



Université du Québec  
à Rimouski

# **L'UTILISATION DES CAPTEURS D'ÉNERGIE DES VAGUES POUR DIMINUER L'ÉROSION CÔTIÈRE**

**Étude de cas pour la plage Palm Beach Azur, Algérie**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées

PAR

**NARIMENE CHERTOUK**

**Juin 2021**



**Composition du jury :**

**Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR**

**Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR**

**Housseyn Otmani, examinateur externe, École Nationale Supérieure des Sciences de  
la Mer et de l'Aménagement du Littoral, Alger**

Dépôt initial le 25 mai 2021

Dépôt final le 14 juin 2021



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.





Je dédie ce mémoire à : Ma très cher maman Nadia que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour sa patience illimitée, son encouragement continu, son aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour ses grands sacrifices. Mes sœurs : Mounia, Mina, Amel, Yasmin et toute la famille Haddadi pour leur amour et soutien, qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude. A mes chères amies et à tous ceux que j'aime.





## **REMERCIEMENTS**

Au terme de ce travail, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail. Je remercie Monsieur Adrian Ilinca, pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire. Je remercie Monsieur Hamdane Yacine pour le temps qui m'a consacré pour la formation sur le model DELF3D. Je suis reconnaissante à tous nos enseignants qui ont contribué à ma formation et à toute personne qui m'a appris une lettre ou une phrase, qu'ils trouvent ici ma reconnaissance et un petit fruit de leurs sueurs.



## RÉSUMÉ

Dans ce travail on s'intéresse à étudier le comportement des capteurs de l'énergie des vagues (Wave Energy Converters - WEC) et leur influence sur l'érosion marine. Nous appliquons la méthodologie d'études proposée au cas particulier la côte algérienne Palm Beach Azure, vu la disponibilité des données dans cette zone à titre d'essai. Nous avons déterminé les types de capteur d'énergie marine, les paramètres de configuration de ces capteurs, leur optimisation et les effets sur le profil marin. Ces modèles et données ont permis de déterminer comment l'énergie des vagues se comporte et se propage après l'installation de ces capteurs WEC. Nous avons pu démontrer que les capteurs d'énergie diminuent l'érosion marine dans la zone d'installation. L'énergie des vagues diminue en présence de ces capteurs (dissipation d'énergie), il n'y a pas d'augmentation dans les zones adjacentes qui pourrait augmenter l'érosion marine. Cette énergie est représentée par la hauteur des vagues qui diminue au passage des capteurs d'énergie WEC. La modélisation numérique avec le modèle SWAN nous a permis de mettre en évidence une accumulation des sédiments dans le profil bathymétrique lorsque des WEC sont installés. Ce dépôt de sable suite à l'étude de la propagation des vagues sur la côte démontre que la présence des WEC non seulement diminue l'érosion marine mais contribue à une accumulation des sédiments sur la côte. Les hauteurs de vagues diminuent en présence des WEC. Le profil bathymétrique présente une accumulation au lieu d'une érosion ou stabilité de profil, ce qui confirme que les WEC peuvent servir à un double rôle l'extraction de l'énergie marine en la convertissant en énergie électrique et aussi comme outils de défense contre l'érosion marine (ouvrage de protection).

Mots clés : Capteurs d'Energie de vague, érosion, bathymétrie, profil bathymétrique, hauteur des vagues, propagation et dissipation d'énergie.



## ABSTRACT

In this work, we are interested in studying the behavior of wave energy converter (WEC) and their influence on marine erosion. We apply the proposed methodology to the particular case of the Algerian coast Palm Beach Azure, given the availability of data in this area. We determined the types of marine energy sensors, the configuration parameters of these sensors, their optimization, and the effects on the marine profile. These models and data were used to determine how the wave energy behaves and propagates after the installation of these WEC converters. We were able to demonstrate that the energy captors decrease marine erosion in the installation area. The wave energy decreases in the presence of these captors (energy dissipation). There is no increase in the adjacent areas that could increase marine erosion. This energy is represented by the wave height, which decreases when passing the WEC energy converters. Numerical modeling with the SWAN model allowed us to highlight an accumulation of sediments in the bathymetric profile when WECs are installed. This deposition of sand following the study of wave propagation on the coast demonstrates that the presence of WECs not only decreases marine erosion but also contributes to an accumulation of sediments on the coast. Wave heights decrease in the presence of WECs. The bathymetric profile shows accumulation instead of erosion or profile stability, which confirms that WECs can serve a double role: extraction of marine energy by converting it into electrical energy and also as a defense tool against marine erosion (protective structure).

Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version) Keywords: Wave Energy Sensors, Erosion, Bathymetry, Bathymetric Profile, Wave Height, Energy Propagation and Dissipation.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACE</b> .....	<b>ERREUR</b>
<b>R ! SIGNET NON DEFINI..V</b>	
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>TABLE DES MATIÈRE</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.V</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.II</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 GENERALITES</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 LES DEFITS ENERGITIAUES</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 LES ENERGIES EN MER</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2.1 L'ENERGIE DES COURANTS MARINS</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2.2 L'ENERGIE DES MARREES</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2.3 L'ENERGIE DES VAGUES</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2.4 L' ENERGIE EOLIENNE EN MER</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2.5 L' ENERGIE THERMIQUE DES MERS</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2.6 LA BIOMASSE MARINE</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.7 ENERGIE DE GRADIENT DE SALINITE</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 ASPECT MATHEMATIQUE DES VAGUES</b> .....	<b>12</b>
<b>1.4 THECHNOLOGIE DE CONVERTISSEUR D'ENERGIE HOULOMOTRICE</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4.1 COLONE D'EAU OSVILLANTE</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4.2 LES CORPS ACTIVES PAR LES VAGUES</b> .....	<b>16</b>
<b>1.4.3 DISPOSITIF DE DEPASSEMENT</b> .....	<b>18</b>
<b>CHAPITRE 2 DONNEES ET ETUDE DE CAS</b> .....	<b>23</b>

<b>2.1</b>	<b>SITUATION GEOGRAPHIQUE.....</b>	<b>23</b>
------------	------------------------------------	-----------





2.1.1	BAI DE BOU-ISUAIL.....	23
2.1.2	SITE D'ETUDE .....	23
<b>2.2</b>	<b>LE CADRE GEOLOGIQUE, GEMORPHOLOGIQUE ET SEDIMENTOLOGIQUE .....</b>	<b>24</b>
2.2.1	GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE .....	24
A-	GEOLOGIE REGIONALE .....	24
B-	GEOLOGIE LOCALE.....	25
2.2.2	GEOMORPHOLOGIE.....	26
2.2.3	SEDIMENTOLOGIE .....	26
<b>2.3</b>	<b>CADRE CLIMATOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE .....</b>	<b>27</b>
2.3.1	CLIMATOLOGIE.....	27
A-	ETUDE DES VENTS .....	27
B-	PRECIPITATIONS ET TEMPERATURE .....	30
2.3.2	HYDROLOGIE.....	31
<b>2.4</b>	<b>COURANTS ET HOULES .....</b>	<b>31</b>
2.4.1	LES COURANTS .....	31
A-	LES COURANTS DE DENSITE ET LE COURANT GENERAL .....	32
B-	COURANT DE HOULE.....	33
2.4.2	LES HOULE AU LARGE .....	33
A-	OBSERVATION DE SSMO 1963-1970 .....	34
B-	DONNEES DE L'ONSM.....	38
	 <b>CHAPITRE 3 METHODES, RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	 <b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>INTERACTION WEC-VAGUE .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>PROPAGATION DES HOULES A LA COTE .....</b>	<b>47</b>
3.2.1	MODELE DE PROPAGATION DE LA HOULES DU LARGE A LA COTE .....	47
3.2.2	LA REFRACTION DE LA HOULE .....	49
3.2.3	APPLICATION DE MODELE NUMERIQUE.....	50
3.2.4	LES ETAPES DE CALCULE DE LA REFRACTION .....	52
<b>3.3</b>	<b>LES DONNEES UTILISEES DANS LA MODELISATION .....</b>	<b>53</b>
3.3.1	DONNEES BATHYMETRIQUES.....	53
3.3.2	DONNEES DE HOULE AU LARGE .....	53
3.3.3	DONNEES DU VENT .....	56
3.3.4	DONNEES D'INTEGRATION DE WEC.....	56

