

Jonathan COIGNARD / GSU03

Tuteur UTC : Fabrice LOCMENT

Cerema/DTecEMF

Technopole Brest-Iroise 29280 Plouzané

Tuteur Cerema : Bertrand MICHARD

Modélisation numérique des vagues à l'approche de la digue d'Esquibien

Stage TN09 du 2 septembre 2013 au 14 février 2014



Sommaire

Remerciements.....	4
Résumé	5

Introduction	6
---------------------	---

Chapitre 1 - Contexte du stage	
1. Les énergies marines	7
2. Le CEREMA.....	7
2.1 Les missions principales :	8
2.2 Position au sein du CEREMA/DTecEMF.....	9
3. Déroulement du stage	9
4. Le projet EMACOP	9
3.1 Les objectifs du projet	10
3.2 L'organisation du projet	11

Chapitre 2 - Notions théoriques sur la houle et les logiciels d'analyses

1. Notions sur la houle.....	12
1.1 La description des vagues	13
1.2 Les phénomènes de transformation à la côte.....	13
1.3 Les méthodes d'analyse de la houle	15
2. Le code de simulation numérique SWASH (Simulating WAves till Shore).....	16
2.1 Le choix du code SWASH	16
2.2 Les équations résolues par SWASH	16
3. Présentation des outils de pré(et post)traitement.....	18
4. Cas tests de validation	19

Chapitre 3 - Modélisation numérique des vagues sur le site d'Esquibien

1. Le site d'étude d'Esquibien.....	20
2. Résultat de la modélisation bathymétrique	22
3. Choix des états de mer à simuler.....	23
3.1 Utilisation des données hindcast ANEMOC	24
3.2 Utilisation des cartes PREVIMER	24
3.3 Combinaison de paramètres retenus.....	26

4. Maillages, Paramètres physique et numérique du modèle d'Esquibien	26
4.1 Maillage horizontal.....	26
4.2 Maillage vertical	27
4.3 La discréétisation temporelle.....	27
4.5 Conditions de forçage initiales.....	27
4.4 Conditions limites.....	27
4.6 Paramètres physiques	27
4.7 Paramètres numériques.....	27
5. Résultats de la modélisation numérique avec le code SWASH	27
5.1 Analyse de la simulation de référence	28
5.2 Analyse de l'influence de la direction de provenance.....	32
5.3 Analyse de l'influence du couple H_s et T_{pic}	35
5.4 Analyse de l'influence des niveaux d'eau.....	39
6. Conclusion sur la transformation des houles à l'approche de la digue d'Esquibien	41

Chapitre 4 - Etude économique d'un projet houlomoteur

1. Concepts fondateurs de l'étude	43
1.1 Les Références de l'étude	43
1.2 Les indicateurs économique.....	43
1.3 L'estimation des incertitudes	45
1.5 La synthèse de la démarche	45
2. Composition d'un projet Houlomoteur	46
2.1 Les systèmes de récupération	46
2.2 Le génie civil	48
2.3 Le raccordement au réseau.....	49
2.4 La maintenance et les réparations	52
2.5 Les revenus.....	53
3. Conclusion sur la démarche économique	54
Bilan et perspectives.....	56

Bibliographie.....57

Annexes A, B, C.....59

Remerciements

Je remercie Philippe Sergent de m'avoir ouvert les portes du CEREMA. Je remercie Bertrand Michard pour m'avoir appris sa rigueur scientifique. Merci à toute l'équipe du CEREMA de Brest pour leur accueil. Enfin, merci à Sylvain Gouzien et Alexandre Perrard, chers colocataires sans qui je n'aurais pas mené une vie aussi saine.

Résumé

La transition énergétique engagée en France implique un développement important des énergies marines renouvelables dans les années à venir. A ce titre, un des objectifs du projet national EMACOP (Energies MARines COtières et Portuaires) est de caractériser le potentiel houlomoteur aux abords des ouvrages côtiers (<http://www.emacop.fr/>).

Un travail d'identification et d'évaluation du potentiel a été réalisé dans la phase de démarrage, afin de sélectionner les sites les plus pertinents (Michard *et al.*, 2013). Pour approfondir le potentiel estimé comme prometteur sur le site d'Esquibien en baie d'Audierne (Finistère), l'action présentée porte sur la caractérisation des conditions de vagues par la construction d'un modèle numérique.

Pour prendre en compte les processus de transformation de vagues jusqu'à la côte, le choix s'est orienté vers le code SWASH (Simulating WAves till Shore) « simulation des vagues jusqu'à la côte » développé par Delft University of Technology (Zijlema *et al.*, 2011), qui résout les équations non linéaires en faibles profondeurs (Non Linear Shallow Water) et permet l'analyse déterministe des vagues.

Les résultats obtenus permettent de comprendre la dynamique du site en réponse à différentes conditions de forçages (spectraux).

Introduction

La houle qui parcourt l’Océan transporte avec elle l’énergie qui la fait naître.

Dans un contexte de développement durable, la tendance actuelle est de se tourner vers des sources alternatives de production d’énergie. Les énergies marines renouvelables, dont le potentiel mondial est estimé à 748GW en 2050 par l’Agence International de l’Energie (<http://www.iea.org/>), sont autant de solutions pour faire face au défi énergétique de demain.

Dans le cadre du Projet National de Recherche EMACOP (Energies MARines COtières et Portuaires), le CEREMA avec ses partenaires mène une activité de prospection énergétique le long des côtes française. Des moyens de modélisations numérique son mis en place pour estimer la ressource énergétique des vagues.

L’objectif de mon stage en tant qu’assistant ingénieur d’étude, consiste à évaluer le potentiel houlomoteur sur le site d’Esquibien dans le sud Finistère, et à estimer un coût de revient du kWh produit.

Le travail consiste à simuler numériquement, à partir des conditions de forçage marin dans la baie d’Audierne, la transformation des houles à l’approche du site d’Esquibien avec le logiciel SWASH de l’Université de Technologie de Delft. L’objectif fixé au regard des données disponibles est **d’étudier les zones de dissipation de l’énergie des vagues**. Le second objectif vise à **caractériser la répartition des dépenses dans un projet houlomoteur**.

Ce rapport est construit autour de 4 chapitres, le premier chapitre a pour but de présenter le contexte général du stage au CEREMA. Le second chapitre a pour vocation d’introduire le lecteur avec les grandeurs et les méthodes d’analyse de la houle. Le troisième chapitre constitue l’étude de la modélisation numérique sur le site d’Esquibien. Dans le chapitre 4, les notions économiques autour d’un projet houlomoteur sont abordées. La dernière partie est consacrée à un bilan sur le stage au CEREMA, et aux conclusions du travail effectué.

Chapitre 1 – Le contexte du stage

1. Les énergies marines

L'intérêt pour les solutions décarbonnées de production d'énergie devient croissant dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des énergies fossiles. Pour répondre aux exigences fixées à l'horizon 2050 par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), les énergies marines peuvent représenter une solution viable à la construction d'un mix énergétique durable.

La France dispose d'un vaste potentiel d'énergies marines renouvelables (EMR), compte tenu des atouts naturels d'une Zone Economique Exclusive (ZEE) de plus de 11 millions de km². Les énergies Marines renouvelables sont de natures variées : vent en mer, houle et vagues, courant de marée, gradient de température... Ce potentiel se double du tissu industriel qui dispose de toutes les compétences techniques et scientifiques nécessaires au développement de systèmes performants. La France pourrait avec ses concurrents européens (Royaume-Uni, Allemagne, ...) prendre un leadership mondial.

Le Royaume-Uni a pris une position offensif dans le développement des EMR, la mise en place de budget important justifié par la ressource énergétique a permis la création du centre d'essai EMEC en 2003, et de Wave Hub en 2010.

En France, l'Ecole Centrale de Nantes (ECN) dispose maintenant d'un site d'essai de 1km² en pleine mer (à 12km au large de Croisic). Le site relié via un câble électrique de 8MVA, permettra de tester des systèmes houlomoteurs mais aussi des éoliennes flottantes (<http://www.france-energies-marines.org/>).

2. Le CEREMA

Le **CEREMA**¹ (*Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*) est le nouvel organisme qui englobe le CETMEF² (*Centre d'Etude technique Maritimes et Fluviales*) depuis le 1^{er} janvier 2014.

Le CEREMA rassemble les 8 Centres d'études techniques de l'équipement (CETE)³ et trois services techniques centraux, le Certu⁴, le CETMEF et le Setra⁵.

Placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie ainsi que sous celle du ministère de l'Égalité du territoire et du logement, le CEREMA est un centre de d'études, d'expertises scientifiques et techniques intervenant en appui à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques portées par les services de l'État et des collectivités territoriales.

¹ <http://www.cerema.fr/>

² <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

³ Les CETE (centres d'études techniques de l'équipement) sont des services déconcentrés apportant des prestations d'ingénierie dans les différents domaines du ministère.

⁴ Le CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques)

⁵ LE SETRA (Service d'étude sur les transports, les routes, et leurs aménagements)

Il intervient dans les grands domaines techniques des deux ministères : aménagement, habitat, politique de la ville, transport, mobilité, sécurité routière, environnement, ville durable, bâtiments, risques, infrastructures publiques, etc.

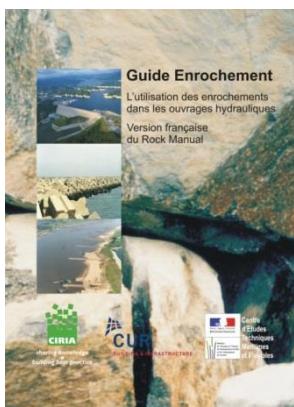
Cet établissement public rassemble près de 3 250 agents répartis sur le territoire national (les équipes des 11 services sont réparties aujourd’hui sur une trentaine de sites). Son budget de fonctionnement est supérieur à 230 M€.

2.1 Les missions principales⁶ :

1 - Recherche & Développement

Le CEREMA/DTecEMF (*Direction Technique Eau Mer et Fleuves*) mène une activité de recherche et de développement variée. Il partage plusieurs laboratoires de recherche dédiés aux sciences de l’hydraulique, à l’hydraulique numérique et au génie côtier et environnemental. Le CEREMA/DTecEMF développe et diffuse des logiciels au bénéfice des collectivités publiques et de l’ingénierie. Comme par exemple, le logiciel OSIRIS-Inondation qui est un outil d’aide à la réalisation du Plan Communal de Sauvegarde (PCS) pour le volet inondation.

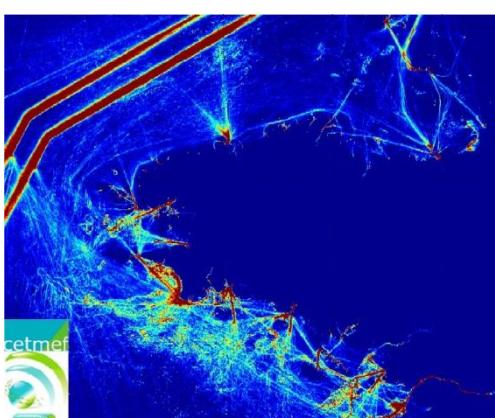
2 - Ingénierie et Méthodologie



Le CEREMA/DTecEMF exerce une fonction de catalyseur et de diffuseur de la connaissance par le biais d’états de l’art, d’avis technique, et d’expertises. Le CEREMA/DTecEMF publie chaque année des ouvrages de référence disponibles sur son site Internet, l’un d’eux est le « Guide Enrochement ».

Figure 2.1.1 : Couverture du « Guide Enrochement »

3 - Sécurité et Intelligence



Le CEREMA/DTecEMF concourt à l’amélioration constante de la sécurité et de l’intelligence du transport maritime, fluvial et routier. Il est mobilisé autour des applications satellitaires et des technologies de l’information. Il accompagne les services en charge de sécurité et de signalisation maritime et fluviale et d’exploitation routière. Notamment la mise en place du système ENVISIA qui permet de traiter les données AIS émises par les navires.

Figure 2.1.2 : Première radiographie du trafic maritime en Bretagne (ENVISIA)

⁶ <http://www.cerema.fr/missions-r18.html>

2.2 Position au sein du CEREMA/DTecEMF :

J'ai effectué mon stage dans la partie ingénierie au sein du département « Environnement et aménagement », et plus précisément dans la division « Hydraulique et Sédimentologie » sous la tutelle de l'ingénieur d'études Bertrand Michard.

L'organigramme du CEREMA/DTecEMF et le détail du département Ingénierie sont disponibles en annexe A de ce rapport.

Dans l'ordre hiérarchique, Joël L'Her est le Directeur de l'Ingénierie, au même titre que Philippe Sergent mon responsable administratif est le Directeur Scientifique. Anne Souquière est la chef du département « Environnement et Aménagement ». Pour finir, Nathalie Metzler est la chef de la division « Hydraulique et Sédimentologie ».

3. Déroulement de mon stage au sein du projet EMACOP

Mon stage a débuté le 2 septembre 2013, le premier mois de stage m'a permis de me former aux notions utiles à l'analyse des états de mer (théorie de la houle, logiciels de calcul numérique, état de l'art, ...). J'ai notamment participé au colloque SHF (société hydraulique de France) à Brest sur les énergies marines renouvelables (EMR).

Début octobre, j'ai bénéficié d'un ordinateur plus puissant (processeur : Intel Xeon CPU E3- 1245 V2 @ 3,40GHz) pour installer le code numérique SWASH, choisi après concertation avec mon maître de stage Bertrand Michard. La prise en main du code SWASH et le choix des logiciels de pré (et post) traitements m'a pris 2 mois. Pendant ces 2 mois, j'ai pu réaliser des tests de sensibilité sur différents paramètres du code ainsi que 3 modélisations visant à déterminer la validité du code SWASH.

Sur la période de décembre, nous avons analysé plus en détail le site d'Esquibien, afin de déterminer l'emprise du modèle numérique et de récupérer les données nécessaires à la modélisation. De plus des appareils de mesures (2 capteurs de pression et une bouée houlographique directionnel) ont été installés pour une future comparaison avec la modélisation numérique réalisée.

Durant le mois de janvier, l'analyse des premiers résultats sur Esquibien a permis de faire les derniers réglages sur notre modèle numérique. Les calculs finaux ont été lancés sur la semaine du 20 février. Le reste du stage a été consacré à la rédaction du présent rapport de stage, et à la rédaction d'un article scientifique pour les journées nationales du génie côtier et génie civil de Dunkerque JNGCGC 2014.

4. Le projet EMACOP

Le projet Energies Marines, Côtières et Portuaires (EMACOP) a été lancé en février 2012. C'est un vaste projet qui rassemble de nombreux partenaires (institutionnelles, bureaux d'études, universitaires, collectivités territoriales, ...) (figure 3.1).

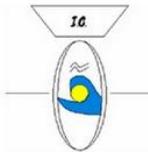


Figure 4.1 : Partenaires du projet EMACOP (source : <http://www.emacop.fr/>)

4.1 Les objectifs du projet

Les objectifs sont extraits du rapport final de montage du projet EMACOP (septembre 2011).

1- **Mieux caractériser le potentiel exploitable et le rendement des technologies** existantes afin d'aider le maître d'ouvrage dans ses choix d'aménagement. Une attention particulière sera aussi portée à la survivabilité du système. Ce travail se déclinera sur une famille d'ouvrages déterminés : les ouvrages portuaires, les ouvrages côtiers, les ouvrages routiers littoraux. Les dispositifs de récupération seront classés en trois catégories : récupération de l'énergie de la houle, de la marée et des courants.

2- Un travail particulier de **sélection et d'adaptation des technologies** sera mis en œuvre en même temps qu'une action d'innovation sur les technologies.

3- **L'impact hydrosédimentaire** des systèmes sera analysé dans l'idée d'utiliser au mieux les systèmes houlomoteurs dans une optique de protection de côte.

4- **L'impact de l'intégration** d'un système convertisseur sur les fonctions et la stabilité d'un ouvrage ancien sera déterminé. Pour un ouvrage neuf, l'évolution du dimensionnement sera estimée. On en déduira les conséquences en termes de coûts de construction. Une analyse de l'acceptation sociale de ces projets industriels sera produite en parallèle.

5- Il s'agit enfin **de tester l'applicabilité de ces concepts sur des sites d'étude**. Afin de couvrir la diversité des configurations du littoral Français, une quinzaine de sites d'étude est proposée. Les sites sont répartis sur la façade Atlantique, Manche-Mer du Nord, Méditerranée et Océan Indien. Ce travail devrait permettre d'estimer le coût du kWh associé à un dispositif de récupération d'énergie sur le site d'étude.

4.2 L'organisation du projet

Le tableau suivant extrait du rapport de montage EMACOP permet de préciser le contenu de chaque tâche et d'en définir le responsable.

LOT	Description	Responsable	Tâches (coordinateur)			
S1	Systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs	Mathieu MORY (Université de Pau)				
S2	Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens	Philippe SERGENT (CETMEF)	Tâches transversales : (coordinateur P. SERGENT) Préciser les sites et leurs contraintes ; Sélectionner les technologies ; Ecrire le cahier des charges pour les essais ; Ecrire le rapport de faisabilité sur les sites retenus	Innovation et essais sur caissons JARLAN (Jérôme BROSSARD)	Estimation du potentiel national des ouvrages portuaires français (Philippe SERGENT)	
S3	Systèmes houlomoteurs sur ouvrages détachés	Luc DEROO (ISL)		Innovations sur des technologies détachées de la côte		
S4	Dispositifs marémoteurs sur bassins à flots	Jérôme BROSSARD (Université du Havre)	Hiérarchiser les sites et projets en fonction de l'état d'avancement des maîtres d'ouvrage Etablir un lien permanent et efficace avec les maîtres d'ouvrage (MOa)	Optimisation du fonctionnement et études de solutions possibles (Jérôme BROSSARD)	Analyse des impacts environnementaux (Jérôme BROSSARD)	
S5	Dispositifs hydroliens sur ouvrages portuaires ou côtiers	Marc LE BOULLUEC (IFREMER)				
O1	Rendement, survivabilité, impact hydraulique et fatigue	Virginie BAUDRY (Ecole Centrale de Nantes)	O1-1. Etude de rendement (Virginie BAUDRY)	O1-2. Etude de survivabilité (Virginie BAUDRY)	O1-3. Etude de fatigue (Christian TESSIER)	
O2	Potentiel houlomoteur d'un site	Michel BENOIT (EDF R&D / Laboratoire Saint-Venant)	O2-1. Amélioration et valisation des bases de données à l'échelle océanique (Giovanni MATTAROLO)	O2-2. Amélioration des outils de modélisation numérique à l'échelle côtière (Giovanni MATTAROLO)	O2-3. Analyse et caractérisation des états de mer et du potentiel (Michel BENOIT)	O2-4. Contribution à la prévision de la production à court terme d'un système (Renaud LABORBE)
O3	Impact hydrosédimentaire local et régional	Eric DAVID (SOGREAH)	O3-1. Modélisation numérique de l'interface petite échelle / grande échelle (Eric DAVID)	O3-2. Evaluation de l'impact hydrosédimentaire local (Arnaud de BOVILLER)	O3-3. Etude numérique de l'impact hydrosédimentaire local (Georges CHAPALAIN)	O3-4. Essais physiques hydrosédimentaires en bassin (Eric DAVID)
O4	Dimensionnement de l'ouvrage et étude socio-économique	Nicolas ROUXEL (CETE de l'Ouest)	O4-1. Impact sur la stabilité et la performance hydraulique (Jérôme BROSSARD)	O4-2. Dimensionnement de l'ouvrage et étude économique (Nicolas ROUXEL)	O4-3. Impact sociétal (Emmanuel PARLIER)	

Figure 4.2 : Répartition des tâches pour le projet EMACOP (source : rapport final de montage EMACOP (2011))

Dans le cadre de mon stage, j'ai participé à l'action visant à estimer le potentiel énergétique sur les ouvrages anciens, ce qui correspond au lot S2. D'autre part, au regard du travail effectué, j'intègre aussi le lot O2 et plus précisément la tâche O2-3 (Analyse et caractérisation des états de mer et du potentiel).

Chapitre 2 – Notions théoriques sur la houle et les logiciels d’analyses

1. Notions sur la houle

Les vagues, qui constituent la houle, sont des oscillations qui affectent la surface de la mer. Elles sont générées par l’énergie du vent et entretenues par la pesanteur. Les vagues font donc partie des ondes de gravité de surface. En pratique les régions de création des vagues et de propagation se chevauchent, on parle alors d’une mer de vent mêlée à une houle océanique.

Aux abords des côtes, par des profondeurs de 50m, les vagues sont modifiées par la remonté des fonds. Dans la zone côtière, la plus importante source d’énergie provient des vagues. Cette énergie est libérée à l’approche des côtes et principalement pendant le déferlement. Elle se convertit alors en courants, turbulences ou transport sédimentaire. La connaissance des zones de dissipation est essentielle pour comprendre la dynamique de nos côtes, mais aussi pour mettre à profit cette énergie.

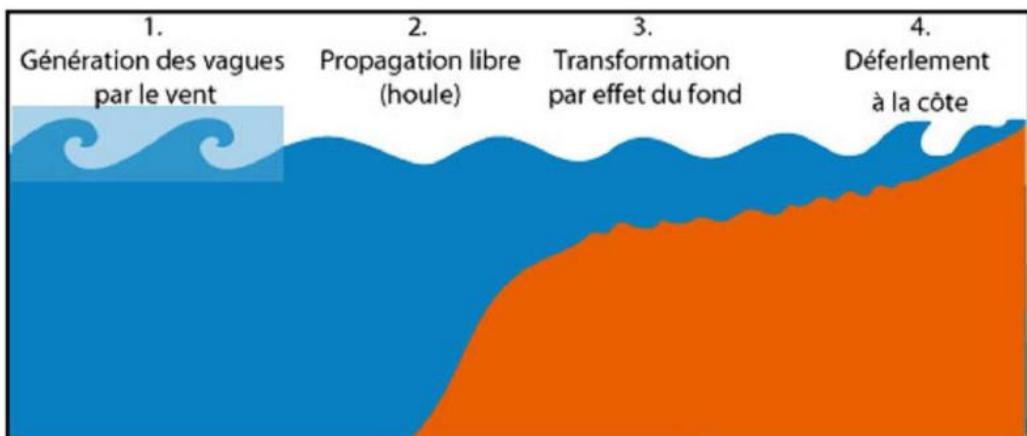


Figure 1.1 : Schéma des processus de la houle (SHOM)

Le domaine d’étude se situe lorsque les vagues subissent des transformations par effet de fond. Pour simuler les vagues des modèles numériques existent à différentes échelles, les codes WAVEWATCH III (IFREMER), TOMAWAC (EDF/LNHE) ou SWAN (Delft University of Technology) sont adaptés à l’échelle des mers. Le modèle SWASH (Delft University of Technology) permet de décrire les vagues à l’approche de la côte sur une petite emprise en faible profondeur.

