvrage, il faut que les limites d'expansion de la houle, issue de chacune des extrémités de l'ouvrage, se croisent sur le trait de côte.

Il existe donc un rapport entre la longueur du brise-lames L, sa distance à la côte D et la longueur d'onde  $\lambda$  au point considéré tel que :

$$E \leq 0,83 D + \lambda / 2 \quad (2.1)$$

Dans notre cas,  $E \leq 324,35$  m.

### – Longueur du brise-lames

La longueur  $L$  du brise lame pour une implantation donnée, est un des paramètres importants, que le brise lame soit submersible ou non, car il conditionne la longueur de côte protégée.

Certains auteurs le rattachent à la distance d'implantation à la côte. Ces deux paramètres interdépendants sont généralement liés à la longueur d'onde locale de la houle.

Carpentier propose une relation du type

$$L \geq 1,2 (D + 0,3 \lambda) \quad (2.2)$$

Dans notre cas,  $L \geq 444,37$  m

Les relations (2.1) et (2.2) nous permettent d'avoir une relation entre la longueur  $L$  des brise-lames et l'espacement  $E$  entre chacun d'eux :

$$L = 1,37 E \quad (2.3)$$

### – Hauteur des brise-lames

C'est essentiellement de la hauteur des brise-lames que dépend l'efficacité de ces derniers.

La côte d'arase est également fonction de la distance au trait de côte, de la profondeur d'implantation des brise-lames et du matériau choisi. L'agitation produite par la retombée du déferlement, à l'arrière du brise-lames, s'amortit dans sa propagation vers le rivage d'autant plus que l'ouvrage est éloigné de celui-ci.

Des recherches de SOGREAH sur l'influence de la hauteur d'une digue submersible montrent qu'un ouvrage immergé ne peut amortir valablement la houle que si le niveau de l'eau se situe très peu au dessus de la crête de la digue.

### – Largeur en crête

Pour être efficace, la largeur en crête d'un brise-lames immergé doit être suffisante pour provoquer une diminution par déferlement de l'énergie de la houle.

Dattari note une valeur optimale de la largeur en crête, rapportée à la longueur d'onde de la houle incidente de :

$$b/\lambda \geq 0,2$$

La largeur de la berme est :  $b \leq 0,2 * 67,7 \longrightarrow b \leq 13,5$ m

### ***Choix du matériau des brise-lames***

On distingue deux sortes de brise-lames :

- Les brise-lames émergent ;
- Les brise-lames immergés.

Les conditions de houle influencent sur les caractéristiques de l'aménagement. Ainsi, les petites houles remontent les sédiments à la côte et ré-engraissent le haut de plage donc on n'aura pas d'intérêt à casser systématiquement leur action. Par contre, ce sont

essentiellement les fortes houles (comme celles de la tempête de 2007) qui creusent le profil de plage et qui devront être amorties.

Les brise-lames immergés ont donné des résultats satisfaisants dans des régions marquées par de faibles marées, comme la Méditerranée.

Au terme des études précédentes et afin de protéger le site contre l'attaque de la mer, le bureau d'études a élaboré un schéma de protection du rivage de Club des Pins à savoir :

### ***Protection en brise-lames immergé en géotubes avec un rechargement de la plage***

#### Définition des géotubes

Les géotubes ont une structure tubulaire (sous forme de tube) constitué d'une enveloppe géotextile tissé de haute résistance remplie de matériaux. La structure est réalisée in situ et remplie par pompage hydraulique avec des matériaux locaux, à l'intérieur de l'enveloppe. Ceci entraîne la création d'une structure flexible, monolithique et continue qui est très résistante aux forces de l'eau. C'est le sable qui est le matériau de remplissage le plus communément utilisé du fait de son incompressibilité mais d'autres types de sols peuvent également être utilisés.

Le tube est fabriqué en utilisant un géotextile spécialement mis au point pour ce type d'application. Le géotextile dispose de pores fins capables de retenir les matériaux injectés tout en ayant une grande perméabilité permettant l'écoulement de l'eau durant la phase d'injection hydraulique. Par ailleurs, le géotextile a des résistances élevées, de même que les coutures, pour résister aux fortes tensions apparaissant durant la phase de remplissage hydraulique et pour maintenir sa forme structurelle.

Le tube est pré fabriqué selon une grande variété de diamètres et de longueurs selon les applications spécifiques. La structure est caractérisée normalement par son diamètre théorique, sa circonférence et sa longueur.

Chaque élément est fabriqué en utilisant les propriétés techniques de la technologie d'assemblage par couture qui assure que la résistance est suffisamment élevée sur l'ensemble de la surface de l'enveloppe. Pour le remplissage, des cheminées sont mises en place à des intervalles spécifiques tout le long du tube.

La structure peut également être associée à un tapis anti-affouillement. Il assure la protection de la base du tube. Ce tapis peut être posé sous le tube et prolongé des deux côtés ou d'un côté uniquement, selon le type d'ouvrage, la largeur du tapis dépendant de la taille du tube utilisé. Le tapis est mis en œuvre avant la pose de la structure en tube et les petit tubes d'ancrage de part et d'autre, servant de lest, sont également remplis hydrauliquement pour créer un lest en pieds de tapis.

Le tube peut être rempli hydrauliquement à terre, soit à sec, ou toute ou partie dans l'eau. Le tube pré fabriquée est déroulé sur site et ancrée à sa position finale. Des points d'attache sont cousus le long du tube en usine pour permettre la fixation provisoire, lors de la mise en œuvre, avant de le remplir. Si nécessaire, le tapis anti-affouillement est placé préalablement au déroulement du tube.

Le tube peut être rempli en utilisant différents types de pompes allant de la petite pompe submersible à la pompe utilisée pour le dragage. Le type de système de pompage dépend du

type de projet et de la facilité de la mise en place sur site. La pompe hydraulique est branchée sur les points d'injection localisés le long du tube.

L'eau ressort par les pores du géotextile, et le sable reste dans le tube qui se remplit progressivement. Pendant la phase de remplissage, d'autres points d'injection peuvent être utilisés pour évacuer le flot d'eau en excédent. Dès que l'élément de tube atteint la hauteur requise, les points d'injection sont fermés.

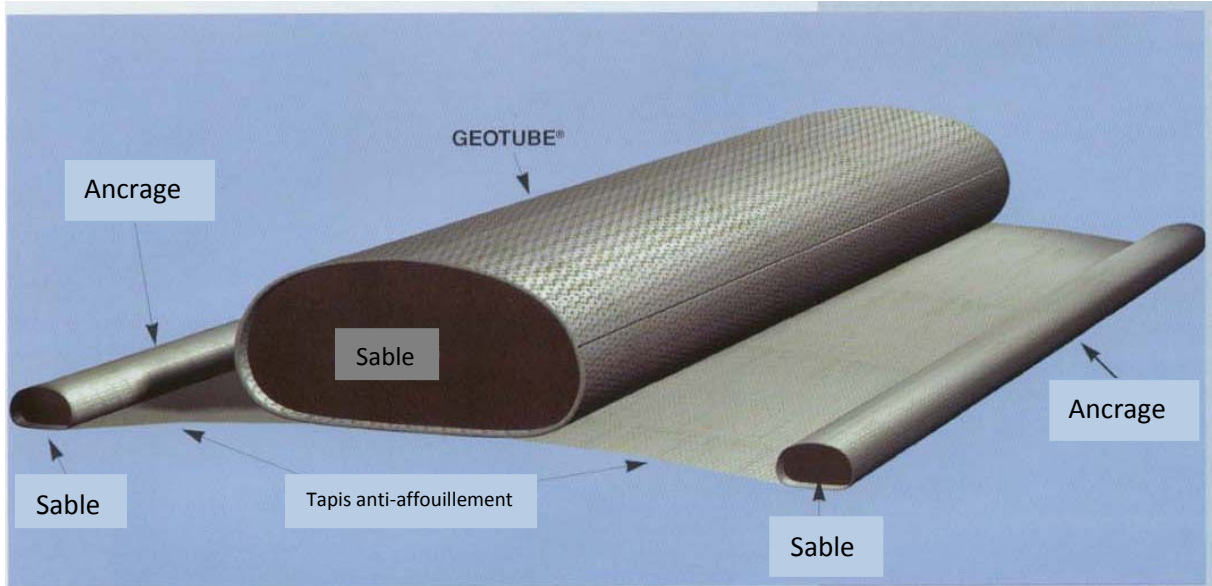


Figure 2.10 : Géotube sur un tapis anti-affouillement

#### Caractéristiques des géotubes

Le dimensionnement des ouvrages en géotubes immergés est relativement délicat et nécessite la connaissance de l'impact des différentes houles sur l'érosion du littoral. La diminution de la hauteur significative des houles incidentes par déferlement au dessus de la structure, induit un coefficient de transmission qui lui-même dépend des caractéristiques de l'ouvrage.

Il est connu que les géotextiles sont sensibles au soleil. Par conséquent, nous devons choisir une côte d'arase de 1 m minimum pour protéger les géotubes contre les rayons ultra violet du soleil. Une hauteur d'eau de 1,5m remplit très bien ces conditions ce qui impliquera une hauteur des brise-lames de 3,5.

Suivant la disponibilité du marché et des contraintes des entreprises de réalisation, les longueurs totales des géotubes sera de 115ml ce qui nous permet d'avoir (selon la relation 2.3) un espacement d'environ de 85ml entre chaque brise-lames et la largeur de la berme, qui doit être inférieure à 13,5m (selon la relation 2.4), sera égale à 12m. Comme la forme du brise-lames est trapézoïdale (pour une meilleure stabilité), la largeur en pied est de 16m.

Les formules développées par d'Angremond, Van der Meer et Jong donne la relation suivante :

$$K_t = \frac{Ht}{H_s} = -0,4 \frac{F}{H_s} + C_p \times \left( \frac{b}{H_s} \right)^{-0,31} \times [1 - \exp(-0,5 \xi_b)]$$

Où,  $K_t$  : Coefficient de transmission ;  $F$  : hauteur d'eau entre la surface et le sommet de la structure ;  $H_s$  : Hauteur significative incidente ;  $b$  : Largeur du sommet du récif ;  $C_p$  : coefficient de perméabilité ( $C_p = 0,64$  dans le cas d'un ouvrage perméable, et  $C_p = 0,80$  dans le cas d'un ouvrage imperméable) ;  $\xi_b$  : le nombre d'Iribarren au déferlement tel que :

$$\xi_b = \frac{\tan(\alpha_r)}{\sqrt{\frac{H_s}{\lambda_0}}}$$

Avec  $\alpha_r$  : pente du talus et  $\lambda_0$  : longueur d'onde de la houle au large =  $\frac{gt^2}{2\pi}$

On précise que l'équation est valable tant que  $\frac{b}{H_s} \leq 10$  et  $0,075 \leq K_t \leq 0,8$

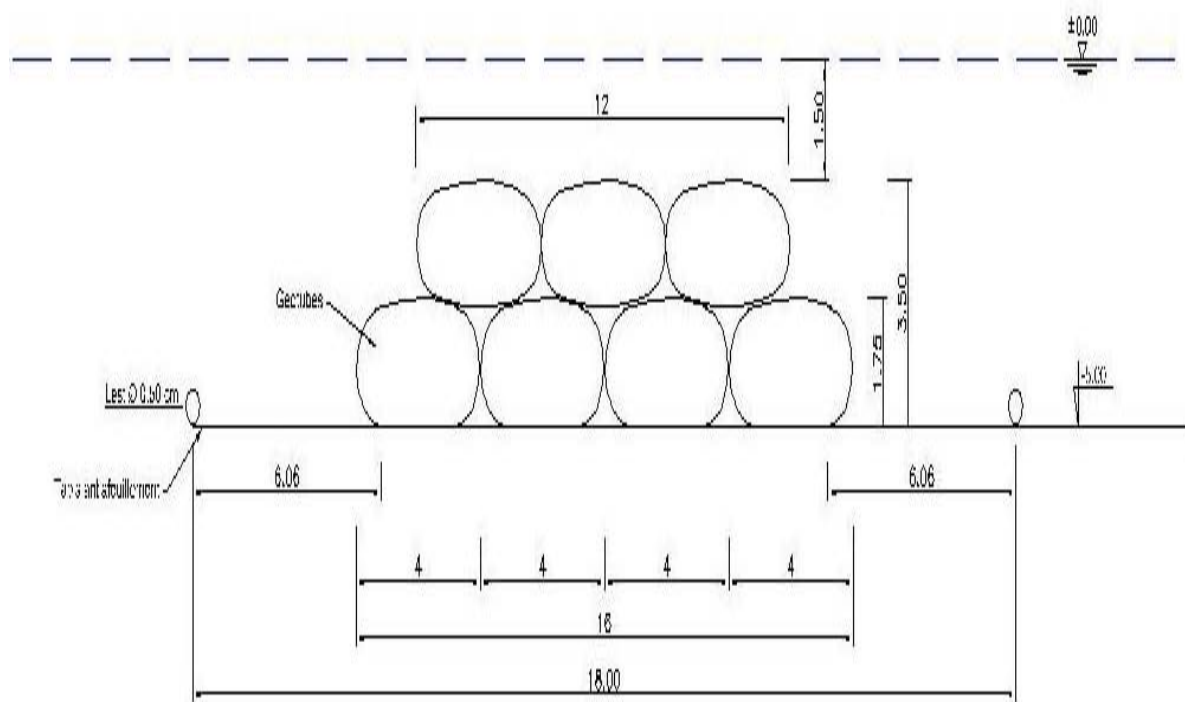
Connaissant le coefficient de transmission que l'on veut obtenir à l'arrière de la structure, on peut déterminer la pente du talus coté mer.

$K_t = 0,5$  ;  $F = 1,5$  m ;  $H_s = 4,2$ m ;  $C_p = 0,64$  ;  $b = 12$ m :

$\xi_b = - 5,05$   $\longrightarrow$   $\alpha_r = 40^\circ$

Un coefficient de transmission de 50% permet d'obtenir un  $H_t = 2,1$ m à l'arrière des géotubes, donc une houle qui semble a priori ne pas causer de dommage pour la plage. Pour avoir ce coefficient, les dimensions de la structure devront être les suivantes :

- Pente : 2/1
- Côte d'arase de la berme : 1.5m
- Longueur de la berme : 12m



**Figure 2.11** : Profil des brise-lames immergés en géotube

### Rechargement de la plage

Le rechargement de la page a été estimé par le LEM comme suit :

Nous avons un profil initial qui est l'état actuel de la plage et nous avons un profil désiré c'est-à-dire la plage qu'on souhaite obtenir, la différence entre les deux profils nous permet d'estimer le volume nécessaire du rechargement de la plage.

Les résultats obtenus par le laboratoire d'études maritimes sont :

- Hauteur de rechargement 0.5 m;
- Diamètre du sable de carrière :  $0.500 \text{ mm} < D_{50} < 0.700 \text{ mm}$  ;
- Volume du sable de carrière de rechargement :  $41\,500 \text{ m}^3$ .

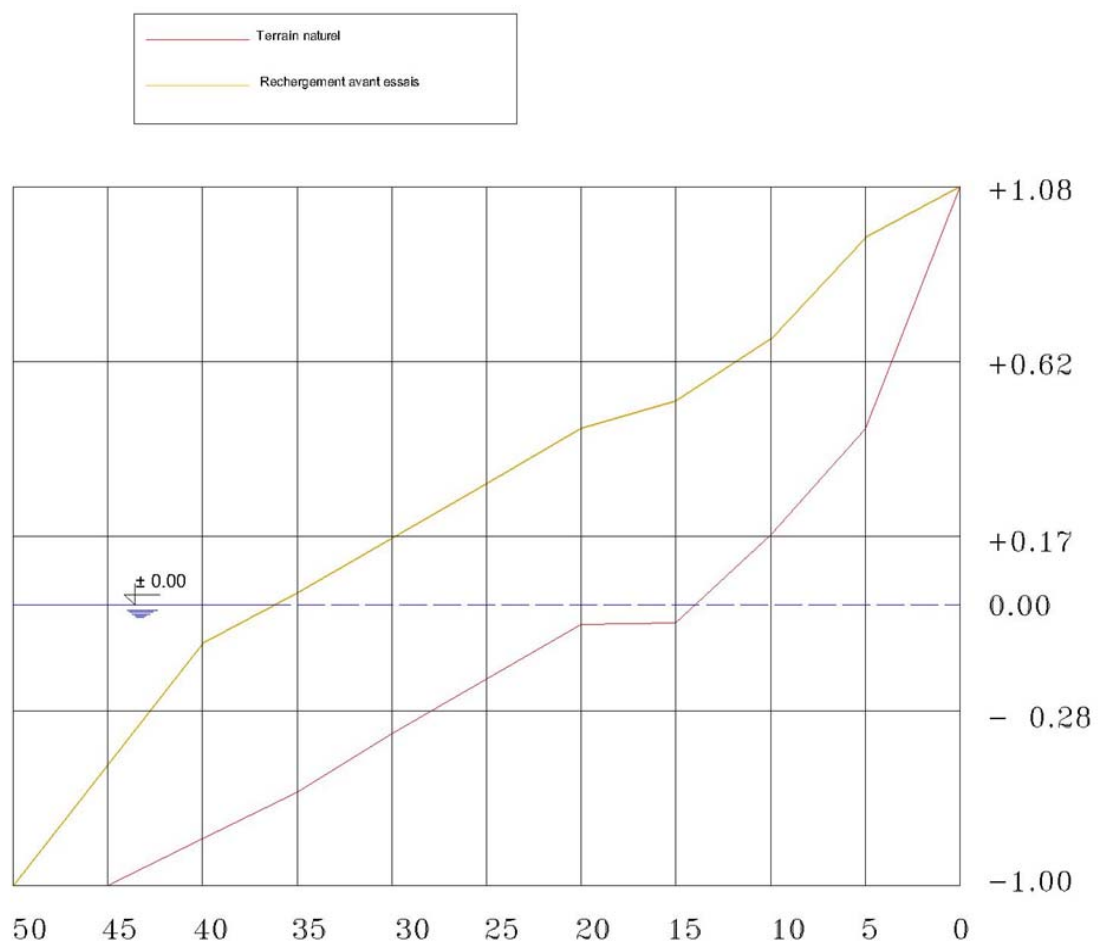


Figure 2.12 : Schéma initial de la plage et schéma du rechargement désiré

## CONCLUSION

### Récapitulatif des caractéristiques des brise-lames

- Profondeur moyenne d'implantation : 5 m ;
- Côte d'arase : -1,5 m ;
- Hauteur de la structure : 3,5 m ;
- Hauteur initiale du géotube : 1,75 m ;
- Largeur du géotube : 4 m ;
- Largeur de la berme de la couche supérieure du brise-lames : 12 m ;
- Largeur de la couche inférieure du brise-lames : 16 m ;
- Tapis anti-affouillement de 18 m de largeur muni d'un petit lest sur les extrémités sous la forme d'un petit tube de 50 cm de diamètre, en vue d'assurer la pérennité du sol support ;
- Distance à la côte : 350 m.

### Récapitulatif du rechargement de la plage

- Hauteur de rechargement 0,5 m;
- Diamètre du sable de carrière :  $0,500 \text{ mm} < D_{50} < 0,700 \text{ mm}$  ;
- Volume du sable de carrière de rechargement :  $41\,500 \text{ m}^3$ .

C'est sur la base des résultats obtenus dans l'étude théorique de la protection du rivage du site du Club des Pins que les essais seront effectués.

C'est sur la base de ce pré-dimensionnement que les essais seront effectués sur les modèles réduits physiques en vue d'optimiser les solutions initialement retenues pour la protection du rivage de la plage du site de Club des Pins.

Deux types de modèles réduits physiques seront utilisés :

- Etude à fond fixe en bassin à houle en vue d'étudier la stabilité des géotubes.
- Etude à fond mobile en canal à houle en vue d'étudier la stabilité et le comportement du rechargement.

Avant d'aborder ces essais, il était important de rappeler les lois de similitudes qui permettent de cadrer ces essais.

# **Chapitre 3**

## **Similitude hydraulique**



## Chapitre 3

# SIMILITUDE HYDRAULIQUE

Les milieux marins est constamment en changement affecté de changement de configurations des fonds et des rivages sans cesse. Ces changements est la résultante de différentes interactions de la phase liquide caractérisée par la houle et les courants marins, et la phase solide caractérisée par les matériaux tapissant les fonds. En conséquence de ces interactions, des processus d'érosion et de sédimentation prennent naissance et engendre par la suite des problèmes d'ensablement et d'envasement et d'affouillement dans les aménagements portuaires, et parfois l'érosion des rivages, les plus exposés au flux d'énergie de la houle ce qui se traduit parfois, par une altération irréversible de l'équilibre du littoral.