<b>3.4</b>	<b>BATHYMETRIE DE LA ZONE .....</b>	<b>56</b>
<b>3.5</b>	<b>MODELISATION DES VAGUES .....</b>	<b>57</b>
<b>3.6</b>	<b>PROFIL BATHYMETRIQUE ET DE LA ROOBATHYMETRIE DE LA ZONE .....</b>	<b>60</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>64</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Distribution fréquentielle du vent à la station météorologique de DAR EL BEIDA selon seize (16) directions.....	29
Tableau 2 : Fréquences mensuelles de la houle du large par direction.....	34
Tableau 3 : Répartition des états de mer par période.....	36
Tableau 4 : Amplitudes des houles en fonction des directions et leurs périodes de retour (SSMO, 1963-1970).....	37
Tableau 5 : Moyennes mensuelles de Hs et Tp (1998-2000).....	39
Tableau 6 : Les caractéristiques des houles décennales utilisées dans le modèle SWAN.....	54
Tableau 7 : Les $\Delta H_s$ moyen et le Coefficient de shoaling entre la présence des WEC et l'absence des WEC.....	59



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Amplitude des marées dans le monde (en mètres).....	6
Figure 1.2: Les centrales d'énergie thermique des mers dans le monde.....	10
Figure 1.3: Classification des technologies de l'énergie houlomotrice en fonction de l'emplacement et de la méthode d'absorption.....	14
Figure 1.4: Schéma de l'Oceanlinx à Port Kembla WEC et Wavegen de Voith Hydro OWC .....	15
Figure 1.5: Schéma de Pelamis WEC.....	16
Figure 1.6: Schéma explicative de PowerBuoy et une photo du prototype PB3-A1 PowerBuoy ....	17
Figure 1.7: Schéma de Wave Dragon et and le prototype installé à Nissum Bredning.....	19
Figure 1.8 : Schéma du WaveCat and et un prototype du laboratoire de Porto à l'échelle 1:50.....	20
Figure 2.1 Situation géographique de la zone de Palm Beach-Azur.....	24
Figure 2.2: Carte géologique régionale.....	25
Figure 2.3: Sédimentologie de la baie de Bou-Ismaïl.....	27
Figure 2.4: Roses récapitulatives saisonnières et annuelles des fréquences d'apparition du vent au large.....	28
Figure 2.5: Répartition annuelle des vents en % .....	29
Figure 2.6: Variation moyenne des précipitations et des températures maximales et minimales entre 1995 et 2015.....	30
Figure 2.7: Le bassin versant du Mazafran et son embouchure par rapport à la zone d'étude.....	31



Figure 2.8: Circulation de l'eau atlantique modifiée dans la Méditerranée.....	32
Figure 2.9: Schéma préalable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude (Palm beach-Azur) .....	33
Figure 2.10: Roses récapitulatives de direction des houles au large du secteur ( $275^{\circ}$ - $55^{\circ}$ ).....	35
Figure 2.11: Répartition des énergies des houles en fonction de la direction et des périodes les plus courantes. ....	37
Figure 3.1: : Configuration optimale de la baie (unités: m). ....	42
Figure 3.2: La figure (a) montre l'amplitude de l'onde autour du cylindre blanc ; et la figure b, l'amplitude de l'onde autour des trois cylindres blancs en interaction. ....	43
Figure 3.3: Champ d'ondes perturbé normalisé par un champ d'ondes non perturbé enregistré pour la configuration du réseau 5 x 5 WEC.....	44
Figure 3.4: Coefficient de perturbation calculé, KD, d'un réseau aligné (à gauche) et décalé (à droite) formé par 9 WEC Wave Dragon pour des ondes irrégulières à crête longue.....	45
Figure 3.5: Coefficient de perturbation calculé, KD, d'un réseau 5 Wave Dragon disposé en deux rangées avec un espacement de D (gauche - a), 2D (milieu - b) et 3D (droite - c), avec $D = 260$ m, pour les vagues irrégulières à crête longue.....	46
Figure 3.6: Organigramme du déroulement des étapes de calcul de la réfraction. ....	52
Figure 3.7: image montrant la configuration des WEC dans la zone d'étude.....	55
Figure 3.8: La carte bathymétrique de Palm Beach-Azur en 2D.....	56
Figure 3.9: Le profil bathymétrique de Palm Beach-Azur en 3D .....	56
Figure 3.10: Réfraction de la houle pour une direction $280^{\circ}$ N et une période de 10s.....	57
Figure 3.11: Cartes des Hs obtenue à l'aide du model SWAN cas 1 : avant l'intégration des WEC , cas 2 après l'intégration des WEC pour une direction $280^{\circ}$ N et $H=5$ m et $T=3$ s .....	58
Figure 3.12: Carte délimitant la zone de calcule de Moyenne de Hs et $\Delta Hs$ moyen.....	59





Figure 3.13 Profils bathymétriques en absence des WEC (1) et profils bathymétriques en présence des WEC (2) .....60







## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

**BEM:** Bandry Element Methode

**GEBCO:** The General Bathymetric Chart of the Oceans

**GPS:** Global Positionning System

**GWh:** Giga Watt Heur

**Hs:** Hauteur Significative

**KD:** Coefficient of Distribution

**Kg:** Kilogramme

**LEM:** Laboratoire des Etudes Maritimes

**NGA:** Nivellement Général Algérien

**ONM:** Office Nationale de la Météorologie.

**SGH:** Sogreah

**SSMO:** Summary of Synoptic Meteorological Observations

**T:** Tone

**SWAN:** Simulating Wave Analysis Nearshore

**WEC :** Wave Energy Converter ou convertisseur d'énergie de vague.







## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire (KABANSHI, 2007).

Cependant ces formes de production engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoquent un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs (ENEA, 2007).

Ainsi l'argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergie. En ce 21-ème siècle, le paysage énergétique change radicalement car plusieurs ressources fossiles sont en voie de disparition et de nouvelles ressources associées à des technologies plus performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles.

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables on cite les énergies de mer, L'océan, qui couvre 71 % de la surface du globe, est une source d'énergie « bleue » sous-exploitée : marées, vagues, courants océaniques, chaleur, salinité, etc. Des techniques se développent pour en retirer une électricité durable, l'un des plus grands problèmes de ces capteurs est leur coût élevé de revient pour le kWh (coût des équipements et de l'installation, entretien, éloignement entre la source et les consommateurs, etc.).

L'augmentation attendue du nombre et de l'intensité des tempêtes en raison du changement climatique, la situation actuelle des zones côtières déjà gravement exposées à l'érosion et aux inondations, ainsi que la nécessité de préserver les écosystèmes côtiers d'une manière acceptable

pour les sociétés, ouvrent la voie à une approche prudente à long terme. Dans la mesure du possible, les défenses dures doivent être à l'épreuve du climat (c'est-à-dire caractérisées par une faible sensibilité à l'élévation du niveau de la mer), respectueuses de l'environnement et éventuellement caractérisées par un faible impact visuel à l'horizon (c'est-à-dire submergé ou à crête basse).

De ce fait l'idée est venue pour combiner l'extraction d'énergie marine tout en protégeant les côtes de l'érosion dont elles souffrent, L'objet de la thèse est de définir comment les capteurs d'énergie marine servent à diminuer l'érosion et quel est leurs comportements face au milieu marin. Si cette hypothèse est démontrée, le double rôle joué par les capteurs d'énergie des vagues devient très intéressant en termes de rentabilité économique et d'efficacité.

Les chapitres suivants présentent : 1-Généralités, 2- Données et étude la zone, 3-méthodes, résultats et interprétations, 4- Conclusion



# CHAPITRE 1

## GENERALITES

### 1.1 Les défis énergétiques

Depuis plusieurs années l'humanité fait face à une demande en énergie croissante due à l'augmentation de la population et à la qualité de vie exigeante en matière de consommation d'énergie.

Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent l'inconvénient d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gaz à effet de serre.

Étant donné le danger que représentent les énergies fossiles, mais aussi le désir d'indépendance énergétique, trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie est devenu primordial. À ce sujet, les énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique, etc.) sont des énergies illimitées contrairement aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Dans le cadre des Nations Unies, des accords internationaux (Kyoto, Paris) ont été signés afin de diminuer les émissions de GES. Ces années dernières, le changement climatique est devenu un très grand problème mondial.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a déclaré que les principales raisons du changement climatique se sont avérées anthropiques (GIEC, 2007).

Les estimations du changement climatique indiquent également que les zones côtières vont être soumises à de grands changements globaux, y compris les effets de l'élévation du niveau de la mer, surtout avec le dégel de la banquise. Cependant, dans le cadre d'un système complexe avec plusieurs interconnexions, l'érosion devrait augmenter considérablement en raison de l'augmentation des événements extrêmes qui peuvent créer de grandes vagues (Nicholls et Klein,

2005). La réduction des émissions de GES est donc une priorité, en particulier les émissions provenant de la production d'énergie, et donc le passage de la production d'énergie à des sources renouvelables est une priorité connexe (Armando Alexandre, 2013).