Figure 1.1 : Schéma provenant du site <http://www.shom.fr/>

1.1 La description des vagues

La houle dans une forme simplifiée peut être assimilée à une onde sinusoïdale monochromatique, avec une longueur d'onde L associée à une période T et une célérité. Cette onde possède une hauteur de crêtes à creux H et évolue dans une profondeur d'eau d .

La cambrure est le rapport de la hauteur de la vague par la profondeur d'eau $\gamma = H/d$. Elle permet de prédire empiriquement le déferlement des vagues (environ $\gamma = 0,8$).

On définit la pulsation (rad/s) tel que : $\omega = \frac{2\pi}{T}$ et le nombre d'onde : $k = \frac{2\pi}{L}$

Après avoir introduit une partie des variables définissant les vagues, la relation de dispersion permet de mieux comprendre les mécanismes de propagation :

$$C = \frac{gT}{2\pi} \times \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (1.1)$$

Cette relation met en évidence une propagation différente des vagues selon la profondeur. En effet en grande profondeur ($> 50m$) le terme en tangente hyperbolique devient égal à 1, et la vitesse dépend uniquement de la période. C'est le côté dispersif des vagues, plus la période est longue plus la vitesse de phase est grande. Si bien que lors d'une tempête, les vagues avec une longue période arrivent en premières sur la côte. Ce type d'observations est utilisé pour déterminer la distance à laquelle se trouve une tempête en mer.

En revanche à la côte, le terme en tangente hyperbolique devient significatif, et la vitesse est influencée par la profondeur, ce qui donne notamment naissance au phénomène de réfraction (expliqué plus loin).

Il est à noter que lors de leur propagation les vagues se superposent du fait des différentes de vitesse de propagation. Les ondes s'additionnent, elles forment des paquets d'ondes qui ont une vitesse de groupe, qui détermine l'énergie transportée.

1.2 Les phénomènes de transformation à la côte

Les définitions sont extraites du guide « la gestion du trait de côte » (MEEDM, 2010)⁸.

Le *shoaling* est dû à la variation de profondeur, il consiste en la déformation de la hauteur de la houle en arrivant à des profondeurs plus faibles près de la côte. Si la houle reste stable vis-à-vis du déferlement, ces effets de gonflement en faible profondeur peuvent accroître la hauteur de la houle de plusieurs dizaines de pour cent.

La *réfraction* des houles par le fond prend effet pour des profondeurs égales à une demi-longueur d'onde (environ 50m de profondeur). Les crêtes des vagues ont alors tendance à se disposer parallèlement aux isobathes. Dans les baies, la houle diverge; il se produit un étalement spatial de l'énergie qui conduit à une diminution des hauteurs. En revanche, les caps convergent les houles, il s'y produit une concentration d'énergie, raison pour laquelle les vagues sont plus spectaculaires aux caps.

⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=Gestion_trait_cote

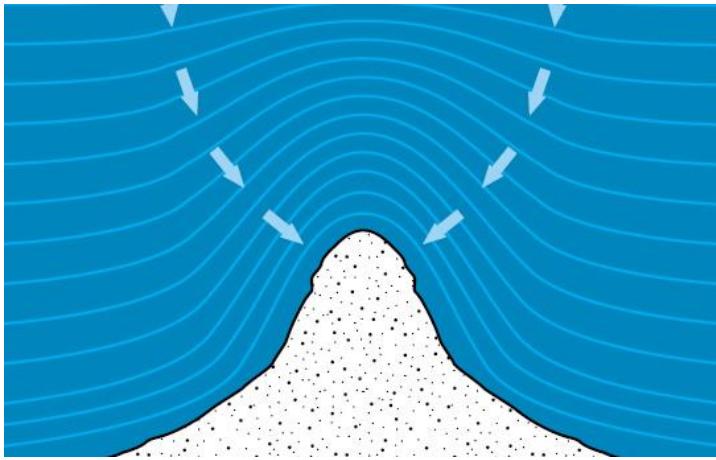


Figure 1.3 : Schéma de principe de la réfraction sur un cap (Environment Canada)



Figure 1.4 : Exemple de réfraction des vagues dans une baie

La houle se *réfléchie* lorsqu'elle rencontre un obstacle vertical plein (digue ou falaise). La superposition de l'onde incidente et réfléchie forme des ventres et des nœuds modifiant l'amplitude des vagues. Si la houle rencontre l'obstacle avec une certaine incidence, des houles gaufrées vont se former en avant de l'obstacle.

La houle se *diffracte* lorsqu'elle ne se propage plus en ligne droite par profondeur constante. On observe de la diffraction autour des digues, dans l' « ombre » (ou à l'abri) de ces ouvrages, il existe une certaine agitation, qui peut s'interpréter comme un transfert d'énergie des zones les plus agitées vers les zones abritées (contournement de l'ouvrage).

Au fur et à mesure que les vagues se rapprochent de la côte, la profondeur d'eau diminue ; le mouvement des molécules d'eau devient plus elliptique ; la célérité et la longueur d'onde diminuent, alors que la hauteur des vagues augmente. Ces modifications aboutissent à une exagération de la cambrure, et à un profil des vagues de plus en plus dissymétrique. A un certain point les vagues « cassent », elles *déferlent*.

Il existe trois principaux types de déferlement selon l'inclinaison de la pente : un déferlement glissant, un déferlement plongeant et un déferlement à gonflement (forte pente).

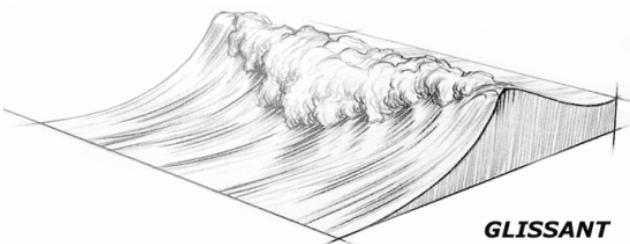


Figure 1.5 : Déferlement glissant sur une pente faible

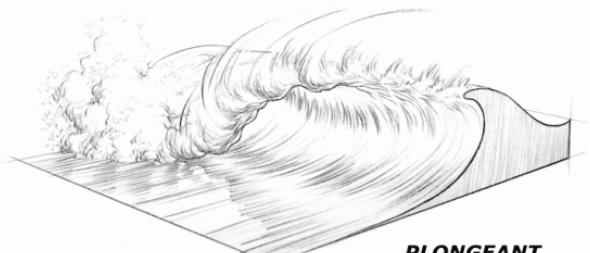


Figure 1.6 : Déferlement plongeant sur une pente moyenne

Figure 1.3 : schéma pris sur le site : <http://ec.gc.ca/meteo-weather/>

Figure 1.4 : source: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/919>

1.3 Les méthodes d'analyse de la houle

Les explications sont extraites du mémoire de D.E.A. « Modélisation numérique des états de mer en mer d'Iroise » (Michard, 2004).

Dans l'étude de la dynamique côtière, l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH) définit les paramètres des états de mer dans un document de référence publié en janvier 1986 en collaboration avec l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation (AIPCN). Cette publication comporte la liste détaillée d'une centaine de paramètres et de fonctions.

En génie maritime, les paramètres retenus donnant une description générale de l'état de mer sont la hauteur significative H_s et la période significative T_s . Deux méthodes d'analyse sont utilisées pour caractériser les états de mer, l'analyse temporelle et l'analyse spectrale. L'étude présentée est basée sur une analyse spectrale.

L'analyse spectrale associe un niveau d'énergie à chaque état de mer, constituant ainsi une représentation énergétique. La densité spectrale d'énergie $S(f)$ représente la répartition de l'énergie d'un état de mer en fonction de la fréquence. Elle est obtenue en traitant le signal temporel discret de l'élévation de la surface libre par des méthodes basées sur la Transformation de Fourier Rapide (TRF) ou Fast Fourier Transform (FFT).

Les spectres directionnels permettent en plus d'intégrer la direction de provenance des vagues. Le spectre directionnel ci-dessous montre entouré en rouge la présence d'une houle océanique, et entouré en bleu une mer de vent plus étalée et moins énergétique.

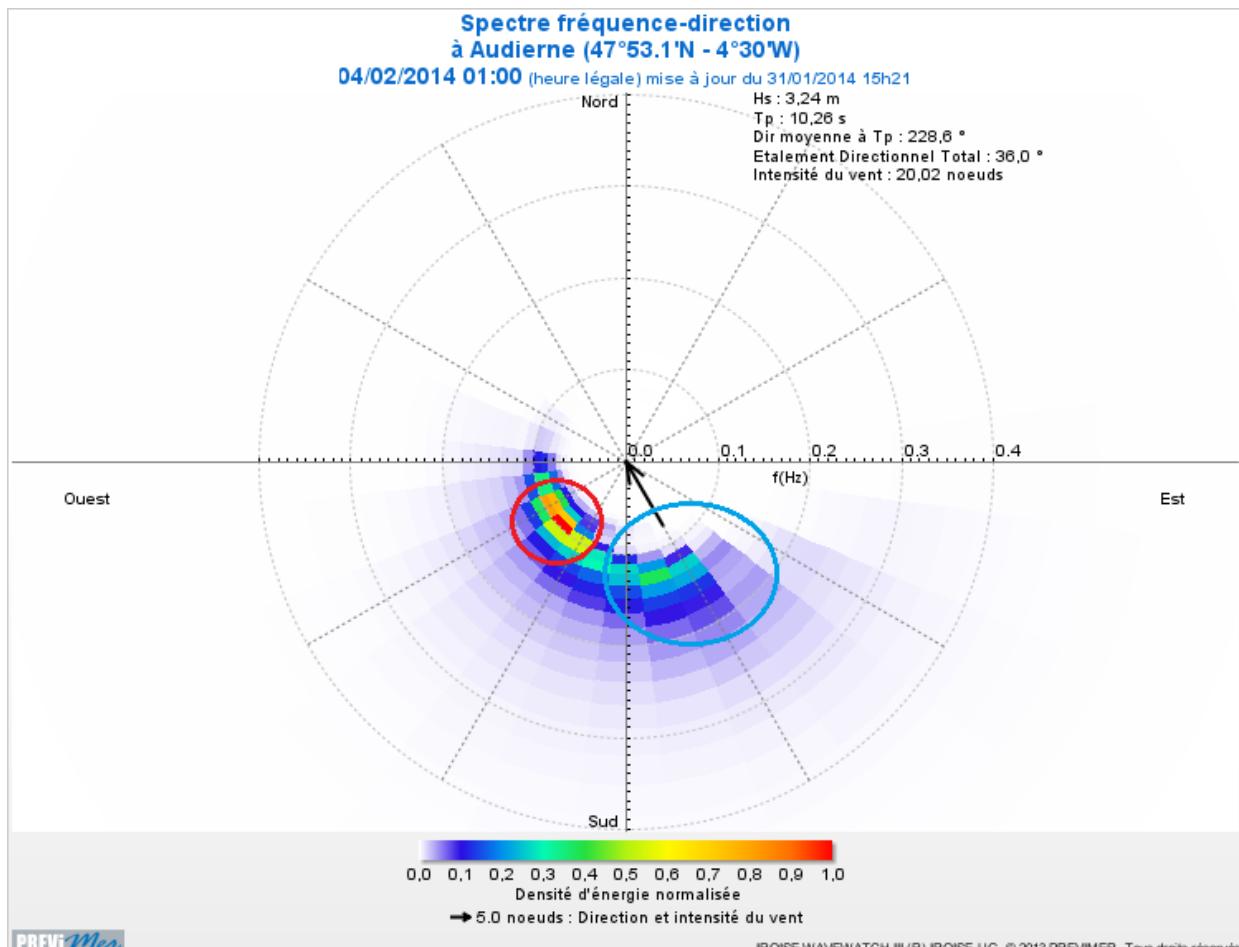


Figure 1.8 : Spectre directionnel (PREVIMER, <http://www.previmer.org/>)

2. Le code de simulation numérique SWASH (Simulating WAves till Shore)

2.1 Le choix du code SWASH

L'objectif de la simulation est double, qualifier précisément les phénomènes côtiers avec la remontée de la bathymétrie, et estimer la variation du potentiel énergétique des vagues sur une longue période.

Cependant, l'estimation énergétique demande de disposer de mesures en bordure de modèle sur une dizaine d'années, sans quoi les résultats ne sont pas représentatifs de la variabilité des conditions réelles.

Avec le code SWASH version 1.2 développé par l'Université de Technologie de Delft (Zijlema *et al.*, 2011), il a été décidé de privilégier l'étude des phénomènes côtiers. Le code SWASH est un code récent (2011) qui permet la modélisation des phénomènes suivants :

- La propagation des vagues,
- Le shoaling, la réfraction et la diffraction,
- Les réflexions partielles et la transmission,
- Les interactions non linéaires entre les vagues,
- Le déferlement,
- L'interaction des vagues avec les structures,
- L'interaction des vagues et des courants.

De nombreux résultats sont exploitables en sortie du code SWASH, une liste non-exhaustive est donnée ci-dessous :

- L'élévation de la surface libre,
- La hauteur significative,
- La norme et la direction du vecteur vitesse dans la colonne d'eau,
- La pression dans la colonne d'eau.

Il est possible de télécharger SWASH gratuitement (<http://swash.sourceforge.net>). Les manuels d'installation et d'utilisation sont disponibles sur le site internet, ainsi que des tests pour vérifier le bon fonctionnement du code une fois installé. Des études de modélisations numériques réalisées en utilisant SWASH sont aussi disponibles : (Rijnsdorp, 2011), (Bogaard, 2012), (Mellink, 2012), (Brinkkemper, 2013).

Le code SWASH est développé dans la continuité de SWAN par Delft University of Technology, et bénéficie donc de la renommée mondiale de ce dernier. Les similitudes dans la prise en main des deux codes, et la possibilité de les combiner pour mener des études à différentes échelles, sont autant d'avantages qui portent en la faveur de l'utilisation de ces méthodes d'analyses.

2.2 Les équations résolues par SWASH

Le modèle SWASH (Simulating WAves till Shore) « simulation des vagues jusqu'à la côte » résout les équations non linéaires en faible profondeur, de plus, il inclut un terme de pression non-hydrostatique. Pour une meilleure précision, SWASH utilise une discréétisation verticale plus fine. Le nombre de couches influe cependant fortement sur la durée du calcul.

Les équations non linéaires en faible profondeur dérivent des équations de Navier-Stokes de continuité et de bilan de la quantité de mouvement, selon l'hypothèse que l'échelle verticale est petite face à l'échelle horizontale.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right)$$

rate of change in time $\underbrace{u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}}$ advection $g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$ hydrostatic pressure $\underbrace{\frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz}$ non-hydrostatic pressure $\underbrace{c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h}}$ bottom friction $\underbrace{\frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right)}$ turbulent stresses

Les équations sont résolues dans le temps t et pour les directions horizontales x et y (à une profondeur d). L'élévation ζ de la surface libre est mesurée depuis le niveau d'eau au repos, la profondeur totale est $h = \zeta + d$.

u et v sont les vitesses de courant moyennes sur la profondeur, respectivement dans les directions x et y . La pression non-hydrostatique est donnée par q , le coefficient de friction est C_f ; τ_{ij} représente les efforts de cisaillement.

Le coefficient de friction avec le fond C_f est basé sur la rugosité de Manning, où n_m est le coefficient de Manning. Avec cette formulation la friction, qui est fonction de la profondeur augmente si les fonds remontent :

$$C_f = \frac{n_m^2 g}{h^{1/3}}$$

Les efforts de cisaillement sont modélisés par les équations ci-dessous :

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}$$

ν_t représente la viscosité induite par les turbulences.

Le code SWASH emploie des schémas à différences finies pour implémenter les équations ci-dessus. Plusieurs schémas sont nécessaires, ils sont détaillés dans un article du Coastal Engineering (Zijlema *et al.*, 2011).

Des tests de validation ont été réalisés en comparaison avec le modèle REFONDE du CETMEF et ARTEMIS (EDF/LNHE), ils sont disponibles en annexe de ce rapport et montrent une bonne corrélation des résultats.

3. Présentation des outils de pré(et post)traitement

Cette section a pour vocation de présenter les outils nécessaires au pré(et post)traitement des données liées au code SWASH. Quatre outils ont été employés pour l'étude (BlueKenue, MATLAB, WAFO et DIWASP).

Le logiciel BlueKenue¹¹ développé par le centre hydraulique canadien (CHC) permet d'interpoler des grilles rectangulaires sur un jeu de données. Les grilles vont ainsi discréteriser le domaine et serviront de base aux calculs.

La première grille à interpoler est la bathymétrie. BlueKenue permet d'ouvrir un fichier de type «.xyz », il propose ensuite la création d'un maillage rectangulaire avec une origine, et un nombre de mailles de dimensions précises. Le fichier contenant la grille est enregistré sous le format « .r2s ».

Une fois le code SWASH exécuté, il en ressort un ensemble de données sous format ASCII ou bien dans le format binaire MATLAB. Le deuxième outil est le logiciel MATLAB (susceptible d'être remplacé par Scilab en licence CeCILL).

MATLAB permet de facilement visualiser les résultats. La fonction « controurf » donne une représentation sans traitement préalable, et autorise l'utilisateur à choisir les iso-lignes qu'il veut mettre en valeur. Le logiciel MATLAB est aussi la base pour deux boîtes à outils « WAFO » et « DIWASP » toutes deux libres d'accès. Ces outils intégrés dans MATLAB permettent un traitement approfondi.

WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) développé par Lund University¹² est un outil de statistique de traitement du signal. Il permet par exemple de traiter les données en sortie de SWASH et de mettre en graphique la répartition des périodes et des hauteurs.

DIWASP (DIrectional WAve SPectra Toolbox)¹³ développé par MetOcean Solution Ltd est un outil plus restreint, sa fonction principale est d'estimer un spectre directionnel à partir d'un échantillon de données. La puissance de cet outil réside dans sa sobriété, toutes les structures servent à la fonction principale « dirspect ». DIWASP a été choisi pour produire les spectres directionnels de l'étude.

Le logiciel BlueKenue peut aussi être utilisé en post-traitement. Il peut lire les données sorties de SWASH et créer des profils sur le domaine.

Dans la démarche retenue, les données brutes ont nécessité un pré-traitement pour être discréterisées selon une grille grâce à BlueKenue. Le maillage de cette grille n'a pas besoin de coïncider avec celui de la grille de calculs dans SWASH. Une fois le code exécuté, les données sont post-traitées avec MATLAB et l'outil DIWASP pour obtenir des résultats graphiques.

¹¹ http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/consultatifs/blue_kenue_index.html

¹² <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/>

¹³ <http://www.metocean.co.nz/support/resources/>

4. Cas tests de validation

Des modélisations de validation du code SWASH ont été réalisées :

1. Le premier cas test est une comparaison entre les codes numériques SWASH et ARTEMIS de la chaîne de calcul TELEMAC (EDF/LNHE) ainsi que des mesures réalisées à Delft University of Technology. Un canal à houle avec différentes pentes est modélisé. Les résultats attestent de la bonne prise en compte du déferlement dans un environnement à 1 dimension (1D).
2. Le deuxième cas test est une simulation sur la plage de Pentrez dans la baie de Douarnenez. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par David Morellato dans le cadre de sa thèse « Dynamique des plages sableuses soumises à l'action des vagues, de la marée et des rechargements artificiels » de 2008 avec le logiciel FUNWAVE. La bonne corrélation des résultats atteste que le déferlement en 2 dimensions horizontales (2DH) est bien modélisé.
3. Le troisième cas test concerne une comparaison entre SWASH et le code d'agitation REFONDE (CETMEF) sur une bosse modélisée en 2D. Les résultats montrent une intégration de la réfraction et de la diffraction.

Chapitre 3 – Modélisation numérique des vagues sur le site d'Esquibien

1. Le site d'étude d'Esquibien

Le port d'Esquibien se situe dans le sud Finistère et plus précisément au nord de la baie d'Audierne (documents complémentaires en annexe B).

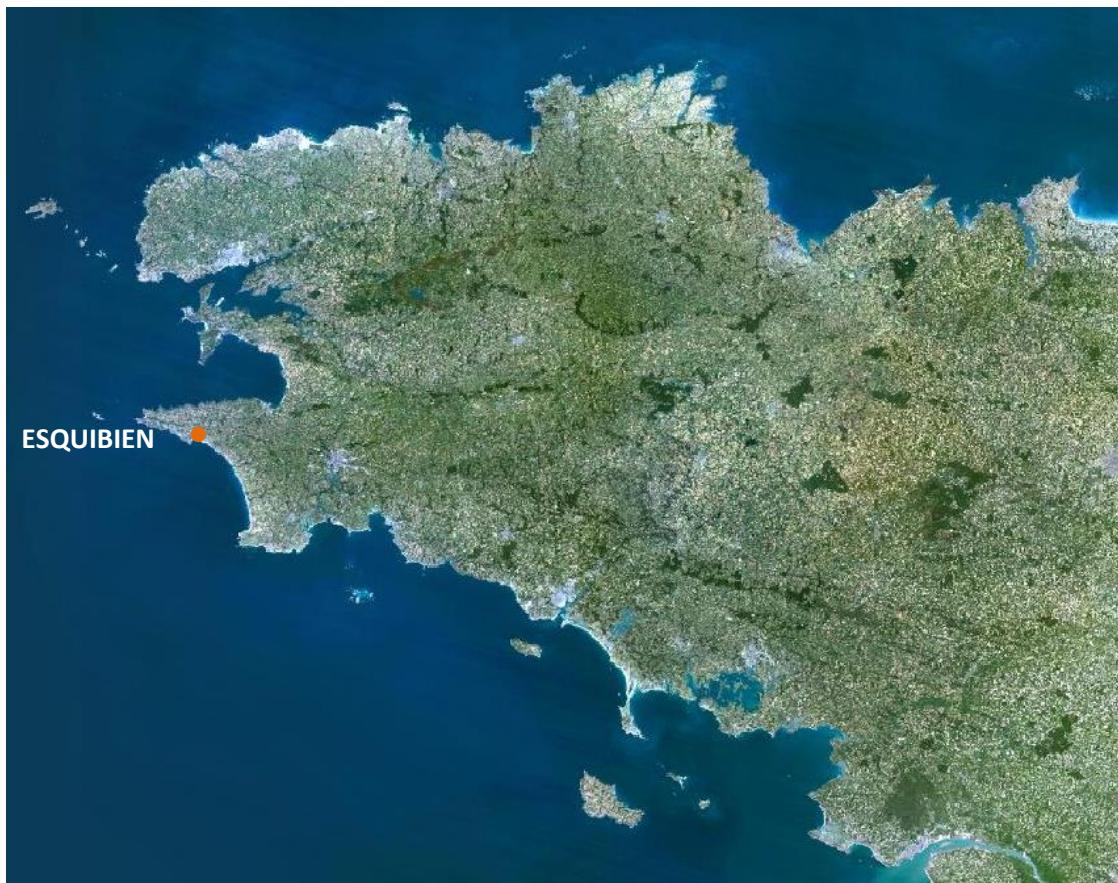


Figure 1.1 : Localisation du site d'Esquibien (portail GéoBretagne <http://cms.geobretagne.fr/>)

Le site d'Esquibien a été sélectionné parmi 22 autres sites dans la phase 1 du projet EMACOP (Michard et al., 2013). Les résultats pour le site d'Esquibien sont présentés ci-dessous. Le potentiel annuel sur le site a été estimé à 6,9kW/m. L'étape suivante, qui constitue le présent travail consiste à mieux comprendre la distribution de cette énergie le long du site.