Pour l'étude de tel phénomène et afin de le prévoir et d'y remédier, les spécialistes font appels à deux types d'outils : la modélisation physique et la modélisation mathématique. Face aux difficultés rencontrées par la modélisation mathématique qui est assez complexe et délicate, la modalisation physique s'avère le moyen le plus convainquant pour répondre aux questions des ingénieurs dans ce domaine.

## 1. SIMILITUDE HYDRAULIQUE

### 1.1. Introduction aux essais sur modèles réduits physiques

Nulle part qu'en hydraulique les formules théoriques utilisées pour fixer les dimensions des ouvrages ou les conditions d'écoulement ne sont susceptibles d'extrapolation, en raison des hypothèses approximatives (presque toujours appuyées sur l'expérience) sur lesquelles elles reposent et des simplifications préalables qui ont présidé à leur établissement.

Lorsqu'un ingénieur étudie le projet d'un ouvrage hydraulique (prise d'eau, évacuateur de crue, siphon, etc.), il commence par préciser l'ordre de grandeur de ses dimensions en se basant sur celles des ouvrages analogues existants et en tenant compte de l'application à l'écoulement considéré des formules théoriques ou empiriques de l'hydraulique classique. Mais généralement les résultats qu'il obtient ainsi ne peuvent le satisfaire complètement en raison, d'une part, de l'approximation très grossière des formules utilisées et, d'autre part, de la nécessité de schématiser le phénomène considéré ou de négliger certain paramètres pour pouvoir lui appliquer la ou les formules utilisées.

L'idée vient tout naturellement d'essayer de voir « *en petit* » comment cela se passe en « *grand* ». C'est ce qui constitue le principe d'essai sur *modèles réduits* qui ont pris un développement considérable non seulement en hydraulique mais dans d'autre branches de la mécanique, notamment en aérodynamique.

La faveur dont bénéficient ces essais s'explique par les facilités qu'offrent les mesures effectuées au laboratoire, la plus grande précision qu'autorisent les appareils de mesure utilisés ; en outre les modèles réduits permettent d'effectuer aisément de nombreuses expériences, de les répéter en cas de nécessiter en faisant varier dans tel ou tel sens tel ou tel

paramètre du problème (étude systématiques du comportement de l'écoulement pour différents débits, pour différents tirants d'eau, différentes pressions, différentes formes de telle ou telle partie de l'ouvrage ,etc.). Enfin les dépenses nécessitées par les essais sur modèle représentent une fraction toujours faible au montant des dépenses et les résultats fournis par le modèle permettent souvent de réaliser des économies de temps et d'argent très importantes pour l'exécution de l'ouvrage.

Mais un problème essentiel se pose alors : dans quelle mesure et suivant quelles lois les résultats obtenus sur les modèles peuvent-ils être transposés dans l'écoulement naturel en vraie grandeur (qu'on appelle le *prototype*)? Autrement dit, si le modèle est géométriquement semblable au prototype, les dimensions linéaires homologues du modèle et du prototype étant dans le rapport  $\lambda$  (échelle du modèle) et si, en outre dans le modèle les caractéristiques de l'écoulement qui intéressent l'ingénieur (vitesse, débit, pressions, etc.) sont réduites par rapport au prototype suivant des rapports différents ( $\lambda_v$ ,  $\lambda_q$ ,  $\lambda_p$ , etc.) pour que les résultats obtenus sur les modèles soient transposables dans la réalité, il faut d'abord que les rapports susvisés ( $\lambda_v$ ,  $\lambda_q$ ,  $\lambda_p$ , etc.) soient bien déterminés et constants, qu'ils ne changent pas, par exemple, quand on modifie les conditions d'écoulement (débit, pression, tirant d'eau, etc.) ; ensuite il faut que ces rapports soient connus en fonction de l'échelle  $\lambda$ . Si ces conditions sont réalisées on a dans le modèle un écoulement semblable à l'écoulement dans le prototype.

La réalisation de ces conditions résulte de l'application des lois de similitude (**Carlier, 1972**).

### 1.2. Lois de similitude

#### 1.2.1. Similitude géométrique

L'échelle du modèle est le rapport des dimensions linéaires homologues du modèle ( $L_2$ ) et du prototype ( $L_1$ ) c'est-à-dire :

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1} \quad (3.1)$$

C'est un rapport qui nous permet d'avoir une relation entre le modèle et le prototype.

#### 1.2.2. Similitude cinématique

La similitude cinématique exige que les vitesses et les accélérations soient dans un rapport défini et constant en tout points correspondants des deux écoulements.

Soient :

$t_1$  le temps mis à parcourir la distance  $L_1$  dans le prototype,

$t_2$  le temps mis à parcourir la distance  $L_2$  homologue de  $L_1$  dans le modèle,

$$\lambda \text{ échelle du modèle : } \lambda = \frac{L_2}{L_1}$$

$$\lambda_t \text{ échelle des temps : } \lambda_t = \frac{t_2}{t_1}$$

$$\lambda_v \text{ échelle des vitesses : } \lambda_v = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\lambda_a \text{ échelle des accélérations : } \lambda_a = \frac{a_2}{a_1}$$

On peut écrire facilement les relations suivantes :

$$V_1 = \frac{L_1}{t_1} ; \quad V_2 = \frac{L_2}{t_2} \quad (3.2)$$

En divisant membre à membre, on a :

$$\frac{V_2}{V_1} = \lambda_v = \frac{L_2}{L_1} \frac{t_1}{t_2} = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

De même pour les accélérations :

$$a_1 = \frac{L_1}{t_1^2} ; \quad a_2 = \frac{L_2}{t_2^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{a_2}{a_1} = \lambda_a = \frac{L_2}{L_1} \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^2 = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

On voit donc que le choix des échelles de temps impose celle des vitesses  $\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t}$  et des accélérations  $\lambda_a = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$ .

### 1.2.3. Similitude dynamique

Les principales forces qui interviennent en hydraulique sont les suivantes :

- Les forces d'inertie ;
- Les forces de turbulence ;
- Les forces de pesanteur ;
- Les forces de viscosité ;
- Les forces de capillarité.

Les forces de capillarité n'interviennent que pour l'étude d'un problème très particulier qui sort du domaine habituel de l'hydraulique traditionnelle. Nous ne considérons donc que les quatre premières catégories de forces. (*Carlier, 1972*)

Pour chacune des ces catégories exprimons le rapport de similitude des forces correspondantes aux points homologues du modèles et du prototype.

– *Forces d'inertie*

La force d'inertie agissant sur la particule de masse  $m$  animée d'une vitesse  $V$  sur sa trajectoire dont le rayon de courbure est  $r$ , a pour expression :

$$F = m \frac{V^2}{r}$$

Dans le prototype, on aura donc :  $F_1 = m_1 \frac{V_1^2}{r_1}$

Au point homologue du modèle :  $F_2 = m_2 \frac{V_2^2}{r_2}$

$$\text{D'où : } \frac{F_2}{F_1} = \frac{m_2}{m_1} \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \frac{r_1}{r_2}$$

En posant :

$$\frac{F_2}{F_1} = \lambda_{fi} = \text{Rapport des forces d'inertie}$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \lambda_m = \text{Rapport des masses}$$

$$\text{Il vient : } \lambda_{fi} = \frac{\lambda \lambda_v^2}{m_1} = \lambda_m \lambda \lambda_t^{-2}$$

Mais le rapport des masses est égal au rapport des masses volumiques ( $\lambda_\rho$ ) multiplié par le rapport des volumes ( $\lambda^3$ ) ; on a donc, en définitive :

$$\lambda_{fi} = \lambda_\rho \lambda^4 \lambda_t^{-2}$$

– *Forces de turbulence*

La force tangentielle résultant de la turbulence d'un écoulement peut s'exprimer comme suit :

$$F_t = \rho S \overline{u v}$$

Avec,  $\rho$  : Masse volumique du liquide ;

$S$  : Surface à travers laquelle se produit l'échange latérale de quantité de mouvement résultant de l'échange des particules liquides ;

$\overline{u v}$  : étant la moyenne des produits des fluctuations de la vitesse instantanée dans le sens longitudinal ( $u$ ) et dans le sens transversal ( $v$ ).

Le rapport des forces de turbulence sera donc :

$$\lambda_{fi} = \lambda_\rho \lambda^2 \lambda_v^2$$

$$\lambda_{fi} = \lambda_\rho \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_{fi}$$

On constate donc que le rapport de similitude des forces de turbulence est le même que celui des forces d'inertie ce qui traduit le fait que ces deux catégories de forces sont de même nature.

– *Forces de pesanteur*

La force de pesanteur agissant sur la particule liquide de masse  $m$  est :

$$\vec{F} = m \vec{g}$$

Le rapport des forces de pesanteur sera donc :

$$\lambda_{fp} = \lambda_m \lambda_g$$

$$\lambda_{fi} = \lambda_\rho \lambda^3 \lambda_g$$

– *Force de viscosité*

La force de viscosité agissant sur l'élément de surface  $dS$  est donnée par la formule de Newton :

$$dF = \mu dS \frac{dV}{dn}$$

$\frac{dV}{dn}$  Représentant le gradient de vitesse dans la direction normale à  $dS$ .

Le rapport des forces de viscosité sera donc :

$$\lambda_{fv} = \lambda_\mu \lambda^2 \lambda \lambda^{-1}$$

Ou 
$$\lambda_{fv} = \lambda_\mu \lambda^2 \lambda_t^{-1}$$

Suivant la nature de l'écoulement considéré ces diverses catégories de forces interviennent d'une manière plus ou moins importante.

Si les forces d'inertie ne peuvent jamais être négligées puisqu'il y a toujours une masse liquide en mouvement, les conditions du problème étudié, permettront souvent, pour les autres catégories de forces, d'en négliger certain par rapport à d'autre.

Cette remarque permet d'établir les distinctions fondamentales suivantes en ce qui concerne la simulation dynamique.

- *Les forces de viscosité sont négligées par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur : **Similitude de Reech-Froude*** Les forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur sont pratiquement seuls à intervenir et la condition de similitude des forces impose que les trois rapports  $\lambda_{fi}$ ,  $\lambda_{ft}$  et  $\lambda_{fp}$  soient les mêmes :  $\lambda_{fi} = \lambda_{ft} = \lambda_{fp}$

Il est pratiquement impossible de faire varier  $g$  entre le prototype et le modèle, donc  $\lambda_g = 1$ .

Il en résulte : 
$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \tag{3.4}$$

Le rapport des vitesses est donc égal à la racine carré du rapport des longueurs. Cette relation très importante est connue sous le nom de « *loi de similitude de Reech-Froude* » ; elle fut découverte par Reech en 1832, rendue public par lui en 1852 et tombée par la suite dans l’oubli ; elle a été retrouvée et remise en honneur par Froude vingt temps plus tard en 1872.

Cette loi de similitude de Reech-Froude peut s’exprimer d’une autre manière. La relation  $\left(\lambda = \frac{L_2}{L_1}\right)$  peut en effet s’écrire :

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{\sqrt{g L_2}} = \frac{V_1}{\sqrt{g L_1}} = F$$

La condition de similitude imposée revient donc à imposer un écoulement possédant le même nombre de Froude aux points homologues du modèle et du prototype.

En combinant la similitude géométrique (3.1), cinématique (3.2 et 3.3) et dynamique (3.4), il est facile d’établir les rapports de toutes les grandeurs physiques caractérisant l’écoulement dans le modèle et le prototype, ce qui permet de passer des résultats observés sur le premier à ceux escomptés sur le second :

**Tableau 3.1** : Rapports de similitudes des différentes grandeurs physiques

Le temps	$\lambda_t = \sqrt{\lambda}$
La vitesse	$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$
Le débit	$\lambda_q = \lambda_v * \lambda^2 = \lambda^{5/2}$
L’accélération	$\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} = 1$
La force	$\lambda_f = \lambda_m * \lambda_\gamma = \lambda_\rho * \lambda^3$
La pression	$\lambda_{pr} = \frac{\lambda_f \lambda}{\lambda_t} = \lambda_\rho \lambda^{7/2}$
La puissance	$\lambda_p = \frac{\lambda_f * \lambda}{\lambda_t} = \lambda_\rho \lambda^{7/2}$
La pente	$\lambda_i = \frac{\lambda}{\lambda} = 1$

La similitude de Reech-Froude est très fréquemment utilisée dans les études sur modèles réduits. Elle intervient notamment pour la plupart des écoulements à surface libre qu'il s'agisse d'écoulement non turbulents sur des ouvrages courts (déversoir, seuil, chute, ressaut,...) dans lesquels les frottements visqueux à la paroi ne jouent qu'un rôle très faible par rapport à la pesanteur, la pression et l'inertie ou d'écoulement très turbulent dans lesquels les forces de viscosités sont également négligeables par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur (*Carlier, 1972*).

#### ❖ Distorsion

Dans de nombreux cas, en particulier en hydraulique fluviale ou maritime, les phénomènes à représenter comportent de très grandes dimensions transversales par rapport aux profondeurs (par exemple un estuaire comme celui de la Gironde a une largeur de 6 km pour une profondeur moyenne de 10 m). Comme le seuil de Reynolds impose une échelle minimale pour le modèle, on serait conduit à donner à celui-ci des dimensions considérables.

On adopte alors pour les dimensions horizontales une échelle plus petite que pour les dimensions verticales (profondeurs). Un des premiers modèles, celui de l'estuaire de Mersey réalisé en Angleterre par Reynolds, comptait ainsi une échelle de 1/8500 en plan et 1/100 puis 1/200 pour les profondeurs.

Dans un modèle ainsi distordu il n'y a plus de similitude géométrique totale avec le prototype puisqu'en réalité on passe de l'un à l'autre par une similitude suivie d'une affinité.

Il existe néanmoins une correspondance entre les grandeurs homologues ce qui nécessite l'introduction d'une variable supplémentaire.

Il existe en effet deux échelles des dimensions géométriques :

- L'une pour les dimensions horizontales (longueurs et largeurs) :  $\lambda_l$  ;
- L'autre pour les dimensions verticales (hauteurs) :  $\lambda_h$ .

Le rapport  $\Delta = \frac{\lambda_h}{\lambda_l}$  s'appelle la *distorsion*.

En général, on a :  $1 < \Delta < 10$  et le plus souvent  $1 < \Delta \leq 3$  (*Carlier, 1972*).

## 2. SIMILITUDE SEDIMENTOLOGIQUE

De plus de la similitude hydraulique, le modèle à fond mobile doit tenir compte des critères de l'évolution et de déformation des fonds, en choisissant un matériau artificiel dont le comportement sous des actions hydrodynamiques en similitude, soit analogue à celui des sables naturels. Cependant la réalisation d'un modèle sédimentologique semblable au prototype répond aux exigences suivantes :

- Le début d'entraînement des sédiments survient en des points homologues pour des conditions hydrauliques semblables, cela revient à respecter le critère de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle ;

- Lorsque les particules solides se déplacent en suspension, en plus de la condition de similitude de mise en mouvement, il peut être parfois nécessaire d'imposer aux particules solides de décanter, suivant des trajectoires homologues dans le modèle et la nature, cela s'exprime en fonction du diamètre sédimentologique  $D^*$ , et du nombre de Reynolds lié à la vitesse de chute libre des particules en eau calme.

- L'échelle des débits solides soit connue, ainsi que l'échelle des temps sédimentologiques :

$$Q_s = K f(\alpha) \left(\frac{g}{C}\right) H^2 T$$

K : Coefficient du transport du matériau ;

C : Cambrure de la houle ;

$\alpha$  : L'angle des crêtes avec la ligne de côte ;

$f(\alpha)$  : Une fonction de l'angle  $\alpha$  ;

H : Amplitude de la houle ;

T : Période de la houle.

En terme d'échelle, le débit solide est exprimé par :

$$\lambda_{Q_s} = \lambda_K \lambda_H^2 \lambda_T$$

Pour la détermination de l'échelle des temps sédimentologique, on utilise la relation classique :

$$Q_s = \frac{V}{T} \quad (V = H \cdot L^2)$$

D'où on obtient :

$$\lambda_t = \lambda_H^{1/2} \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^2 \lambda_K$$



## **Chapitre 4**

Etude de stabilité des  
géotubes en en bassin à  
houle à fond fixe

## Chapitre 4

# ETUDE DE STABILITE DES GEOTUBES EN BASSIN A HOULE A FOND FIXES

## 1. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objet de la présente étude est de vérifier la stabilité de la solution de protection du rivage du Club des Pins.

Cette solution de protection est constitué par une batterie de 11 brise-lames de 115m chacun, qui sont implantés à -5m arasé à -1.5m et espacé de 80m.

Le but de ces brise-lames est d'atténuer la houle arrivant à la cote et de maintenir en place le rechargement de la plage prévue également dans le cadre de cette solution.

Ces brise-lames sont constituées par deux rangées de géotubes remplis par des matériaux fins.

Les essais auront pour objectifs :

- Mesurer l'agitation derrière les géotubes à la cote
- Définir la zone d'implantation la plus optimale
- Vérifier la stabilité des géotubes vis à vis des différentes houles

## 2. CONDITION D'ESSAIS

### 2.1. Directions de houles

En se basant sur l'étude des données océanographiques, trois directions ont été retenues pour l'étude hydraulique en modèle réduit, soit : N 360°, N 315° et N 270°.

Les données de houle à la côte et utilisée pour la simulation en modèle (après réfraction) sont reportées dans le tableau suivant :

**Tableau 5.1** : Hauteurs de la houle près de la côte (à -10 m)

Période de retour de la houle	N 315°	N 360°	N270°
	H <sub>s</sub> (m)	H <sub>s</sub> (m)	H <sub>s</sub> (m)
Annuel (1 ans)	1,01 m	0,81 m	0,99 m
Quinquennale (5 ans)	2,36 m	2,09m	2,11m
Décennale (10 ans)	3,00 m	2,90m	4,13m
Vingtennale (20 ans)	4,00 m	3,8m	4,82m
Cinquantennale (50 ans)	4,85 m	5,08 m	5,51 m

## 2.1. Niveaux d'eau en modèle

Les niveaux d'eau utilisés lors des essais sont :

- Niveau 0.00 ZH
- Niveau +0.50 ZH

En général les niveaux d'eau élevés sont surtout liés aux situations météorologiques dépressionnaires sur la côte. Les basses mers sont généralement observées à la suite d'une anti-dépression pour un vent très faible. D'après les études hydrauliques existantes, les niveaux observés fréquemment en Méditerranée sont 0,00ZH et + 0,50ZH (ZH : Zéro hydrographique).

Afin d'étudier les conditions de houle les plus défavorables, le L.E.M recommande d'utiliser les niveaux d'eau suivants :

- +0,00 ZH pour la série progressive (Utilisé dans les essais d'agitation et de stabilité)
- +0,50 ZH pour la série d'endurance (Utilisé dans les essais d'endurance).

## 2.2. Conduite des essais

Chaque essai est exécuté avec une série de plusieurs tests successifs avec des conditions de houle (Hs, Tp, etc.) augmentés par paliers discontinus jusqu'à ce que la houle soit limitée par le déferlement.

Pour les essais d'agitation et de stabilité, la durée d'un test est de l'ordre de 19 minutes soit 2 heures en nature.

## 2.3. Calibration (réglage hydraulique du modèle)

Après la construction des fonds et avant chaque essai on procède à la calibration hydraulique.

Ce réglage a pour but d'une part de procéder au réglage de l'appareillage, et d'autre part d'ajuster les conditions expérimentales de manière à ce que l'ensemble des paramètres hydrauliques soient reproduits conformément à la nature.

## 2.4. Génération de la houle

La houle appliquée sur la maquette est générée par un système de génération de houle composé :

- d'un volet plan fonctionnant dans un plan horizontal, dont le déplacement est comparable à un piston ;
- d'un vérin hydraulique asservi en position sur un signal de commande continu, actionné par un groupe de puissance hydraulique à 110 bars ;
- d'un générateur électronique qui élabore le signal de commande lié, à l'aide d'un ordinateur, à un programme de génération dénommé WAVEGEN, représentant un train de houle réel enregistré en nature et converti en train de houle en modèle.

Cette fonction est introduite dans un système "Servo" qui contrôle le mouvement du vérin.

Dans le cas de la houle aléatoire (houle utilisée pour l'ensemble de l'étude), le signal est effectivement aléatoire suivant une durée de tempête préalablement fixée.

- des guides canalisant la houle depuis le batteur jusqu'à l'ouvrage.

La houle dans le modèle est générée sur un front de 5,50m correspondant à 220 m en nature, et cela pour les trois directions.