Notre travail mènera à la conversion de l'énergie houlomotrice à partir des vagues océaniques, précisément de déterminer l'impact de l'extraction d'énergie des vagues dans les zones côtières impliquant une bonne synergie. Nous étudions comment, grâce au réseau de convertisseurs d'énergie houlomotrice (WEC) on produira de l'électricité, mais aussi on peut protéger le rivage ou le trait de côte de l'érosion marine, tout en permettant une réduction nette du coût de l'énergie.

Ci-dessus on vous présente quelques informations de base sur les vagues et les énergies marines.

## **1.2 Les énergies en mer**

La mer est un milieu riche en flux énergétiques pouvant être exploités sous diverses formes : énergie des courants marins, énergie des marées, énergie des vagues, énergie éolienne en mer, énergie thermique des mers, biomasse marine, énergie osmotique.

### **1.2.1 L'énergie des courants marins**

L'énergie des courants (hydrocinétique) correspond à l'exploitation de l'énergie cinétique des masses d'eau mises en mouvement par les courants provoqués par les variations de la gravitation dues au mouvement de la Terre par rapport au Soleil et à la Lune. Elle est exploitée par des hydroliennes qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique ou en énergie hydraulique ramenée à terre. La vitesse et les horaires des courants de marée dépendent du cycle lunaire et présentent l'avantage d'être prévisibles longtemps à l'avance. La prévisibilité de cette intermittence cyclique est un atout important de cette forme d'énergie marine. De plus, pour ce qui

concerne son exploitation dans la Manche, le décalage de l'onde de marée durant sa propagation dans la Manche permet théoriquement d'obtenir une puissance garantie relativement continue en équipant les nombreux sites intéressants de cette zone. La puissance électrique qu'on peut extraire des déplacements des masses est proportionnelle au cube de la vitesse du courant, à la surface balayée par le système et à la densité de l'eau. Les hydroliennes sous-marines à axe horizontal peuvent être assimilées à des éoliennes immergées. Bien que les courants marins soient 4 à 5 fois moins rapides que le vent, la puissance électrique d'une hydrolienne est beaucoup plus importante que celle des éoliennes de même dimension du fait d'un milieu fluide beaucoup plus dense (la densité de l'eau de mer est 800 fois plus élevée que celle de l'air). Cela a pour conséquence de nécessiter des hydroliennes nettement moins imposantes que les éoliennes terrestres ce qui en fait une technologie adaptée pour l'extraction de l'énergie des mers en faible profondeur (ADEME, 2010).

**- Ressources et potentiels exploitables :**

Les zones propices sont celles où la vitesse des courants est supérieure à  $1 \text{ ms}^{-1}$  et la profondeur d'eau est typiquement d'au moins 20 m pour que la machine puisse avoir une puissance suffisante. En Europe, la ressource est répartie principalement entre le Royaume-Uni (75 % dont la moitié en Écosse) et la France (20 %, Bretagne et Basse-Normandie).

Dans ces régions, l'onde de marée est amplifiée dans certaines zones privilégiées par la configuration de la côte (détroits, formes du fond, singularités bathymétriques). D'après Hydrohélix Énergies, la côte métropolitaine présente un potentiel naturel de plus de 6 GW, avec le littoral de la Bretagne et de la Normandie qui possède plusieurs sites où les courants atteignent des valeurs importantes. Selon EDF (Electricité de France), le potentiel techniquement exploitable est compris entre 5 et 14 TWh/an, soit entre 2,5 et 3,5 GW de puissance installée. Les sites potentiels sont spécifiques (détroits, caps, goulets... où l'on observe une augmentation des vitesses) et bien identifiés (sur les côtes métropolitaines françaises on peut noter : Raz Blanchard, Fromveur, Raz de Sein, Héaux de Bréhat, Raz de Barfleur ; et en Outre-Mer : effets de pointe, passes, etc.) (ADEME, 2010).



### 1.2.2 L'énergie des marées

L'énergie marémotrice est l'exploitation de l'énergie potentielle de la marée liée à une différence de niveaux entre deux masses d'eau (Figure 1.1). Selon le Conseil Mondial de l'Énergie, le potentiel mondial de l'énergie marémotrice pour des sites « classiques à un seul réservoir » est estimé à 380 TWh/an pour 160 GW. Tidal Electric Ltd estime à 6 000 MW le potentiel au Royaume-Uni, et à 2 000 MW en France pour l'exploitation de l'énergie marémotrice par des lagons artificiels (ADEME, 2010).

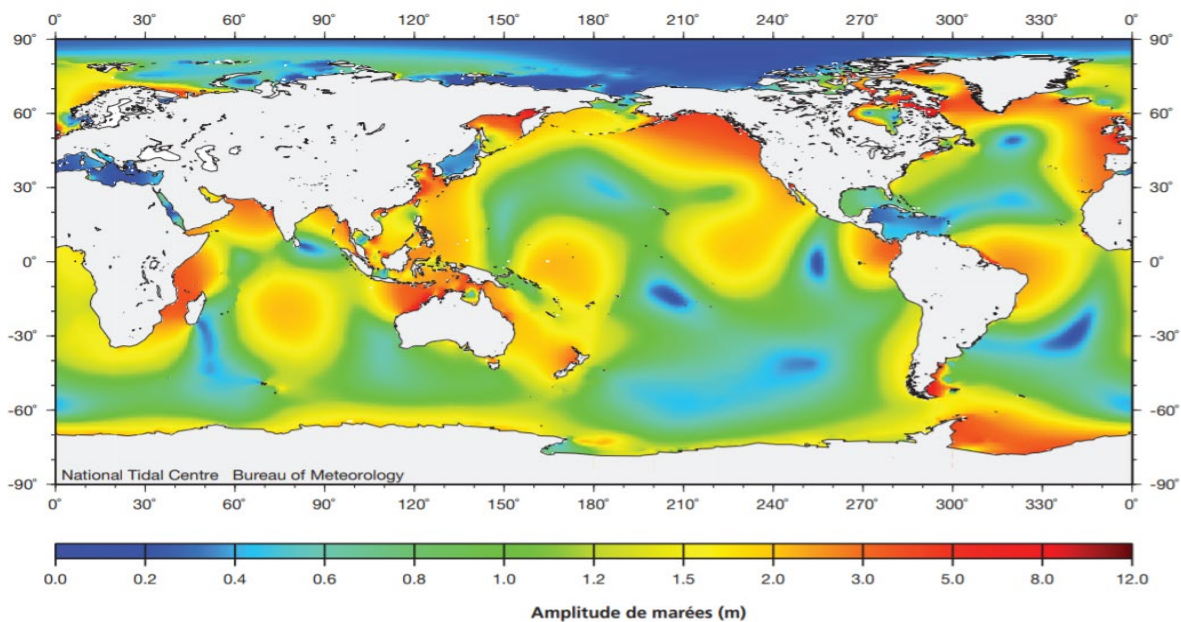


Figure 1.1. Amplitude des marées dans le monde (en mètres)

Source : Amplitude des marées. Reproduit avec l'autorisation du Bureau de météorologie, Fiche Prisme No15 (2018).

### 1.2.3 L'énergie des vagues

Les vagues et la houle sont générées par l'interaction des vents avec la surface marine. La taille des vagues qui se forment lors de ce transfert d'énergie est déterminée par les caractéristiques du vent (vitesse, direction) et la distance sur laquelle il s'applique (fetch). Ces vagues, parcourant



de longues distances, forment la houle et sont modifiées par la bathymétrie (qui peut concentrer ou dissiper l'énergie des vagues) et les courants (courants océaniques et/ou courants de marée). Les vagues ont le potentiel de fournir une source d'énergie durable qui peut être transformée au moyen de convertisseurs d'énergie en énergie électrique. Ces convertisseurs ont été développés aussi bien pour extraire l'énergie des vagues en eaux peu profondes qu'en eaux profondes (ADEME, 2010).

#### - **Ressources et potentiel exploitable :**

Selon le Conseil Mondial de l'Énergie, 10 % de la demande annuelle mondiale en électricité pourrait être couverte par la production houlomotrice, soit un potentiel techniquement exploitable de 1400 TWh/an. En France métropolitaine, le potentiel techniquement exploitable peut être estimé à 10 % au moins de la ressource théorique (400 TWh/an) soit 40 TWh/an que pourraient produire quelques 10 à 15 GW situés principalement sur la façade atlantique. Dans les DOM-COM, un fort potentiel est identifié à la Réunion, en Polynésie et en Nouvelle-Calédonie ainsi que localement en Martinique et en Guadeloupe. L'énergie dissipée par la houle dans le monde s'élève à plus de 22 000 TWh par an, soit près d'un quart des besoins énergétiques de la planète. On chiffre généralement cette puissance en kW par mètre de front de vague (kW/m). Sur la façade atlantique française, la puissance houlomotrice moyenne transmise par les vagues a été estimée à 45 kW par mètre de ligne de crête ce qui correspond à une énergie annuelle brute de 417 TWh, très proche de la consommation électrique annuelle totale (476 TWh en 2006). Il s'agit là bien sûr d'ordres de grandeur globaux, qui montrent simplement que la récupération d'une fraction de cette énergie pourrait constituer apport significatif au bouquet énergétique du futur (ADEME, 2010).