Esquibien	Climat Annuel		Climat Hivernal		Climat Estival	
	Large	Site	Large	Site	Large	Site
Hauteur de houle (m)	2,4	1,3	3,1	1,4	1,7	0,9
Période Te (s)	9	6,1	10	6,4	8,1	5,5
Puissance (kW/m)	44,3	6,9	71,1	8,4	18	3,4
Obliquité sur l'ouvrage (°)	X	40	X	40	X	40

Figure 1.2 : Tableau des résultats de la phase 1 d'EMACOP (Michard et al., 2013) pour Esquibien



Figure 1.2 : Digue d'Esquibien à marée basse avec une mer calme (photo B. Michard)



Figure 1.3 : Digue d'Esquibien à marée basse avec une mer agitée (phot M. Arzel)

2. Résultat de la modélisation bathymétrique

La bathymétrie a été digitalisée à partir de la carte marine SHOM du port d'Audierne (N°7147 de la chaussée de Sein à la pointe de Penmarch). La digitalisation est faite dans le repère Lambert II étendue, les altitudes sont prises par rapport au zéro hydraulique du SHOM.

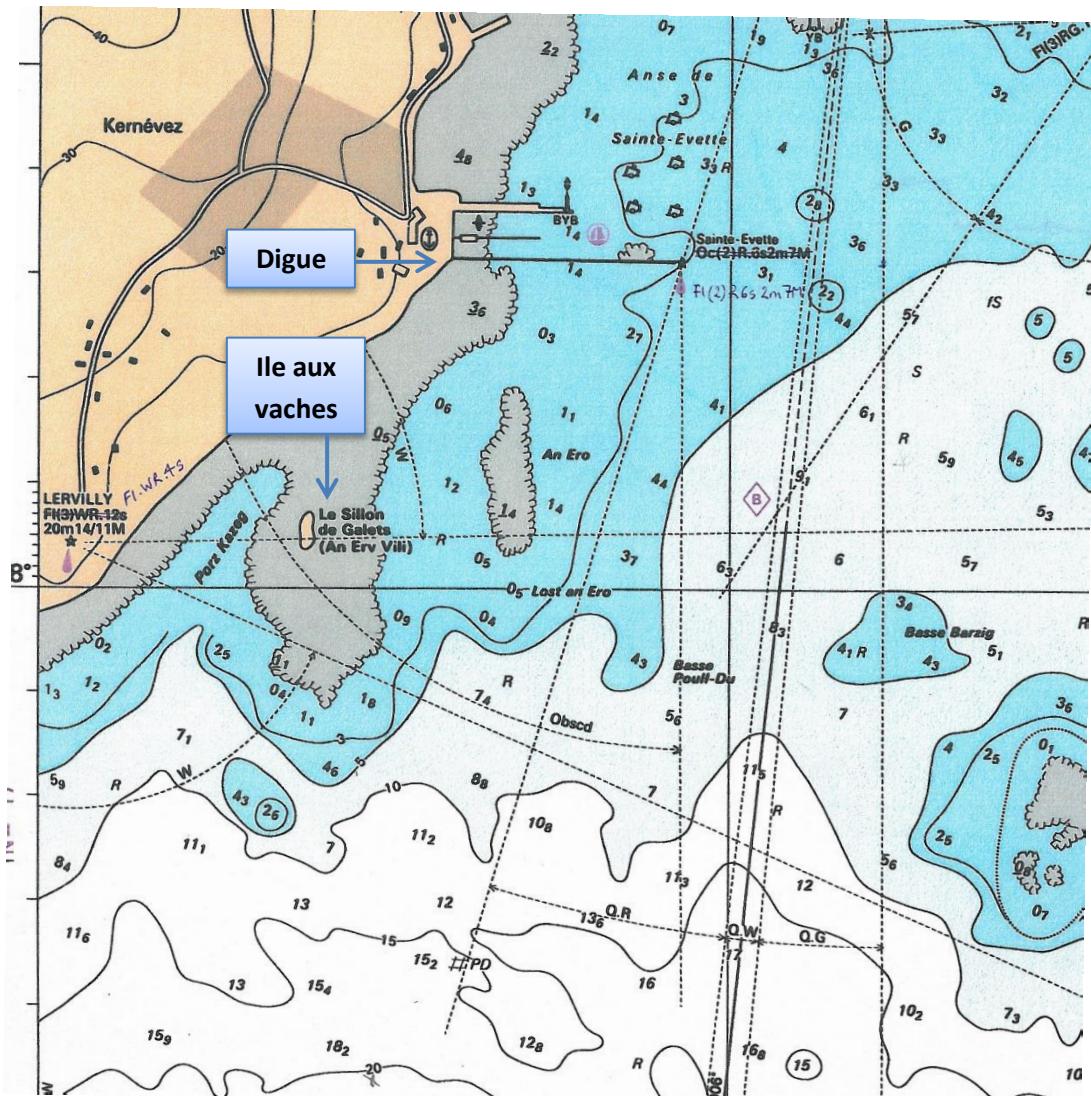


Figure 2.1 : Carte bathymétrique du SHOM dans le repère WGS94 (extrait de la carte marine N°7147)

Un premier travail d'analyse de la bathymétrie donne une idée des transformations qui vont être induites aux houles entrant à la frontière sud.

L'avancée à l'ouest est communément appelée l'île aux vaches (« Le sillon de Galets » sur la carte), ce relief est plus ou moins immergé selon la marée, à son approche les fonds remontent brusquement. Un peu plus à l'est, se trouve un haut fond qui peut être visible à marée basse (« An Ero »). La bathymétrie le long de la digue varie de -2m CM à 3m CM. A l'est la bathymétrie plonge à 6m CM.

Une fois la bathymétrie traitée avec le logiciel BlueKenue, un maillage est obtenu avec un pas de 1m dans la direction x et y. Le résultat ci-dessous donné par SWASH correspond à la bathymétrie avec une hauteur d'eau de 3m, l'échelle est de 4m en abscisse et de 2m en ordonné, le point d'origine (en bas à gauche) a pour coordonnées (85 327 ; 2 354 915) dans le repère Lambert II étendue.

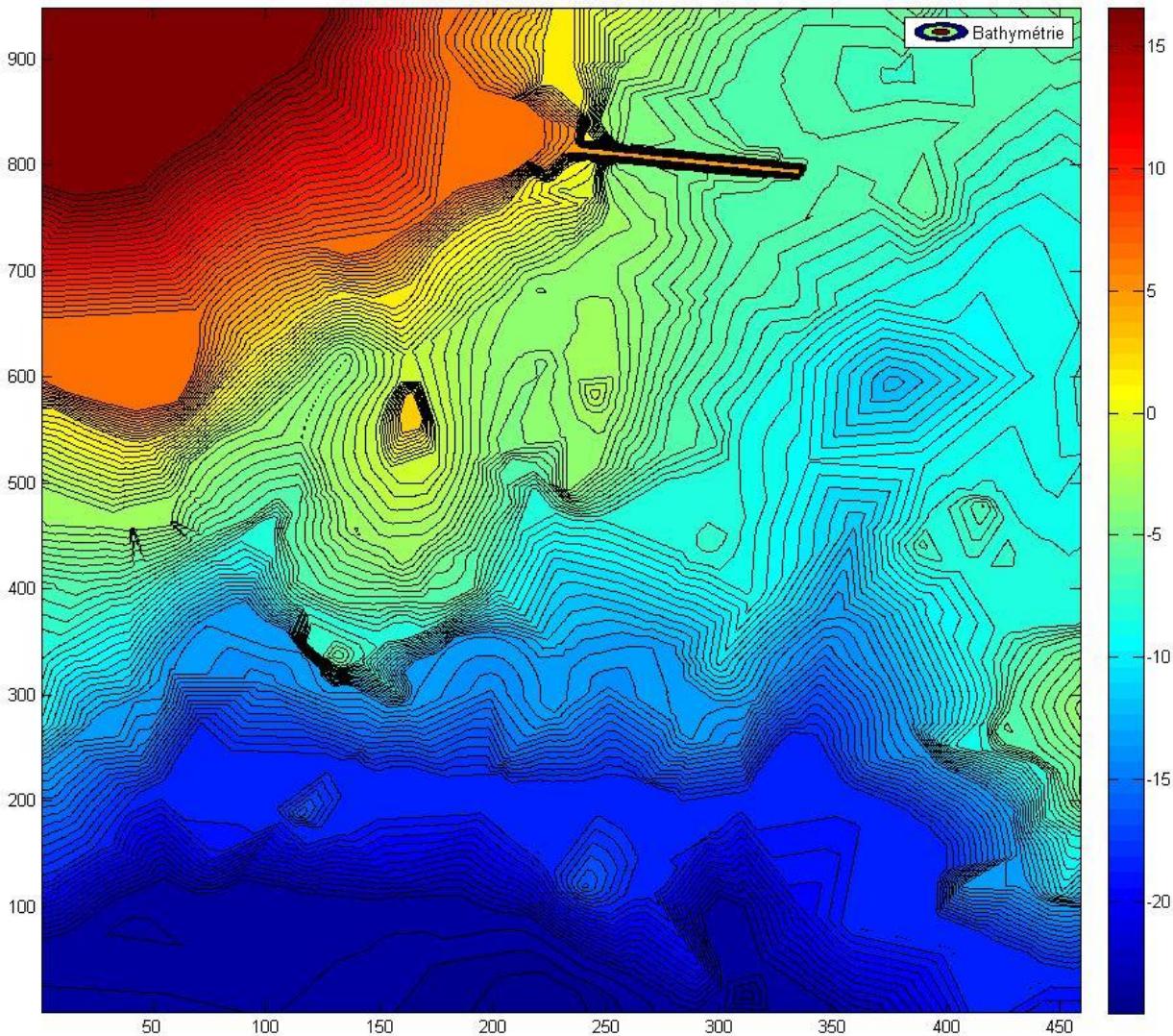


Figure 2.2 : Résultat de bathymétrie en sortie du modèle SWASH traité par MATLAB (100 isobathes)

Deux autres modèles inclinés de 20° et 40° ont été créés pour modéliser des directions de provenance différente, ces modèles ont pour origines respectivement les points de coordonnées (85 040 ; 2 355 146) et (84 598 ; 2 355 322) dans le repère Lambert II étendue.

A noter que la bathymétrie LITTO3D devait être utilisée initialement, mais celle-ci n'a pas pu être délivrée à temps, par le CG29 propriétaire de la donnée. Une des suggestions sera de relancer les calculs avec cette bathymétrie d'une densité moyenne de 2 point par m².

3. Choix des états de mer à simuler

Les données de forçage concernent les paramètres spectraux de : hauteur significative (Hs), période de pic (Tp), direction (Dir) et étalement (Etal) des vagues. De plus, 3 niveaux d'eau sont pris en compte. Ces données doivent représenter des évènements plausibles, et plus encore, elles doivent représenter des évènements caractéristiques des conditions de mer sur le port d'Esquibien.

La démarche d'obtention des conditions de forçage s'est basée sur l'atlas numérique ANEMOC développé par le CETMEF et EDF/LNHE et l'atlas numérique PREVIMER développé par l'IFREMER.

3.1 Utilisation des données hindcast ANEMOC

Le point 2511 du maillage ANEMOC se situe à 10,5km au sud et 3km à l'est d'Esquibien¹⁴. Il a été utilisé pour récupérer les données hindcast sur 23 ans (période de 1979 à 2003). Le traitement des données (Michard et al, 2013) a permis d'obtenir des statistiques représentatives (figure 3.1.1), afin de retenir certaines valeurs caractéristiques présentées sur la figure 3.1.2.

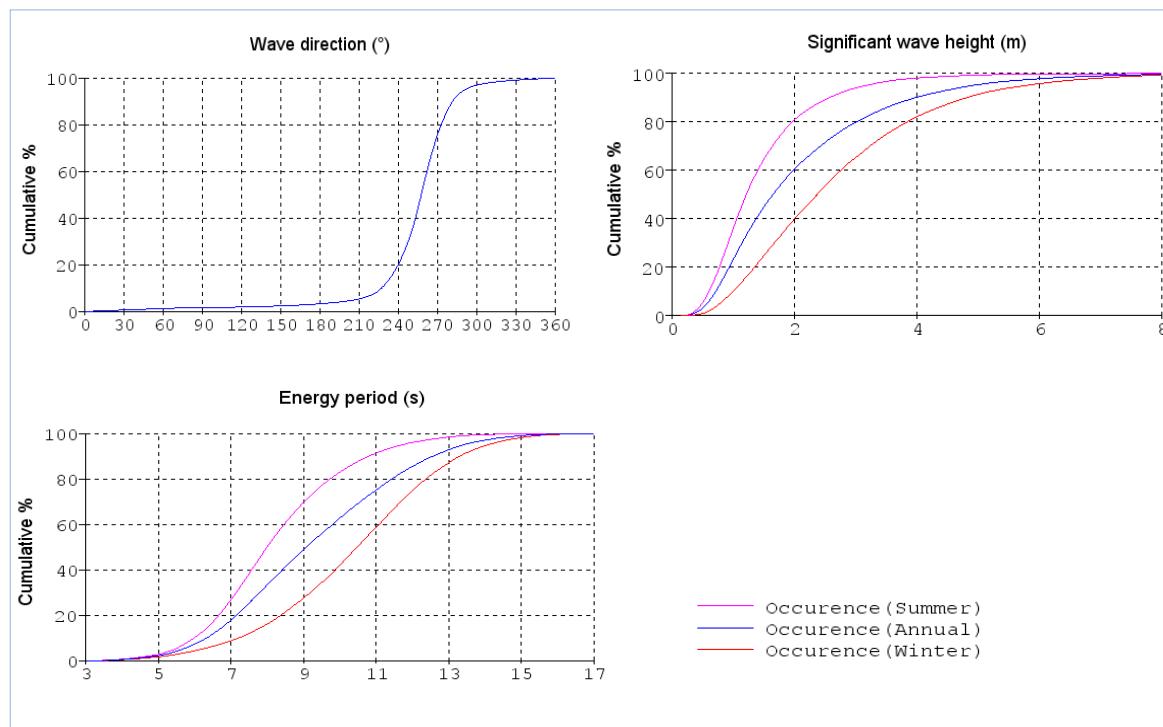


Figure 3.1.1 : Traitement des données ANEMOC (direction, hauteur, période)

	Direction de provenance	Hauteur significative	Période de Pic
Valeur à 20%	230°N	1,5m	8.3s
Valeur à 50%	250°N	2,7m	10.3s
Valeur à 80%	270°N	4,0m	12.3s

Figure 3.1.2 : Résultat des valeurs significatives retenues au point ANEMOC 2511 (à une profondeur de 30m)

3.2 Utilisation des cartes PREVIMER

Les simulations de l'atlas numérique PREVIMER sont en libre accès (<http://www.previmer.org/>). Elles représentent la hauteur significative des vagues et leurs directions (figure 3.2.1).

A partir à l'analyse des données PREVIMER sur la période de septembre à décembre 2013, il a été possible d'estimer la variabilité en hauteur et direction des vagues, entre le point ANEMOC et l'entrée du modèle d'Esquibien. Les résultats obtenus montrent que l'angle de provenance des houles varie de 40° à 50° et la hauteur significative de 0,7m (figure 3.2.2).

¹⁴ Point ANEMOC : <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte2/>

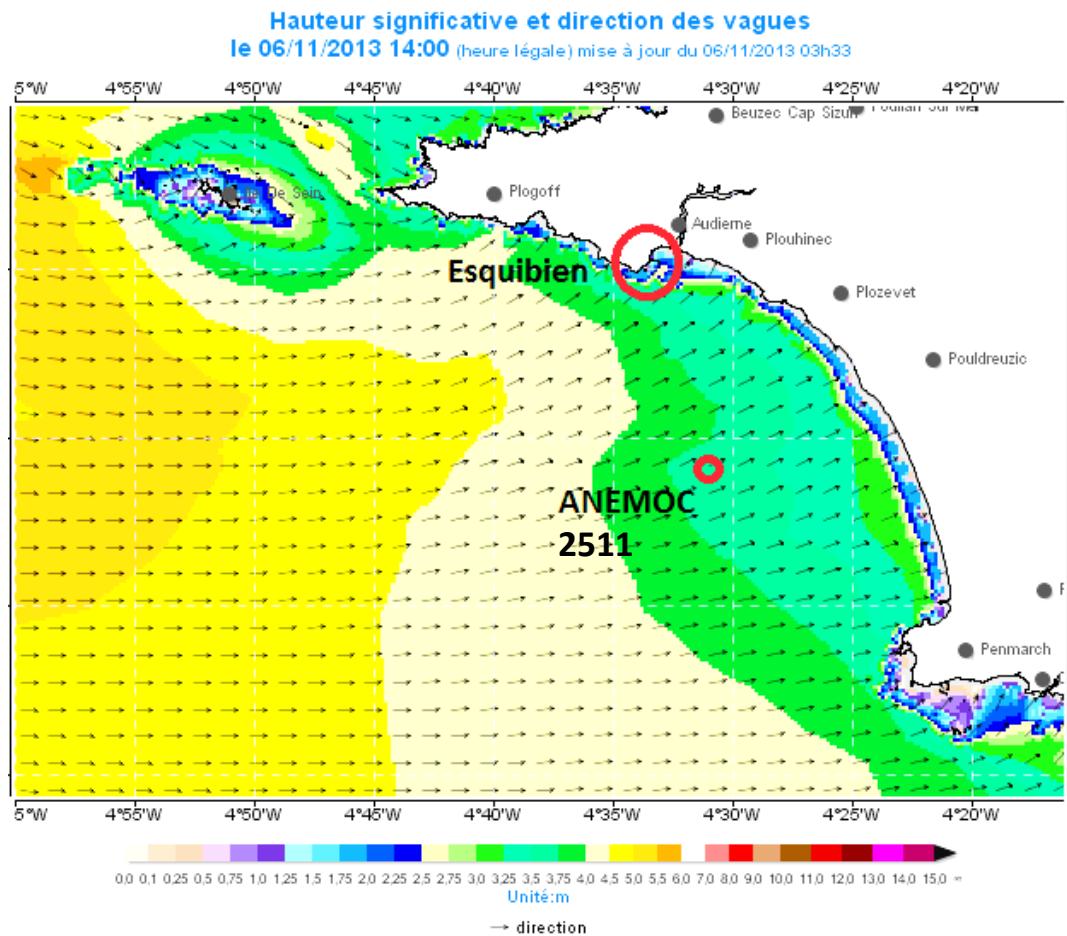


Figure 3.2.1 : Schéma de propagation des houles (Hs et Dir) par PREVIMER

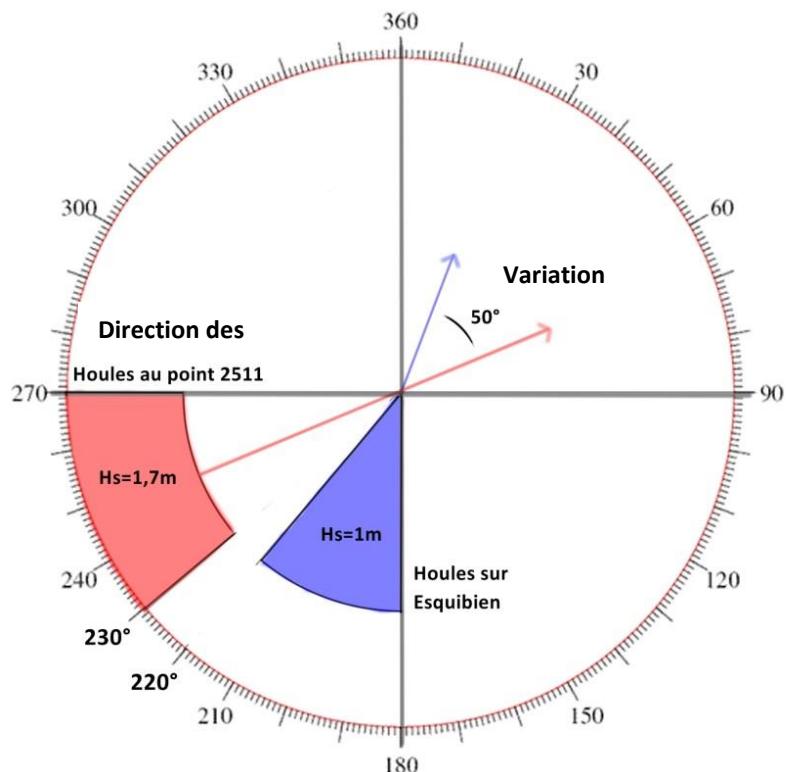


Figure 3.2.2 : Résultat de la variabilité des directions de houles entre le point ANEMOC 2511 et Esquibien

3.3 Combinaison de paramètres retenus

Les analyses précédentes permettent de retenir un évènement caractéristique susceptible de se produire en limite entrante du modèle numérique, et 2 autres événements, qui encadrent le champ des possibles (figure 3.3.1).

De plus l'impact de 3 niveaux d'eau sera étudié. Les niveaux de basse mer, mi marée et pleine mer ont été choisis pour une marée de vive eau (coefficient de 95 le 6 novembre 2013 à Esquibien).

Données de forçage :

	Direction de provenance	Hauteur significative	Période de Pic
Valeurs simulées	180°N	1m	7s
en limite entrante	200°N	2m	10.3s
de modèle	220°N	3m	13s

Figure 3.3.1 : Conditions de forçages utilisées pour les simulations

La méthodologie se base sur une étude de sensibilité des différents paramètres. Ainsi après analyse, il a été réalisé 7 simulations :

Simulations /Paramètres	Référence	Direction 1	Direction 2	Triplet 1	Triplet 2	Niveau d'eau 1	Niveau d'eau 2
Direction (Dir)	200°N	180°N	220°N	--	--	--	--
Niveau d'eau	3m	--	--	--	--	0,8m	5,25m
Hauteur significative (Hs)	2m	--	--	1m	2m	--	--
Période de pic (Tp)	10,3s	--	--	7s	13s	--	--
Etalement (Etal)	25°	--	--	37,5°	18°	--	--

Figure 3.3.2 : Tableau récapitulatif des 7 simulations réalisées sur le site d'Esquibien

4. Maillages, paramètres physique et numérique du modèle d'Esquibien

4.1 Maillage horizontal

Le maillage est de 4m selon l'axe des x et de 2m selon l'axe des y. Cette résolution permet d'avoir au moins 50 mailles par longueur d'onde en entrée de modèle ; ce qui est préconisé dans le manuel d'utilisation de SWASH. La résolution des mailles perpendiculaires à la direction des vagues a été relâchée à 4m dans le but de réduire le temps de calcul.