Le modèle est équipé d'un logiciel acquis récemment par le LEM. Celui-ci impose le choix du spectre devant être choisi pour la génération en modèle.

Dans le cadre de cette étude, le spectre choisi étant celui de JONSWAP.

### 2.5. Techniques de mesure et définitions

La houle dans le modèle est enregistrée par des capteurs de houles, appelés sondes, basés sur le principe de conductance électrique entre deux électrodes.

Les signaux des capteurs de houles sont enregistrés en continu et analysés par une chaîne de mesure informatisée

A la fin de chaque essai, la chaîne de mesure transmet à l'imprimante les répartitions statistiques de tous les signaux enregistrés.

Pour l'interprétation des résultats des essais, les définitions suivantes furent considérées :

**Hauteur significative ( $H_s$ )** : Elle est définie comme la moyenne du 1/3 des vagues les plus hautes dans un train de houle, en modèle.

**Hauteur moyenne ( $H_{moy}$ )** : Elle est définie comme la moyenne des vagues enregistrées dans un train de houle.

**Période de pointe ( $T_p$ )** : C'est la période qui correspond à la plus grande densité d'énergie spectrale

Un exemple de sortie des résultats est donné dans le tableau suivant :

**Tableau4.2** : Exemple de sortie de résultat

Canal	N-vagues	$H_{max}$	$H_{min}$	$H_3$	$H_{moy}$
1	697	6,87	0,05	4,84	3,12
2	622	7,12	0,06	4,89	3,06
3	615	5,86	0,01	4,03	2,71

**Canal** : numéros de sonde de mesure ;

**N-vagues** : nombre de vagues enregistrées par une sonde ;

**$H_{max}$**  : Hauteur maximale enregistrée par une sonde ;

$H_{\min}$  : Hauteur minimale enregistrée par une sonde ;

$H_3$  : moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues;

$H_{\text{moy}}$  : moyenne arithmétiques des hauteurs de houle.

## 2.5. Distorsions

### a) Distorsion due à la viscosité

Pour que la représentation des forces de viscosité soit correcte, il est théoriquement nécessaire que la similitude adoptée laisse invariant le nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{\mathbf{V.D}}{\nu}$$

Avec :

V : Vitesse caractéristique (vitesse orbitale, célérité, ...);

$\nu$  : Viscosité cinématique du fluide ;

D : Dimension caractéristique (dimension d'un bloc, hauteur d'eau,...).

Or, l'adoption à priori de la similitude de Froude impose une échelle de  $\lambda^{\frac{3}{2}}$  pour le groupement VD.

Pour satisfaire à la fois aux critères de similitude de Froude et de Reynolds, il serait donc théoriquement nécessaire d'utiliser pour le modèle, un fluide de très faible viscosité, 1/189,57 fois celle de l'eau dans ce cas. Cette impossibilité pratique conduit très généralement à préférer le simple choix de l'eau pour le modèle et donc à accepter une distorsion sur la représentation du nombre de Reynolds, distorsion d'autant plus importante que l'échelle de réduction des longueurs est plus grande.

Cependant, pour une échelle donnée, les conséquences pratiques de cette distorsion (distorsion des seules forces de viscosité) restent relativement négligeables tant que le modèle fonctionne dans des conditions d'écoulement telles que les forces de viscosité restent négligeables.

### b) Distorsion due à la densité de l'eau

L'eau utilisée dans le modèle est douce ( $\delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) alors qu'elle est salée en nature, donc plus dense, dans la réalité ( $\delta_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ). La masse spécifique de l'eau intervient directement dans les forces de nature inertielle, proportionnelles aux volumes et aux accélérations, ainsi que dans les poussées d'Archimède. En fait, cette caractéristique intervient globalement sur la stabilité suivant une relation empirique (formule de stabilité d'Hudson) qui traduit les conditions d'apparition d'un certain degré de dommage.

$$\mathbf{M} = \frac{1}{\mathbf{K}_D} \cdot \frac{\delta_s \mathbf{H}^3}{\left(\frac{\delta_s}{\delta_w} - 1\right)^3 \cot g \alpha}$$

Avec :

M: Masse unitaire des blocs de carapace ;

H: Hauteur des vagues incidentes ;

$\delta_s$ : Masse spécifique du matériau constituant les blocs ;

$\delta_w$ : Masse spécifique de l'eau ;

$K_D$ : Coefficient empirique caractérisant la stabilité propre du bloc ;

$\alpha$  : Angle de pente du talus par rapport à l'horizontale ;

Cette équation peut s'écrire aussi :

$$V = \frac{1}{K_D} \cdot \frac{H^3}{\left(\frac{\delta_s}{\delta_w} - 1\right)^3 \cot g \alpha}$$

Avec :

V : Volume du bloc.

Pour compenser de manière simple la distorsion qu'entraîne l'emploi de l'eau douce, il suffit donc d'adopter pour les modèles de blocs (réduits à l'échelle) un matériau de densité inférieure à celle des blocs du prototype de manière à ce que le groupement :  $\left(\frac{\delta_s}{\delta_w} - 1\right)$  ait la même valeur dans les deux systèmes.

Ainsi, avec :

$$\delta_w = 1025 \text{ kg/m}^3 \text{ pour le prototype et } \delta_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ pour le modèle,}$$

La valeur de la masse spécifique des matériaux à utiliser pour représenter les blocs artificiels de béton est :  $2341 \text{ Kg/m}^3$  au lieu de  $2400 \text{ Kg/m}^3$ , pour les enrochements naturels, un facteur de correction égal à 0,87 intervient directement sur leur poids.

### 3. CONSTRUCTION DU MODELE

#### 3.1. Choix de l'échelle

L'échelle doit le plus souvent nous rapprocher de la réalité, pour cela il faut que toutes les conditions importantes des états de la mer ayant un impact sur l'aménagement soient respectées et mesurées d'une manière respectable.

L'échelle dépend également des capacités et des installations du laboratoire.

Si l'échelle est trop petite les forces de viscosité ne seraient plus négligeables et la loi de Froude n'est plus applicable. Il est recommandé pour éviter ces effets d'avoir des profondeurs supérieures à 2cm et de conduire des essais avec des vagues dont le seuil minimal en hauteur varie entre 2 à 5cm et en période entre 0,5 et 0,75 s.

On détermine l'échelle par les méthodes expérimentales qui prennent comme conditions :

1 - L'échelle géométrique doit satisfaire la relation suivante :  $\lambda < 3l \times l$  / avec  $l$  : longueur du bassin ;

2 - La profondeur d'eau maximale « P' » dans le modèle est inférieure à 50cm pour des bassins de 1m de profondeur  $P \frac{1}{\lambda} < 50cm$  / avec,  $P$  : la profondeur maximale dans le prototype ;

3 - La distance entre l'emplacement du batteur et le pied de l'ouvrage « X » doit être comprise entre  $3L < X < 5L$  / Avec,  $L = \frac{g T^2}{2\pi}$  : longueur d'onde générée par le batteur.

**Dans le cas de notre étude, nous avons :**

- Longueur du prototype :  $l' = 800$  m
- Profondeur maximale dans le prototype :  $P = 12$  m
- Période de la houle générée par le batteur :  $T = 10$  s

La longueur d'onde générée par le batteur en modèle réduit est :

$$L = 156 \text{ m pour } T = 10\text{s ce qui donne une distance } X = 624 \text{ m ;}$$

- L'échelle géométrique choisie est :  $\left( \lambda = \frac{\text{longueur du bas sin}}{\text{longueur du prototype}} = \frac{26}{800} \approx \frac{1}{30} \right)$

C'est à partir de cette valeur  $\left( \lambda = \frac{1}{30} \right)$  que nous nous basons pour le choix définitif de l'échelle de notre modèle réduit physique.

– Avec une échelle de 1/30

$\lambda = 30 < 3 \times 26$	}	Certes les deux conditions principales sont satisfaites mais la profondeur d'eau est un peu élevée.
$1200 \times \frac{1}{30} = 40 \text{ cm} < 50 \text{ cm}$		

– Avec une échelle de 1/40

$\lambda = 40 < 3 \times 26$	}	Les deux conditions principales sont satisfaites et la profondeur est idéale pour des essais en bassin à houle.
$1200 \times \frac{1}{40} = 30 \text{ cm} < 50 \text{ cm}$		

- Avec une échelle de 1/50
- $$\left. \begin{array}{l} \lambda = 50 < 3 \times 26 \\ 1200 \times \frac{1}{50} = 24 \text{ cm} < 50 \text{ cm} \end{array} \right\} \text{ Les deux conditions principales sont satisfaites.}$$

Maintenant, si on devait choisir entre les échelles 1/40, 1/30 et 1/50 on choisirait bien entendu l'échelle 1/40 car c'est elle qui s'approche le plus de la réalité et qui respecte toutes les conditions des états de la mer.

### Conclusion

L'échelle choisie pour les essais en bassin à houle est de :  $\lambda = 40$

$\lambda = 40 < 3 \times 26$   $\longrightarrow$  La condition 1 est vérifiée

$1200 \times \frac{1}{40} < 50 \text{ cm}$   $\longrightarrow$  La condition 2 est vérifiée

$468 \text{ m} < 624 < 780 \text{ m}$   $\longrightarrow$  La condition 3 est vérifiée

Compte tenu des dimensions du bassin, ceux des ouvrages et leur implantation et du levé bathymétrique, ainsi que des conditions hydrographiques, l'échelle du modèle adoptée est **1/40**

### 3.2. Représentation des fonds

Les fonds au large ont été construits conformément à une campagne de reconnaissances comprenant de levés topo bathymétriques réalisée par l'équipe du LEM entre le 24 mai et le 1<sup>er</sup> juillet 2009.

- Un levé topographique sur un linéaire de côte d'environ 2000m et une bande variant entre 20 et 100m de large, comprenant les abords du site, les accès routiers, les constructions, la plage ainsi que tous les détails.

La surface totale levée est de 19.7 hectares.

- Un levé bathymétrique du site d'étude exécuté suivant le linéaire de côte levé en topographie.

Une superficie de 328.65 hectares de bathymétrie a été levée, suivant 100 profils parallèles espacés de 20m.

- Un levé de 20 profils bathymétriques espacés de 200m, exécutés à l'Est et à l'Ouest (10 profils de chaque côté) du site d'étude, s'étendant aux ports de Sidi Fredj et El Djamila. La longueur totale de ces profils est de 3200m.

- Un levé de 41 profils totalisant une longueur de 50km, réalisés au sonar latéral au niveau de la zone d'étude.

### 3.3. Choix des matériaux

Les matériaux constituant les différentes parties de l'ouvrage, sont sélectionnés en fonction de leurs poids et leurs tailles.



Chaque catégorie d'enrochements fait l'objet d'un tri soigné. En ce qui concerne le tout-venant de carrière, il est soumis à un lavage préliminaire afin d'éliminer les éléments fins susceptibles de déformer la représentation de la perméabilité de l'ouvrage.

Les matériaux de construction utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau ci-après.

**Tableau 4.3** : Caractéristiques des matériaux.

Désignation	Caractéristiques en nature			Caractéristiques en modèle		
	Diamètre (m)	poids (t)	Longueur (m)	Diamètre (cm)	poids (Kg)	Longueur (m)
Géotubes supérieur	2,85	1270,98	115	7,125	19,85	2,875
Géotubes inférieur	2,85	1160,46	105	7,125	18,13	2,625
Stabi-plalges	1,6	110,25	1,25	4,00	1,72	1,25

### 3.4. Observation des dégâts

Les observations des dégâts sont réalisées pendant le déroulement des essais (mode de dégradation) et à la fin des essais, après vidange (évaluation des dégâts).

Une atténuation particulière sera donnée aux points suivants :

- Glissement des géo tubes supérieurs.
- Ecartements des espaces entre géo-tubes inférieur
- Déplacements des géo-tubes
- La mesure de la houle à la côte derrière les brises lames

### 3.5. Moyens mis en œuvre pour les observations

Pour conserver les résultats de ces observations, trois supports ont été retenus :

- **Support écrit** : les observations sont inscrites au fur et à mesure des essais sur un cahier permettant de plus d'y ajouter quelques commentaires.
- **Support photographique** : tout au long des essais, de nombreux clichés sont réalisés permettant en outre de comparer les dégâts propres à chaque essai.
- **Support vidéo** : Pour visualiser de manière plus concrète le mode d'attaque de la houle sur l'ouvrage, un enregistrement vidéo est effectué.

La confrontation de ces modes d'observations permet une analyse objective de l'essai.

### 3.6. Description de l'installation

Concrètement, il s'agit d'un bassin de 26 \*19\* 1 m, qui permet de réaliser des expériences et des essais sur modèle physique d'infrastructures soumises à la houle. Particulièrement perfectionné, ce bassin est capable de reproduire des houles multidirectionnelles par agitations

complexes. Ces dernières sont engendrées par des batteurs placés le long d'un des bords. Cette installation permet donc de reproduire à petite échelle les houles et courants marins du littoral de façon très réaliste. Cette installation est utilisée pour des applications littorales et côtières, comme l'étude du comportement des ouvrages maritimes ou côtiers soumis à la houle et à l'agitation des vagues.

Ces études basées sur des essais sur modèles réduits permettent de déterminer le comportement de ces ouvrages dans un environnement marin complexe et d'évaluer leurs performances en vue d'une éventuelle optimisation du projet.

Le modèle a été construit dans un hall couvert du laboratoire d'études maritimes à Hydra (Alger). Ce bassin a les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 26m
- Largeur : 19m
- Profondeur : 1m

La topographie du fond marin a été reproduite en modèle conformément au plan bathymétrique, établi par le L.E.M, à l'aide d'un maillage de 1m.

Les fonds du modèle ont été simulés à partir de l'isobathe -12 m permettant ainsi une génération de la houle au large. La construction du modèle s'est faite suivant les phases suivantes :

- Carroyage du bassin pour le préparer tout les 1m ;
- Dessin sur la dalle du bassin, des contours du site et des isobathes à l'échelle 1/40 ;
- Calage et matérialisation des niveaux des contours du site et des isobathes grâce à un niveau topographique et à des fers plats façonnés suivants les dessins reportés sur la dalle ;
- Remplissage du fond avec du sable ;
- Lissage de finition avec une chape de mortier de ciment de 5cm d'épaisseur arasée au niveau des fers plats représentant les isobathes.

Pour minimiser la réflexion des houles non désirées, les limites du bassin sont couvertes de briques, qui jouent le rôle d'absorbant.

L'emplacement des ouvrages de protection et les directions sont tracés sur le modèle.

## **4. RESULTATS DES ESSAIS DE STABILITE ET D'AGITATION**

### **4.1. Essais d'agitation en l'état actuel de la plage**

Avant l'entame des essais de stabilité des géo tubes, il a été placé un ensemble de 12 sondes dans le modèle (figure 4.1) en vue de connaître le niveau d'agitation en différents points, ces valeurs serviront de base en vue de comparer le niveau d'atténuation de la houle avec les variantes qui seront testées.

**Tableau 4.4** : Mesure de la houle avant l'implantation des géotubes dans la direction N315°

Temps de retour	H <sub>s</sub> (m)											
	N315°											
	Sondes sans géo tubes											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	1,02	1,02	0,62	0,85	0,75	1,1	0,8	0,9	0,46	0,38	1,02	0,81
Hs= 5 ans	2,2	2,38	1,26	2,09	1,62	2,42	2,23	1,88	1,18	1,11	1,82	1,67
Hs= 10 ans	2,56	3,11	1,56	2,58	2,18	2,79	2,58	2,41	1,45	1,36	1,94	1,72
Hs= 20 ans	3,08	4,02	2,02	3,31	2,83	3,06	2,82	2,84	1,07	1,51	2,05	1,76
Hs= 50 ans	3,46	4,89	2,36	3,68	3,39	3,1	2,82	2,97	2,42	1,6	2,01	1,91

**Tableau 4.4** : Mesure de la houle avant l'implantation des géotubes dans la direction N360°

Temps de retour	H <sub>s</sub> (m)											
	N360°											
	Sondes sans géo tubes											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	0,89	0,82	0,66	0,63	0,43	0,75	0,38	0,17	/	0,19	0,45	0,81
Hs= 5 ans	1,84	2,07	1,68	1,53	1,16	2,05	1,05	0,46	/	0,75	1,43	1,62
Hs= 10 ans	2,51	2,97	2,13	2,41	1,62	2,53	1,64	0,71	/	1,4	1,62	1,76
Hs= 20 ans	2,14	3,73	2,44	2,95	2,27	2,97	2,04	0,89	/	1,64	1,78	1,73
Hs= 50 ans	3,84	4,99	2,87	3,75	2,68	3,08	2,77	1,87	/	1,69	1,88	1,72

**Tableau 4.5** : Mesure de la houle avant l'implantation des géotubes dans la direction N270°

Temps de retour	H <sub>s</sub> (m)											
	N270°											
	Sondes sans géo tubes											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	1,18	0,97	0,45	1,29	0,09	0,26	0,78	1,23	0,77	1,02	0,77	0,28
Hs= 5 ans	2,41	2,12	0,88	2,44	/	0,62	2,11	2,21	1,85	1,39	1,66	1,34
Hs= 10 ans	4,43	4,16	2,12	3,18	/	1,98	2,51	2,63	2,73	1,62	2	1,73
Hs= 20 ans	4,68	4,82	2,3	3,17	/	1,88	2,6	2,67	2,92	1,62	1,96	1,74
Hs= 50 ans	4,82	5,13	2,38	3,37	/	1,84	2,65	2,67	2,68	1,62	1,95	1,73

## 4.2. Essais préliminaires

Les brise-lames sont placés à une profondeur de -5m avec un espacement entre chacun d'eux de 80m. Ils sont constitués de quatre géotubes à la base et de trois géotubes au sommet. 3 batteries de géotubes ont été modélisé.

**Douze** sondes ont été répartie dans le bassin de façon a avoir une bonne appréciation de l'agitation, **deux** sondes sont places près des batteurs, **trois** sondes à -6m juste au devant les géotubes, **quatre** sondes à -4m à l'arrière des géotubes et 3 sondes près de la plage a -2m.

Pour les directions N°270 et N°360, il n'y a aucune mesure au niveau des sondes S5 et S9.

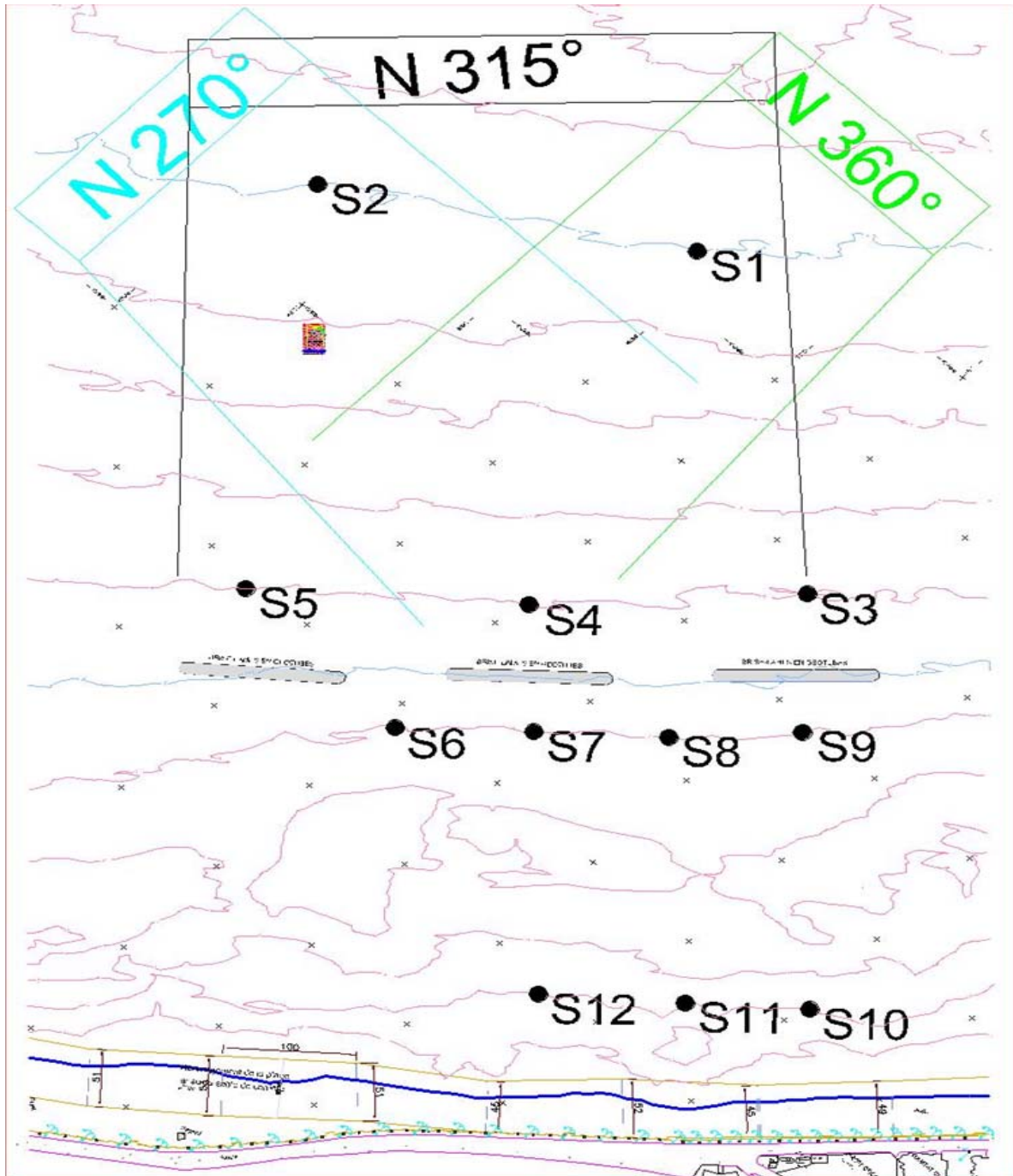


Figure 4.1: Plan de sondes du brise-lames dans les trois directions

Les tableaux 4-1 à 4- 3 représentent les résultats des essais préliminaires.