#### **1.2.4 L'énergie éolienne en mer**

Il s'agit d'exploiter l'énergie du vent soufflant sur les étendues marines, par des éoliennes qui produisent de l'électricité exportée à terre par des câbles sous-marins. Jusqu'à présent, les projets éoliens offshore consistaient à transposer en mer une technologie éprouvée à terre. Cette transposition presque directe a eu l'avantage de pouvoir créer rapidement une filière éolienne

industrielle. Mais cette approche a rapidement montré certaines limites, et notamment celles de la profondeur à laquelle les éoliennes peuvent être installées : on parle aujourd'hui de 40 m maximum. En outre, plus la profondeur augmente, plus les quantités, et donc le coût des matériaux nécessaires aux fondations (acier et béton), sont importantes (ainsi que les efforts sur la structure). S'affranchir de la contrainte de la profondeur est donc une piste séduisante, surtout en France où les profondeurs d'eau dépassent rapidement les 40 m à proximité des côtes (ADEME, 2010). Alors que la mer du Nord offre de vastes plateaux avec de faibles profondeurs d'eau, en France, les zones les plus intéressantes sur les côtes de la Manche, offrent des conditions nettement moins favorables. L'avenir du développement de l'éolien en mer passe probablement par de nouveaux concepts non extrapolés de l'éolien terrestre. Il faut utiliser les spécificités du milieu marin plutôt que d'essayer de s'en affranchir. Les constructeurs d'éoliennes terrestres sont prisonniers d'une technologie : les innovations viendront de marins qui proposeront des concepts innovants. C'est donc un vrai changement de regard sur la technologie que proposent les porteurs de projets d'éoliennes flottantes, ouvrant la voie vers l'éolien profond installé à des profondeurs supérieures à 50 m et s'éloignant des côtes. Alors que le transfert technologique est important entre l'éolien terrestre et l'éolien peu profond, qui sont dans la même gamme de produits et qui sont portés par les mêmes acteurs, il y a une rupture technologique à envisager pour aller vers l'éolien offshore flottant. Cette rupture va permettre à de nouveaux acteurs d'arriver sur le marché, et notamment ceux venant de l'offshore pétrolier et de l'industrie navale (ADEME, 2010).

**- Ressources et potentiel exploitable :**

Selon une étude de l'Agence Internationale de l'Énergie conduite en 2000, le potentiel européen techniquement exploitable serait de l'ordre de 313 TWh/an en considérant les sites à moins de 20 km des côtes et de moins de 20 m de profondeur. Il est envisagé pour le futur d'utiliser des éoliennes flottantes qui seraient ancrées sur le fond et pour lesquelles la limitation de profondeur serait moins contraignante. Les machines flottantes élargissent les zones potentielles de développement de parcs dans de nombreux pays comme en France, au large de la Norvège, au Portugal, en Italie, aux États-Unis, etc. Elles donneraient accès à une ressource beaucoup plus importante tout en élargissant les zones éligibles (ADEME, 2010).

### 1.2.5 L'énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers (ETM) pour la production d'électricité consiste à utiliser une différence de température d'au moins 20°C entre l'eau en profondeur et l'eau chaude en surface pour produire de l'électricité, mais également de l'eau douce, du froid pour la climatisation et des produits dérivés pour l'aquaculture suivant le type de processus (cycle ouvert ou cycle fermé). La ressource mondiale théorique basée sur un gradient de température de 20 °C au moins permettrait de produire environ de 10 000 TWh/an dans les zones intertropicales. Cette ressource théorique n'est exploitable que très partiellement et ponctuellement, sans stockage massif de l'énergie produite, en raison de l'absence de zones de consommation électrique à proximité de la ressource, notamment dans la zone intertropicale Pacifique. Un stockage via l'hydrogène est envisageable à terme. La France a été précurseur sur ces technologies (travaux de G. Claude dans les années 30 et IFREMER dans les années 80). Les centrales ETM (OTEC en anglais) doivent permettre, en zone intertropicale, de produire de l'électricité de base (prédictible et en continuité). La zone économique exclusive (ZEE) des DOM-COM est particulièrement intéressante pour expérimenter l'ETM et contribuer ainsi à l'autonomie énergétique de ces territoires ultrapériphériques isolés. Le grand intérêt de l'ETM réside dans le fait que l'énergie produite est exploitable toute l'année, nuit et jour, et apparaît pour ces îles comme une alternative envisageable aux énergies fossiles. Un autre usage thermique, en zones tempérées, consiste à utiliser l'eau proche de la surface comme source de chaleur pour des installations de chauffage/climatisation par pompe à chaleur (concept SWAC, Sea Water Air Conditioning).

La disponibilité d'eau froide profonde pourrait être une opportunité pour expérimenter la valorisation des propriétés spécifiques de cette eau de mer, notamment riche en nutriments, pour l'aquaculture par exemple. Compte tenu des enjeux (offrir aux DOM-COM une énergie de base renouvelable), même si la démonstration de la maturité technologique est possible à une échelle réduite, seules les technologies permettant la réalisation de centrale flottante de plusieurs MW sont éligibles. Les travaux déjà réalisés sur le sujet ont mis en évidence que la mise en œuvre de cette énergie comportait des risques technologiques en particulier le tuyau de pompage en eau profonde. Le coût d'une plateforme flottante supportant un convertisseur énergétique supérieur au MW est

important et relève de la mise en œuvre de technologies de type parapétrolier où la part de recherche est faible (ADEME, 2010).

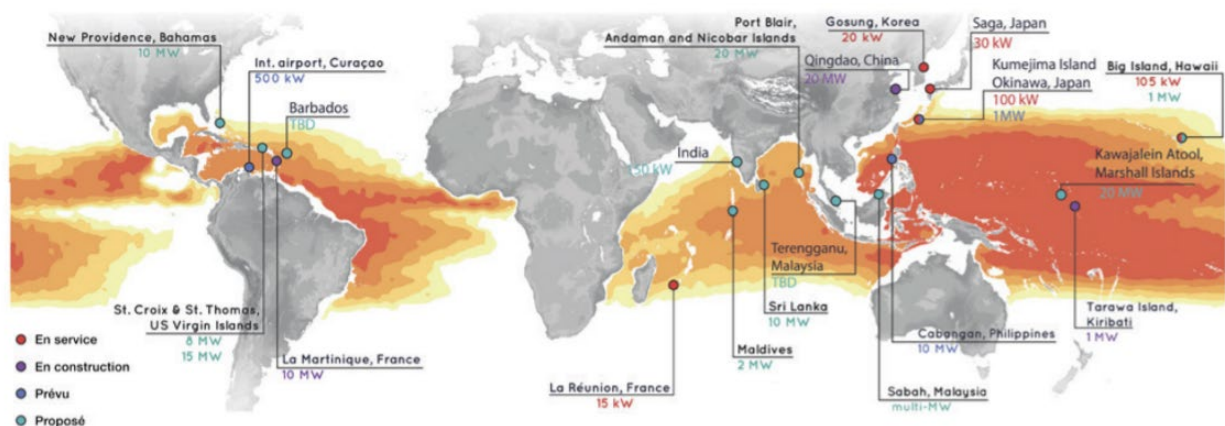


Figure 1.2. Les centrales d'énergie thermique des mers dans le monde

Source : <https://www.ocean-energy-systems.org/oes-projects/task-11-status-of-otec-and-its-resource-assessment/#tab-results>. Reproduit avec l'autorisation d'IEA Ocean Energy Systems (OES)