4.2 Maillage vertical

Pour tenir compte des hautes fréquences, et avoir une bonne modélisation de la dispersion des vagues, 2 couches de discréétisation verticale ont été retenues, après une analyse approfondie du manuel. Ce paramétrage donne une erreur sur la dispersion des vagues de 1% et une période minimum correctement simulée de 3,2s ; en accord avec les préconisations du manuel d'utilisation de SWASH.

4.3 Discréétisation temporelle

Le pas de temps de calcul n'est pas homogène pour toutes les simulations. Dans la mesure où, certaines simulations induisent des courants plus forts, le pas de temps a dû être baissé. La condition CFL a néanmoins été limitée entre 0,1 et 0,6 pour toutes les simulations. Les pas de temps varient de 0,05s à 0,01s.

4.5 Conditions de forçage initiales

Au départ de la simulation, l'élévation de la surface libre est initialisée uniformément au zéro hydrographique en ajoutant une hauteur représentant le niveau d'eau. Les 10 premières minutes de la simulation n'apparaissent pas dans les résultats et permettent d'atteindre un état agité « initial ». Il est considéré que le niveau d'eau ne varie pas pendant les 40 minutes de la simulation.

4.4 Conditions limites

Les vagues sont propagées perpendiculairement à la frontière sud. Des absorbeurs ou « éponges » d'une largeur fixée sont mis aux bordures nord (largeur de 200m), à l'ouest (largeur de 100m) et à l'est (largeur de 100m). Ces éponges ont pour but d'annuler les effets de réflexions des frontières liquides et solides.

4.6 Paramètres physiques

Aucun paramètre de vent n'a été forcé, compte tenu d'un effet négligeable sur une petite emprise. Une friction de type Manning avec un coefficient de 0,019 a été entrée pour prendre en compte les frottements sur les fonds. La viscosité turbulente n'a pas été prise en compte dans les simulations.

4.7 Paramètres numériques

La commande « BREaking » est utilisée pour rendre compte de l'énergie dissipée lors du déferlement. La pression non-hydrostatique est intégrée avec un schéma numérique de type Keller-Box, conformément aux recommandations du manuel d'utilisation de SWASH.

5. Résultats de la modélisation numérique avec le code SWASH

Le temps total d'une simulation est de 40 minutes, il se décompose en deux parties :

- 10 minutes sans acquisitions de données (pendant l'établissement de l'état initial),
- 30 minutes d'acquisition pour simuler un nombre suffisant de vagues.

Les résultats sont obtenus à deux échelles différentes :

- Globalement sur l'ensemble du domaine (hauteur significative et élévation de la surface),
- Localement aux emplacements de bouées virtuelles (spectres directionnels et puissances linéaires définie plus loin).

L'emplacement de chaque bouée virtuelle est spécifié sur la figure ci-dessous, ces bouées sont numérotées le long de 3 courbes (le premier chiffre désigne la courbe, et le deuxième la position le long de la courbe). Le domaine compte 18 bouées (4 bouées sur la courbe n°3 et 7 sur les courbes n°1 et 2).

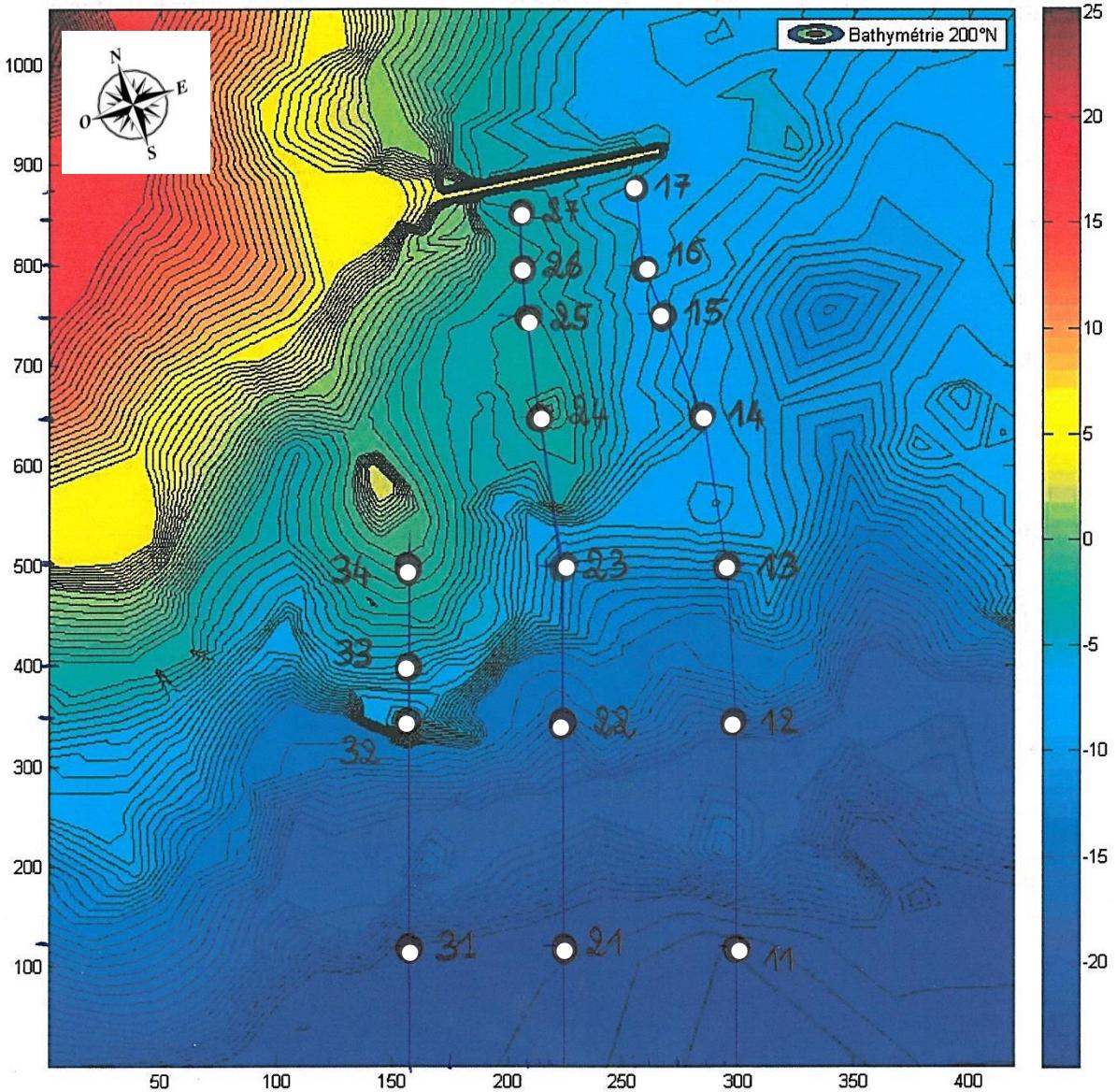


Figure 5.1 : Emplacement de bouées virtuelles sur fond bathymétrique incliné de 20° par rapport au nord

Les spectres directionnels permettent de façon intuitive de voir la répartition de la densité d'énergie selon la direction de provenance et la fréquence. Chaque spectre directionnel est accompagné de données complémentaires :

- Une hauteur significative locale,
- Une puissance linéaire (sans tenir compte de la provenance des vagues).

Le temps de simulation varie de 20h à 48h selon les simulations sur un ordinateur disposant d'un processeur : Intel Xeon CPU E3- 1245 V2 @ 3,40GHz. L'intégrité des résultats des simulations sont disponibles en annexe D de ce rapport.

5.1 Analyse de la simulation de référence

Cette simulation est basée sur des conditions fortement probables aux abords d'Esquibien : $H_s=2m$, $T_p=10,3s$; direction de provenance 200°N et un étalement de 25°.

Cette première analyse a permis de mettre en avant la dynamique du site face à des conditions hivernales moyennes. Les résultats de références suivants permettent de comparer les simulations suivantes.

Résultats de la simulation de référence

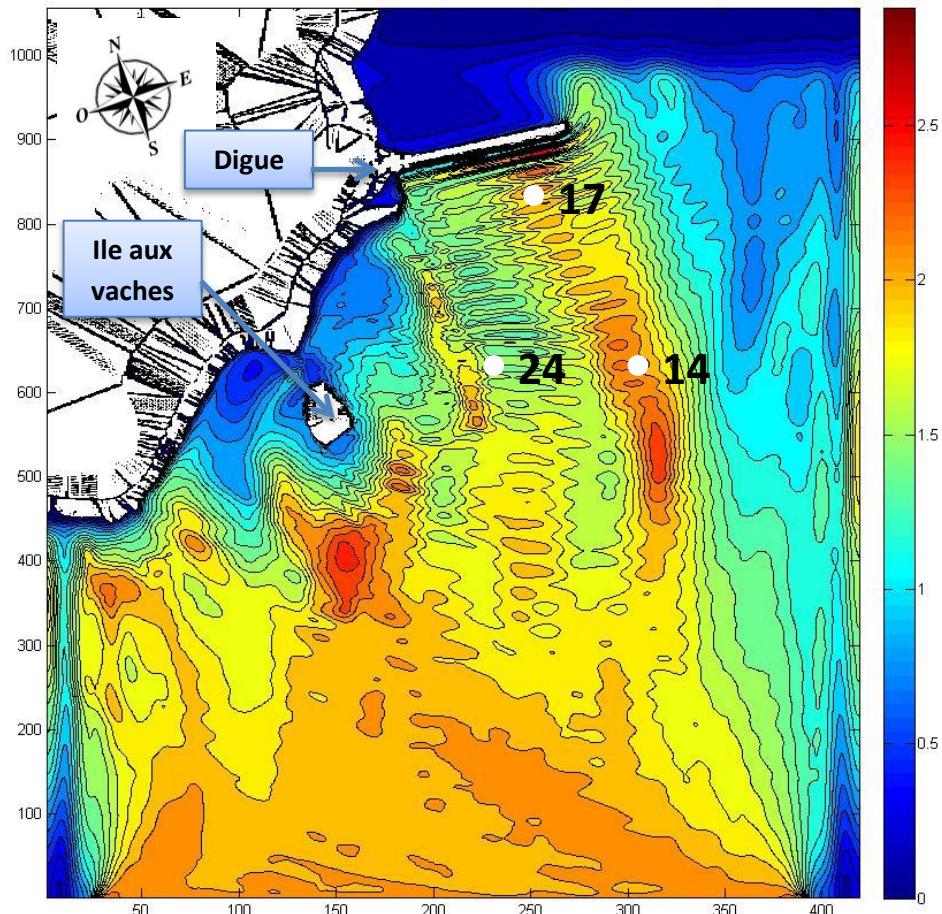


Figure 5.1.1 : Résultat de la hauteur significative(H_s) pour la simulation de référence ($H_s=2m$, $T_p=10,3s$, $Dir=200^{\circ}N$, $Etal=25^{\circ}$ Niveau d'eau de 3m)

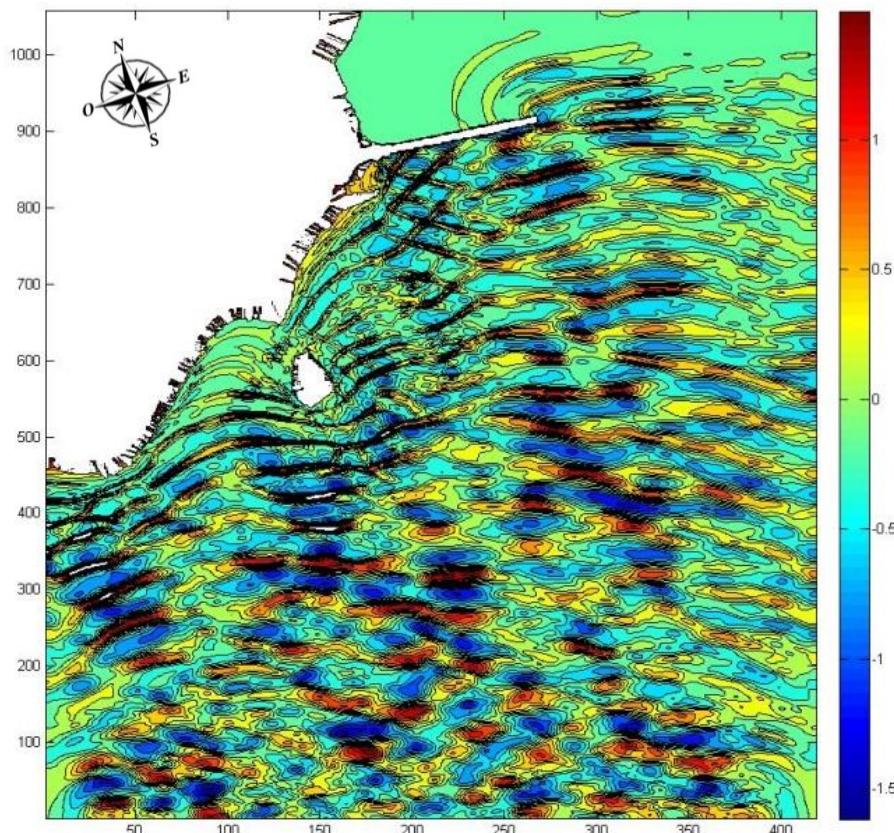


Figure 5.1.2 : Résultat de l'élévation de la surface libre ($t=40\text{min}$) pour la simulation de référence

Analyse des résultats

Les valeurs de hauteurs significatives (H_s) décroissent de la bordure sud à la digue. L'observation des H_s montre que les houles du $200^\circ N$ convergent en partie sur l'île aux vaches, ce qui a pour effet d'abriter des vagues une partie de la digue. Deux zones principales de shoaling se démarquent devant l'île aux vaches, et au sud du point « 14 ». Au niveau de ces zones, la hauteur des vagues augmentent de 25% par rapport à la bordure sud.

A l'inverse, il existe à l'est de la digue une zone où les valeurs de H_s sont faibles, car les fonds de 6m CM à l'est remontent rapidement à 3m CM en allant vers l'ouest. Les vagues se réfractent alors fortement et s'orientent à $190^\circ N$ vers la digue. Cette zone caractérise le phénomène de caustique.

Au-devant de la digue, à intervalle régulier d'une demi-longueur d'onde, il se produit des variations de 10% des hauteurs significatives. Ce phénomène est dû à la réflexion sur la digue, il correspond vraisemblablement à une interférence entre l'onde réfléchie et l'onde incidente, créant localement des ventres où les amplitudes sont supérieures.

L'ensemble des spectres pour la simulation sont présentés en annexes ; certains points remarquables sont présentés ici. **Les directions sur le graphique sont présentées selon le cercle trigonométrique, mais l'étude utilisera les directions par rapport au nord correspondant à la rose des vents (90° équivaut à $0^\circ N$)** (figure 5.1.4).

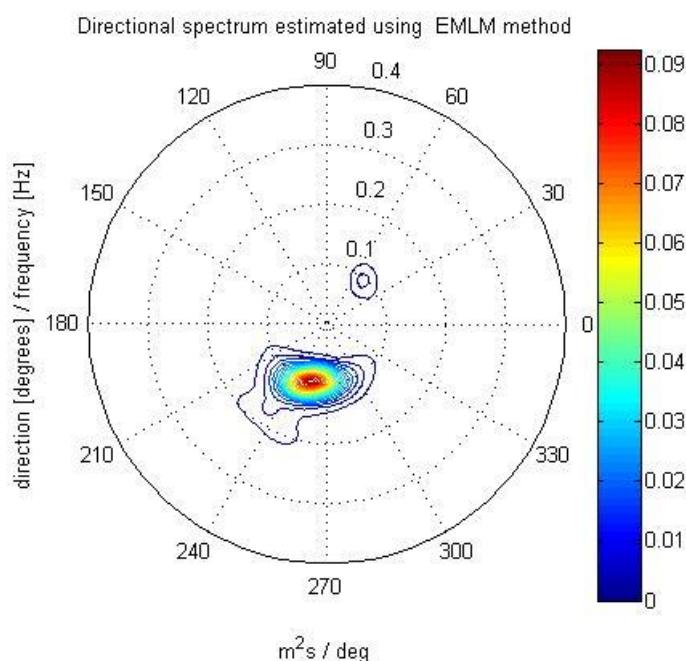


Figure 5.1.3 : Résultat du spectre « 14 » $H_s=2,2m$ et la puissance linéique $Pl=20,4kW/m$

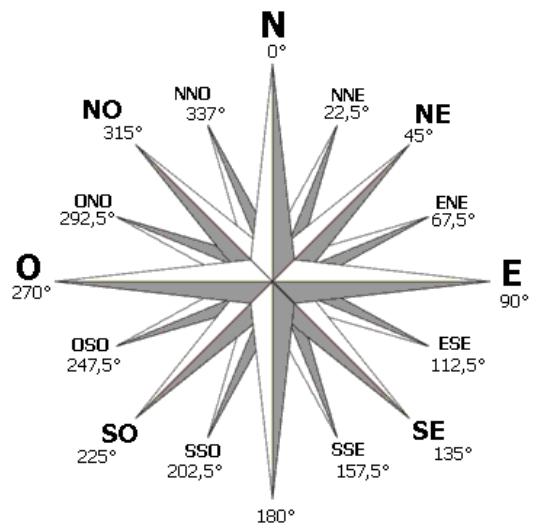


Figure 5.1.4 : Rose des vents

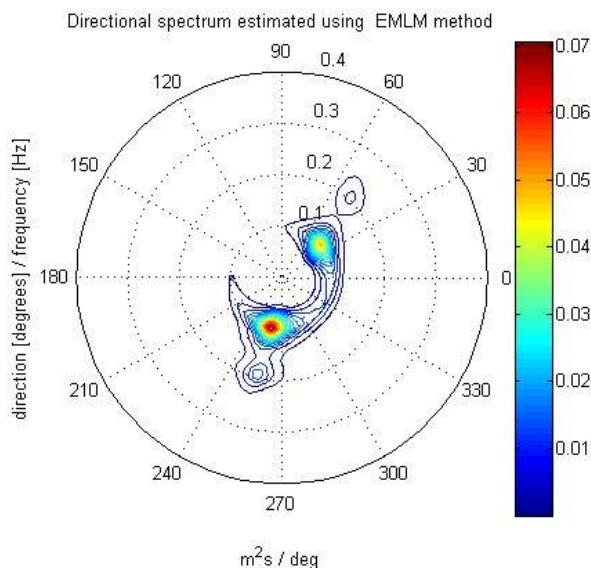


Figure 5.1.5 : Résultat du spectre « 17 » $H_s=2,2\text{m}$ et $P_l=20,4\text{kW/m}$

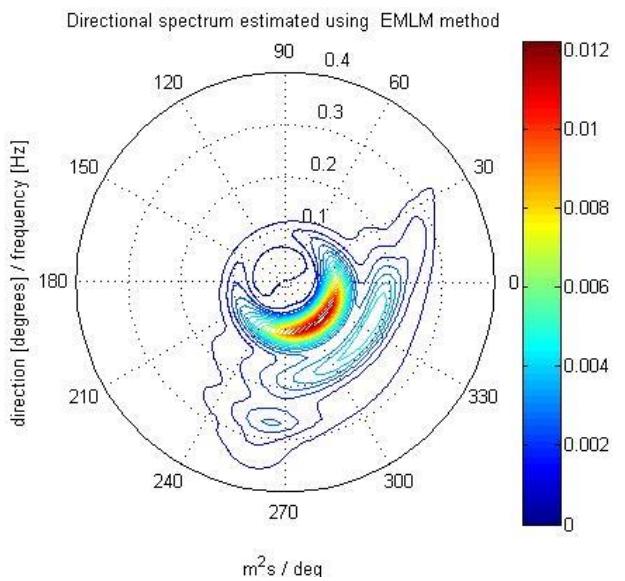


Figure 5.1.6 : Résultat du spectre « 24 » $H_s=1,6\text{m}$ et $P_l=6,0\text{kW/m}$

La puissance linéique a été calculée à partir de la formule suivante (EPRI, 2011) en utilisant un script MATLAB et des spectres fréquentiels générés par WAFO :

$$P_l = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty \frac{S(f)}{f} \left[\left(1 + \frac{2k_f d}{\sinh(2k_f)} \right) \tanh(k_f d) \right] df$$

Au regard des spectres directionnels des figures 5.1.4, 5.1.5, 5.1.6 :

Le long de la courbe n°1, les vagues changent fortement de direction au point « 14 », c'est à ce moment qu'elles s'orientent vers la digue. Le point « 14 » correspond aussi à la zone de shoaling, la puissance linéique y est de 20,4kW/m (92% de celle à la limite sud). L'onde réfléchie par la digue peut s'observer sur les spectres (à l'opposé de la provenance des vagues), elle est graduellement plus forte à l'approche de la digue. La réflexion fait un angle de 40° avec la digue (inclinée de 6° par rapport au nord). Au point « 17 » la puissance linéique est élevée (20,4kW/m), ce qui s'explique par la prise en compte de l'onde réfléchie. Le point « 15 » est marqué par l'influence grandissante des interactions non linéaires, elles forment un pic d'énergie pour des périodes deux fois inférieures (5s).

Le long de la courbe n°2, la direction des vagues varie de 80° entre les points « 23 » et « 24 ». La puissance linéique au point « 24 » est relativement faible (25,5% de celle au point « 21 »), avec néanmoins une hauteur significative de 1,6m. Le point « 24 » est situé sur un haut fond 1m CM.

Le long de la courbe n°3, les vagues changent peu de direction et viennent déferler entre les points « 33 » et « 34 » (on passe de 24,1kW/m à 2,8kW/m). Il est à noter la formation d'un deuxième pic de fréquence dès le point « 32 ».

Conclusion sur la simulation de référence

La modélisation numérique pour des conditions hivernales moyennes montre que, **l'ensemble du site est exposé aux houles**. Les endroits **les plus énergétiques à la côte** se situent en bout de digue et devant l'**île aux vaches**. Les houles arrivent sur la digue avec **une obliquité qui augmente avec la proximité de la côte**.

5.2 Analyse de l'influence de la direction de provenance

Les deux simulations suivantes se basent sur des domaines différents. Pour simuler une direction de 220°N, il a fallu tourner le modèle de 40° par rapport à la simulation des vagues provenant de 180°N ; les figures sont présentées en annexes. Le fait de devoir créer deux emprises différentes implique quelques limites lors de la comparaison. La simulation devrait montrer que, contrairement aux vagues venant du sud, les vagues du 220°N atteignent moins facilement la digue, en partie protégée par l'île aux vaches.