**Tableau 4.4** : Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 270°

	H <sub>s</sub> (m)											
	N315°											
	Sondes sans géo tubes											
Temps de retour	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	1,08	0,97	0,33	1,16	/	0,21	0,31	0,86	0,30	0,73	0,42	0,22
Hs= 5 ans	2,41	2,11	0,83	2,35	/	0,45	0,8	1,95	0,80	1,36	0,94	0,82
Hs=10ans	4,57	4,14	1,94	3,33	/	1,72	2,15	2,81	1,96	1,62	1,78	1,72
Hs= 20 ans	/	4,75	2,42	3,38	/	1,98	2,15	2,81	1,96	1,59	1,74	1,59
Hs= 50 ans	/	5,09	2,53	3,62	/	1,82	2,27	2,86	1,96	1,61	1,73	1,63

**Tableau 4 -4** : Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 270°

	H <sub>s</sub> (m)											
	N270°											
	Sondes sans géo tubes											
Temps de retour	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	0,89	0,82	0,51	0,86	0,52	0,75	0,24	0,19	/	0,14	0,38	0,7
Hs= 5 ans	1,84	2,07	0,79	1,51	1,24	1,88	0,43	0,44	/	0,54	0,9	1,39
Hs=10ans	2,51	2,97	1,2	2,12	1,63	2,34	0,6	0,57	/	0,79	1,16	1,54
Hs= 20 ans	2,14	3,73	1,7	2,97	2,9	2,8	1,19	0,9	/	0,49	1,53	1,6
Hs= 50 ans	3,84	4,99	2,25	3,29	2,67	2,77	1,53	1,49	/	1,55	1,64	1,5

**Tableau 4-5** : Mesures des hauteurs de houle en bassin dans la direction N 360°

	H <sub>s</sub> (m)											
	N360°											
	Sondes sans géo tubes											
Temps de retour	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Hs= 1an	0,99	1,03	0,80	1,21	1,01	1,08	0,48	0,77	0,36	0,26	0,6	0,66
Hs= 5 ans	2,08	2,38	1,31	2,46	2,38	2,44	1,42	1,98	0,70	0,79	1,62	1,30
Hs=10ans	2,46	3,00	1,59	2,79	2,13	2,77	1,73	2,11	0,83	1,03	1,73	1,51
Hs= 20 ans	2,84	3,98	1,92	3,56	2,84	2,84	2,07	2,73	1,17	1,44	1,8	1,63
Hs= 50 ans	3,26	4,72	2,05	3,72	3,12	3,00	2,01	2,87	1,40	1,50	1,86	1,80

### Analyse des résultats préliminaire

Après que nous ayons effectué les essais dans les trois directions et avec les douze sondes de mesures, nous avons conclu que :

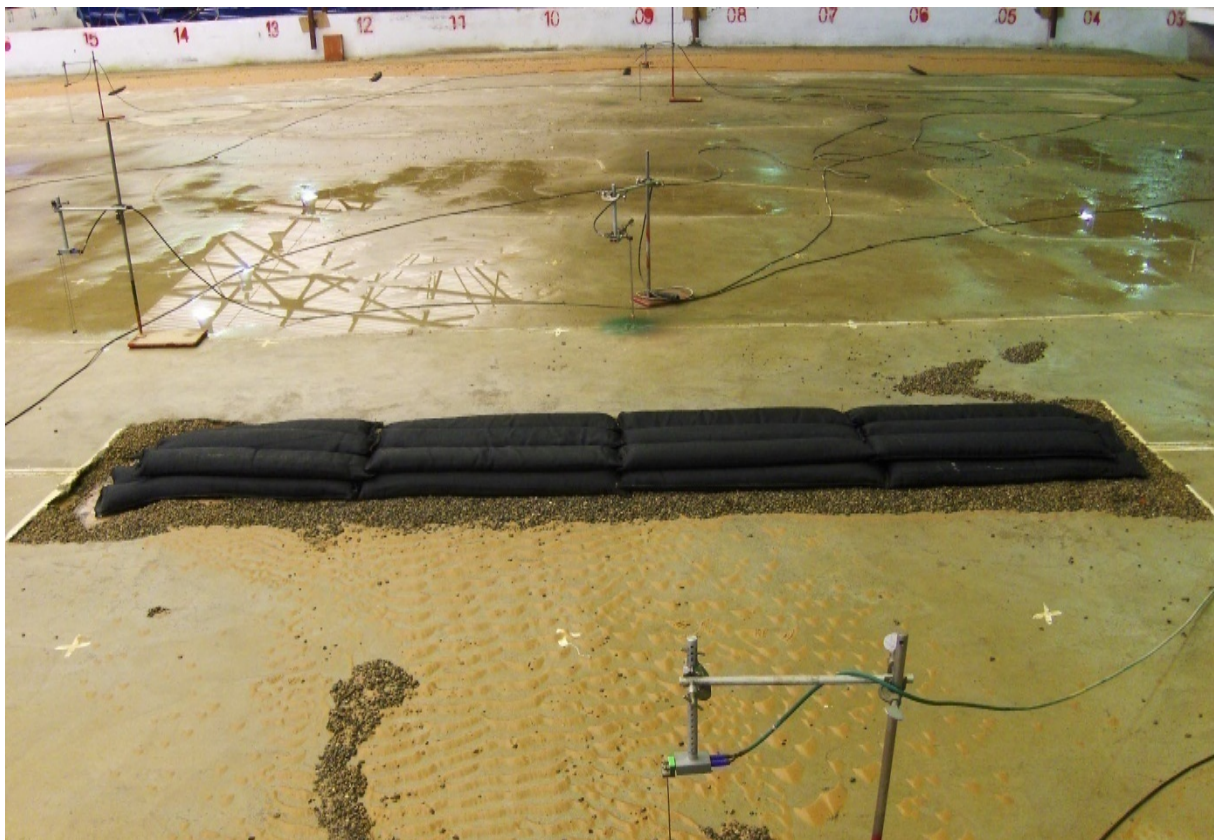
- ✓ Il est préférable de n'étudier que la stabilité des géotubes que sur deux batteries et d'en éliminer la troisième (il n'y a aucune différence d'étudier deux ou trois batteries de géotubes);
- ✓ Il s'avère qu'au vu des résultats que la direction N315 est la plus préjudiciable en terme de stabilité et d'agitation derrière les brises lames de ce fait seul cette direction sera testé pour la suite des essais .
- ✓ Seules les sondes: S1, S2, S4, S7, S12 sont intéressante en terme de résultats car :

S1 et S2 : sont placées juste après le batteur et permettent de s'assurer que la houle de consigne est bien générée et respectée

S4 : est positionnée juste avant le brise-lame ;

S7 : est mise juste après le brise-lame et permet donc de définir l'effet du brise lame en terme d'atténuation de la houle ;

S12 : est placée au niveau de la plage pour mesurer l'amplitude de la houle arrivant à la côte et influe directement sur le comportement du rechargement de la plage.



**Figure 4.2 :** Vue d'une batterie de géotubes

### 4.3 Description et résultats de la variante 1

#### Description des Brise-lames en géotubes

- Profondeur moyenne d'implantation : -5 m ;
- Côte d'arase : - 1.5m ;
- Hauteur de la structure : 3.5m ;
- Hauteur unitaire du géotube : 1.75m
- Largeur du géotube : 4m ;
- Longueur du géotube : 28.75m
- Largeur de la berme de la base supérieure du brise-lame: 12m ;
- La largeur de la base inférieure du brise-lames : 16m ;
- Espacement de 80 m entre brise-lame
- Ces brise-lames présentent une longueur unitaire de 115ml et un espacement entre brise-lames de 80ml. Ils seront implantés à une distance d'environ 350 mètres de la côte et orientés parallèlement à la côte et perpendiculairement aux houles du secteur Nord-Ouest
- Les géo tubes sont posé sur un tapis anti-affouillement formé de géo textile de 26 m de largeur muni d'un petit lest sur les extrémités sous la forme d'un petit tube de 50 cm de diamètre, en vue d'assurer la pérennité du sol support.

**Tableau N° 4-4** : Hauteurs des houles mesurées pour variante 1

	Hauteur des Houles (m)									
	Sans brise-lames					Avec brise-lames				
Temps de retour (an)	S1 (m)	S2	S4	S7	S12	S1	S2	S4	S7	S12
1an	1,02	1,02	0,85	0,8	0,81	<b>1,07</b>	<b>1,04</b>	<b>1,24</b>	<b>0,65</b>	<b>0,84</b>
5ans	2,2	2,38	2,09	2,23	1,67	<b>2,3</b>	<b>2,27</b>	<b>2,58</b>	<b>1,33</b>	<b>1,1</b>
10ans	2,56	3,11	2,58	2,58	1,71	<b>2,87</b>	<b>2,99</b>	<b>3,2</b>	<b>1,69</b>	<b>1,42</b>
20ans	3,08	4,02	3,31	2,82	1,76	<b>3,99</b>	<b>4,4</b>	<b>3,72</b>	<b>2,06</b>	<b>1,57</b>
50ans	3,46	4,89	3,68	2,82	1,91	<b>4,49</b>	<b>4,61</b>	<b>3,62</b>	<b>2,25</b>	<b>1,65</b>





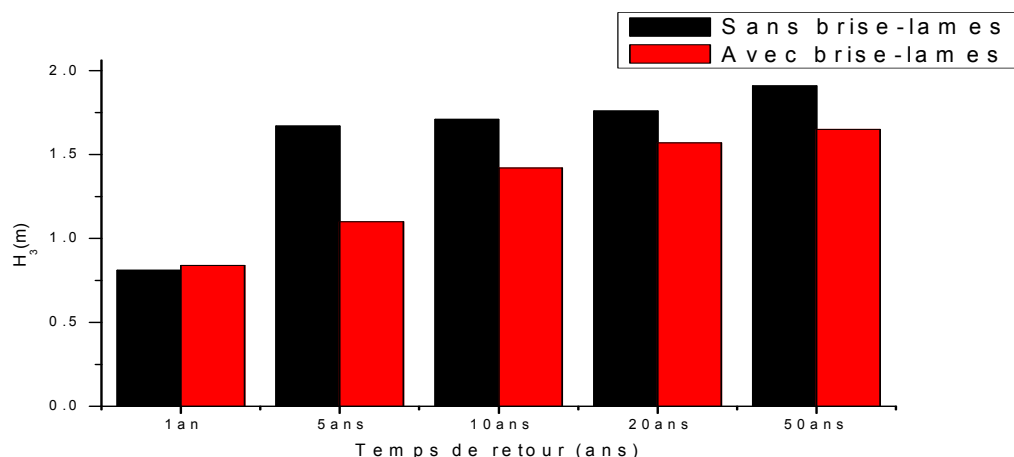


Figure 4-3 : Hauteur des houles générées dans le bassin les en fonction du temps de retour

#### Analyse des résultats

Hauteur de houle (m)	
Sans Brise-lames	Avec Brise-lames
<b>S4</b>	<b>S7</b>
0,85	0,48
2,09	1,42
2,58	1,73
3,31	2,07
3,68	2,01

En comparant les résultats obtenus par la sonde S4 placée avant les géotubes et les résultats obtenus par la sonde S7 placée après les géotubes, nous confirmons bien là les effets des géotubes sur l'atténuation de la houle.

Hauteur de houle (m)	
Sans Brise-lames	Avec Brise-lames
<b>S12</b>	<b>S12</b>
0,81	0,84
1,67	1,1
1,71	1,42
1,76	1,57
1,91	1,65

Les résultats des sondes S12 placées au niveau de la plage montrent que la hauteur de la houle a bien diminué comparé à ce qu'elle était avant.

#### 4.4. Description et résultats de la variante 2

Les brise-lames sont placés à – 5m de profondeur avec un espacement entre chacun d’eux de 40m. Chacun des deux brise-lames est constitué de 16 géotubes à la base et de 12 géotubes au sommet. Chaque géotube ayant une longueur de 29m environ.

	Hauteur des Houles (m)									
	Sans brise-lames					Avec brise-lames				
Temps de retour (an)	S1	S2	S4	S7	S12	S1	S2	S4	S7	S12
1an	1,02	1,02	0,85	0,80	0,81	1,11	1,07	1,30	0,80	0,60
5ans	2,2	2,38	2,09	2,23	1,67	2,43	2,40	3,15	1,75	1,13
10ans	2,56	3,11	2,58	2,58	1,71	2,78	2,72	3,85	2,25	1,42
20ans	3,08	4,02	3,31	2,82	1,76	4,00	4,40	3,32	2,94	1,61
50ans	3,46	4,89	3,68	2,82	1,91	4,46	4,46	4,63	3,25	1,66

Tableau N° 4-5: Hauteurs des houles en bassin à houle de la variante 2

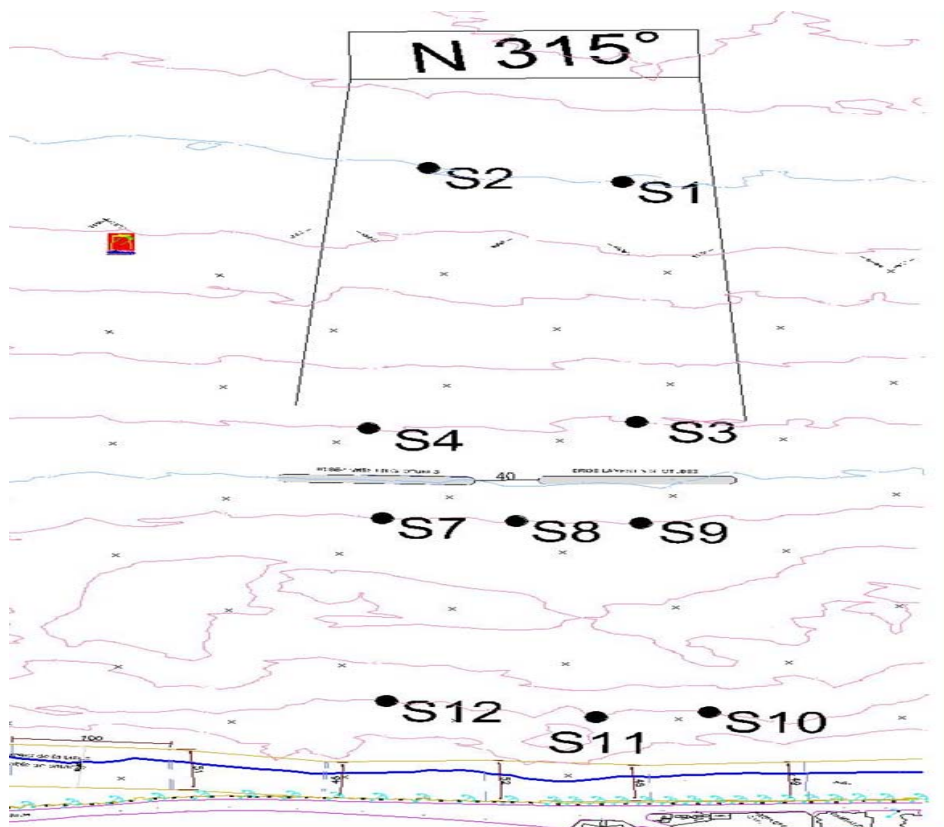


Figure4-4: Plan de sondes de la variante 2

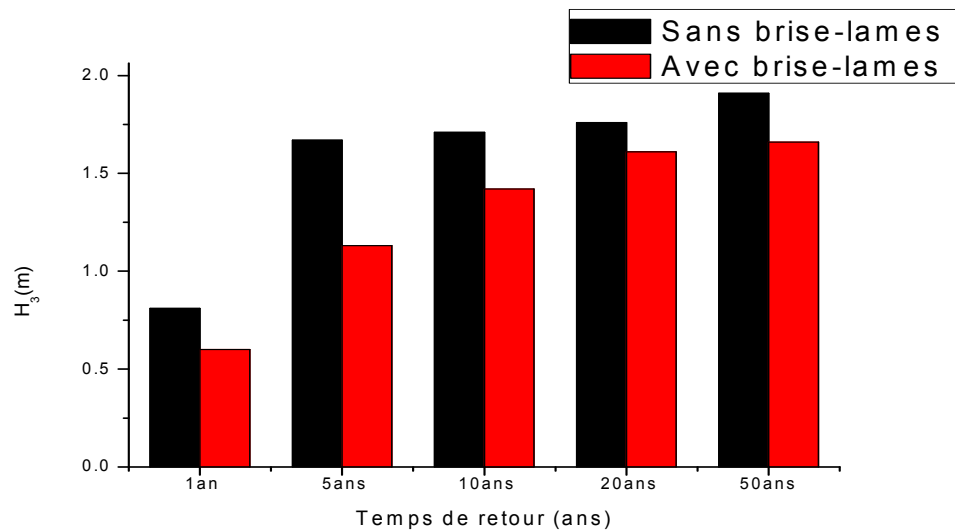


Figure 4.5 : Hauteur des houles générées dans le bassin en fonction du temps de retour

### Analyse des résultats

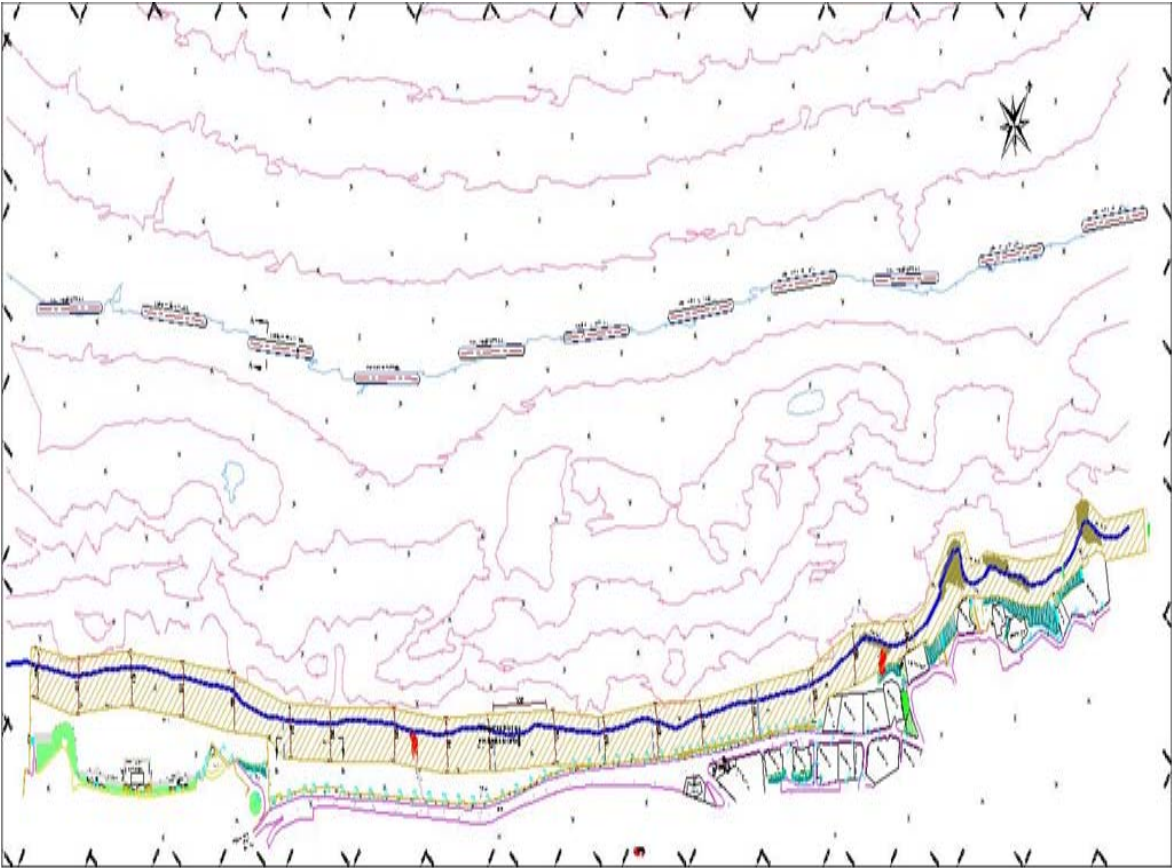
Les mêmes remarques que pour la 1<sup>ère</sup> variante concernant les sondes S4 et S7.