### 1.2.6 La biomasse marine

Les algues sont un ensemble d'organismes photosynthétiques, possédant des caractéristiques dissemblables. Aucun regroupement simple ne peut être opéré pour les définir et les placer dans une famille cohérente. Si l'on réduit l'étude aux microalgues unicellulaires, le regroupement n'est pas plus simple. Des centaines de milliers d'espèces sont réparties sur la surface du globe que ce soit en milieux marins, d'eau douce ou d'eau saumâtre. Elles participent à 90 % de la production primaire aquatique et à 50 % de la production primaire mondiale. Elles ont colonisé tous les milieux, des glaces polaires aux zones désertiques en passant par les sources d'eaux chaudes. Elles se sont adaptées aux environnements extrêmes, vivant dans des marais salants, dans des milieux acides, voire dans des conditions d'éclaircissement très faibles. Par leur présence à la surface des océans recouvrant 70 % de la planète, elles jouent un rôle majeur dans le climat mondial comme usine à transformer le CO<sub>2</sub> en matière organique. On estime entre 200 000 et un million le nombre d'espèces d'algues existantes ; une telle diversité peu exploitée constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie. Cette diversité biologique, répondant à une exceptionnelle adaptabilité,

laisse préjuger d'une richesse proportionnelle en molécules originales et bien évidemment en producteurs de lipides. Comparativement aux espèces oléagineuses terrestres, ces microalgues présentent de nombreuses caractéristiques favorables à une production d'acides gras. Les points forts des microalgues par rapport aux espèces oléagineuses terrestres sont :

- Rendements de croissance et par conséquent des productions potentielles à l'hectare supérieures aux espèces oléagineuses terrestres;
- Pas de conflit avec l'approvisionnement alimentaire;
- Plasticité métabolique bien plus importante, permettant d'orienter plus facilement la bioproduction vers certains acides gras;
- Maîtrise du cycle de l'azote et du phosphore en contrôlant le recyclage des éléments nutritifs;
- Couplage possible à une source de CO<sub>2</sub> industrielle;
- Offrir une récolte continue;
- Pas d'apport de phytosanitaires;
- Gestion de l'eau a priori non conflictuelle si culture en eau de mer;
- Nombreux sous-produits valorisables;
- Technologie exploitable dans les pays en voie de développement (ADEME, 2010).

### **1.2.7 L'énergie de gradient de salinité**

Lorsqu'un fleuve se jette dans la mer, le mélange des eaux ayant des concentrations en sel différentes entraîne une perte d'entropie. Il est possible de récupérer de l'énergie utile en réalisant ce mélange à travers des membranes semi-perméables. Deux méthodes de récupération de cette énergie sont testées : la première est basée sur l'osmose (en Norvège), la seconde sur l'électrodialyse inversée (aux Pays-Bas). Une étude de la société Statkraft indiquerait un potentiel mondial de 1600 TWh répartis sur plus de 180 sites (dont 170 TWh en Europe). En Norvège, le potentiel de cette technologie est estimé à 10 % des besoins annuels en énergie (ADEME, 2010).

### 1.3 Aspects mathématiques des vagues de l'océan

Les ondes océaniques consistent en une superposition d'un très grand nombre d'ondes sinusoïdales (harmoniques) individuelles, chacune avec sa propre amplitude, fréquence et direction. Cette superposition est exprimée mathématiquement par une série de Fourier, qui peut représenter tout état de la mer (Holthuijsen, 2007). La série de Fourier, un concept de domaine temporel, a son homologue dans le domaine fréquentiel dans le spectre de densité d'énergie des vagues, généralement appelé pour brièveté le spectre d'ondes, qui quantifie la distribution de l'énergie des vagues sur les différentes fréquences. Souvent, les informations directionnelles sont contenues dans le spectre, qui est alors un spectre directionnel. Sur la base du spectre d'énergie d'onde directionnelle, il est possible de calculer les paramètres d'intérêt de l'onde, dont certains sont présentés ci-dessous (Dalrymple & Dean, 1991). Si la densité d'énergie d'onde directionnelle est notée  $S(f, \theta)$ , avec  $f$  la fréquence et  $\theta$  la direction de l'onde, les moments spectraux peuvent être définis comme :

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

La hauteur significative des vagues est alors donnée par :

$$H_s = 4m_0^{1/2} \quad (2)$$

La période d'onde de crête peut être calculée comme l'inverse de la fréquence au pic spectral ( $f_p$ ),

$$T_p = (f_p)^{-1} \quad (3)$$

La direction moyenne des ondes peut être obtenue à partir du spectre d'énergie des ondes directionnelles

$$\theta_m = \arctan \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) \sin \theta df d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) \cos \theta df d\theta} \quad (4)$$

La puissance des vagues, ou flux d'énergie des vagues est donnée par :

$$J = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} c_g(f, h) S(f, \theta) df d\theta \quad (5)$$

La densité varie dans le temps et dans l'espace, notamment avec la température. Une valeur moyenne de la densité a été prise pour ce travail,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ , avec  $h$  est la hauteur moyenne des vagues et  $C_g$  est la vitesse des groupes de vague.

Dans de nombreux cas, la forme détaillée du spectre est inconnue, et seuls certains des paramètres d'onde caractéristiques sont donnés. Dans ce cas, la puissance des vagues, également appelée flux d'énergie des vagues, peut être calculée à partir de l'approximation suivante :

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_{m01} H_s^2 \quad (6)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'eau,  $g$  est l'accélération due à la gravité,  $H_s$  est la hauteur significative des vagues (m) et  $T_{m01}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) la période d'énergie des vagues, définie comme :

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (7)$$

Une analyse plus approfondie décrivant les équations qui régissent l'extraction pour des dispositifs spécifiques peut être trouvée dans la littérature, par exemple Falcão (2010b).

#### 1.4 Technologies de convertisseur d'énergie houlomotrice

Un convertisseur d'énergie houlomotrice est une technologie qui utilise le mouvement des vagues de surface de l'océan pour créer de l'électricité. La capture d'énergie est réalisée au moyen d'une prise de force (PTO) intégrée à l'appareil qui convertit l'énergie mécanique en électricité. La prise de force est différente selon la technologie WEC et son principe de fonctionnement. Ces technologies ont été passées en revue par un grand nombre d'auteurs (Clément et al., 2002b; Drew, Plummer & Sahinkaya, 2009b; Falcão, 2010a; Falnes, 2007; Iglesias, Alvarez & García, 2010;

McCormick, 1981; Thorpe, 1999). Ils ont proposé différents critères sur lesquels les technologies WEC peuvent être classées, tel qu'il apparait à la Figure 1.3.

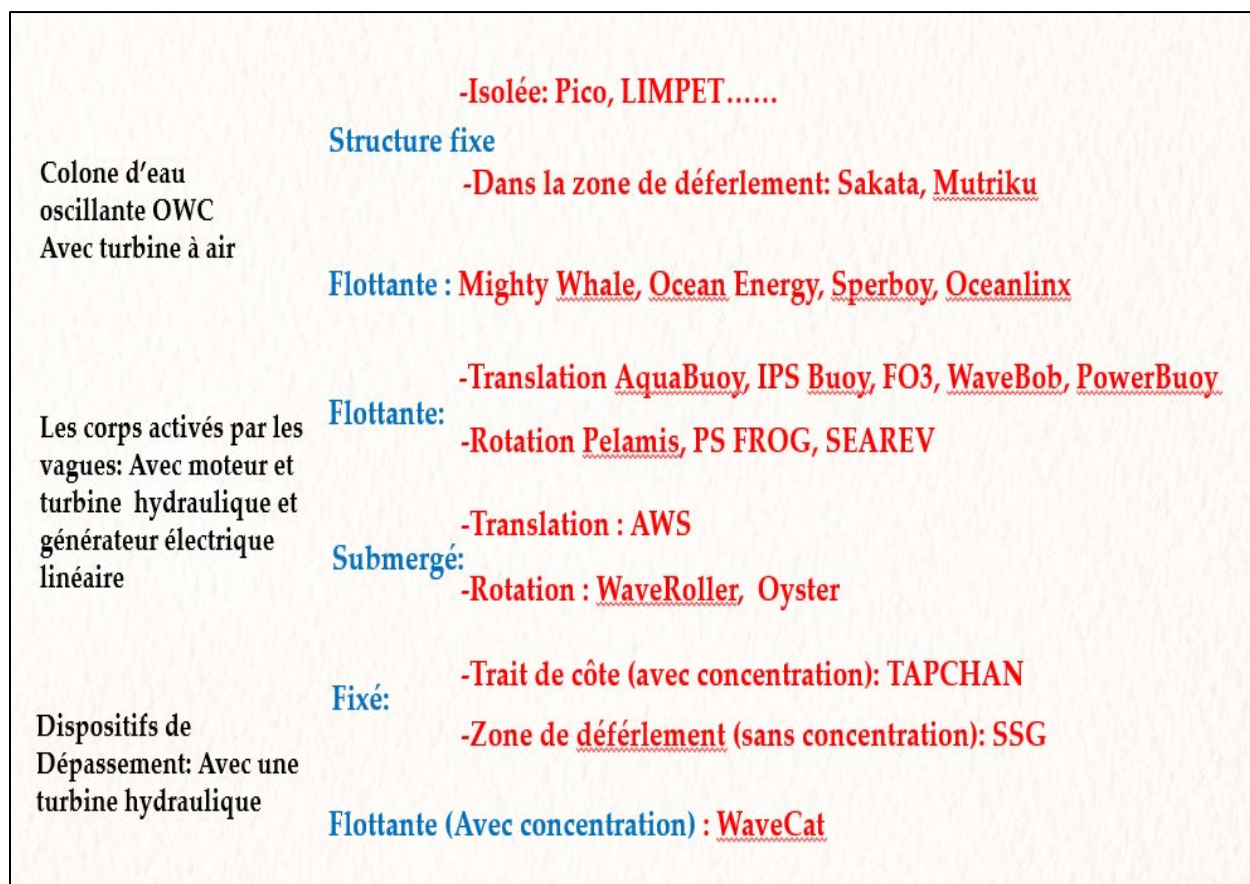


Figure 1.3: Classification des technologies de l'énergie houlomotrice en fonction de l'emplacement et de la méthode d'absorption (Falcão, 2010b).