Résultats de la simulation des vagues en provenance de 180°N

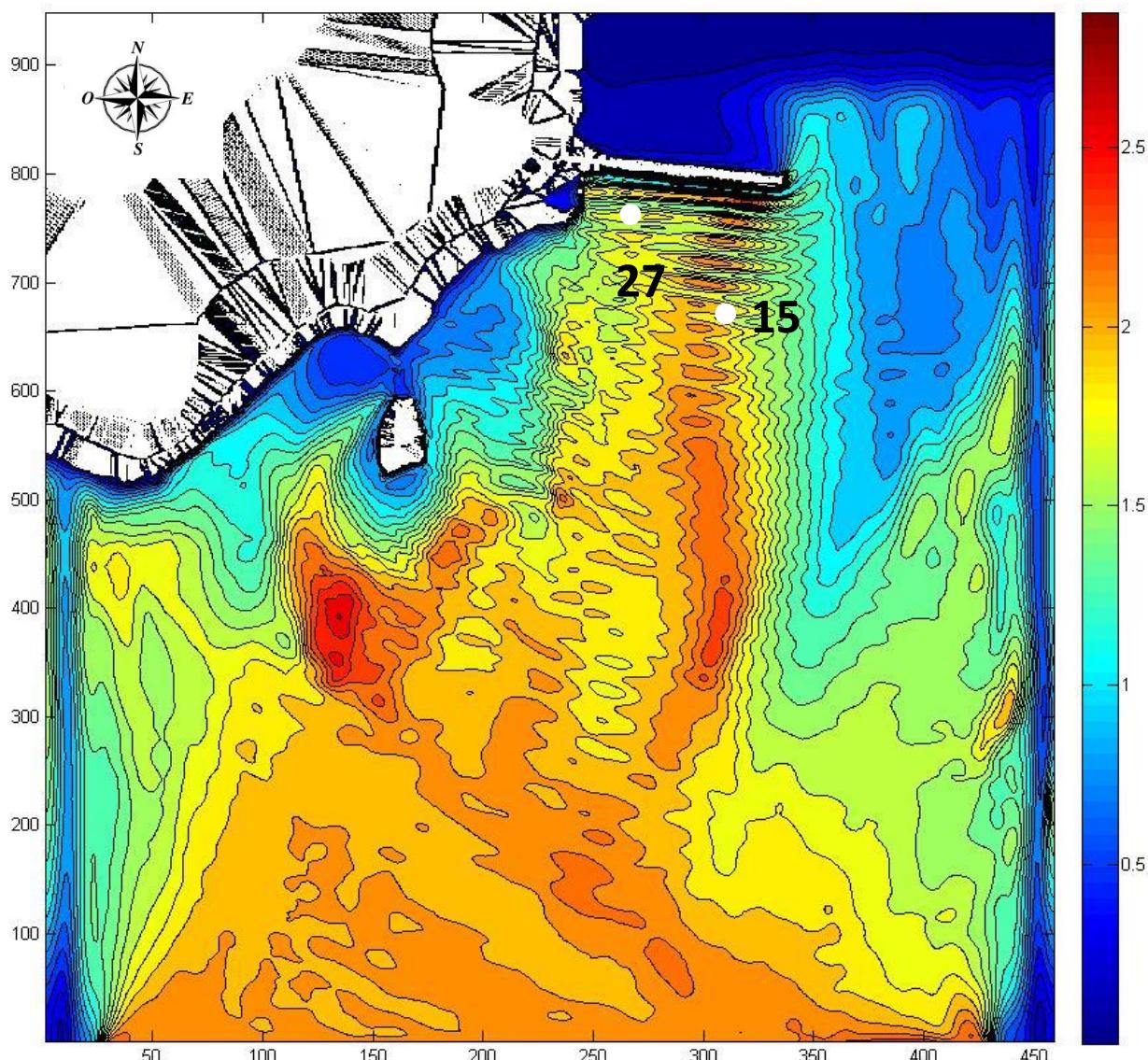


Figure 5.2.1 : Résultat de la hauteur significative pour la simulation à 180°N ($H_s=2\text{m}$, $T_p=10,3\text{s}$)

Analyse des résultats de la simulation des vagues pour la direction 180°N (figure 5.2.1)

La distribution est similaire à celle de la simulation de référence. L'île aux vaches concentre toujours les houles, néanmoins la digue est moins protégée et les hauteurs de vagues sont plus élevées en avant de celle-ci. La zone de shoaling se trouve plus à l'ouest du fait de la trajectoire plein sud des vagues. La caustique à l'est est fortement marquée, sur une distance Est-Ouest de 200m les houles passent d'une hauteur de 2m à 1m.

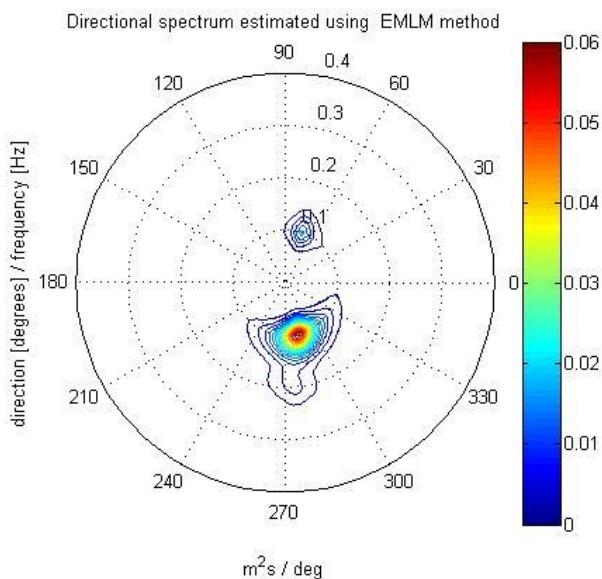


Figure 5.2.2 : Résultat du spectre « 15 » $H_s=2,0m$ et $P_l=15,8kW/m$

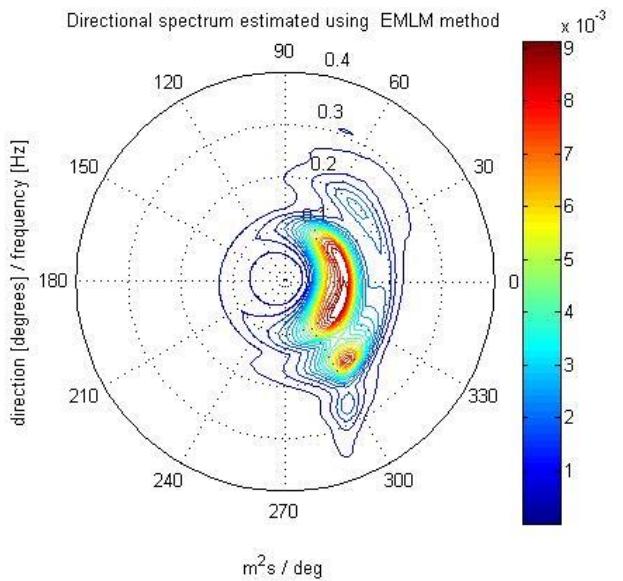


Figure 5.2.3 : Résultat du spectre « 27 » $H_s=1,5m$ et $P_l=7,1kW/m$

Au regard des spectres directionnels des figures 5.2.2 et 5.2.3 :

Le long de la courbe n°1, la houle garde la direction 180°N jusqu'au point « 14 », puis elle s'incline à 170°N. La puissance a diminué de moitié au point « 16 » depuis la bordure sud. La digue réfléchie l'onde incidente avec un angle de 15°.

Le long de la courbe n°2, la transformation de la houle est similaire à celle de la simulation de référence. Il est à noter que, la direction de propagation est de 90°N au point « 27 », ce qui veut dire que les vagues viennent frapper le début de la digue. Cette direction de propagation est susceptible de donner naissance à des houles gaufrées.

Résultats de la simulation des vagues en provenance de 220°N

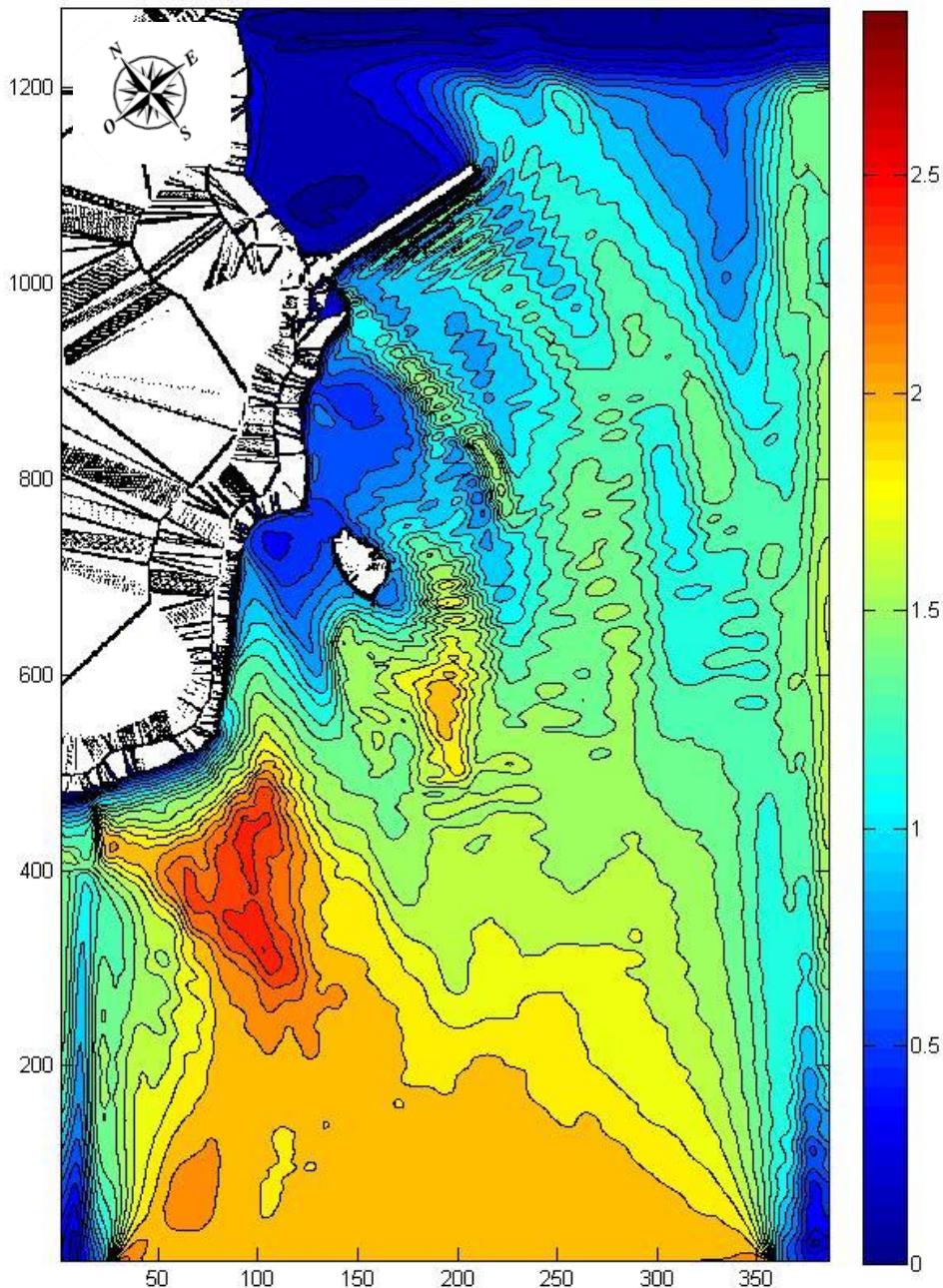


Figure 5.2.4 : Résultat de la hauteur significative pour la simulation à 220°N ($H_s=2m$, $T_p=10,3s$)

Analyse des résultats de la simulation des vagues pour la direction 220°N (figure 5.2.4)

Lorsque les vagues arrivent du 220°N la côte protège la digue d'Esquibien. Une large partie de l'énergie est dissipée avant d'arriver au pied de la digue. La hauteur significative est diminuée de moitié dans une vaste zone devant la digue par rapport à la bordure sud. L'île aux vaches est également moins exposée.

Au regard des spectres directionnels :

Le long de la courbe n°1, le niveau de puissance linéique est plus faible (en deçà de 10kW/m). La houle prend une direction à 270°N au point « 11 » ce qui montre une légère tendance à s'éloigner de la côte jusqu'au point « 12 ».

Le long de la courbe n°2, les houles s'orientent vers la digue à partir du point « 24 ».

Conclusion sur l'influence de la direction

Lorsque les houles ont une composante ouest, la côte capte l'énergie des vagues qui se dissipe sur les éperons rocheux. Au contraire, les houles venant du sud frappent directement la digue. De plus, les houles de 180°N accentuent le phénomène de caustique à l'est, et le phénomène de résonance devant la digue. Au point « 15 » pour la simulation de provenance 180°N, la puissance linéique est de 15,8kW/m, pour la simulation de provenance 200°N, (de référence) PI=15kW/m, enfin pour la simulation 220°N, la puissance linéique est de 6,8kW/m. La direction de provenance des vagues à 2km au large d'Esquibien influe donc de manière significative la répartition de l'énergie à la côte.

5.3 Analyse de l'influence du couple H_s et T_{pic}

Dans ces deux simulations, le même modèle est confronté à deux états de mer différents. Dans la simulation 1, présentée sur la figure 5.3.1, un spectre de paramètres spectraux H_s=1m et T_p=7s est généré à la bordure sud. Sur la deuxième simulation, présentée sur la figure 5.3.2, un spectre plus énergétique est simulé (H_s=2m et T_p=13s).

A priori, le deuxième spectre devrait montrer des puissances linéiques nettement plus élevées, et des spectres directionnels resserrés autour d'une même direction.

Résultats de la simulation H_s=1m et T_p=7s

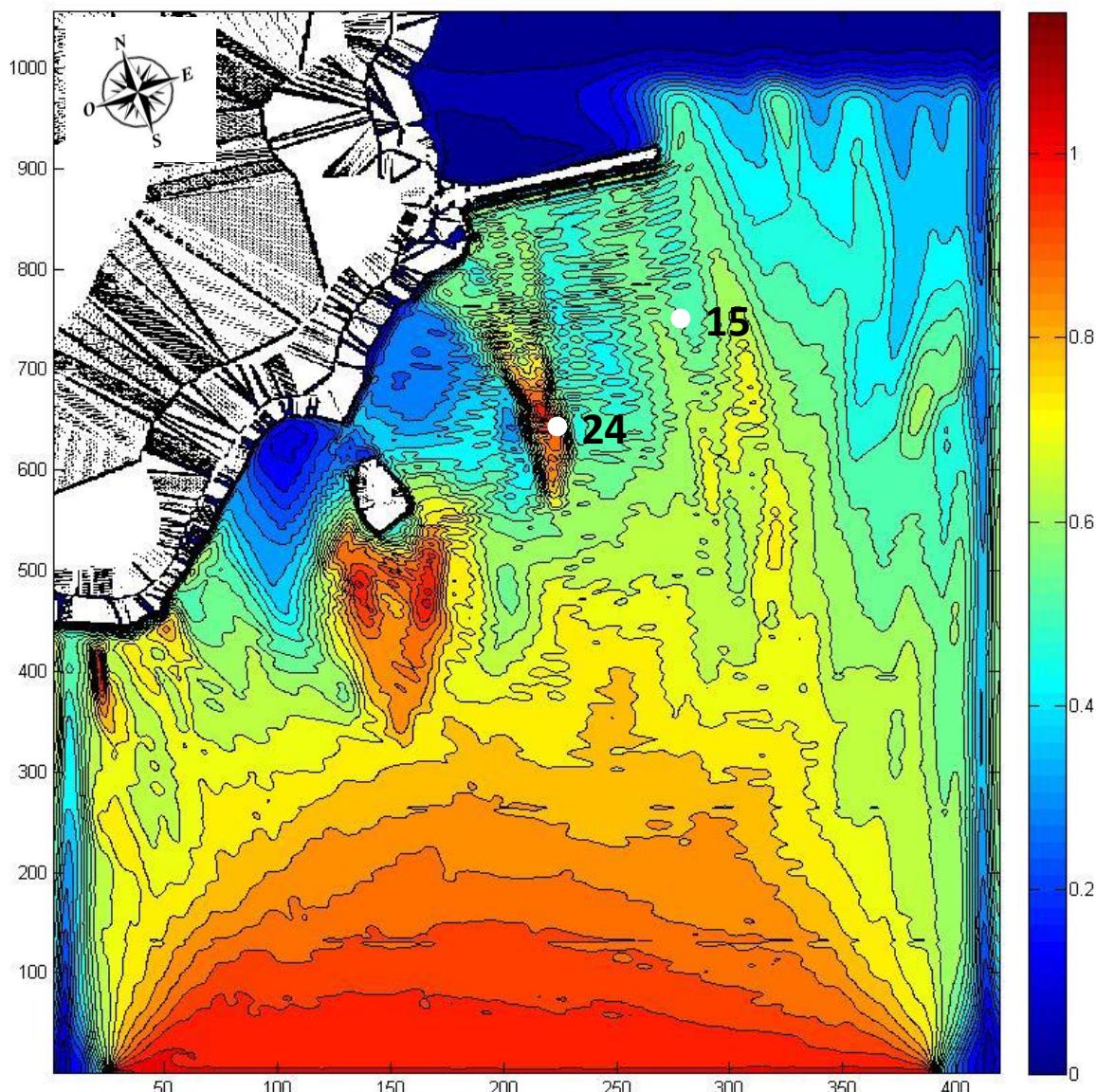


Figure 5.3.1 : Résultat de la hauteur significative pour la simulation H_s=1m T_p=7s Dir=200°N

Analyse des résultats pour les conditions : Hs=1m et Tp=7s

L'amplitude des hauteurs significatives semblent diminuer progressivement au cours de la propagation. Les phénomènes de caustique à l'est et de résonance sur la digue sont nettement moins marqués. Le shoaling à l'est, proche de la caustique est inexistant, en revanche il est présent sur le haut fond « An Ero » avec une augmentation d'environ 50% de la hauteur significative. Compte tenu de leur faible hauteur, les vagues déferlent au plus près de l'île aux vaches.

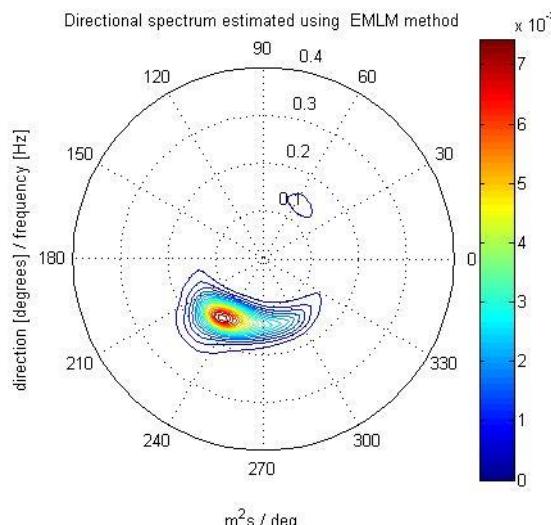


Figure 5.2.2 : Résultat du spectre « 15 » $H_s=0,7\text{m}$ et $P_l=1,7\text{kW/m}$

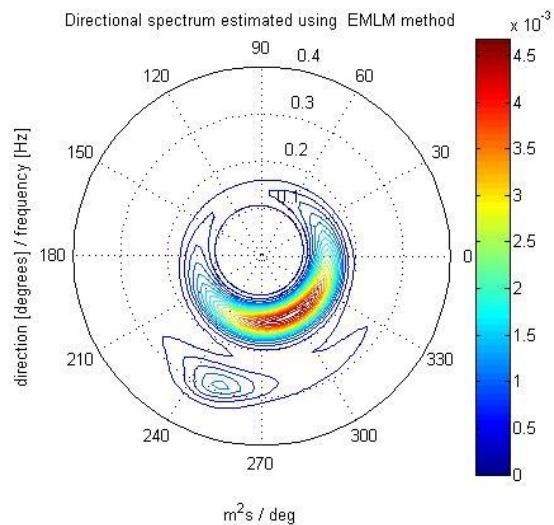


Figure 5.2.3 : Résultat du spectre « 24 » $H_s=0,9\text{m}$ et $P_l=2\text{kW/m}$

Au regard des spectres directionnels des figures 5.2.2 et 5.2.3 :

Le long de la courbe n°1, la puissance linéique est faible ($2,7 \text{ kW/m}$ au point « 11 »). Les spectres montrent une mer très étalée, qui engendre des réflexions sur la digue elles aussi très étalées (45° au point « 17 »).

Le long de la courbe n°3, les vagues n'ont toujours pas déferlées au point « 34 » contrairement aux autres simulations, leur H_s est égale à $0,8\text{m}$.