Hauteurs de houle (m)	
Avec Brise-lames (80m)	Avec Brise-lames (40m)
<b>S12</b>	<b>S12</b>
0,84	0,60
1,10	1,13
1,42	1,42
1,57	1,61
1,65	1,66

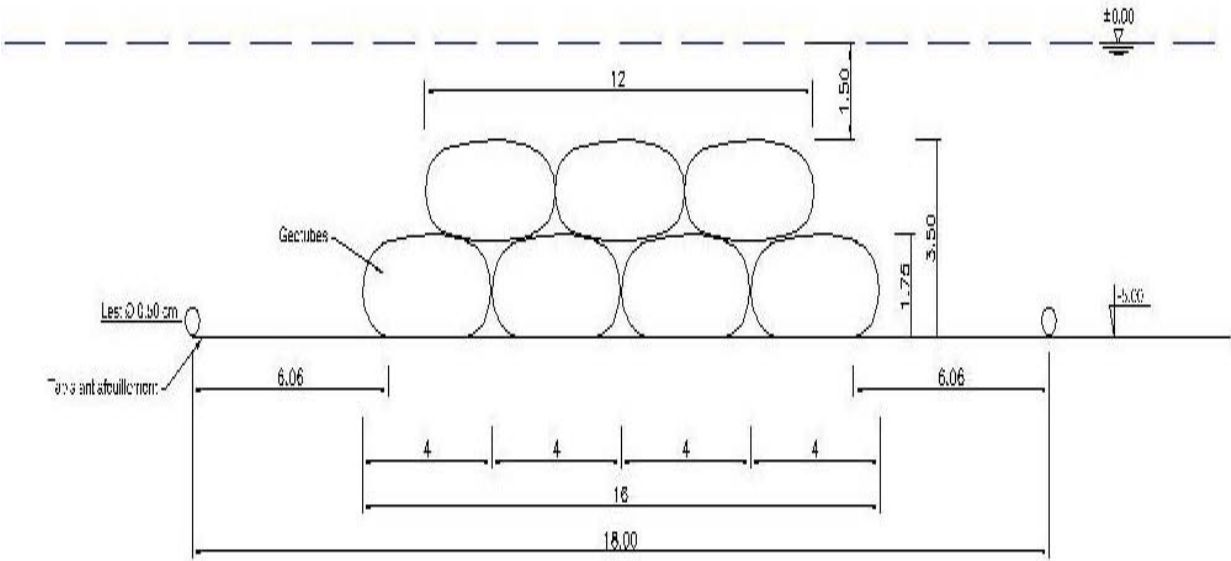
Si on venait à comparer les résultats mesurés par les sondes S12 avec un espacement entre les géotubes de 40 et 80m, on peut dire que finalement, dans l'ensemble, malgré la diminution d'espace entre les brise-lames, la houle arrivant aux côtes reste quasiment inchangée.

En conclusion, que ça soit un espace de 40 m ou de 80 m entre les brise-lames, on aura pratiquement les mêmes résultats de mesure. Ce qui nous permet de conclure que l'espace entre les batteries de géotubes variant entre 40m et 80 m n'influence pas sur la hauteur de la houle arrivant à la côte ni sur la stabilité des géotubes.

La première et la deuxième variante ont les mêmes caractéristiques la seule différence est l'espacement entre les brise-lames qui est de 80m pour la 1<sup>ère</sup> variante et de 40m pour la 2<sup>ème</sup> variante.



Plan de masse des variantes 1 et 2



Profil du brise-lames des variantes 1 et 2

### 4.5 Description et résultats de la variante 3

#### Description du Brise-lames en géotubes

- Profondeur moyenne d'implantation : -3 m ;
- Côte d'arase : - 1.25m ;
- Hauteur de la structure : 3.5m ;
- Hauteur unitaire du géotube : 1.75m
- Largeur du géotube : 4m ;
- Longueur du géotube : 28.75m
- La largeur de couche inférieure du brise-lames : 16m ;
- Espacement de 80 m entre brise-lame ;
- Ces brise-lames présentent une longueur unitaire de 115ml et un espacement entre brise-lames de 80ml. Ils seront implantés à une distance d'environ 145 mètres de la côte et orientés parallèlement à la côte et perpendiculairement aux houles du secteur Nord-Ouest.
- Les géo tubes sont posé sur un tapis anti-affouillement de 26 m de largeur muni d'un petit lest sur les extrémités sous la forme d'un petit tube de 50 cm de diamètre, en vue d'assurer la pérennité du sol support.
- 

**Tableau N° 4-6:** Hauteurs des houles en bassin à houle de la variante 3

	Hauteur des Houles (m)									
	Sans brise-lames					Avec brise-lames				
Temps de retour (an)	S1 (m)	S2	S4	S7	S12	S1	S2	S4	S7	S12
1an	1,02	1,02	0,85	0,8	0,81	<b>1,21</b>	<b>1,18</b>	<b>1,18</b>	<b>1,22</b>	<b>0,49</b>
5ans	2,2	2,38	2,09	2,23	1,67	<b>2,42</b>	<b>2,42</b>	<b>2,46</b>	<b>2,58</b>	<b>0,82</b>
10ans	2,56	3,11	2,58	2,58	1,71	<b>3,03</b>	<b>3,03</b>	<b>2,98</b>	<b>2,96</b>	<b>0,91</b>
20ans	3,08	4,02	3,31	2,82	1,76	<b>4,06</b>	<b>4,23</b>	<b>3,52</b>	<b>3,01</b>	<b>1,09</b>
50ans	3,46	4,89	3,68	2,82	1,91	<b>4,9</b>	<b>4,98</b>	<b>3,59</b>	<b>3,21</b>	<b>1,1</b>

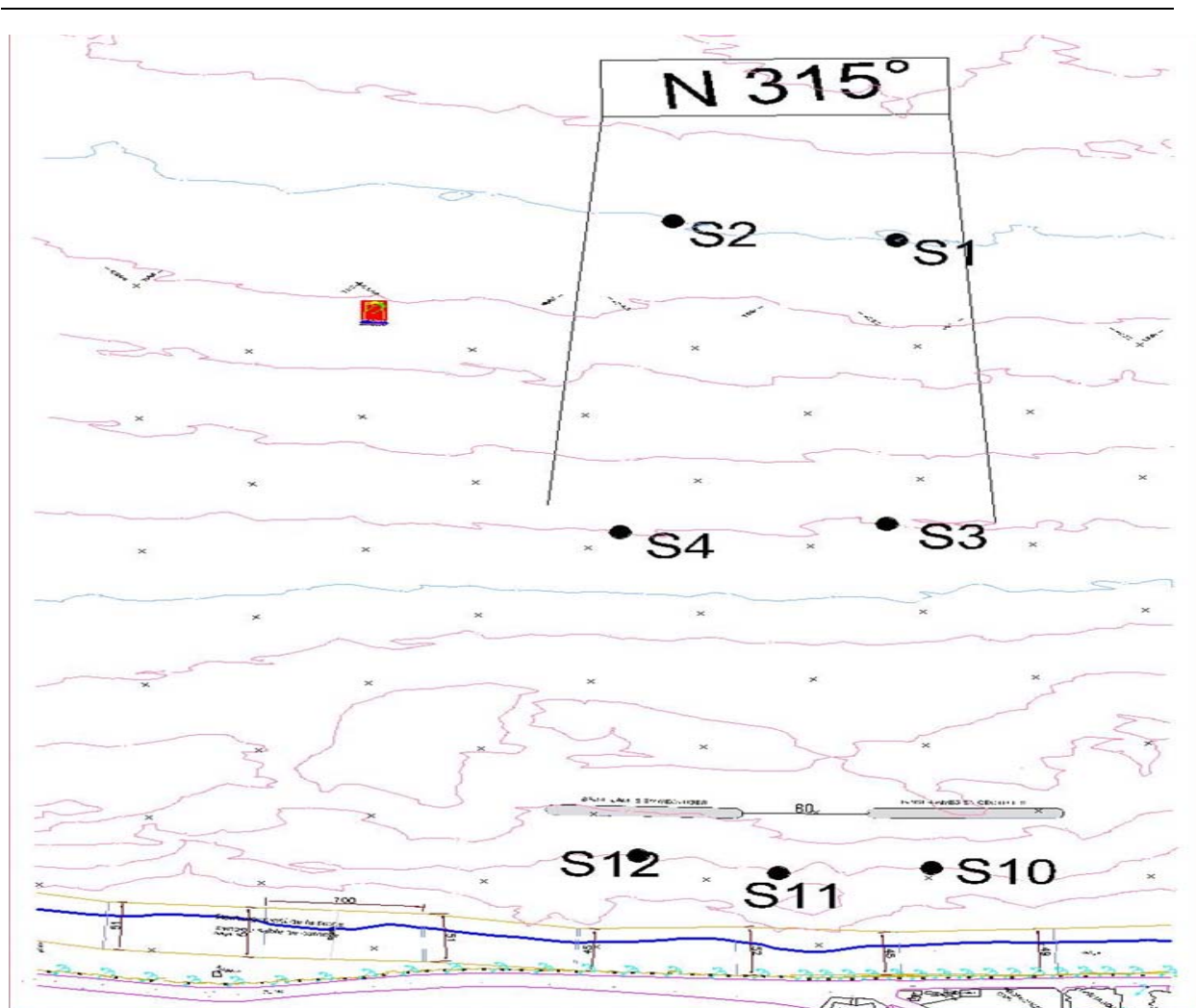


Figure4-6 : Plan de sondes de la variante 3

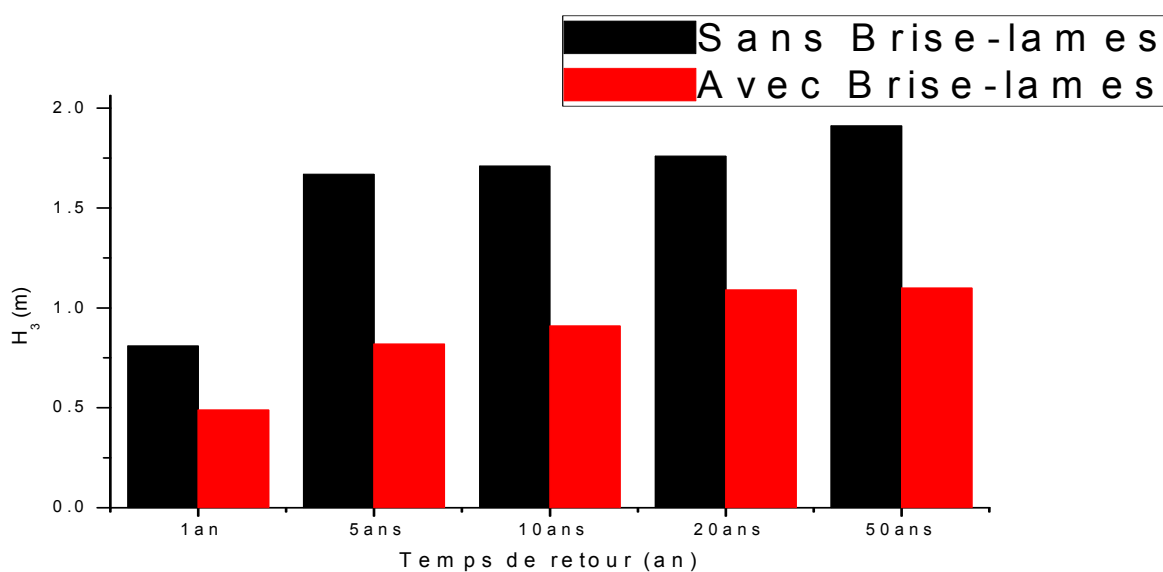


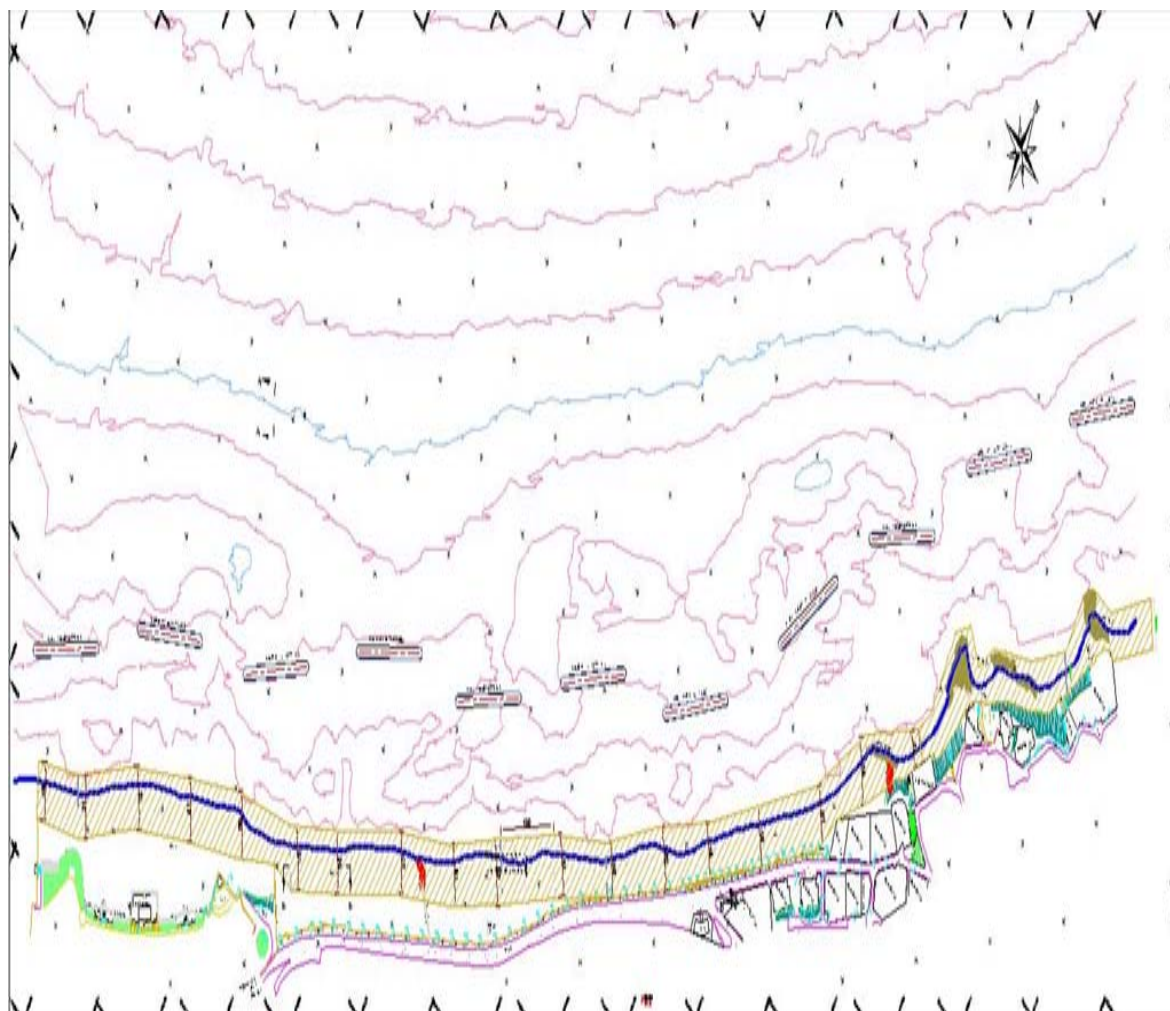
Figure 4.7 : Hauteur des houles générées dans le bassin en fonction du temps de retour

*Analyse des résultats*

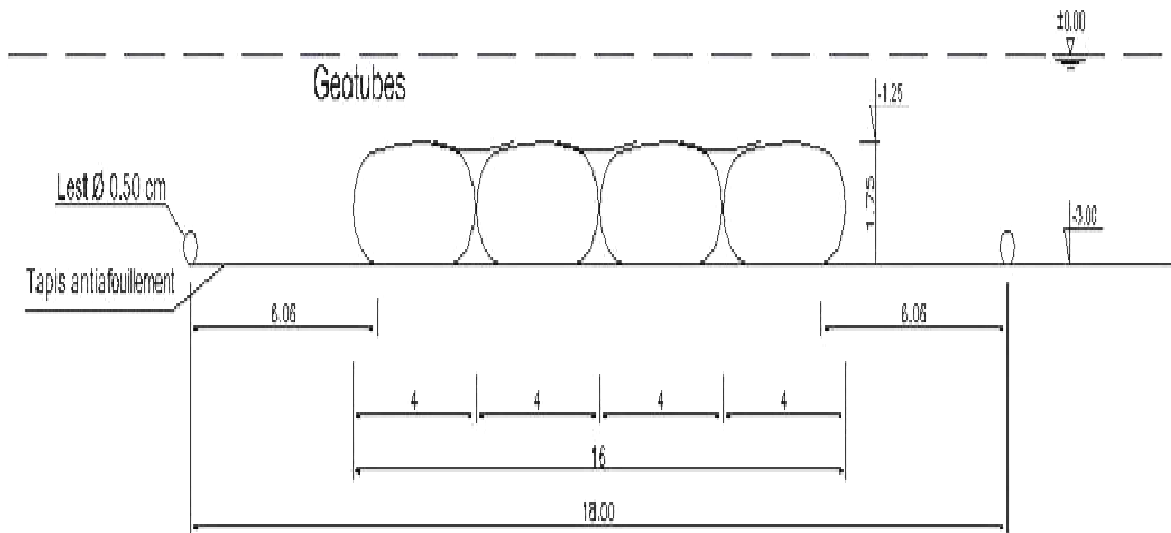
Hauteur de		Houle (m)
Sans Brise-lames	Avec Brise-lames	
<b>S12</b>	<b>S12</b>	
0,81	0,4	
1,67	0,83	
1,71	0,89	
1,76	1,04	
1,91	1,66	

On remarque qu'en plaçant les géotube à la profondeur -3m et arasé à -1,25m avec seulement 16 géotubes à la base , la hauteur de la houle arrivant a la côte a nettement baissé.

La stabilité des géotube n'est en aucun cas atteinte.



Plan de masse de la variante 3

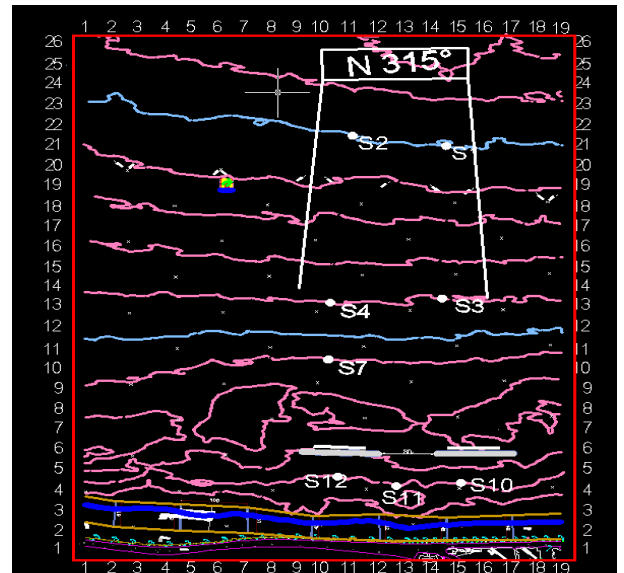


Profil du brise-lames de la variante 3

### Essais complémentaires

Nous avons repris la variante 3 avec les mêmes paramètres sauf que cette fois-ci nous avons placé une sonde entre deux batteries de géotubes pour pouvoir connaître l'intensité de la houle passant et arrivant à la cote entre deux dernières.