#### 1.4.1 Colonnes d'eau oscillantes (OWC) :

La colonne d'eau est située directement sur la plage en profitant des criques naturelles ou en creusant des bassins artificiels sur la côte. Elle est constituée des structures creuses, construites en acier ou en béton, sans base et partiellement immergée dans l'eau de mer. Dans la partie supérieure il y a une turbine Wells, utilisée pour convertir l'alimentation en air disponible lorsque la vague bouge à l'extérieur de la machine, elle provoque une montée du niveau de la mer dans la chambre



qui exerce une pression sur l'air contenu dans la chambre (la chambre étant fermée excepté du côté de l'entrée des vagues et du côté de la turbine ce qui oblige l'air à entrer et sortir par la turbine). Cette pression exercée sur l'air fait tourner la turbine située en haut de la chambre qui fait elle-même fonctionner un générateur. Lorsque l'eau contenue dans la chambre sort, faisant ainsi diminuer la hauteur d'eau dans la chambre et donc la pression sur l'air, ce dernier sort de la turbine, la faisant marcher une deuxième fois. En effet les turbines n'ont pas de sens de fonctionnement, on dit qu'elles sont bidirectionnelles. Les machines peuvent être onshore, c'est-à-dire installées sur la terre ferme, comme les Wavegen ou offshore, c'est-à-dire en pleine mer, par exemple les Oceanlix (Figure 1.4).

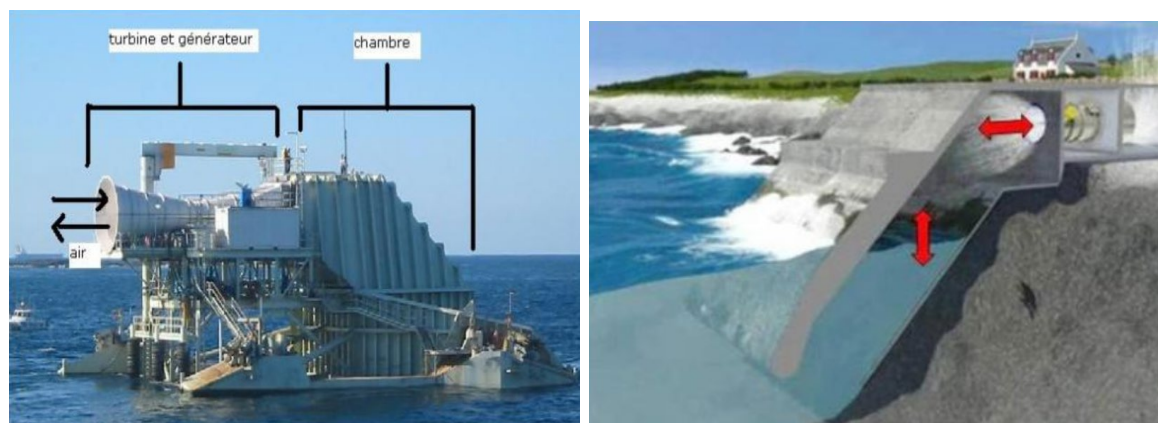


Figure 1.4: Schéma de l'Oceanlix à Port Kembla WEC (à gauche) et Wavegen de Voith Hydro OWC (à droite). Source: EVE (2014) and Wavegen

Vu que cette technologie est principalement développée à terre, on ne va pas la prendre en considération pour l'étude et ne peut pas être utilisée en synergie pour la protection des zones côtières.

### 1.4.2 Les corps activés par les vagues :

Aussi appelés système de corps, sont situés au large (offshore) peuvent être submergés ou flottants, ces dispositifs sont composés de plusieurs corps contenant un mécanisme de prise de force (PTO). Un exemple d'un système de corps flottant est le dispositif Pelamis (Figure 1.5). Encore appelé « serpent de mer », semi-immersé situé à une profondeur plus de 50m, formé de cinq sections cylindriques assemblées par des cardans, il utilise les mouvements relatifs de différents caissons reliés entre eux (tronçons et cylindres intermédiaires), lors du passage des vagues, pour produire de l'électricité. Cette grande structure flottante se déforme donc, sous l'action des vagues, dans le plan horizontal et dans le plan vertical. Les cylindres intermédiaires ou convertisseurs renferment tous les éléments permettant de transformer l'énergie mécanique produite par la déformation du Pelamis en énergie électrique. Cette déformation, sous l'effet des vagues, actionne des vérins (pompes) qui mettent de l'huile sous pression. Cette huile met en mouvement un moteur hydraulique, qui entraîne à son tour un générateur électrique. Un câble permet de récupérer l'électricité produite dans les trois convertisseurs et de l'acheminer à terre.

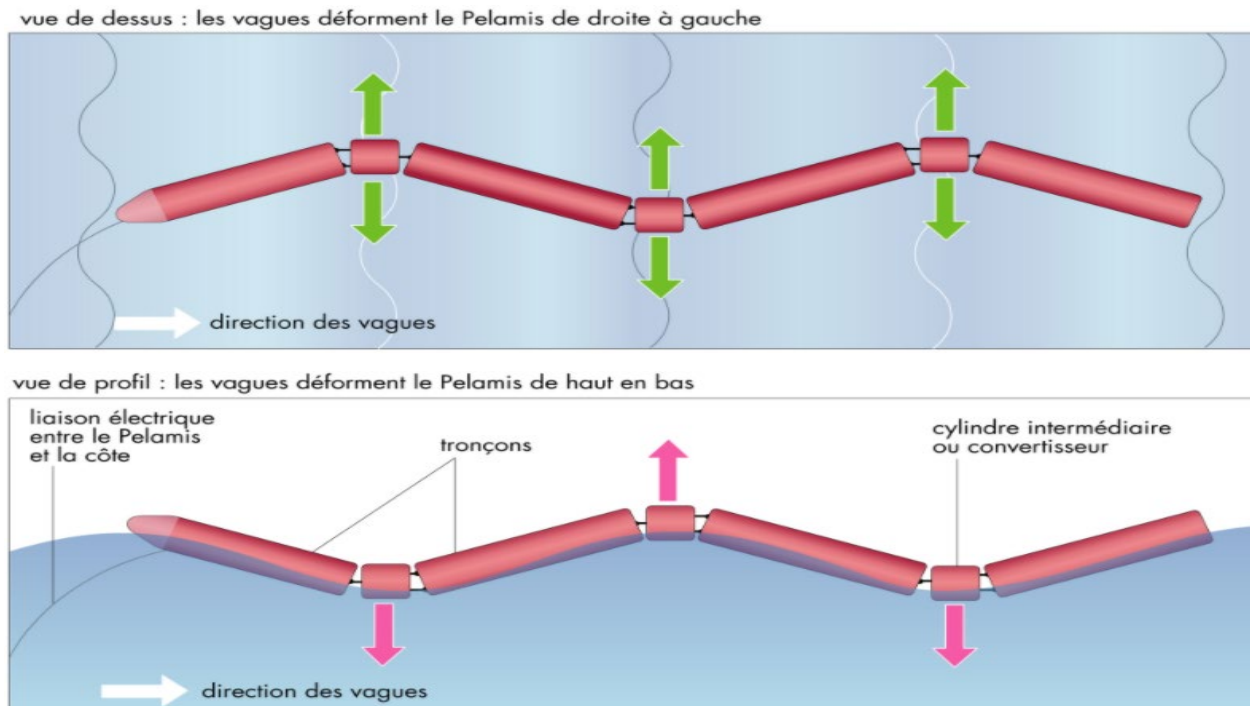


Figure 1.5: Schéma de Pelamis WEC. Source : (2013 Encyclopædia Universalis France)

Les autres groupes d'appareils de cette catégorie sont ceux composés d'éléments de flottaison oscillant à la surface de la mer. Parmi ceux-ci se trouvent :

### **PowerBuoy :**

Le système PowerBuoy (USA) (Ocean Power Technologies, Inc) est une bouée immergée, avec une partie fixe, un ancrage tendu et une partie oscillante au rythme de la houle, le mouvement relatif est amorti pour être converti en électricité (Figure 1.6). Seule une balise indique la présence du système sous l'eau pour la navigation. Ce système, dont la fréquence propre rend ses performances très sensibles à la période de houle, nécessite un contrôle spécifique pour maximiser l'extraction de l'énergie, incluant notamment une composante prédictive. Le dispositif de conversion comprend une pompe, un accumulateur et un moteur hydraulique, ce dernier entraînant un générateur électrique.