Résultats de la simulation Hs=2m et Tp=13s

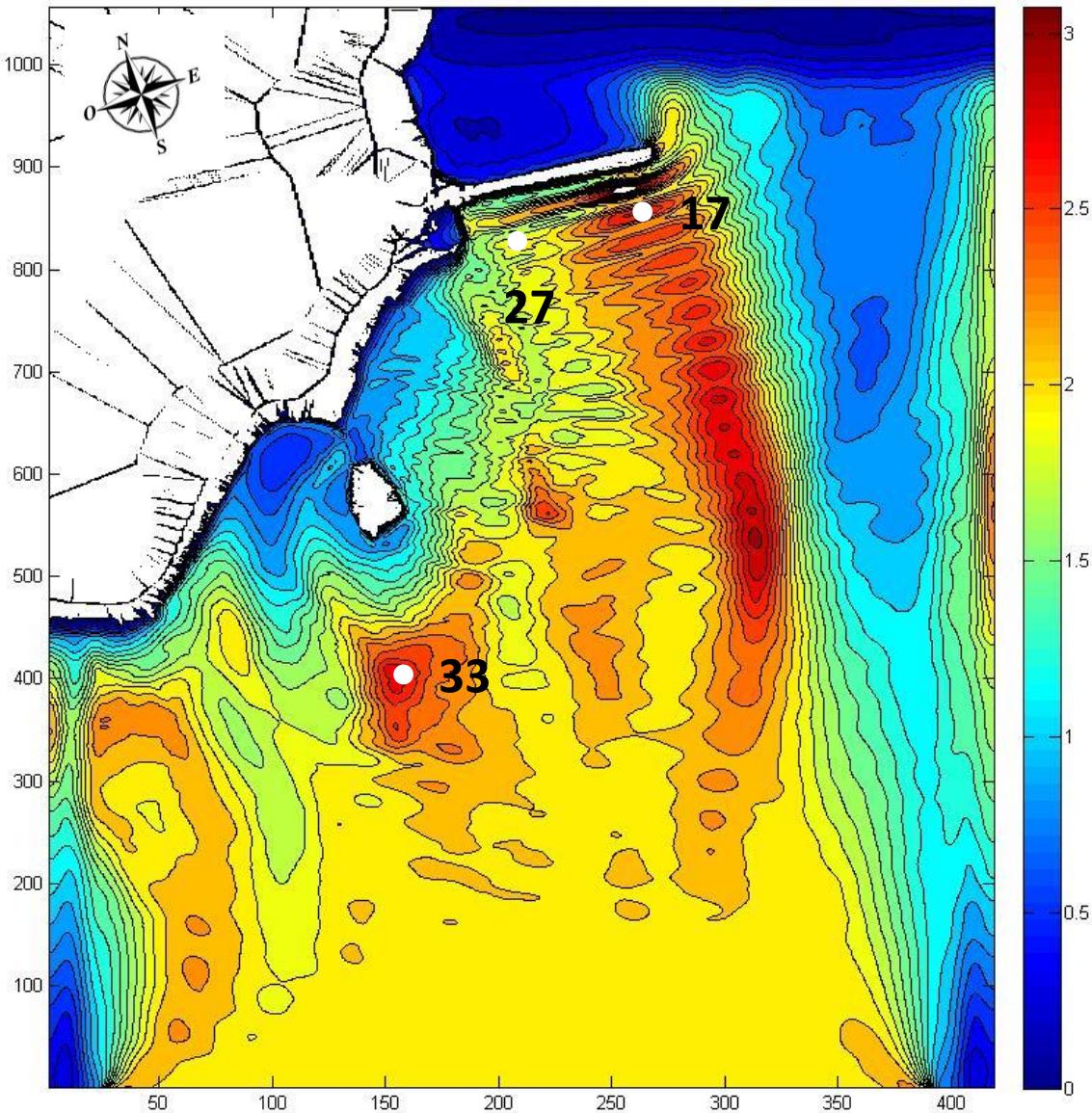


Figure 5.3.4 : Résultat de hauteur significative pour la simulation $Hs=2m$ $Tp=13s$ $Dir=200^\circ N$

Analyse des résultats pour les conditions : $Hs=2m$ et $Tp=13s$

L'amplitude des hauteurs significatives ne diminue pas, elle aurait même tendance à augmenter avec l'effet de shoaling. La hauteur d'eau est suffisante pour que les vagues ne déferlent pas avant d'être réfléchies par la digue. A l'inverse de la simulation précédente, avec un spectre plus énergétique, les phénomènes de résonnance et de caustique sont très marqués. Au niveau de la zone de shoaling à l'ouest, de très fortes amplitudes se forment +50% à +25% par rapport au 2m de hauteur significative du départ.

Au regard des spectres directionnels des figures 5.3.5, 5.3.6, 5.3.7 :

Le long de la courbe n°1, le spectre directionnel « 11 » montre une houle avec un étalement de 30° qui va se resserrer à partir du spectre « 12 » avec un étalement de 20° . La puissance linéique est élevée (supérieur à $19kW/m$) avec un record au point « 12 » de $31,7kW/m$.

Le long de la courbe n°2, les puissances linéiques sont également très fortes. Cependant les directions de propagation sont plus tournées vers la côte, au point « 27 » la direction est de $120^\circ N$.

Le long de la courbe n°3, le point « 33 » montre l'importance des interactions non-linéaires, avec un pic énergétique au niveau d'une fréquence 2 fois supérieure à celle simulée.

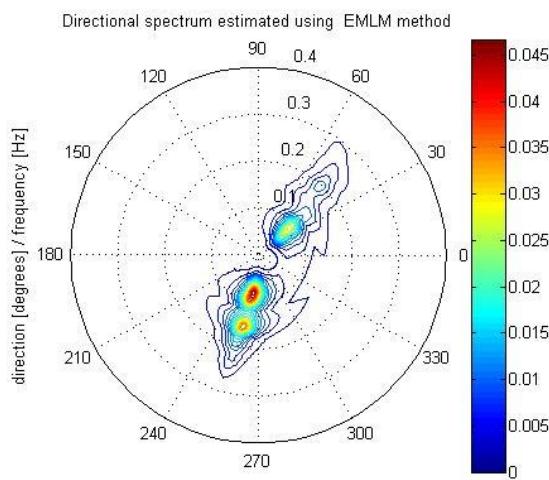


Figure 5.3.5 : Résultat du spectre « 17 » $H_s=2,1m$ et $Pl=19,1kW/m$

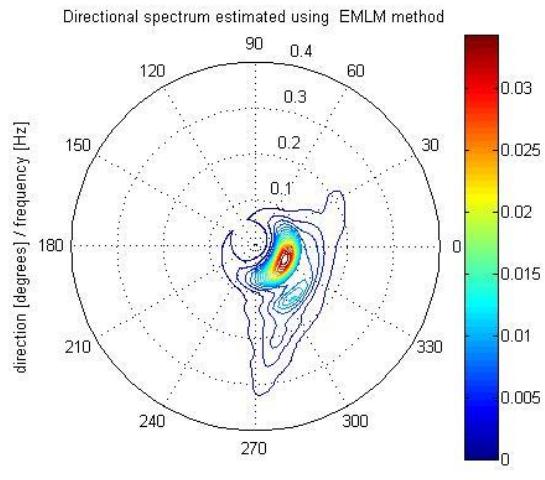


Figure 5.3.6 : Résultat du spectre « 27 » $H_s=2m$ et $Pl=14,5kW/m$

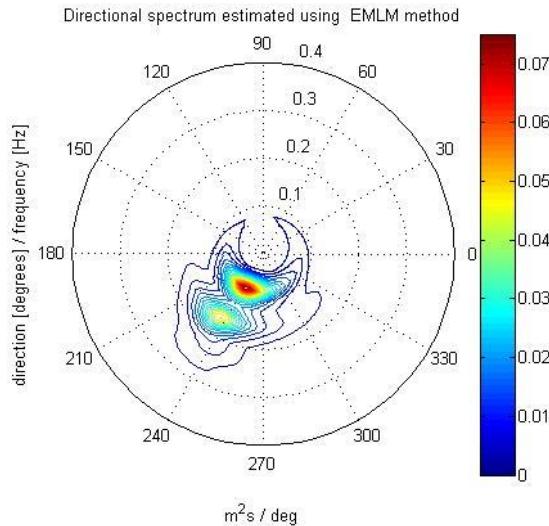


Figure 5.3.7 : Résultat du spectre « 33 » $H_s=2,8m$ et $Pl=30,5kW/m$

	Puissances au point « 15 » (kW/m)	Puissance au point « 24 » (kW/m)
Spectre $H_s=1m T_p=7s$	1,3	2
Spectre $H_s=2m T_p=10,3s$	15	6
Spectre $H_s=2m T_p=13s$	24,5	7,9

Figure 5.3.8 : Comparaison des différences de puissances linéiques en fonction de la position

Conclusion sur l'influence du couple Hs Tp

L'énergie transportée par les vagues dépend du couple H_s, T_p . Une diminution de la hauteur ou de la période engendre des énergies moindres à la côte. Néanmoins malgré une tendance énergétique globale plus faible pour le spectre $H_s=1m$ et $T_p=7s$, l'**observation montre que la répartition de l'énergie joue un rôle**, ainsi par endroits les différences sont atténuées (figure 5.3.8). Au point « 15 » la différence atteint un facteur 20 alors que au point « 24 » la différence n'est seulement que d'un facteur 4.

5.4 Analyse de l'influence des niveaux d'eau

Dans les deux dernières simulations, les deux niveaux d'eau de coefficient 95 sont simulés. Ils sont pris pour un événement de marée de vive eau (6 novembre 2013 à Esquibien). Le premier niveau d'eau est de 0,8m (basse mer) et le deuxième est de 5,25m (pleine mer).

La variation du niveau d'eau devrait modifier les zones de shoaling et de déferlement.

Résultats de la simulation pour un niveau d'eau de basse mer (coefficient 95)

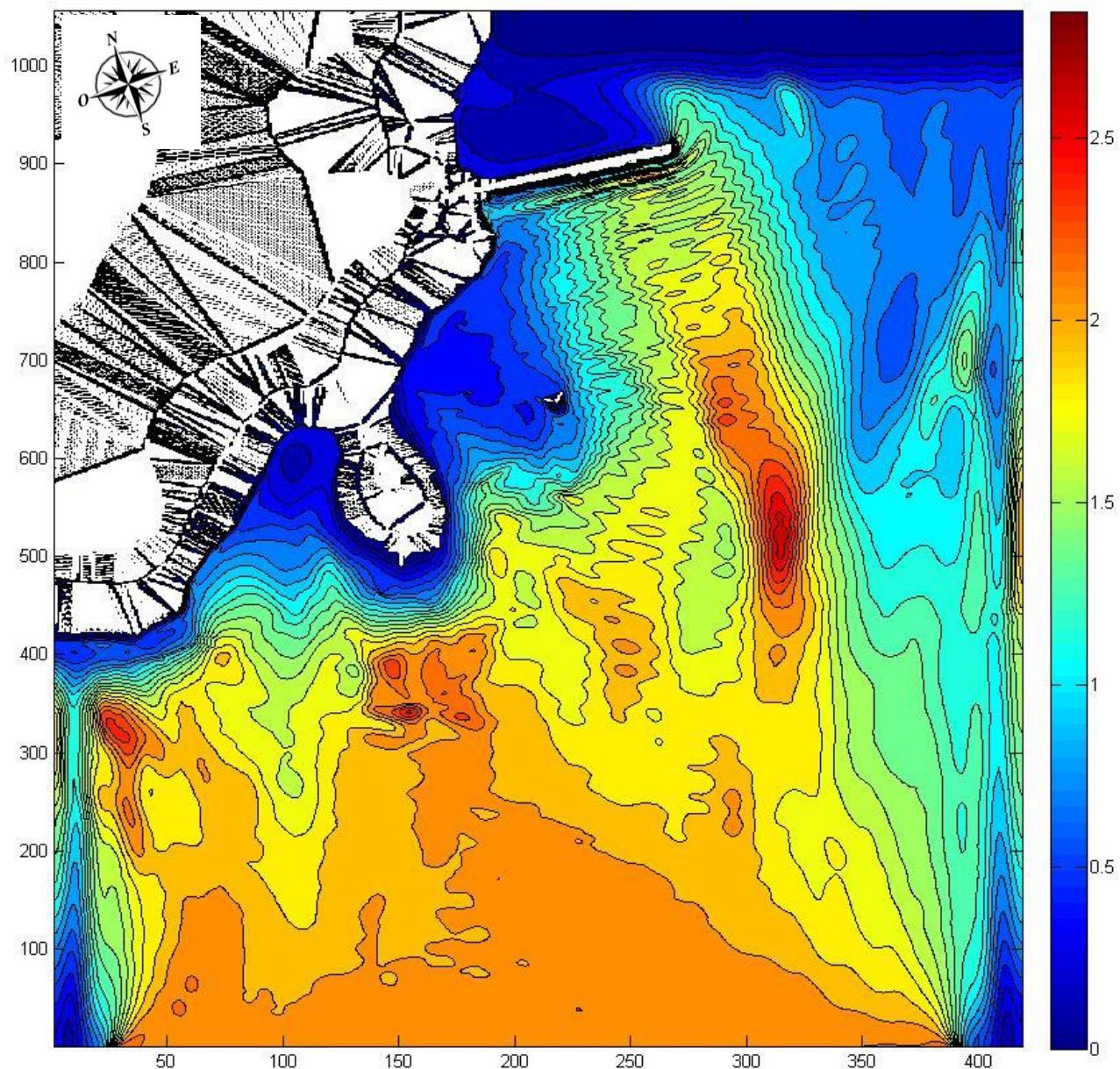


Figure 5.4.1 : Résultat de la hauteur significative pour un niveau d'eau de 0,8m ($H_s=2m$ et $T_p=10,3s$)

Analyse des résultats pour un niveau d'eau de 0,8m (basse mer coefficient 95)

L'île aux vaches précédemment immergée fait surface et protège le côté ouest de la digue. De plus le haut fond de « An Ero » apparaît lui aussi à la surface et fait déferler les vagues. Un couloir de hauteur significative plus élevées se forme depuis le bout de la digue.

Résultats de la simulation pour un niveau d'eau de haute mer (coeffcient 95)

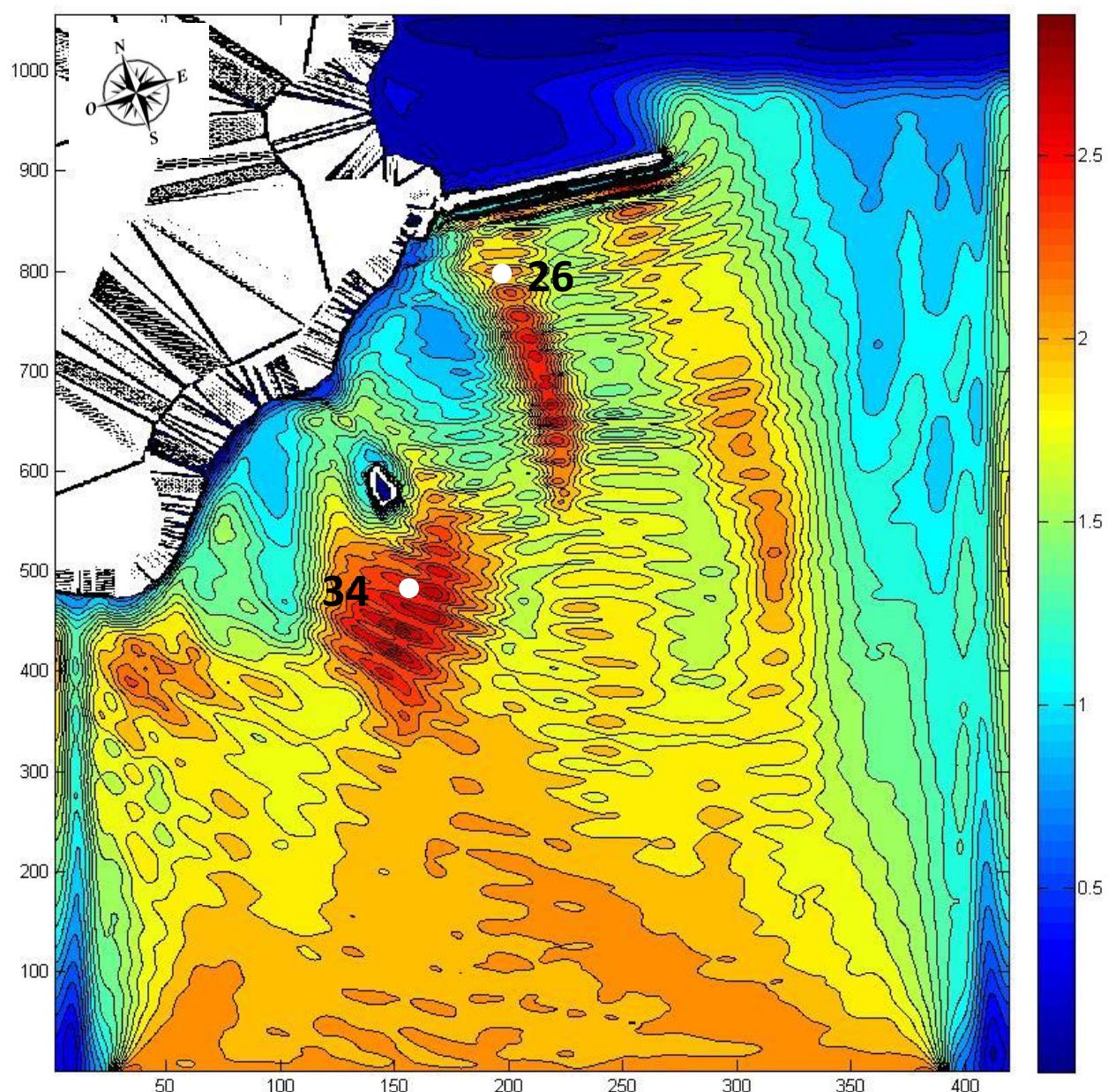


Figure 5.4.2 : Résultat de la hauteur significative pour un niveau d'eau de 5,25m ($H_s=2m$ et $T_p=10,3s$)

Analyse des résultats pour un niveau d'eau de 5,25m (haute mer coefficient 95)

Un niveau d'eau plus important permet aux vagues de rester dans une zone de shoaling, alors qu'elles auraient dû déferler. C'est notamment le cas de la zone devant l'île aux vaches, qui est caractérisée par un important shoaling. L'île aux vaches protège moins la digue, et de surcroit le haut fond « An Ero » est suffisamment profond pour que les vagues ne déferlent pas. Le début de la digue est ainsi beaucoup moins protégé.

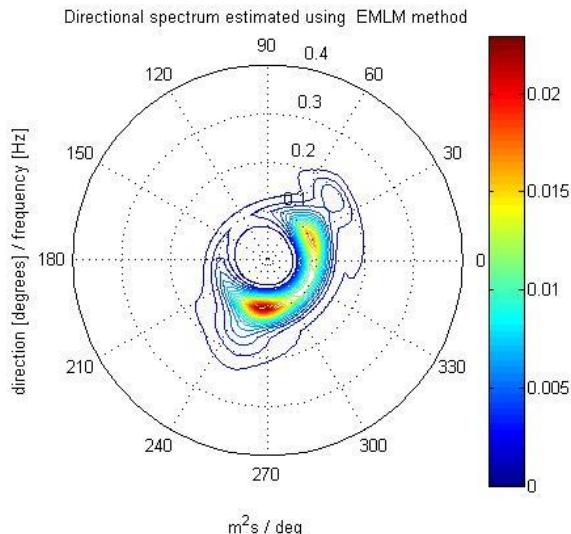


Figure 5.4.3 : Résultat du spectre « 26 »
 $H_s=1,9m$ et $Pl=13,6kW/m$

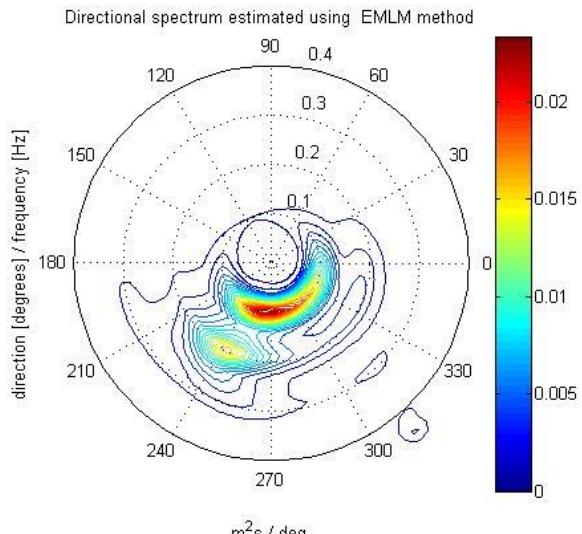


Figure 5.4.4 : Résultat du spectre « 34 »
 $H_s=2,2m$ et $Pl=15,1kW/m$

Au regard des spectres directionnels des figures 5.4.3 et 5.4.4 :

Le long de la courbe n°2, la direction des vagues change peu, en comparaison avec la simulation de référence au point « 26 » la direction des vague est de 130°N, ici elle est de 190°N. La puissance linéique est aussi plus élevée, notamment au point « 24 » elle est de 23,7kW/m (4 fois supérieure à celle de la simulation de référence au même point).

Le long de la courbe n°3, les vagues n'ont toujours pas déferlées au point 34.

Conclusion sur l'influence du niveau d'eau

Le niveau d'eau expose plus ou moins certaines parties de la digue. **A basse mer, l'ile aux vaches et le haut fond « An Ero » jouent des rôles protecteurs.** A pleine mer, **les vagues réfractent moins** du fait d'une plus grande profondeur, **les vagues du 200°N arrivent plein sud sur la digue.** De plus certaines zones ne font plus déferler les vagues, mais deviennent des zones de shoaling. **Ainsi à la pleine mer, la digue est beaucoup plus vulnérable aux houles.**

6. Conclusion sur la transformation des vagues à l'approche de la digue d'Esquibien

L'obliquité des vagues varie de façon significative le long de la digue d'Esquibien. Plus la hauteur des vagues est importante face à la profondeur, et plus elles se réfractent en direction de la côte. **Les 100 mètres à l'extrémité de la digue sont les plus énergétiques**, à cet endroit les vagues arrivent de façons moins obliques (en moyenne le potentiel au début de la digue est 3 fois inférieur).

L'ile aux vaches est une zone de dissipation majeure, quelque soit la simulation le spectre directionnel « 33 » est l'un des points les plus énergétique étudié.

Le haut fond « An Ero » créé une zone de potentiel modéré au nord, selon le niveau d'eau et la hauteur des vagues, il crée une zone de déferlement, et une zone de shoaling plus ou moins marquée.

A l'est de la digue, pour des profondeurs plus importantes, **le phénomène de caustique rend le potentiel énergétique plus faible**. Plus le niveau d'eau est bas, et les houles sont énergétiques en provenance du sud, plus le phénomène de caustique est amplifié.

En définitif, l'étude a permis de caractériser le site d'Esquibien comme un site de fort potentiel en période hivernale.

Un des enjeux majeurs à l'implantation d'un démonstrateur est la survivabilité du récupérateur d'énergie. Le système installé devra résister à des vagues de provenances variées, capables de franchir la digue. **En fonction de sa résistance aux événements extrêmes, un système pourra être plus ou moins exposé.**



Figure 6.1 : Franchissement de la digue d'Esquibien par une vague à marée haute (photo de M. Arzel)

Pour approfondir le travail réalisé, **une matrice de puissance de la ressource énergétique devra être donnée pour les endroits clés du site d'Esquibien**. Elle se basera sur une analyse statistique fine des différents scénarios susceptibles de se produire en limite entrante du modèle.

Chaque scénario sera pondéré en fonction de sa probabilité d'occurrence, puis simulé avec le code de calcul SWASH. Ainsi le potentiel énergétique de chaque état de mer alimentera une matrice de puissance. Pour couvrir la large plage des scénarios, une cinquantaine de simulations sera nécessaire, ce qui demandera un travail d'optimisation du modèle numérique en place.

Chapitre 4 - Etude économique d'un projet houlomoteur

La clé d'un développement rapide est une vision claire à long terme. Pour cela, il est nécessaire de qualifier la rentabilité financière des récupérateurs d'énergie des vagues.

Cette étude économique s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche du thème O4-2 intitulé « Dimensionnement de l'ouvrage et étude économique » du projet EMACOP. L'objectif de l'action est d'aboutir à un prix du kWh, à partir de l'étude des coûts d'aménagements et de la production électrique d'un récupérateur d'énergie, dimensionné de façon réaliste.

Les projets houlomoteurs n'étant pas encore au stade commercial, il est difficile de récupérer des données représentatives. En effet, les coûts sont pour l'instant très élevés de par leur caractère novateur.

L'étude a pour vocation d'éclairer le lecteur sur les principales thématiques qui construisent un projet houlomoteur. Une étude plus poussée sera nécessaire pour évaluer un prix de revente de l'électricité produite.