Hauteur de houle (m)					
Avec Brise-lames					
S1	S2	S4	S7	S12	S11
1,21	1,18	1,18	1,22	0,49	0,46
2,42	2,42	2,46	2,58	0,82	0,91
3,03	3,03	2,98	2,96	0,91	1,16
4,06	4,23	3,52	3,01	1,09	1,35
4,9	4,98	3,59	3,21	1,1	1,45



### Interprétation des résultats :

En comparant les sondes S11 et S12 on peut conclure que la houle à la cote arrivant entre les géotubes est sensiblement la même comparé aux valeurs derrière le géotube et cela pour des fortes houles (période hivernale).



# **Chapitre 5**

Etude en modèle à fond  
mobile en canal à houle

## Chapitre 5

# ETUDE EN MODELE A FOND MOBILE EN CANAL A HOULE

## 1. ETUDE EN MODELE A FOND MOBILE : ETUDE EN CANAL A HOULE

### 1.1. Description de l'installation

Les essais en canal permettent de modéliser une plage soumise uniquement aux houles frontales, ils ne tiennent pas compte du transit littoral. Seuls les processus sédimentaires d'échanges transversaux sont représentés.

Les mouvements dans le profil sont particulièrement importants entre la côte et la zone de déferlement. Dans cette zone, les fonds s'érodent et se sédimentent alternativement suivant les caractéristiques des houles, mais le profil moyen peut rester stable au cours des années successives en l'absence d'ouvrage le long de la côte. (*Validation en canal à houle d'aménagement de la plage des Lecques*)

Dimensions de notre canal sont : 40\*0,6 \* 1 m.

Ces essais permettent de vérifier la stabilité d'une ou plusieurs sections (2D) de ces ouvrages dans un environnement marin donné, et d'en évaluer les performances en termes de franchissement, de réflexion ou encore de transmission en vue d'une éventuelle optimisation du projet. (<http://www.oceanide.net/index.html>)



*Figure 5.1* : Canal à houle

## 1.2. Echelle de similitude dynamique et sédimentologique

Le transport sédimentaire sous l'effet prédominant de la houle est caractérisé par le paramètre adimensionnel  $G$  appelé paramètre du grain. Pour reproduire des mouvements sédimentaires homologues sur le modèle à ceux de la nature, il est nécessaire de choisir un matériau artificiel dont le comportement est analogue à celui des sédiments naturels en conservant le même régime d'écoulement du grain tombant en chute libre dans l'eau.

Ce critère est respecté si l'on conserve sur le modèle la même valeur du paramètre, sans distorsion du grain  $G$  qu'en nature avec :

$$G = \frac{\varepsilon g D^3}{\nu^2}$$

$\nu$  : viscosité cinématique de l'eau ;

$g$  : accélération de la pesanteur ;

$D$  : diamètre caractéristique du grain ;

$\varepsilon$  : la densité relative du matériau :  $\varepsilon = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$ ,  $\gamma$  et  $\gamma_s$  étant les poids spécifiques de l'eau et du matériau,

➤ L'égalité  $G_{\text{modèle}} = G_{\text{nature}}$  permet de définir les rapports entre les diamètres des grains sur le modèle et en nature,

$$\begin{aligned} G_{\text{modèle}} = G_{\text{nature}} &\longrightarrow \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\nu_m}{\nu_n} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\nu_m = \nu_n) \\ &\longrightarrow \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

➤  $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_n}{m^{\frac{3}{8}}}$  /  $m$  : échelle pour les dimensions en hauteur

$$m^{\frac{3}{8}} = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} \quad (4.2)$$

Le diamètre du matériau naturel est compris entre [0,5mm et 0,7mm].

Le matériau choisi est le PVC broyé, sa masse volumique est  $\rho_m = 1,4\text{g/cm}^3$ .

Si nous prenons :  $D_n = 0,6\text{mm}$  et  $D_m = 1\text{mm}$  nous aurons :

$$(4.1) \quad \longrightarrow \quad \frac{D_m}{D_n} = \frac{1}{0,6} = 1,66 = \left( \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = e^{3 \ln 1,66} = 4,57$$

$$\longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = \frac{0,4}{4,57} = 0,087$$

$$(4.2) \quad \longrightarrow \quad m \approx 58$$

Donc c'est à partir de cette valeur ( $m = 58$ ) que nous allons nous baser pour choisir l'échelle en hauteur de notre modèle.

Pour  $m = 50$  :

$$(4.2) \quad \longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = 4,33$$

$$\longrightarrow \quad \varepsilon_m = \frac{0,33}{4,33} = 0,076$$

$$(4.1) \quad \longrightarrow \quad \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{0,082}{0,33} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,61$$

$$\longrightarrow \quad D_m = 0,61 D_n$$

Le rapport entre les grains naturels et les grains du modèle est trop petit alors nous devons changer l'échelle en hauteur.

Pour  $m = 40$

$$(4.2) \quad \longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = 3,98$$

$$\longrightarrow \quad \varepsilon_m = \frac{0,33}{3,98} = 0,082$$

$$(4.1) \quad \longrightarrow \quad \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{0,082}{0,33} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,58$$

$$\longrightarrow \quad D_m = 1,58 D_n$$

Pour  $m = 30$

$$(4.2) \quad \longrightarrow \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = 3,50$$

$$\longrightarrow \varepsilon_m = \frac{0,33}{3,50} = 0,094$$

$$(4.1) \quad \longrightarrow \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{0,094}{0,33} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,51$$

$$\longrightarrow D_m = 1,51 D_n$$

Pour m = 20

$$(4.2) \quad \longrightarrow \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = 3,07$$

$$\longrightarrow \varepsilon_m = \frac{0,33}{3,07} = 0,107$$

$$(4.1) \quad \longrightarrow \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{1,107}{0,33} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,44$$

$$\longrightarrow D_m = 1,44 D_n$$

Pour m = 20 :

$$(4.2) \quad \longrightarrow \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m} = 3,07$$

$$\longrightarrow \varepsilon_m = \frac{0,33}{3,07} = 0,107$$

$$(4.1) \quad \longrightarrow \frac{D_m}{D_n} = \left( \frac{0,107}{0,33} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,44$$

$$\longrightarrow D_m = 1,44 D_n$$

Si nous venions à calculer les diamètres du matériau du modèle avec une échelle en hauteur de  $m = 20$ , nous nous rendons compte que cette échelle est trop petite et que le diamètre obtenu avec cette échelle est trop petit ce qui sera difficile à observer lors des essais. C'est pour cette raison que, nous avons décidé de choisir une échelle en hauteur égale à 30 qui n'est ni trop petite ni trop grande.

La distorsion doit être comprise entre  $[2, 4]$ . Si nous choisissons une distorsion de  $\Delta = 3$ , nous aurons une échelle horizontale  $n = 90$ . Nous pouvons toujours arrondir ce chiffre à  $n=100$ .

#### ❖ Similitude sédimentologique

Le respect d'un certain nombre de règles de similitude du comportement du sédiment nous a conduit à retenir un matériau plus léger que le sable nature ; c'est ainsi que le matériau artificiel choisi pour cette étude est le **PVC** de masse volumique de **1.41g/cm<sup>3</sup>**.

De même, un facteur de grossissement des grains égal à **1,51** a été considéré.

Comme nous l'avons précédemment, la relation entre le diamètre du matériau du modèle et celui en nature est la suivante :  $D_m = 1,51 D_n$  (**m=30**)

**Tableau 5-1** : Tableau des diamètres du grain naturel et artificiel

$D_n$ (mm)	0,50	0,6	0,7
$D_m$ (mm)	0,72	0,906	1,057

Fourni en rouleau, le PVC est broyé à plusieurs reprises pour atteindre une granulométrie la plus fine.



Broyeur du matériau en PVC

Le matériau broyé est ensuite tamisé sur une série de tamis dont les mailles sont réparties comme suit : 315, 400, 500, 630, 800 et 1000  $\mu\text{m}$ .

Cette répartition nous permet d'avoir la granulométrie voulue du matériau pour le rechargement à savoir :

- $D=700\mu\text{m}$  ,.
- $D=1000 \mu\text{m}$
- $D=900\mu\text{m}$



Tamiseuses comportant la série de tamis

❖ **Similitude hydraulique distordue**

Les échelles de réduction géométrique ont été fixes à :

$$\lambda_l = 1/n = 1/100 \text{ pour les dimensions en plan ;}$$

$$\lambda_h = 1/m = 1/30 \text{ pour les dimensions en hauteur ;}$$

$$\Delta = 3,33 \text{ pour la distorsion,}$$

La similitude géométrique doit être complétée par une similitude dynamique (hydraulique) qui dans le cas présent est une similitude de Reech-Froude qui consiste à reproduire en modèle le même type d'écoulement (ondes gravitaires) qu'en nature,

Le tableau ci après indique les principaux rapports de similitude qui se déduisent des lois de Froude :

**Tableau 5-2** : Rapports de similitude

Grandeur	Symbole	Valeur
Dimension en plan	$\lambda_l = 1/n$	1/100
Profondeur	$\lambda_h = 1/m$	1/30
Surface { Verticale Horizontale	$\lambda_l \times \lambda_h$	1/3000
	$\lambda_l^2$	1/10000
Volumes	$\lambda_l^2 \times \lambda_h$	1/300000
Vitesse { Verticale Horizontale	$\lambda_h^{1/2}$	1/5,47
	$\lambda_l / \lambda_h^{3/2}$	1/0,608
Temps hydraulique	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_h}$	1/5,47
Houles { Hauteur Période Longueur d'onde	$\lambda_h$	1/30
	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_h}$	1/5,47
	$\lambda_h$	1/30

❖ **Echelle des temps sédimentologique**

L'échelle des temps sédimentologique est différente de l'échelle des temps hydrauliques,

L'échelle théorique des temps sédimentologiques est égale au rapport entre l'échelle des volumes et l'échelle des débits sous l'action de la houle :

$$\lambda_t = \frac{T_{modèle}}{t_{nature}} = \frac{Km}{Kn} n^{1/2} \left(\frac{m}{n}\right)^2$$

$$\lambda_t = \frac{Tm}{tn} = \frac{1}{1521}$$

C'est-à-dire qu'une année en « nature » sera représentée sur le modèle par 6 heures environ.

Le nombre d'heure représentant une année en nature est égale à :

$X = 8640 \times 1 / 1521 = 5,68 \approx 6$  heures en modèle.

La houle frontale prise en considération en canal est celle de la direction N315°. Les résultats de la réfraction de cette houle à -10m sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 5-3** : Réfraction de la houle à -10m de profondeur

Direction	Période de la houle Tp (s)	Amplitude de la houle Hs (m)	Temps (mn)
N315°	Tp = 6,00s	Hs = 1,01 m	79,56
	Tp = 8,00 s	Hs = 2,36 m	27,00
	Tp = 8,36 s	Hs = 3,00 m	27,00
	Tp = 10,00 s	Hs = 4,00 m	8,28

Une année sera divisée en deux temps équivalents : un temps pour la saison hivernale et un temps pour la saison estivale. La nature est telle qu'en hiver il y a des houles dites de tempête c'est-à-dire qu'elles sont caractérisées par de grandes amplitudes avec une longue durée d'action contrairement aux houles d'été.

Le tableau suivant représente la répartition d'une année en nature (6h en modèle) dans la direction des houles frontales c'est-à-dire N315°. On a divisé l'année en deux cycles : cycle d'été et cycle d'hiver. Les données de houles à -10m de profondeur sont réparties selon les cycles. On remarque que les grandes amplitudes de houles (Hs=4m) une durée d'action assez faible en été et assez grande en hiver.

**Tableau 5-4** : Répartition des temps d'action des houles durant les deux cycles

	Hs à - 10 m (m)	Tp (s)	Durée (mn)		Hs à - 10 m (m)	Tp (s)	Durée (mn)
	Cycle d'été	1,01	6,00		40,00	Cycle d'hiver	1,01
2,36		7,32	13,50	2,36	7,32		10,00
3,00		8,83	13,5	3,00	8,83		13,00
4,00		9,80	8,28	4,00	9,80		40,00
4,85		10,83	6,00	4,85	10,83		45,00
3,00		8,83	13,5	3,00	8,83		13,00
2,36		7,32	13,5	2,36	7,32		10,00
1,01		6,00	40,00	1,01	6,00		8,00



## 2. RECHARGEMENT DE PLAGE

### 2.1. Généralités

Les rechargements de plage auront pour but de compenser les déséquilibres du littoral par suite d'une érosion naturelle ou due à des interventions humaines (ouvrages portuaires, emprunt de sables à l'amont...). La reconstitution de la plage par rechargement pourra avoir comme conséquences de supprimer les phénomènes de réflexion de la houle sur le haut estran accore et de rétablir les possibilités de remontés des sédiments du large sous l'action des houles faible a moyennes. Dans tous les cas ce procédés appliqué seul ou en association avec des ouvrages de fixation de l'estran (épis, brise-lames...) est très efficaces. Les premiers rechargements de plages par des produits de dragages ont été réalisés par *le laboratoire central d'hydraulique de France* à Agadir en déversant les sables à des profondeurs de plus en plus faibles le long du littoral. On constate que dans ce cas il fallait atteindre des fonds inférieur à -3m pour que l'alimentation du rivage soit efficace.

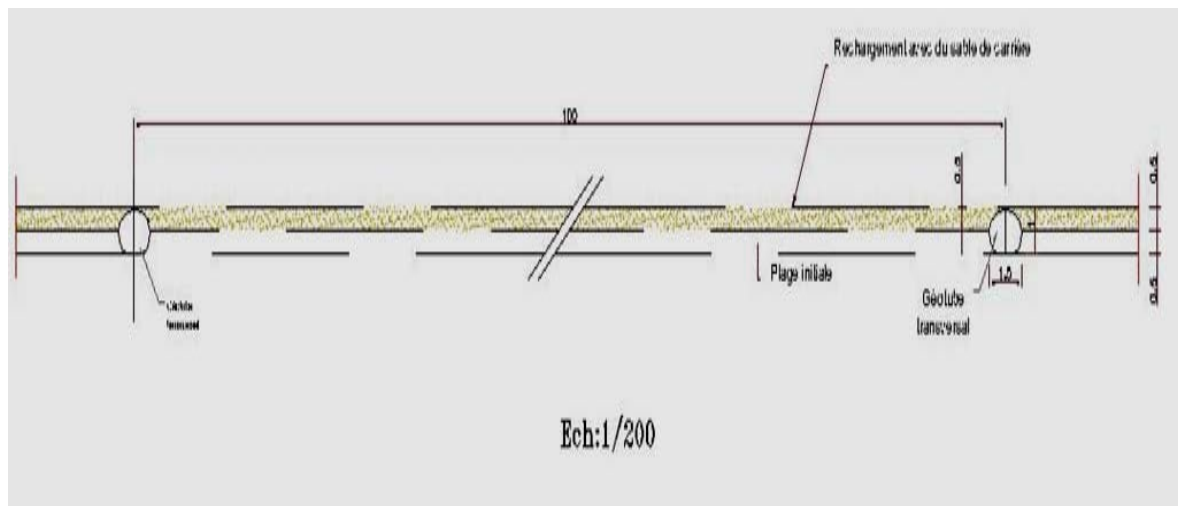


Figure 5.2 : Rechargement de la plage

### 2.2. Méthode de rechargement

#### 2.2.1. Déversement du matériau directement sur la plage

Pour alimenter une plage, il est souhaitable de déverser le matériau directement sur le haut estran en laissant le soin à la houle de faire la répartition et le modelage de la plage

- ♣ Apports par camions
- ♣ Refoulement hydraulique (plages reconstituées par produits dragués du large et refoulés par canalisation)

#### 2.2.2. Déversement d'apports par petits fonds

Ce mode d'apport doit être soigneusement étudié: suivant la profondeur de déversement, la nature des sédiments et les conditions des houles sur le site: les matériaux peuvent soit remonter vers la plage ou être entraînés vers le large.

### 2.3. Profil de la plage

#### *Notion de profil d'équilibre*

Lorsque les fonds marins et les plages sont constitués par des matériaux mobiles, ceux-ci, sous l'action des houles se modèlent et se déplacent jusqu'à ce que ce soit atteint un profil d'équilibre correspondant, en autres paramètres, aux caractéristiques des sédiments (en particulier leur sédiments) et de la houle (période, amplitude et cambrure). Ce profil, lorsque la houle varie, évolue ; les volumes des matériaux mis en jeux lors de ces mouvements peuvent être fort importants (de l'ordre de quelques milliers de m<sup>3</sup> par m et par an).

Ces modifications des profils se traduisent par des modifications des niveaux de la plage et des fonds marins et aussi de la répartition des matériaux dans le profil.

A l'approche du rivage, la houle est soumise à différentes déformations. En particulier, sa célérité, son amplitude et sa longueur d'onde (donc sa cambrure) se modifient en fonction de la configuration des fonds existants.

A partir d'une certaine profondeur, une partie de l'énergie de la houle est utilisée pour mettre en mouvement les matériaux de fond, notamment entre la ligne de déferlement et la ligne de côte.

Il y a donc action des fonds sur la houle et action de la houle sur les matériaux ; ainsi, pour des caractéristiques de matériaux et de houle du large, ces actions tendent à s'équilibrer, et la plage prend une forme stable que l'on appelle profil d'équilibre.

En toute rigueur, le profil d'équilibre n'existe que pour une plage rectiligne non soumise à une érosion ou une sédimentation d'ensemble (produite par exemple par la présence d'un ouvrage).

#### *Type de profil de plage – Formation de barres*

Depuis longtemps déjà, on a observé que les houles d'hiver (ou de tempête) érodaient le haut des plages, tandis que les houles d'été (ou de beau temps) avaient tendance à les reconstituer.

Cette classification est encore adoptée de nos jours, mais avec des appellations diverses :

- Profil d'hiver, de tempête ou avec barre ;
- Profil d'été, de beau temps ou sans barre,

Il semble encore que les deux types de profils généralement rencontrés soient bien caractérisés par la présence ou non d'une barre qui se forme parallèlement au rivage, au droit de la ligne de déferlement.

#### *Evolution des profils de plage*

Les plages et les fonds sous marins qui leur font suite, ont à chaque instant, un équilibre dynamique qui dépend des facteurs océanographiques (en particulier des houles) et sédimentologiques (nature des matériaux) ou encore du régime général de la cote (littoral en érosion ou en sédimentation).

L'évolution du profil des plages se fait donc à des échelles de temps extrêmement variables en fonction des paramètres pris en compte.

On peut ainsi considérer :

- Les évolutions à l'échelle du jour et de quelques jours correspondant à des conditions océanographiques et météorologique de durée limitée ;
- Les évolutions annuelles qui correspondent, schématiquement aux périodes de tempêtes (automne-hiver) et de beau temps (printemps-été) ;
- Les évolutions à très longue période ou durées (plusieurs années) qui sont en relation avec le régime général du littoral.

Bien évidemment, plusieurs types d'évolution peuvent se superposer et pendant la période de beau temps, les profils se modifient lors des tempêtes occasionnelles.

A coté de ces grands modes d'évolutions, il faut ajouter d'autres facteurs intervenant à des degrés variables tels que le cycle de marées (marée de vive eaux – marée de mortes eaux) ou encore des phénomènes exceptionnels comme des typhons. (Laboratoire centrale de l'hydraulique en France)

Dans le cas de notre projet, nous sommes en présence de la mer Méditerranée qui est une mer sans marée ou l'évolution des profils de plage est saisonnière.

- **Mer sans marée : mer Méditerranée**

La côte, où la marée est inférieure à 0,5m, est soumise à des houles pouvant atteindre en période de tempête 7m, une barre existe le plus fréquemment.

La comparaison des profils avant, pendant et après la période de mauvais temps (Octobre-Janvier ; Avril-Juillet) font apparaître que :

- En période de mauvais temps il y a érosion de la partie supérieure du profil et engraissement de la partie inférieure alors que le processus est inverse en période de beau temps ;
- En période de mauvais temps, la barre se creuse et se déplace vers le large, Le processus est inverse en période de beau temps ou le processus tend à disparaître.

Les volumes mis en jeu (érosion et sédimentation) dans l'évolution entre les profils de beau temps et de tempête sont de l'ordre de 500 000 m<sup>3</sup>/Km/an. Ces chiffres prennent toutes leurs valeurs lorsqu'on compare aux quantités de matériaux transportés par le transit littoral qui sont de 250 000 m<sup>3</sup>/an.