Figure 1.6 : Schéma explicatif de PowerBuoy et une photo du prototype PB3-A1 PowerBuoy.

Source: Grid Magazine(2020) Renwes.Bis (2016).

Leur principe de fonctionnement, la translation ou la rotation, ces dispositifs ne donnent pas une bonne réduction de l'onde (elle est minimum) pour protéger la côte. De ce fait, ces dispositifs ne seront pas choisis pour étudier leurs impacts sur le trait de côte.

### 1.4.3 Dispositifs de dépassement :

L'eau déferle sur une pente douce pour remplir un réservoir situé au-dessus du niveau de la mer. L'eau stockée est alors évacuée entraînant dans le même temps une turbine reliée à un générateur électrique. Le principal avantage de ces systèmes est de lisser naturellement la puissance récupérée. Le réservoir joue le rôle de capacité dans laquelle on stockerait de l'énergie potentielle de pesanteur. Certains dispositifs sont fixés à la côte et subissent l'effet des marées.

D'autres systèmes sont amarrés en pleine mer, et sont libres de monter et descendre aux rythmes des marées. Ils récupèrent donc l'eau de manière optimale tout au long de la journée et ne sont pas influencés par les marées. Du fait, ces dispositifs ne seront pas pris en compte dans ce travail, car notre but est de chercher comment les fermes houlomotrices offshore agissent sur la côte en définissant ces impacts sur cette dernière sous son vent.

Dans ce contexte le principe de fonctionnement sert au captage d'énergie en grande quantité, tout en diminuant la hauteur des vagues sous le vent de l'appareil.

Concluant que les dispositifs ou les convertisseurs de dépassement offshore conviennent aux fins de cette thèse.

Finalement deux types de convertisseurs WEC seront sélectionnés dans l'étude qui suivra :

Le Wave Dragon (Kofoed et al., 2006; Tedd & Kofoed, 2009) et WaveCat (Fernandez et al., 2012; Iglesias et al., 2008). Ces dispositifs sont implémentés dans des profondeurs de 20m à 40m dans des eaux relativement profondes.

#### ➤ **Wave dragon**

Le Wave Dragon (Figure 1.7) est un dispositif offshore, flottant et amarré. Il possède des chambres de lestage permettant d'ajuster sa ligne de flottaison en fonction de la houle incidente. Il est équipé de 16 turbines basse chute (type Kaplan) permettant d'évacuer l'eau du réservoir, transformant ainsi l'énergie potentielle accumulée en énergie électrique. L'utilisation de plusieurs

turbines permet de mieux optimiser le rendement global du système en fonction du débit. Les turbines Kaplan entraînent ainsi des génératrices synchrones à aimants permanents en entraînement direct. Les dimensions de la version échelle 1:1 sont 300 m (distance entre extrémités des bras), 170 m (longueur) et 17 m de hauteur, dont 3 à 6 m au-dessus du niveau de la mer. La masse totale est de 33 000 tonnes avec un réservoir d'une capacité de 8000 m<sup>3</sup>. Sa puissance maximale est de 7 MW avec une productivité annuelle de 20 GWh pour une ressource moyenne de 36 kW/m. Ainsi le nombre d'heures en équivalent à pleine puissance atteint 2800 heures.

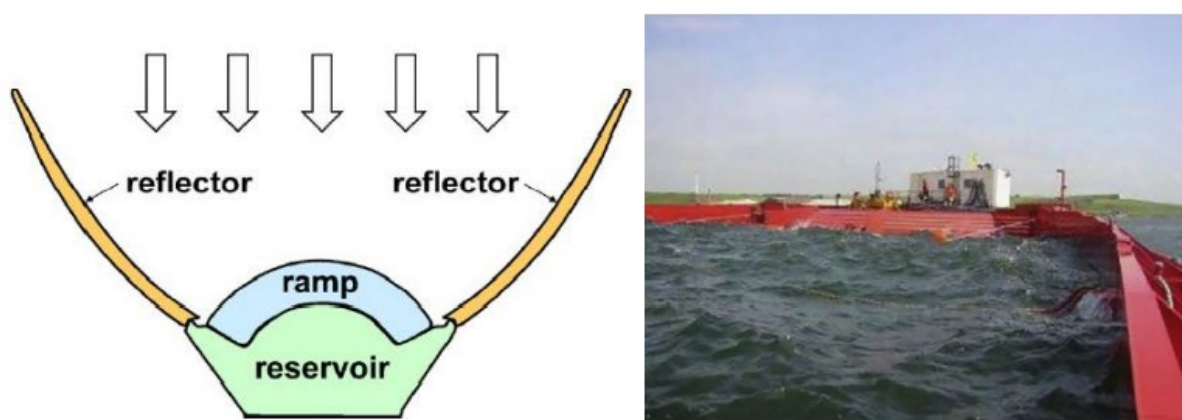


Figure 1.7 : Schéma de Wave Dragon et and le prototype installé à Nissum Bredning.

Source: Courtesy of Wave Dragon (2005).

### ➤ WaveCat

Le WaveCat (Figure 1.8) se compose de deux coques symétriques reliées à la poupe par une charnière, permettant de faire varier l'angle relatif entre les coques en fonction de l'état de la mer. De plus, le franc-bord du dispositif diminue le long du bord intérieur vers la poupe permettant aux vagues entrantes de continuer à dépasser malgré la réduction de hauteur provoquée par le dépassement lui-même. De plus, le tirant d'eau et l'assiette du dispositif peuvent être modifiés grâce à l'utilisation de ballasts pour s'adapter aux états de la mer et régler le franc-bord pour répartir les volumes de franchissement dans tout le dispositif. Les volumes d'eau de débordement sont

collectés dans des réservoirs à bord contenus dans les coques et libérés par des turbines à basse pression pour produire de l'électricité. La longueur totale du prototype prévu est de 45 m et est destiné à fonctionner dans des profondeurs d'eau comprises entre 20 m et 50 m. En règle générale, ces profondeurs d'eau se trouvent plus au large, où le profil bas de l'appareil limitera les impacts visuels par rapport aux grandes structures offshore telles que les éoliennes.

L'appareil est amarré via un point unique au fond de la mer, à l'aide d'un amarrage à patte d'ancre caténaire (CALM). Cela permet au dispositif de s'orienter passivement le long de la direction de propagation des ondes, réduisant ainsi le besoin de systèmes complexes consacrés au maintien de la direction du dispositif. La capacité de survie de l'appareil est étroitement liée à l'angle de coin. En réduisant l'angle à  $0^\circ$ , fermant efficacement la cale, le dispositif agit comme un corps de coque unique.

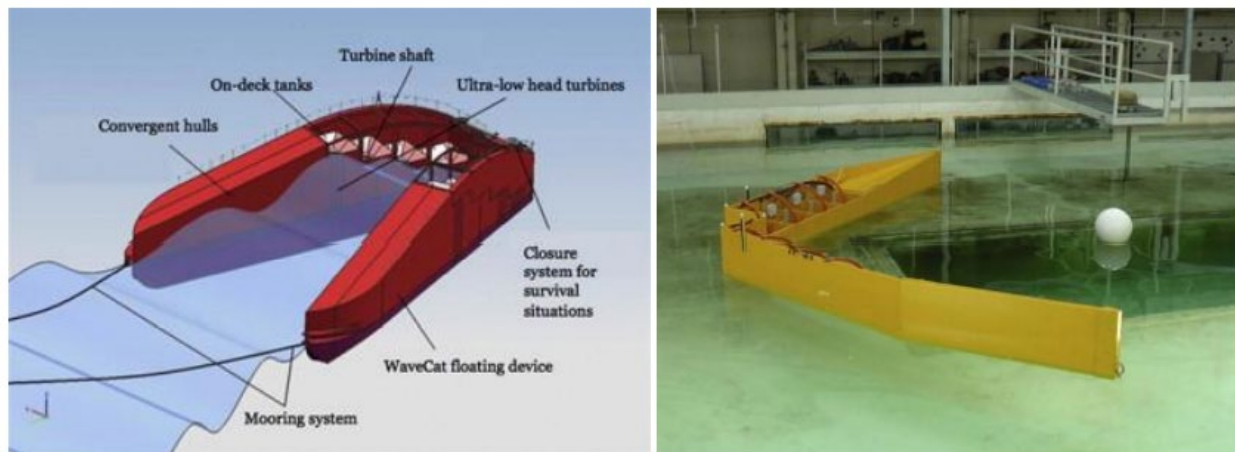


Figure 1.8 : Schéma du WaveCat and et un prototype du laboratoire de Porto à l'échelle 1:50 (Fernandez et al., 2012).