1. Concepts fondateurs de l'étude

1.1 Les Références de l'étude

Cette partie prend appui sur une suite de documents références. La source principale de cette étude provient du projet EquiMar (<http://www.equimar.org/>). D'autres documents ont servi comme appoint pour vérifier les informations : EPRI « *Economic assessment Methodology for Offshore Wave Power Plants* » (novembre 2004), le rapport interministériel sur les énergies marines renouvelables (2013), Carbon TRUST « *Cost estimation methodology* » (mai 2006) et « *Accelerating marine energy* » (juillet 2011), SI OCEAN avec « *Ocean energy : State of the art* » (2013) et « *Ocean energy : cost of energy and cost reduction opportunities* » (mai 2013).

1.2 Les indicateurs économique

La Valeur Actuelle Nette (VAN)

La valeur Actuelle Nette (VAN) fait appel à deux concepts connus des investisseurs, le CAPEX et l'OPEX. Le premier correspond à l'investissement premier, c'est un coût de départ qui devra être amorti au cours du temps. L'OPEX quant à lui est le coût attribué au fonctionnement, c'est-à-dire aux dépenses d'exploitation de la centrale.

Pour évaluer la rentabilité d'un projet, les investisseurs ont besoin d'indicateurs, l'un d'eux est la Valeur Actuelle Nette (VAN). Elle permet d'appréhender **la rentabilité d'un projet**. Le calcul de la VAN convertit tous les futurs flux monétaires prévus d'un projet en leur « valeur actuelle », c'est-à-dire leur valeur

maintenant, au début du projet. Par exemple : 1€ placé à la banque aujourd’hui vaudra plus de 1€ demain. Pour tenir compte de cela, une réduction est appliquée sur la valeur de l’argent dépensé et gagné dans le futur.

Ainsi toutes les valeurs actuelles pour chaque année sont additionnées pour caractériser la valeur générale du projet, autrement dit, la rentabilité du projet.

$$VAN = \sum_{n=1}^N \frac{FT_n}{(1+r)^n} - I$$

Avec :

- **FT_p** le flux de trésorerie, ici la différence (*Revenus – OPEX*),
- **n** représente l’année en cours et **N** le nombre total d’années,
- **I** l’investissement initial à l’année 0 (*CAPEX*),
- **r** le taux d’actualisation qui permet de ramener sur une même base des flux financiers qui se produisent à des dates différentes.

Le taux d’actualisation représente le risque de l’investissement sur le projet, il varie selon les industries, on peut considérer un taux de 15% pour une technologie peu mature, et un taux de 8% pour une technologie déjà bien établie.

D’autre part le Taux de Rentabilité Interne (TRI) est un second indicateur lié au premier. Il correspond à un taux d’actualisation qui annule la valeur actuelle nette. Un projet ne sera donc retenu que si son TRI prévisible est suffisamment supérieur au taux bancaire, pour tenir compte notamment de la prime de risque propre au type de projet.

Le coût de l’énergie (COE)

Le coût de l’électricité (Euro/kWh) est un indicateur permettant d’inclure le capital initial, le taux d’actualisation et les coûts d’exploitation par rapport à l’énergie fournie sur le réseau.

Le COE (Cost of Energy) est une bonne gauge pour évaluer la **compétitivité d’un projet**, il s’applique entre technologies du même ressort mais aussi avec d’autres technologies conventionnelles. De façon simple en prenant sur la base d’une durée de vie de 20 ans :

$$COE = \frac{\text{Valeur actuelle (coût)}}{\text{Valeur actuelle(production)}}$$

La valeur actuelle du coût qui est divisée par la valeur actuelle de la production d’électricité.

Les enjeux de la valeur actuelle du coût seront décortiqués dans la suite de ce rapport, ceux-ci dépendent en autre de la production d’électricité, d'où l'importance d'une évaluation correcte de cette production. Cette valeur est la combinaison de plusieurs analyses :

- La production du système en réponse à différents états de mer,
- Le nombre de fois qu’un état de mer se répète au cours d’une année,
- Les pertes électriques lors de la transmission de l’énergie au réseau,
- La disponibilité du système à produire par rapport aux intempéries ou aux maintenances au cours de l’année.

De plus, une attention toute particulière doit être portée aux limites présentes dans le coût de l'énergie. En effet, dans la mesure où cette valeur sert de comparatif, il faut définir les limites des dépenses à intégrer dans le calcul :

- Les adaptations du réseau
- La recherche et le développement
- Les taxes
- Les études d'impact environnementales
- Etc...

Enfin, un prix vendu du kWh doit être fixé pour avoir des indicateurs économiques réalistes.

1.3 L'estimation des incertitudes

C'est seulement avec l'expérience accumulée dans le développement et la maintenance des technologies marines, qu'une bonne approximation du coût de l'énergie sera donnée. La plage d'incertitude est un indicateur de fiabilité, une petite bande d'incertitude reflète un prix finement cadré, alors qu'une bande plus large correspond à un prix qu'il faut considérer avec des risques. Les incertitudes permettent de voir les domaines qu'il faut approfondir pour arriver à une meilleure estimation. Dans certains cas, les incertitudes existeront toujours, notamment dans la prédiction des états de mer. C'est pourquoi l'investisseur doit parfois gérer cela en termes de risques du projet, comme il pourrait traiter les risques du marché d'autres produits.

Combiner estimations et incertitudes peut se révéler dangereux, dans la mesure où, si l'un des paramètres réduit le coût de l'énergie (forte excitation de la mer), il peut aussi l'augmenter d'un autre côté (plus de maintenance). Il faut estimer l'incertitude sur chaque valeur, mais aussi évaluer les incertitudes combinées. Des méthodes comme l'analyse Monte Carlo permettent de telles analyses.

1.5 La synthèse de la démarche

Le graphe suivant permet de synthétiser notre démarche. D'un côté, on évalue les rentrées d'argent chaque année (Revenue –OPEX), de l'autre les dépenses qui ne sont réalisées qu'une seule fois dans la vie du projet (CAPEX). Le tout permet de déterminer la valeur présente nette à un taux près.

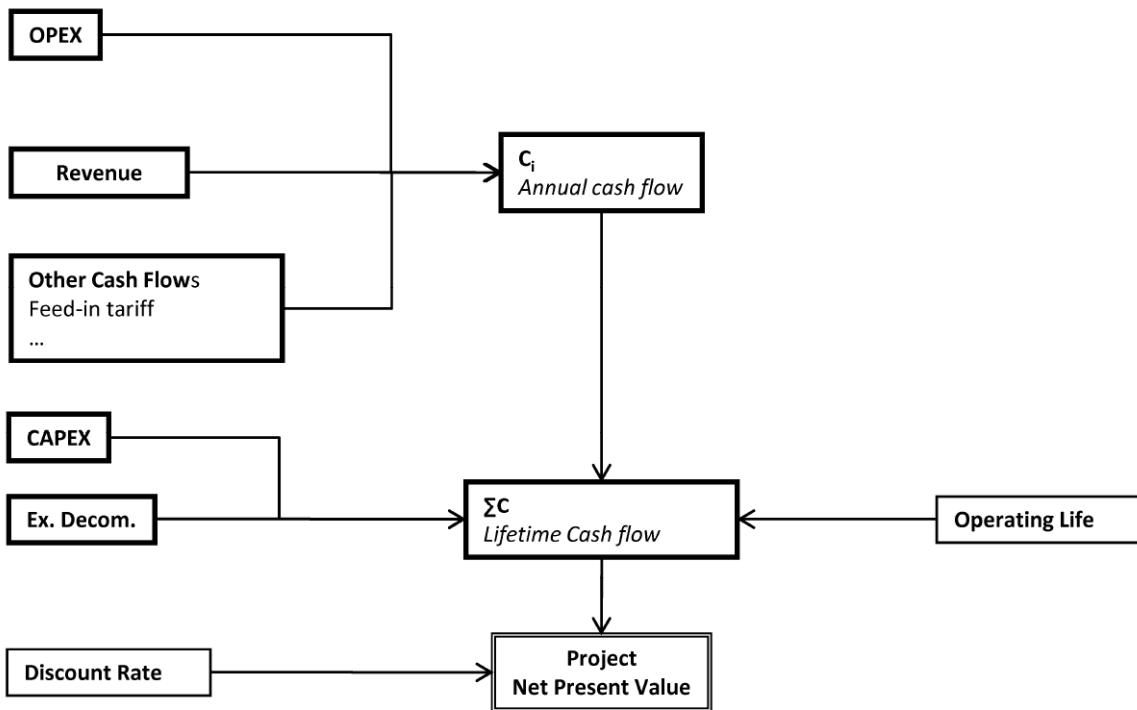


Figure 1.5.1 : Synthèse de la démarche tirée du rapport EquiMar D7

2. Composition d'un projet Houlomoteur

2.1. Les systèmes de récupération

2.1.1 Description

Le système est le cœur du projet. Dans le domaine houlomoteur, il existe plus d'une centaine de concepts qui se développent dans une trentaine de pays différents (SI OCEAN, 2012). Comme pour tout système (machine), on peut décomposer son coût en fonction de plusieurs paramètres :

- la structure (métallique, bétonnée, ...),
- le transfert mécanique (turbine, piston, ...),
- l'équipement électrique (générateur, transformateur, convertisseur),
- la fabrication,
- le transport (voie routière ou maritime),
- le prix de l'ingénierie pour la conception.

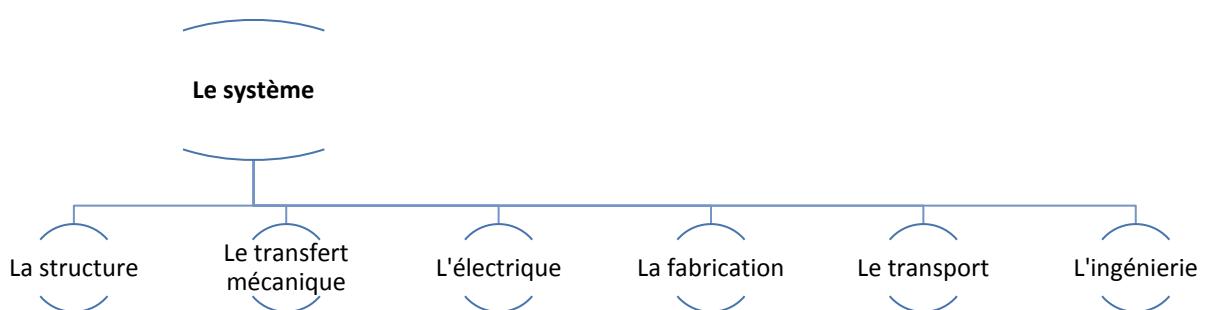


Figure 2.1.1.1 : Décomposition du coût d'un système de récupération

Le centre européen des énergies marines (EMEC) donne une classification et une courte description des différents systèmes houlomoteur (<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>) :

- A. Attenuator (*Chaîne flottante*)
- B. Point absorber (*Colonne à oscillation verticale*)
- C. Oscillating wave surge converter (*Paroi oscillante immergée*)
- D. Oscillating water column (*Colonne d'eau oscillante*)
- E. Overtopping (*Piège à déferlement*)
- F. Pressure differential (*Capteur de pression immergé*)
- G. Bulge wave
- H. Rotating mass
- I. Other (*autre*)

(Traduction française tirées du site de France énergie marine <http://www.france-energies-marines.org/>)

Au sein de la classification du EMEC, le rapport SI OCEAN « Ocean Energy :State of the Art » (2012) propose la sélection d'un nombre important de types de systèmes :

Type de système	Systèmes
Attenuator	Pelamis, Dexa-Wave, AlbaTERN
Point absorber	Ocean PowerTechnologies, WaveStar, Seatricity, CETO Wave Energy Technology, SeaRaser SeaNergy
Oscillating wave surge converter	Aquamarine Power, WaveRoller, Langlee Wave Power
Oscillating water column	Voith Hydro WaveGen, WavEC Pico Plant, Oceanlinx, Ocean Energy
Overtopping	Wave Dragon, Waveplane
Pressure differential	AWS Ocean Energy
Bulge wave	Wello Oy
Rotating mass	Checkmate Seaenergy

2.1.2 Le coût

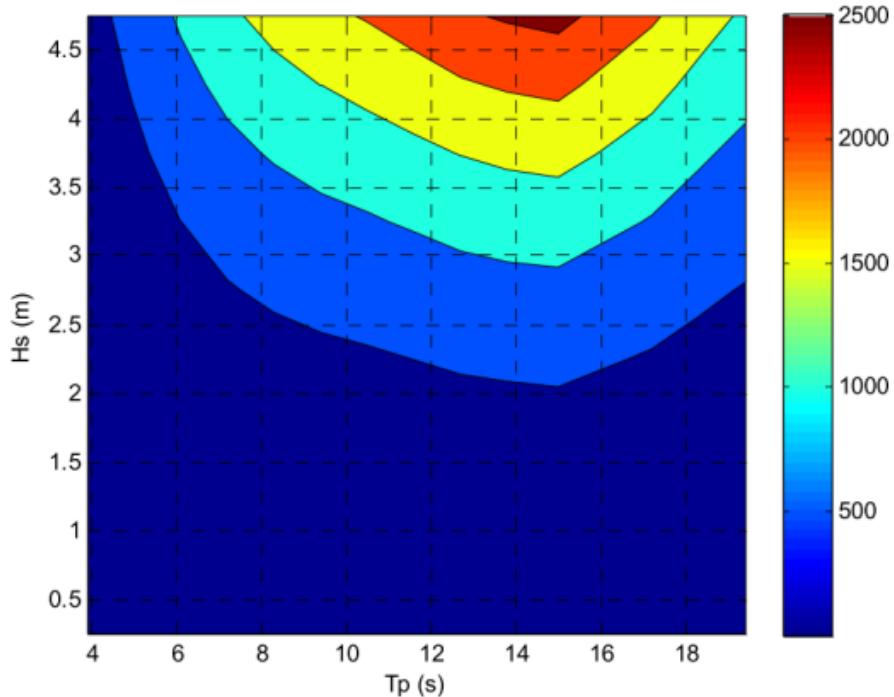
Le prix du système est fortement dépendant du type de récupérateur. Le prix d'un système doit être vu dans un coût globale incluant l'entretien et l'installation du dispositif. Une chaîne de valeur pour le houlomoteur est donnée en annexe du rapport interministériel de 2013 sur les énergies marines. Cette chaîne est reprise par l'ADEME et est fournis par l'américain NREL (2012).

- **Absorbeur hydrodynamique** (structure) : 34 % soit 2361 €/kW
- **Convertisseurs** (transfert mécanique) : 28% soit 1947 €/kW
- **Contrôle** (électrique) : 2% soit 139 €/kW
- **Fondation/ ancrage** : 8% soit 556€/kW
- **Ingénierie, services de construction** : 10% soit 695 €/kW
- **Coût propriétaire** : 18% 1248 €/kW

On obtient un coût total de 6946 €/kW, soit environ 7 M€ le mégawatt (contre 1,6 M€ pour l'éolien Onshore : Avis de l'ADEME – Eolien (2011)). Cependant le coût total est appelé à baisser significativement par rapport aux projections 2015, le rapport estime -25% en 2020 et -50% en 2030.

2.1.3 La performance d'un système

Il est important de connaître la réponse d'un système en fonction d'un état de mer correspondant. La matrice de puissance d'un dispositif permettra d'estimer l'énergie produite pendant sa durée de fonctionnement.



2.2 Le génie civil

Du fait de la diversité des systèmes houlomoteurs, le génie civil peut être extrêmement différent d'un projet à un autre. La question de l'ancre du dispositif est cependant l'une des interrogations la plus importante.

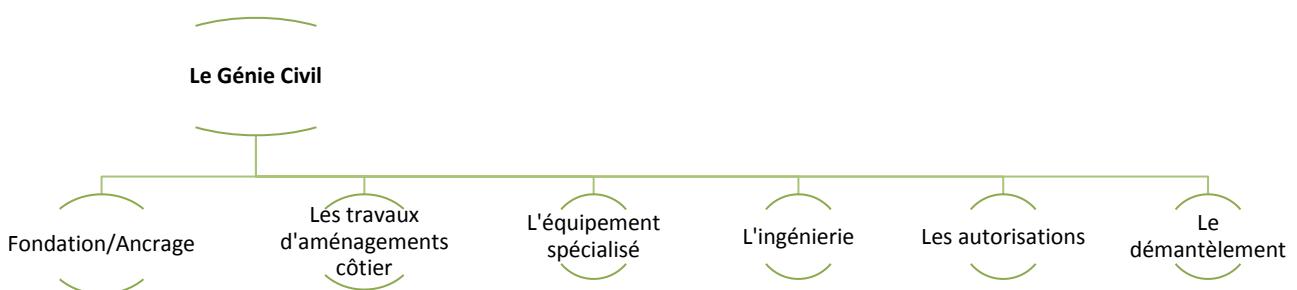


Figure 2.2.1 : Décomposition du coût des travaux de génie civil

Le rapport EquiMar D7.3.2 « Consideration of the cost implications for mooring MEC devices » de 2009 apporte des éclairages sur les manières d'ancre un système récupérateur. Le rapport aborde les différents types de raccordements via des câbles, des fibres synthétiques ou des chaînes, ainsi que les différentes fondations où ancrages qui peuvent être utilisées. Le rapport n'aborde cependant pas les questions de coûts très variables.

Dans le cadre de travaux de rénovation sur une digue, il est possible de creuser les fondations d'une structure qui viendrait se monter sur la digue (figure 2.2).

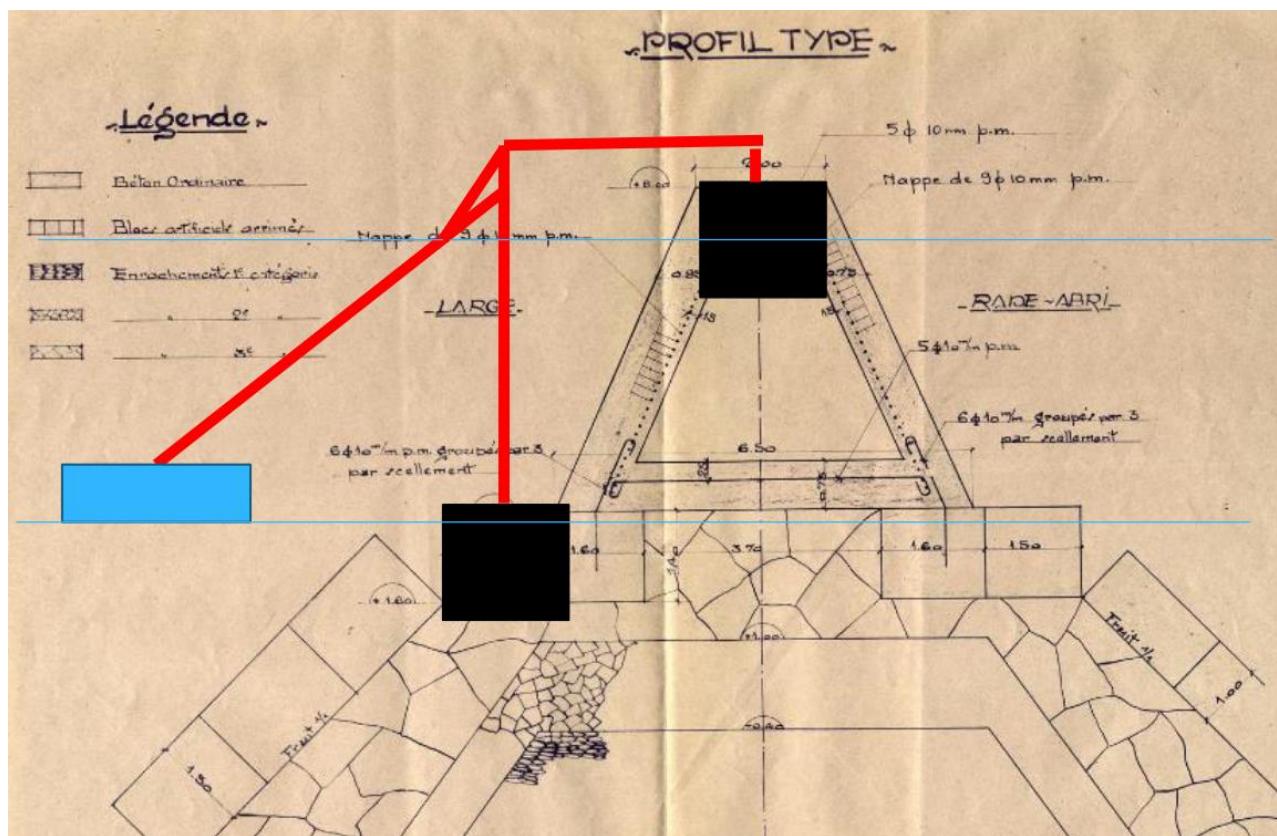


Figure 2.2.2 : Etude d'implantation d'un dispositif houlomoteur à Esquibien par L.Delaby, I.C. Ingénieurs Conseils (novembre 2013)

Dans le cas d'une structure sur digue, si l'aménagement n'est pas trop coûteux, il est possible que le coût total diminue, dans la mesure où le raccordement serait plus facile, et que la maintenance pourrait s'effectuer sans moyen nautique.

2.3 Le raccordement au réseau

Le raccordement est un très gros poste de dépense, notamment si le projet est distant de la côte. La force des projets côtiers réside dans le faible coût de raccordement. Le schéma ci-dessous représente une solution viable proposée par le rapport EquiMar 5.1 (2009), pour le raccordement d'une ferme commerciale. Dans de cas de fermes « pré » commerciales de plus petite échelle, la station offshore pourrait être remplacée par un simple hub sous-marin.

De gauche à droite le schéma ci-dessous représente :

- un courant alternatif produit par des récupérateurs,
 - un système de convertisseurs assurant le réglage de la fréquence,
 - un transformateur de petite taille (11kV -33kV),
 - une station offshore : équipée de protections, d'un hub pour connecter les systèmes, et d'un transformateur pour éléver la tension et limiter les pertes du transport à la côte,
 - Une station onshore : équipée de protections, d'un transformateur et d'une capacité pour adapter la tension au réseau.