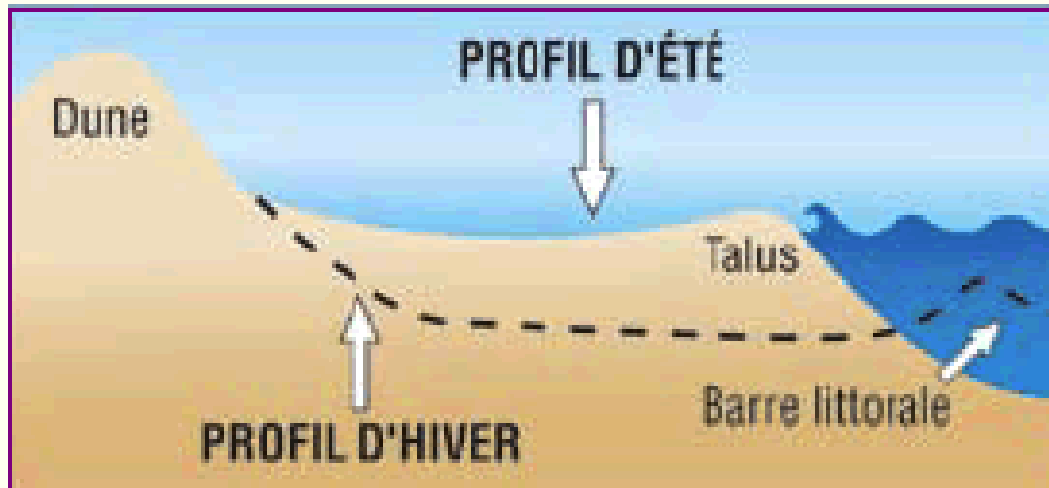


Figure 5.3 : Schéma représentant les profils d'été et d'hiver

### 3. RESULTATS DES ESSAIS EN CANAL A HOULE

#### 3.1 OBJET DE L'ETUDE

L'objet de la présente étude est de vérifier la stabilité du rechargement protection du rivage de club des pins préconisée.

Cette solution de protection est constitué par un rechargement artificiel de la plage avec du sable de carrière afin d'augmenter la largeur de la plage notamment du coté Est (le plus touché par l'érosion) protégeant ainsi les aménagements qui longe la côte.

Les fonds on été représentés sur 1457m environ entre les côtes +2.9 m et -15 m

Les caractéristiques du matériau de rechargement sont définies en comparant la distribution granulométrique de ses particules à celles du sédiment in-situ de la plage naturelle. Le rechargement de la plage de Club des Pins sera réalisé avec un matériau d'apport ayant les critères suivant :

- Diamètre moyen :  $0,500 \text{ mm} < D50 < 0,700 \text{ mm}$
- Hauteur moyenne de rechargement : 0.5m

Ce rechargement est protégé à proximité de la côte par des brises lames immergés fondés à -3 m ou -5m ayant respectivement des cotes d'arase de -1.25 m et -1.5m.

Ces prises lames sont formées par des géotubes dont la stabilité a été étudié lors des essais en bassin à houle.

#### Conditions d'essais

La houle frontale prise en considération en canal est celle de la direction Nord 315°.

Les résultats de la réfraction de cette houle à -10m sont résumés comme suit :

**Tableaux 5-5** : Résultats de la réfraction de la houle à -10m de profondeur

Période $T_p$ (s)	Amplitude $H_s$ (m)
6,00	1,01
8,00	2,36
8,83	4,00
10,00	4,85

Les essais en canal à houle ont été effectués avec les résultats obtenus en bassin à houle. C'est la houle mesurée à la sonde 12 (la sonde qui est située au niveau de la plage) qu'on a générée dans le canal à houle.

Il n'y a que trois sondes :

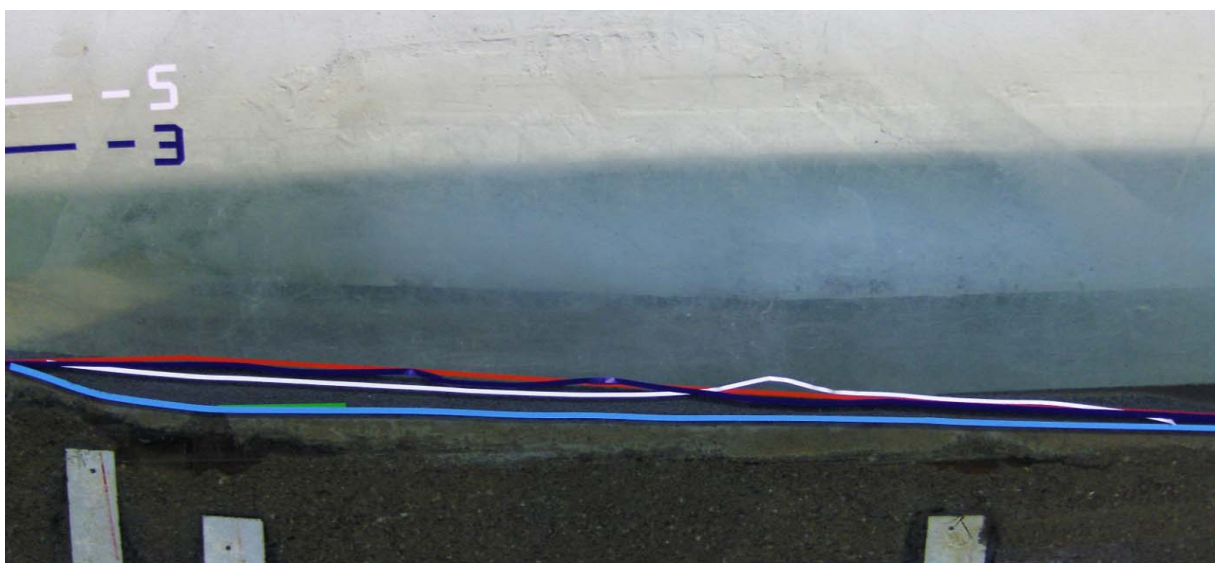
- La première sonde est située à -10m de profondeur (une sonde de génération) ;
- La deuxième est située juste avant le brise lame ;
- La troisième est située après le brise lame.

Les limites géographiques et l'emprise du modèle sont les suivantes :

- Parallèlement à la cote, le littoral est représenté sur un linéaire de 60m;
- Perpendiculairement au littoral, les fonds sont restitués sur 800m environ, soit jusqu'à l'isobathe -10m.

Comme les parois du canal à houle sont en verre transparent , nous pouvons observer l'évolution du profil du rechargement de la plage. Nous avons reporté ces profils sur un papier calque pour pouvoir ensuite les tracer sous format numérique.

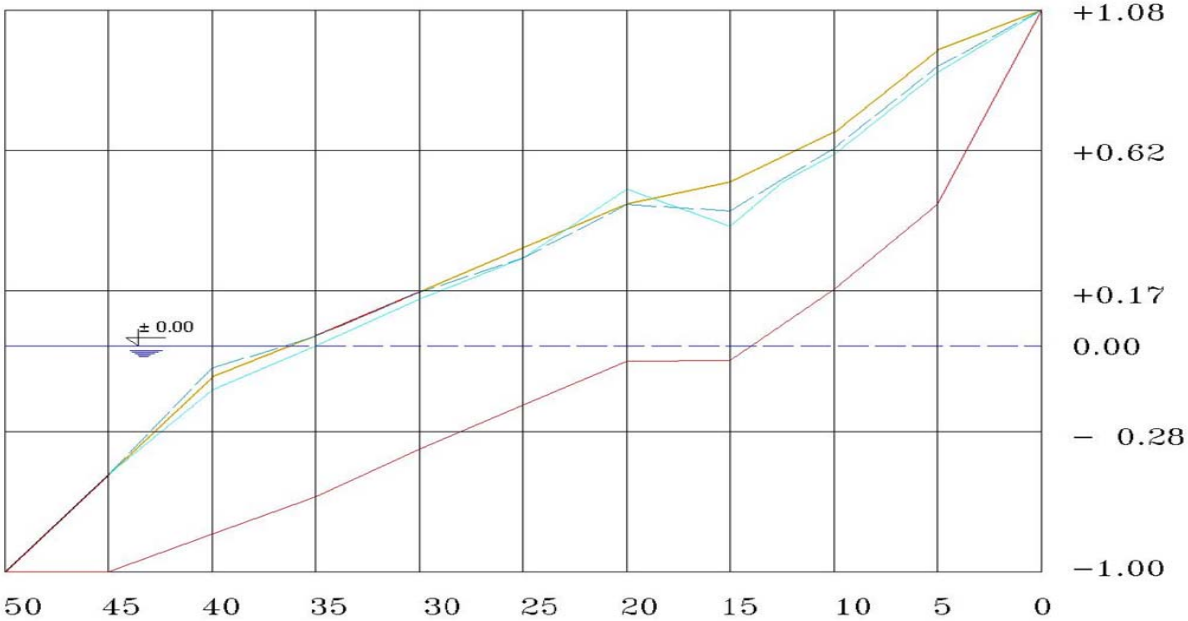
Le niveau de la mer est considéré comme référentiel (niveau 00).

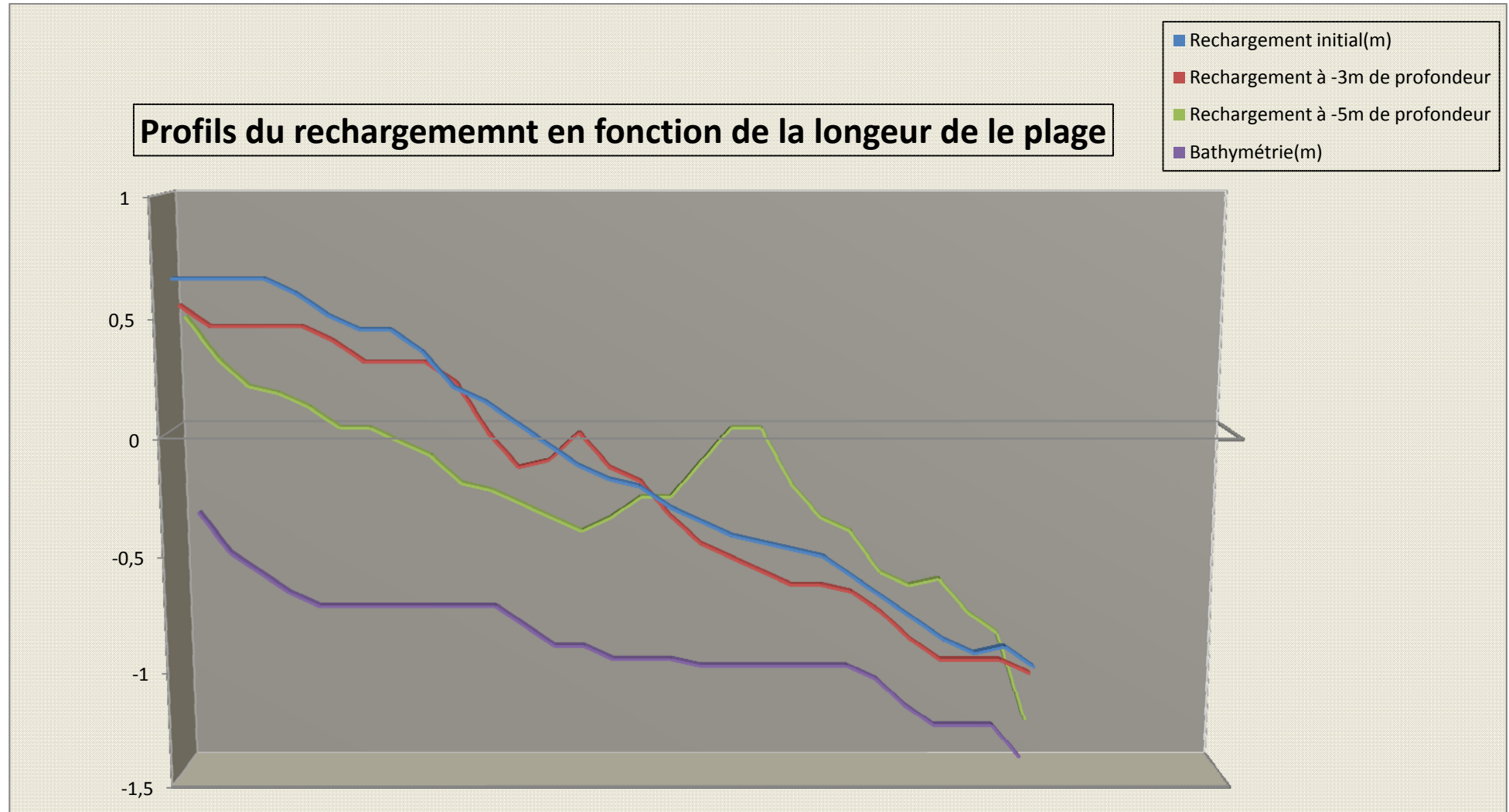


**Figure 5.3** : Profil du rechargement de la plage en canal à houle.

Tableau 5-6 : Tableau de mesure des profils de la plage en canal à houle

Point	Distance (m)	Rechargement initial (m)	Rechargement pour des brises lames à -3m (m)	Rechargement pour des brises lames à -5m (m)	Bathymétrie (m)
1	3	0,66	0,54	0,48	-0,39
2	5,6	0,66	0,45	0,3	-0,57
3	7,9	0,66	0,45	0,18	-0,66
4	10,6	0,66	0,45	0,15	-0,75
5	13,6	0,6	0,45	0,09	-0,81
6	17,6	0,51	0,39	0	-0,81
7	19,3	0,45	0,3	0	-0,81
8	21,5	0,45	0,3	-0,06	-0,81
9	26,3	0,36	0,3	-0,12	-0,81
10	28,3	0,21	0,21	-0,24	-0,81
11	32,3	0,15	0	-0,27	-0,81
12	35,3	0,06	-0,15	-0,33	-0,9
13	40,1	-0,03	-0,12	-0,39	-0,99
14	43,3	-0,12	0	-0,45	-0,99
15	46,8	-0,18	-0,15	-0,39	-1,05
16	49,5	-0,21	-0,21	-0,3	-1,05
17	52	-0,3	-0,36	-0,3	-1,05
18	54,1	-0,36	-0,48	-0,15	-1,08
19	55,7	-0,42	-0,54	0	-1,08
20	57,2	-0,45	-0,6	0	-1,08
21	59,2	-0,48	-0,66	-0,24	-1,08
22	60,7	-0,51	-0,66	-0,39	-1,08
23	65,8	-0,6	-0,69	-0,45	-1,08
24	70,3	-0,69	-0,78	-0,63	-1,14
25	75,7	-0,78	-0,9	-0,69	-1,26
26	81,7	-0,87	-0,99	-0,66	-1,35
27	83,5	-0,93	-0,99	-0,81	-1,35
28	85,2	-0,9	-0,99	-0,9	-1,35





Grphe 5.5 : Profils du rechargement en fonction de la longueur de la plage.



### *Interprétation des résultats*

Pour un brise lame implanté à la profondeur de -3m et arasé à -1,25m, le nouveau profil de la plage se rapproche plus du profil initial ce qui implique que le rechargement est plus stable pour la variante 3 testé en bassin que les variantes 1 et 2.

Néanmoins, pour la solution brise lames à -5m de profondeur, il y a formation d'une barre littoral sur le profil de la plage du fait des houles relativement plus importante en période hivernale. Au final, les brise-lames qu'ils soient placés à -3m ou à -5m de profondeur, les deux profils du rechargement de la plage sont stables et il n'y a pas une grande différence entre ces derniers. Par conséquent, nous pouvons placer les brise-lames à -3m ou à -5m de profondeur ceci ne causera pas beaucoup de changement sur le profil de rechargement.

### **Conclusion**

Après toutes ces comparaisons, nous arrivons aux résultats suivants :

- L'espace variant entre 40m et 80 m entre les batteries de géotubes n'a pas une grande influence sur la houle arrivant à la côtes pour le site de club des pins ;
- La hauteur de houle arrivant a la côtes avec les géotubes placés à -3m et arasé à -1,25m est plus faible que celle avec les géotubes placés à -5m et arasé à -1,50m ;
- Les essais en canal à houle nous ont permis de constater que le rechargement de la plage est stable pour que ce soit pour des géotubes placés à -3m ou à -5m de profondeur même si le profil est meilleur pour la -3m.

En conclusion, la solution la plus optimale et surtout la plus économique s'avère la solution batterie de géotube placé a-3m et qui est composé de **16 géotubes** de 29m environ.

La solution brises lame implanté à -5 m même si elle présente presque les même résultats s'avèrent plus couteuse puisque une batterie de géotubes nécessite la mise en place de plus de **28 géotubes** de 29 m environ.

Au vu de la proximité de ces géotubes par rapport à la cote il sera nécessaire de baliser ces ouvrages pour éviter leurs éventuels endommagements par les bateaux de plaisances ou des pêcheurs

## CONCLUSION GENERALE

L'étude expérimentale en modèles réduits physique nous a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres océanographiques sur le comportement hydrodynamique et sédimentologique du littoral.

Les zones côtières sont soumises en plus d'une pollution sans précédent, à une exploitation sauvage et abusive des réserves sédimentaires marine, ayant pour conséquence dramatiques, non seulement l'atteinte de la faune et de la flore, mais aussi la disparition parfois de certaines plages. La baie d'EL Djamila n'en est pas le moins épargnée. Devant cette catastrophe mi-humaine et mi-naturelle, nous avons décidé de protéger la baie en suggérant des protections plus ou moins différentes selon le contexte socio-économique.

Afin de protéger au mieux la plage du Club des Pins et dans le but de respecter la nature et de ne pas enlaidir l'horizon, nous avons opté pour une protection en brise-lames immergé en géotube et un rechargement en sable de carrière de la plage.

Il existe différents critères qu'il faut respecter pour la simulation des phénomènes liés à la dynamique côtière, sur modèle réduit physique. Cette étape consiste en la recherche des échelles de similitude en utilisant la similitude de Reece-Froude, et reproduire le climat de houle sur modèle. Il est important de choisir un matériau artificiel substituant le sable naturel en modèle réduit physique. Pour cela et après des investigations sur le matériau disponible, on a opté pour le PVC broyé, qui a montré à travers les essais, une reproduction fidèle de la dynamique et la morphologie côtière.

La première étape de cette étude est de tester la stabilité des géotubes en bassin à houle à fond fixe et ceci en les confrontant à une série progressive de houles allant de la houle annuelle à la houle cinquantennale. A la fin des premiers essais, nous avons conclu qu'il n'y a pas de déplacement des géotubes même sous les houles dites de tempêtes et que l'implantation des géotubes à -5m et à -3m provoquait une atténuation de la houle à la cote pouvant permettre de stabiliser le sable relatif au rechargement .

En second lieu, nous avons exécuté des essais en canal à houle dans le but d'observer le profil du rechargement et son comportement au cour d'un cycle annuel de houle. Nous avons constaté que le profil du rechargement de la plage reste plus ou moins stable pour les deux solutions testées même si le rechargement demeurerait plus stable avec un brise lame implanté à -3m.

En conclusion, la solution la plus optimale pour la protection de la plage de Club des Pins serait la réalisation de onze batteries de brise-lames immergés en géotubes à -3m et une côte d'arase de -1,25m.

Au vu du caractère balnéaire du site d'étude il est impératif de mettre en place un dispositif visant à limiter la pollution, il faudra créer des stations d'épuration-au niveau des sources polluantes- qui limiteraient les effets des rejets en mer. Elles collecteraient les eaux usées urbaines et industrielles de toute la région.

Les rejets urbains devraient être interdits en mer, afin de permettre le développement de la flore, qui joue un rôle très important dans la fixation des fonds sableux, et de la faune susceptible de fournir une quantité non négligeable de sédiments (coquilles et débris de coquilles).

## BIBLIOGRAPHIE

Bonnefille, R., (1980). « Cours d'hydraulique maritime ». Editeur Masson, 2<sup>ème</sup> édition, 180 pages

Carlier, M., (1980). « Hydraulique générale et appliquée ». Eyrolles Editeur /Paris, 565pages

Larras, J. (1961). « Cours d'hydraulique maritime et de travaux maritimes ». /Dunod Editeur, 459 pages.

Agence de coopération culturelle et technique, 1976. « Vocabulaire de l'océanographie »./Hachette Editeur, 431 pages.

Leclerc J.P. & Bellesort B. & Mignot C., (1976). « Action de la houle sur les sédiments ». Laboratoire central d'hydraulique de France, Publication du centre national pour l'exploitation des océans, 199pages.

Zorkani M., (2009). « Cours d'hydraulique, d'hydraulique maritime ». Département D'Hydraulique de l'Ecole Hassania des Travaux Publics Casablanca, Maroc, 579 pages.

Equipe du département environnement et littoral, (2010). « Avant projet sommaire de l'étude de la protection du rivage du site du Club des Pins ». Laboratoire d'études maritimes.

L.Schmied. (1993). « Calcul des spectres de projet ». Communication du laboratoire d'optoélectronique de l'université de Toulon et du var.