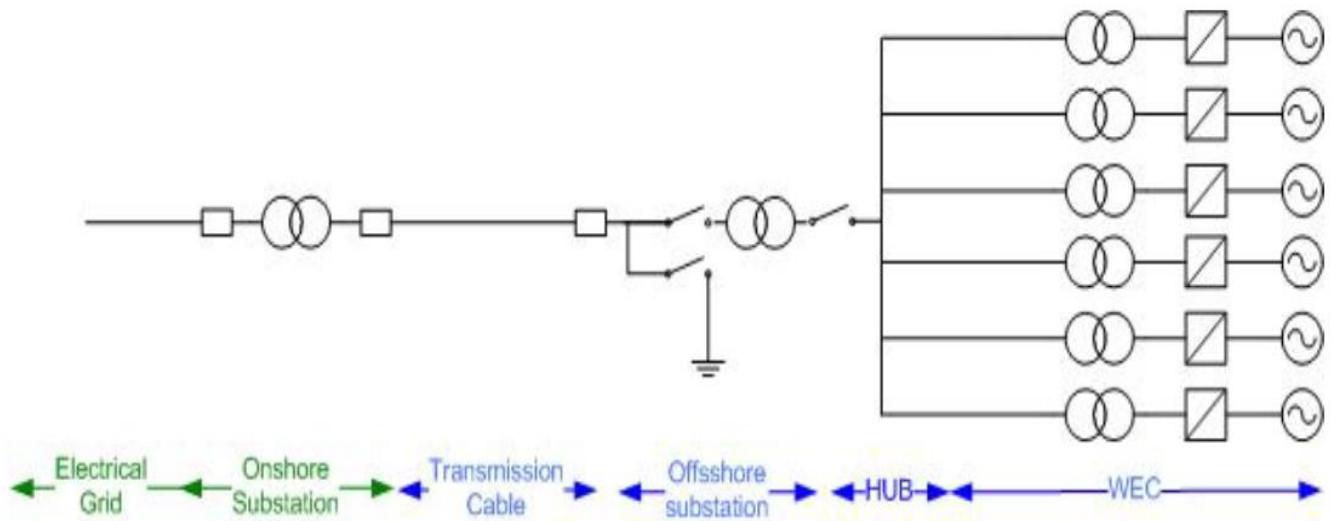


Figure 2.3.1 : Schéma électrique du raccordement d'une ferme commerciale Equimar 5.1 (2009)

3.1 – Câblage du récupérateur

Le raccordement des récupérateurs doit se faire avec des connecteurs facilement manipulables pour alléger les opérations de maintenances.

Le choix doit être fait entre des connecteurs waterproof plus chers, et des connecteurs « secs » qui demandent plus de manipulation. Le rapport Equimar 5.1 (2009) met en avant la société Hydro Group Plc. qui propose des solutions de raccordement (www.hydrogroupplc.com).

3.2 – Poste de transformation et adaptation du réseau

Le tableau tiré de la mission interministérielle sur les énergies marines renouvelables de 2013 résume les grandeurs de coût, de puissance et de délai misent en jeu. Les coûts concernent le poste de transformation et les adaptations du réseau en amont. On notera que les délais de 6 à 7 ans comportent 4 à 5 ans de démarches administratives et seulement 2 ans de travaux.

Terminologie usuelle	Moyenne tension	Haute tension	Très haute tension		
Termes techniques	HTA	HTB1	HTB2	HTB3 HVAC	HTB3 HVDC
Tension	1 à 50 kV	63 kV 90 kV	150 kV 225 kV	400 kV (alternatif)	400kV (continue)
Puissance adaptée	17 MW à 100MW	150 MW	600 MW	Supérieur à 500MW	Supérieur à 1.5GW
Acteur	ERDF	RTE			
Délai	2 ans	3-5 ans	6-7 ans	10 ans	Au moins 8 ans
Exemple de coûts (très variable)	70 M€ au Fromveur pour 60 MW	5M€ au Raz Barfleur pour 100 MW (poste collecteur) 6-10 M€ au Raz Blanchard pour 80 MW (poste)	110 – 130 M€ au large du Cotentin 180 M€ pour une ligne aérienne portant à 3.4 GW la capacité du Cotentin	150-200 M€ par bloc de 500 MW en Offshore Au large du Cotentin : 140-190 M€ pour 500 MW 190-270 M€ pour 750 MW 220-330 M€ pour 1000 MW	Au large du Cotentin 600-800 M€ selon le volume

Figure 2.3.2 : Récapitulatif des différents raccordements au réseau

La vision du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

La prospective de RTE sur l'accueil de la production hydrolienne de janvier 2013, confirme le tableau ci-dessus. Les stratégies de raccordements vont varier en fonction de la puissance et de la localisation de la production à raccorder. Par exemple, pour une puissance relativement faible, le projet du Fromveur sera beaucoup plus couteux, pour couvrir les travaux d'amélioration du réseau de l'île d'Ouessant à la côte.

Il est possible d'atteindre une ferme d'une puissance de 150MW avec des câbles de 90 kV (HTB1). Mais selon le rapport RTE, pour des fermes commerciales d'une puissance supérieur à 100MW, il paraît plus intéressant d'aménager une station de transformation en mer raccordée en 225 kV, afin d'éviter les nombreux points d'atterrages engendrées par des câbles HTA.

Avec une station en mer et un raccordement par une ligne 225 kV, la taille optimale d'une ferme correspond à la capacité du câble de 250MW. En installant plusieurs plates-formes, on irait de 100M€ pour 250MW à 300M€ pour 1GW.

Au-delà d'un volume de 500MW, des études pour l'installation d'un câble 400kV alternatif seront étudiées. Enfin pour une puissance supérieure à 1,5GW l'utilisation d'un câble 400kV en courant continu pourra être envisagée, mais nécessitera une station de conversion en mer qui pourra avoir un coût supérieur à 600M€.

D'un point de vue spatial, compte tenu de la rareté des points de raccordement, l'enjeu pour RTE est de réaliser le raccordement des fermes expérimentales, tout en anticipant le déploiement ultérieur des fermes commerciales.

Concernant les modalités de financement et de partage des responsabilités : chaque producteur sera amené à financer son raccordement aux réseaux publics dans le cadre des règles actuellement, incluant l'éventuel transformation HTA/HTB et la station en mer. RTE se chargera de la réalisation et de la maintenance du raccordement de la plate-forme en mer au réseau terrestre. RTE préconise de mutualiser les coûts entre producteur. De plus RTE émet l'idée d'une autre approche de type « appel d'offres ». Cette approche permettrait de répartir les risques entre les différents acteurs.

Les préconisations du Syndicat des Energie Renouvelables (SER)

Le rapport du Syndicat des Energies Renouvelables « Accélérer le développement de l'éolien en mer et des autres énergies marines renouvelables » (2013) met en avant quelques propositions pour faciliter le raccordement des parcs. La SER met en garde contre les problèmes rencontrés en Ecosse liés à la faiblesse du réseau électrique malgré un pôle énergie marine développé.

Les propositions notoires :

1. L'Etat doit définir une feuille de route nationale de déploiement des EMR en termes de volume, localisation et calendrier.
2. L'autorisation de passage en espaces remarquables doit être étendue aux canalisations privées.
3. Les procédures de raccordement et l'obtention de la convention d'utilisation du Domaine Public Maritime (DPM) pourraient être parallélisées, en basant la demande de proposition technique et financière auprès d'ERDF sur le récépissé de demande de convention sur le DPM et non la convention elle-même.

Si ces résolutions sont suivies, on peut espérer une baisse des coûts de raccordement.

2.4 La maintenance et les réparations

L'OPEX est dominé par deux interventions distinctes, la maintenance et les réparations. Ces deux événements doivent être traités de manière différente. La maintenance est une tâche planifiée alors que les réparations sont inopinées. Leurs enjeux sont décrits dans le schéma suivant.

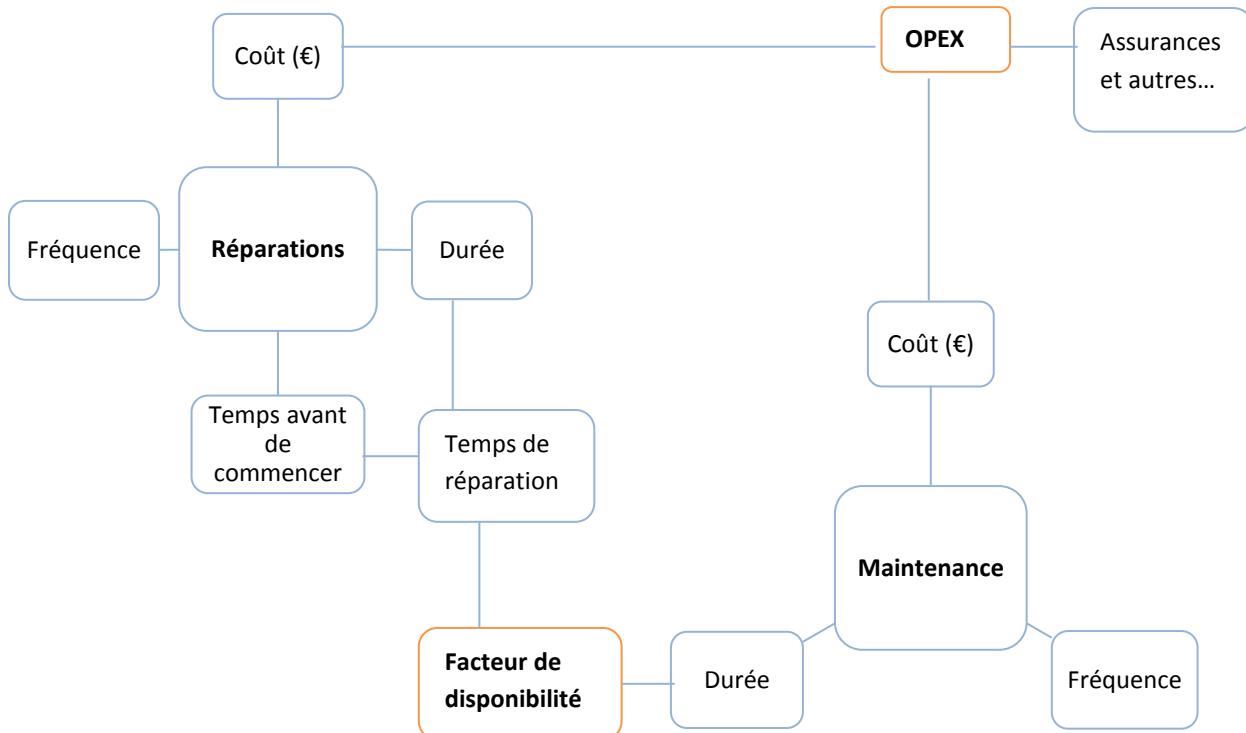


Figure 2.4.1 : Organisation des dépenses de fonctionnement

Pour la réparation ou la maintenance, l'opération se caractérise par un coût, une durée et une fréquence d'apparition. La spécificité des réparations est l'ajout d'un délai avant le début des opérations. Ainsi les coûts permettent d'obtenir la valeur de l'OPEX auquel il faudra encore ajouter certaines dépenses supplémentaire de location, assurances, etc... De plus ce schéma met en évidence un facteur de disponibilité qui va agir sur le temps de production.

Les opérations de maintenances devront disposer de moyens nautiques spéciaux permettant de stabiliser et de libérer le dispositif de son ancrage. Les maintenances devront prendre en compte la variabilité des conditions météo.

L'américain NREL(2012) propose une estimation des dépenses d'entretiens. Les coûts fixes d'opération et de maintenance prévus en 2015 sont de 474€/kW soit 5% du budget d'investissement (discuté dans la partie système). Les coûts d'opération devraient baisser dans les proportions de ceux de l'investissement premier (-25% en 2020 et -50% en 2030).

2.5 Les revenus

Le revenu est éminemment dépendant de la ressource primaire mais aussi de ce que peut en retirer le système. Il nous faut donc prendre en compte le rendement ainsi qu'un facteur de disponibilité de la machine. Enfin le prix de vente est l'élément clé qui va fixer les bénéfices pour chaque kWh fournis au réseau.

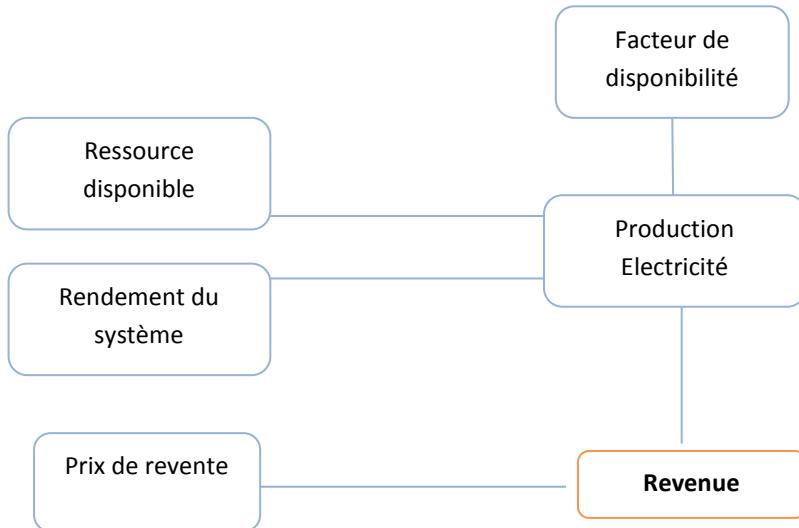


Figure 2.5.1 : Provenance des revenus de la production

L'arrêté du 1^{er} mars 2007 fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique, il prévoit un tarif d'achat de 150€/MWh, actualisé à 163€/MWh en 2012.

D'autre part, Le Code de l'Energie stipule dans son article L- 314 – 1 qu'il est possible de prévoir un contrat d'achat spécifique pour certaines installations de production d'électricité jugées prioritaires (énergies renouvelables). Un tarif d'achat plus élevé donnerait de la visibilité aux investisseurs, et donc un signal économique clair. En revanche, cela pourrait provoquer une augmentation de la CSPE (Contribution au service public de l'électricité).

Les projets devront faire appel à des aides financières, parmi elles, le programme européen NER300, les AMI de l'ADEME.

Une politique d'appel d'offre pourrait également être mise en place par la CRE (Commission de régulation de l'énergie) mais cela nécessiterait de bien définir les limites de l'appel d'offre.

3. Vision d'ensemble sur la démarche économique

Le coût d'un projet houleuse est hautement variable. Le type de systèmes installés, le nombre de systèmes, la distance à la côte, l'exposition aux houles sont autant de variables qui influent sur le coût final du projet. Le tableau et le graphique suivant (Carbon Trust, 2006) récapitulent les différents postes de dépenses (traduit de l'anglais).

Postes de dépenses	Principaux facteurs
Coûts d'investissement <ul style="list-style-type: none"> · Coût de la structure · Coût du système mécanique et électrique · Ancrage · L'installation du système · Connexion au réseau · La gestion du projet 	<i>Les matériaux</i> <i>Le dimensionnement aux conditions extrêmes</i> <i>En fonction de la puissance installée</i> <i>La profondeur d'eau</i> <i>La variation du niveau d'eau (marée)</i> <i>Les courants de marée</i> <i>Les conditions de tempête</i> <i>La conformité (compliance)</i> <i>Le type et disponibilité du navire</i> <i>La distance au port</i> <i>Le temps pris pour l'installation</i> <i>Le temps patienté à cause des conditions météo</i> <i>La puissance à transmettre</i> <i>La distance à la côte</i> <i>La gestion</i> <i>Les assurances</i> <i>Les autorisations</i>
Coûts d'opération <ul style="list-style-type: none"> · Maintenance planifiée · Réparation 	<i>Le coût des pièces de rechanges</i> <i>Le temps de maintenance</i> <i>La distance au port</i> <i>Les conditions météo</i> <i>Le coût des pièces de rechanges</i> <i>Le coût des pièces en stock</i> <i>Le temps de réparation</i> <i>Les conditions météo</i> <i>Le coût du personnel en attente</i>

Figure 3.1 : Bilan des postes de dépenses (Carbon trust, 2006)

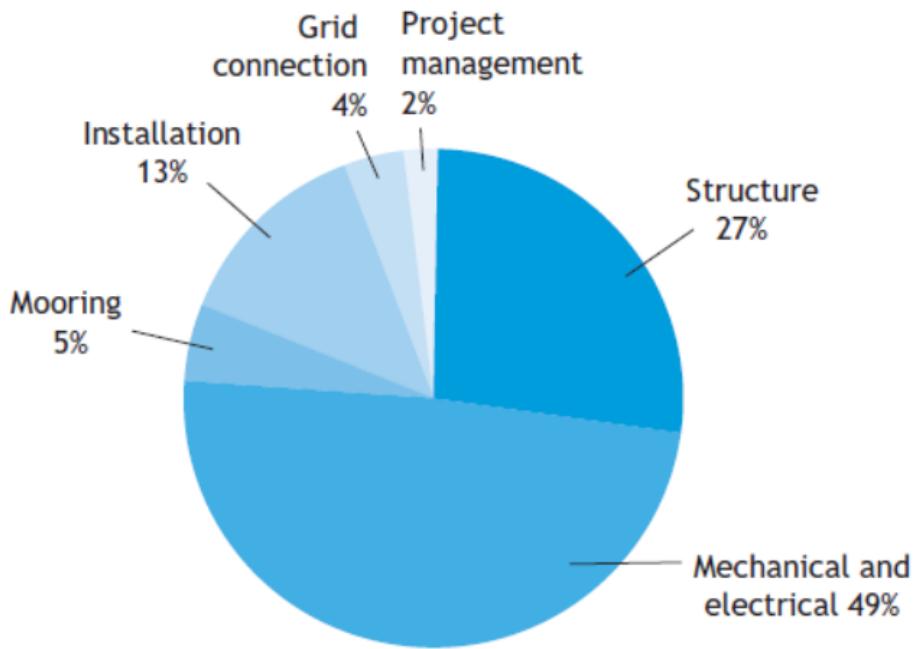


Figure 3.2 : Pourcentage du coût de chaque poste sur l'investissement premier (Carbon trust, 2006)

Le rapport (Carbon Trust, 2006) précise que la répartition des dépenses (Figure 3.2) n'est pas représentative pour tous les types de systèmes. Le raccordement au réseau représente 4% sur le graphe ci-dessus, ce qui semble sous-estimé par rapport aux prévisions faites par RTE. Le dimensionnement de la machine par rapport aux conditions maritimes doit être optimisé pour éviter un surcoût. En effet la structure ainsi que le système mécanique et électrique représente plus des ¾ du coût (Carbon Trust, 2006).

Au regard des éléments présentés précédemment, il semble important dans un premier temps, de **définir le potentiel énergétique d'un site de façon précise**, afin **d'installer le système le plus adapté au bon endroit**. Le site devra également être choisi en fonction **des disponibilités de raccordements au réseau électrique**. Enfin, il est nécessaire d'établir **une communication claire entre les différents acteurs du monde maritime** pour limiter la gêne occasionnée par un ferme houlomotrice. Dans ce cadre, le **SIG EMR en ligne sur GéoLittoral** (<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/>) développé par le CEREMA est une bonne initiative pour définir l'utilisation du domaine maritime.

Bilan et perspective

L'utilisation d'un code de calcul numérique à résolution de phase comme SWASH est relativement récente pour des études côtières en 2 dimensions (2D). Cependant, le code montre qu'il est capable de décrire de façon fine la transformation des vagues à l'approche des côtes, dans un temps de calcul raisonnable. Ces modélisations peuvent être utilisées pour justifier l'implantation d'un système houlomoteur, mais peuvent également servir à évaluer les risques pour les équipements côtiers lors de conditions extrêmes.

Le code numérique SWASH est un outil de précision pour l'ingénieur en génie côtier qui désire dimensionner des structures qui seront soumises à l'action des vagues.

Concernant le travail effectué, certaines suggestions peuvent être faites pour la suite du projet EMACOP :

- L'utilisation de la bathymétrie LITTO3D du CG29 pour assurer une meilleur modélisation de la digue,
- La confrontation des résultats de modélisation, une fois que les appareils de mesures in situ auront acquis suffisamment de données,
- La création d'une matrice de puissance de la ressource énergétique sur le site d'Esquibien.

Ce stage de 5 mois et demi au CEREMA de Brest a été ma première expérience en tant qu'assistant ingénieur d'étude. Il m'a permis de me confronter au fonctionnement d'un service public d'ingénierie travaillant sur un Projet National de Recherche.

Le travail de recherche réalisé, ainsi que l'écriture d'une publication scientifique a confirmé ma volonté de continuer mes études en doctorat. Le génie civil côtier m'intéresse particulièrement dans le cadre des énergies marines renouvelables. Le domaine est amené à se développer dans les années à venir, ce qui constitue pour moi d'éventuelles perspectives professionnelles.

Bibliographie

Bart Mellink (2012). Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater. TU Delft.

Benoit M., Lafon F. et Goasguen G. (2008). Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans. Base ANEMOC en Atlantique, Manche et Mer du Nord. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 12/1-2, pp 35-50.

Carbon TRUST (mai 2006). Cost estimation methodology. <http://www.carbontrust.com/>

Carbon TRUST (juillet 2011). Accelerating marine energy. <http://www.carbontrust.com/>

Canadian Hydraulics Centre (2011). Blue Kenue reference Manual. Source : https://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/consultatifs/blue_kenue_index.html

Delft University of Technology (2013). Swash 1.2 user manuel. Source : <http://swash.sourceforge.net/>.

Dirk Rijnsdorp (2011). Numerical modelling of infragravity waves in coastal regions. TU Delft.

Electric Power Research Institute - EPRI (2011). Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource, technical report, final report .december 2011, 176 p.

EPRI (novembre 2004). Economic assessment Methodology for Offshore Wave Power Plants.

Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil – IREX (2011). Rapport de montage du projet EMACOP. <http://www.emacop.fr/>

Johnson D., 2001. DIWASP, a directional wave spectra toolbox for MATLAB: User Manual. Research Report WP-1601-DJ (V1.1), Centre for Water Research, University of Western Australia.

Joost Brinkkemper (2013). Modeling the cross-shore evolution of asymmetry and skewness of surface gravity waves propagating over a natural intertidal sandbar. Utrecht University.

Michard B. (2004). Modélisation numérique des états de mer en mer d'Iroise. Mémoire de DEA Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer, 153 p.

Michard B., Dufour G. et Cosquer E. (2013). Evaluation préliminaire du potentiel houlomoteur de 22 sites français en Manche et Atlantique. Rapport de recherche IREX R/13/EMA/003 EMACOP 120 p.

Lund University (2011). a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Load. Turorial for WAFO version 2.5. Source : <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/>.

Projet EquiMar. Source : <http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html>

Rapport interministériel de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables (mars 2013).

SHOM (2011). Ouvrage de marée, Références altimétriques maritimes, Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée.

SI OCEAN (2013). Ocean energy : State of the art. <http://www.si-ocean.eu/en/>

SI OCEAN (mai 2013). Ocean energy : cost of energy and cost reduction opportunities.

Tom Bogaard (2012). Modelling the anisotropy of turbulence with the SWASH model: Heterogeneous roughness conditions in open channel flows. TU Delft.

van Vledder G. Ph., Ruessink G. and Rijnsdorp Dirk P. (2013). Individual wave height distributions in the coastal zone : measurements and simulations and the effect of directional spreading. Coastal Dynamics 2013, 7th Int. Conf. on Coast. Dyn., 24-28 June 2013, Arcachon, France.

Zijlema M., Stelling G. and Smit P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. C.E., 58, 992-1012.

Annexes

Annexe A : Organigramme du Cerema/DTecEMF et de la Direction de l'Ingénierie

Annexe B : Situation du site d'Esquibien

Annexe C : Résultats des simulations du modèle numérique d'Esquibien