Comité Français des géosynthétiques. (2009). « Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion », 304 pages.

Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 2005. Programme d'Aménagement Côtier (PAC) "Zone côtière algéroise", 34 pages

Thèse de magistère de S.Bengherifa. (1999). « Etude hydrodynamique et sédimentologique de l'équilibre du littoral sur modèle réduit physique », 109 pages.

Center for Communication Programs, The Johns Hopkins University School of Public Health,USA, «Population Information Program».

## Webographie

[www.enseiht.fr](http://www.enseiht.fr)

<http://www.meteolafleche.com/houle.html>

<http://www.shom.fr/>

<http://www.acri-in.fr/activites/gencot/canal.html>

<http://www.u-picardie.fr/beauchamp/littoral/GRENOBLE-4.html>

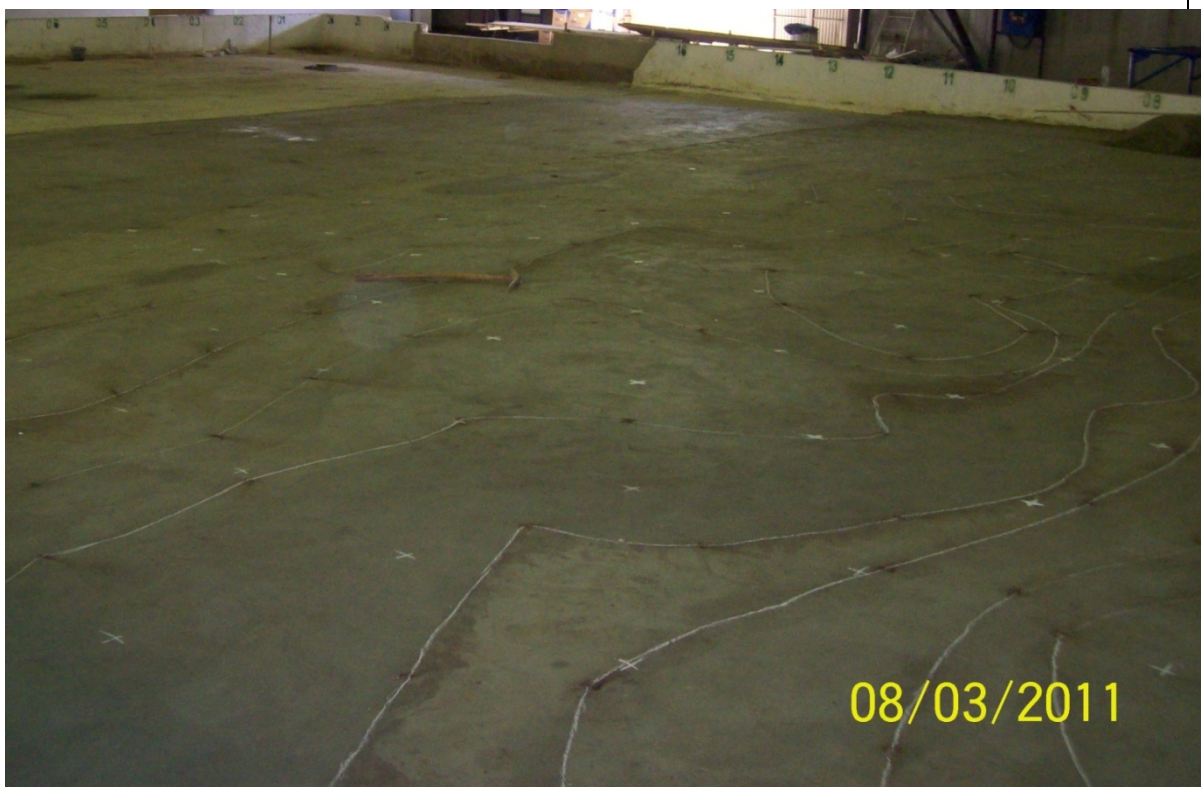
ANNEXE

ALBUM PHOTOS DES EUDES EN MODELES

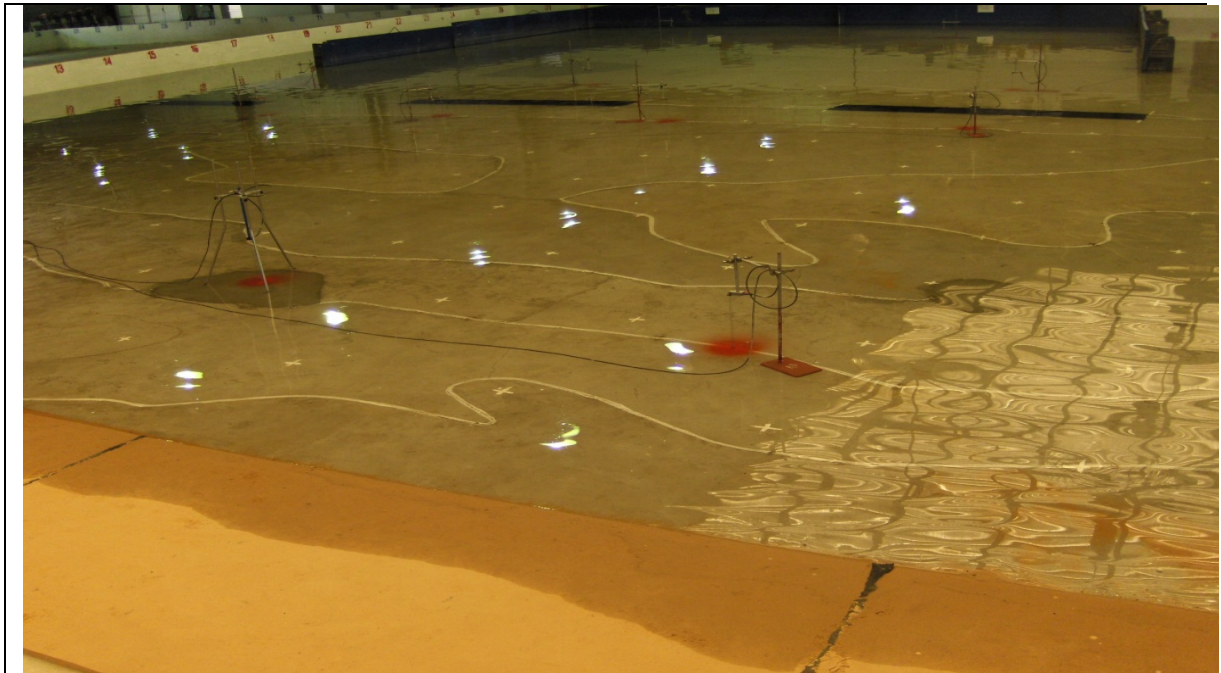
# ESSAIS DE STABILITE EN BASSIN A HOULE A FOND FIXES



Construction des fonds fixes du bassin à houle en cours

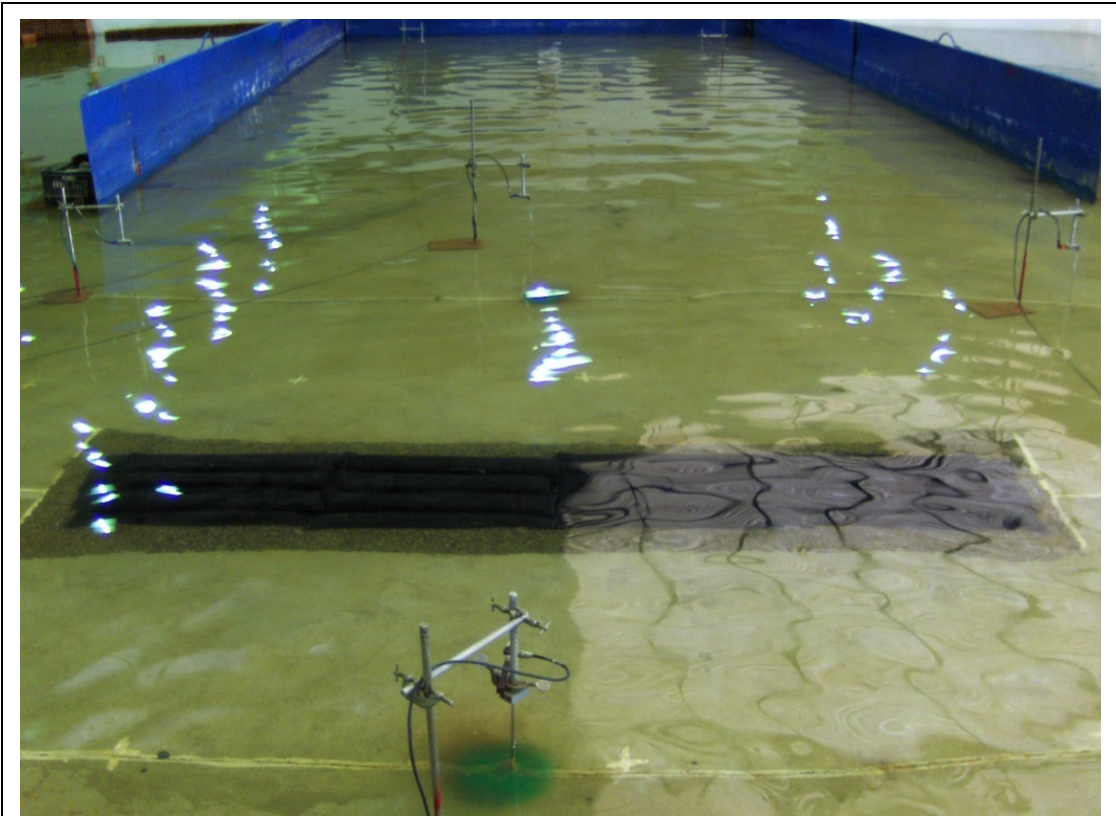


Construction des fonds fixe achevé

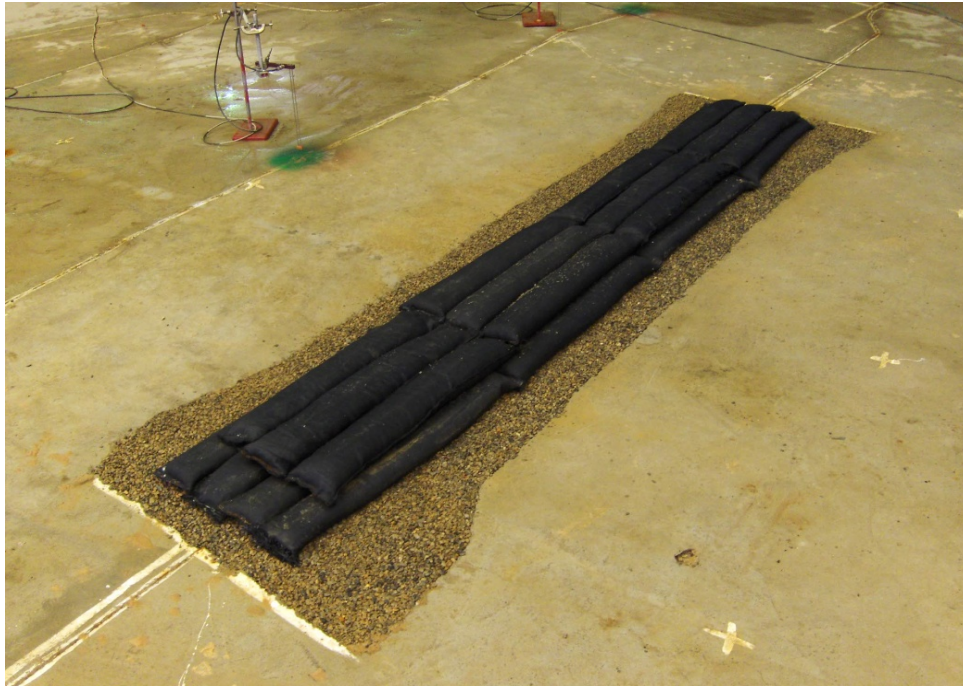


Vue d'ensemble des géotubes et la plage de la variante 1

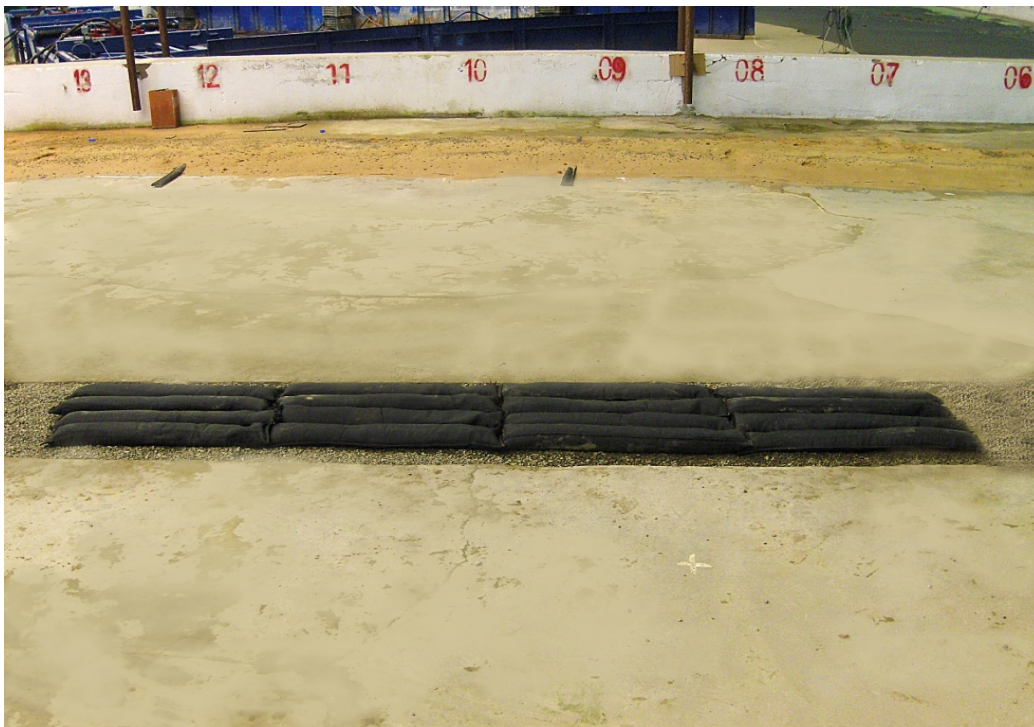




Vue générale du batteur de houle et des guideaux utilisés en bassin à houle



Vue d'une batterie de géotubes (variante 1 et 2)

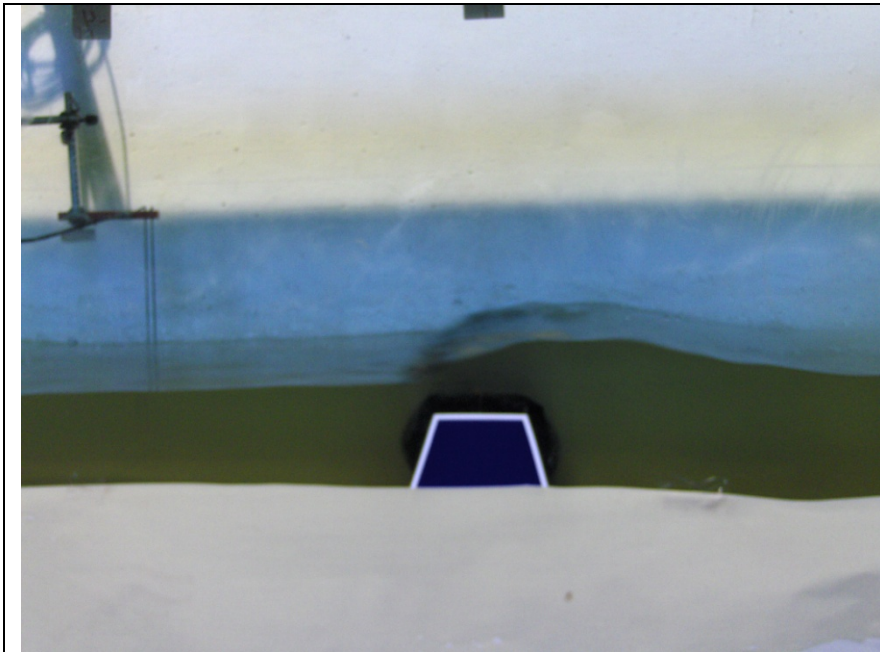


Batterie de géotubes de la variante 3

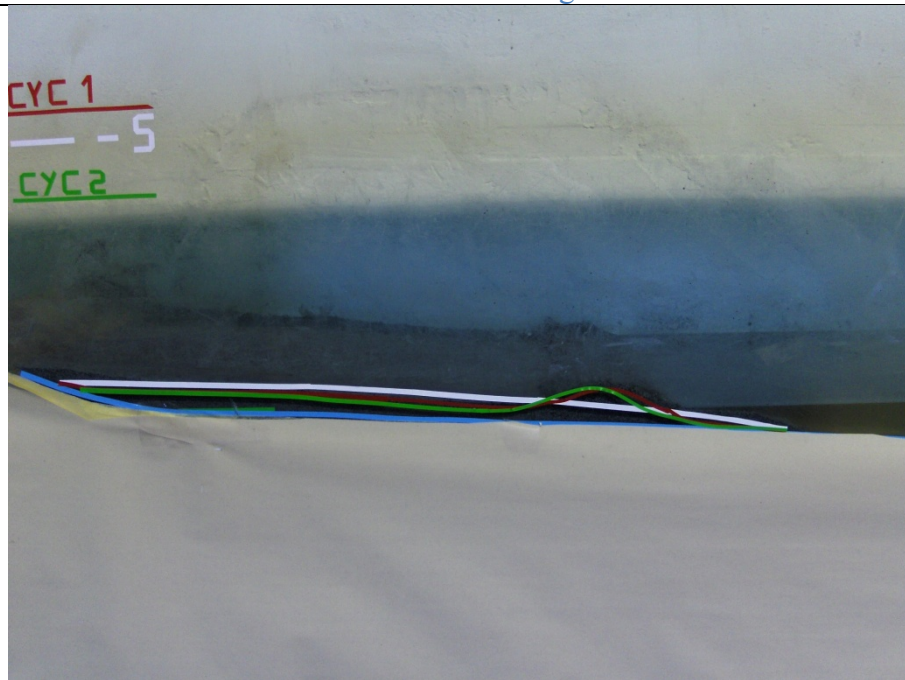
# ESSAIS EN CANAL A HOULE A FOND MOBILE



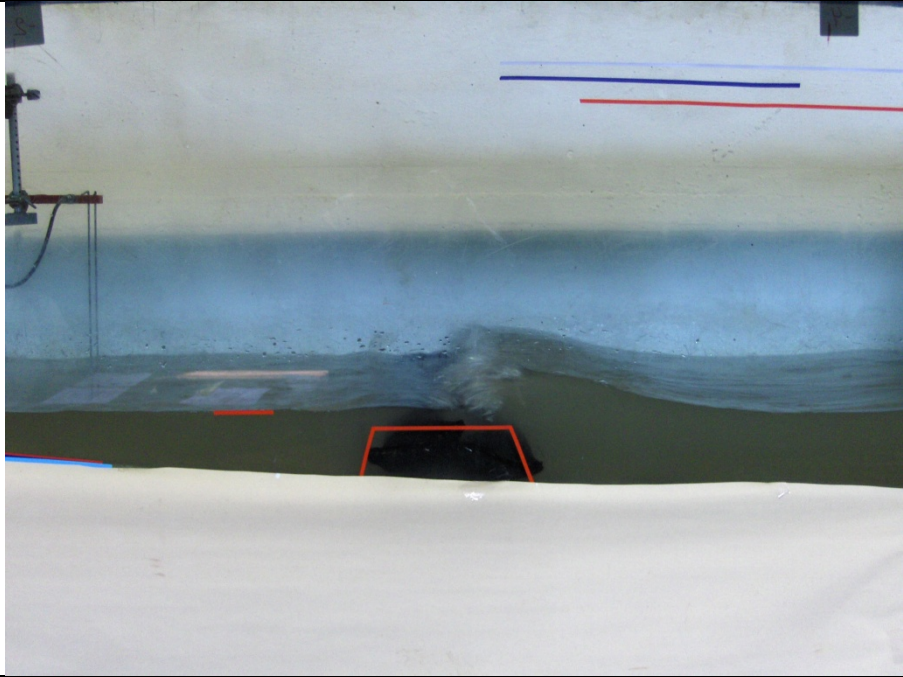
Rechargement de la plage en canal à houle



Variante 1 : Déferlement de la houle sur le géotube à -5m



Variante 1 : Vue du rechargement à la fin des essais



Variante 3 : Déferlement de la houle sur le géotube implanté à -3m



Variante 3 : Vue du rechargement à la fin des essais