## CHAPITRE 2

### DONNEES ET ETUDE DE CAS

#### 2.1 Situation géographique

##### 2.1.1 Baie de Bou-Ismaïl :

La Baie de Bou Ismail, anciennement appelée **Castiglione**, est l'une des plus importantes baies de la côte algérienne, elle est située dans la partie centrale du littoral algérien, à 50 km à l'ouest d'Alger dans la wilaya de Tipaza, entre 2°25' à l'Ouest et à 2°55' à l'Est.

##### 2.1.2 Site d'étude :

La zone de Palm Beach-Azur (Figure 2.1) est implantée au niveau du secteur Est de la baie de Bou-Ismaïl dans la commune de Staouali à environ 27km à l'ouest d'Alger, elle s'étend sur un linéaire côtier de 2000 m, délimité à l'ouest par la Méditerranée, à l'Est par la commune de Zéralda, au Nord par le port présidentiel, au Sud par l'épi transversal et les brise-lames du complexe touristique de Zéralda, aux niveaux de :

- ✓ Latitudes: 36°43'44" à 36°44'48".
- ✓ longitudes: 2°50'12" à 2°50'44".

La proximité de cette zone de la capitale et son ouverture sur la Méditerranée, fait d'elle l'objet de la convoitise et un point d'attrait pour les besoins touristiques.

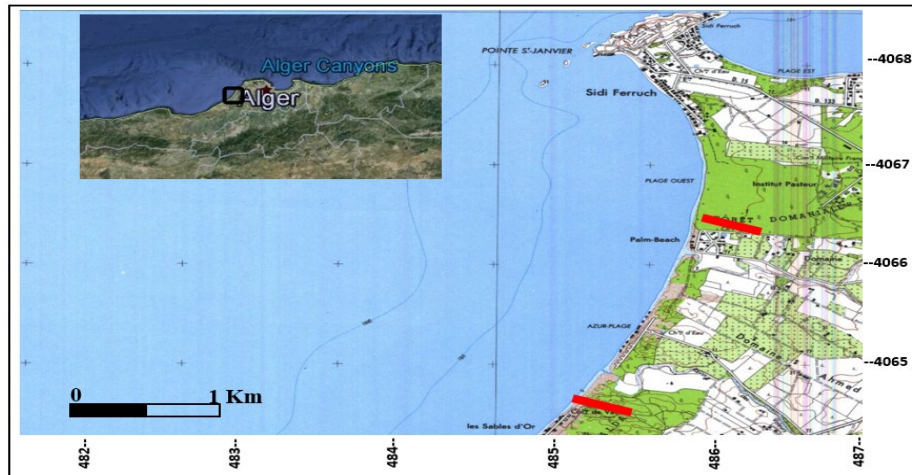


Figure 2.1: Situation géographique de la zone de Palm Beach-Azur (IGN, France; 1960)

## 2.2 Le cadre géologique, géomorphologique et sédimentologique

### 2.2.1 Géologie régionale et locale :

#### A. Géologie régionale

La région d'Alger est constituée d'un socle métamorphique primaire, le massif d'Alger, bordé de dépôts sédimentaires du Sahel et de la Mitidja tel qu'illustré à la Figure 2.2.

#### ▪ Le Primaire

Les terrasses primaires forment les massifs de Ain Benian et de Bouzareah (massif d'Alger) et se prolongent vers Sidi Fredj à l'ouest et Bordj El Bahri à l'est. Ces massifs sont constitués de roches cristallophylliennes de nature pelitique et carbonatées (gneiss, schiste, calcaire) recoupés par des épisodes éruptifs d'ère tertiaire (Glangeaud, 1932).

#### ▪ Le Secondaire

Connu dans l'atlas Blidéen, mais n'affleure pas dans la région d'Alger.

### ▪ Le Tertiaire

Marqué par le Miocène et le Pliocène qui recouvrent en discordance les faciès métamorphiques par des grès grossiers sableux et des marnes à lentilles de calcaires (Benallal & Ourabia, 1989).

### ▪ Le Quaternaire

Il comporte plusieurs faciès lithologiques d'origine marine et continentale (Glangeaud & al, 1952) :

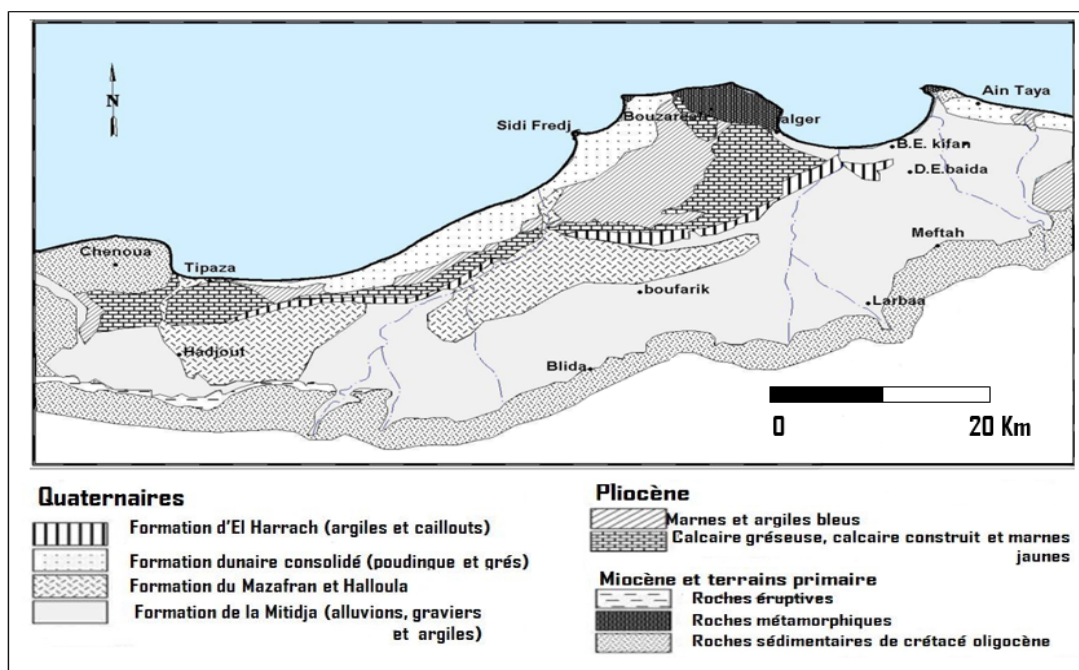


Figure 2.2 : Carte géologique régionale (Bennie 1983 in Amghar et Sahraoui, 2005)

### B. Géologie locale:

La bordure littorale de la zone d'étude se caractérise par une importante accumulation de dunes récentes, d'alluvions, de sables et de graviers tandis que la bordure Nord est constituée de terrains d'ères quaternaires.

Ce littoral est représenté par le faciès Quaternaire marin (atteignant 10 mètres d'épaisseur) qui présente une succession de couches qui sont les suivantes : calcaire coquillier (Lumachelle),

grés, les dépôts de plage (où se termine l'épisode marin) et enfin les dépôts dunaires plus lapidifiés (terrasses plus récentes).

### **2.2.2 Géomorphologie**

La zone de Palm Beach- Azur fait partie du littoral du sahel occidental d'Alger et correspond à une étroite plaine côtière dont la largeur et l'altitude sont respectivement comprises entre 500m et 1000m entre 0 et 25 m de profondeur.

La plateforme côtière se réduit à une bande littorale ne dépassant pas 200 m (Bérard-Rocher plat, Bou Ismaïl, etc.) les côtes sont en général basses et surtout sableuses à l'Est de l'Oued Mazafran (DTP, 2009).

### **2.2.3 Sédimentologie**

La baie de Bou-Ismaïl se caractérise par une texture sédimentologique disparate dont neuf faciès peuvent être identifiés (les sables fins, les sables fins envasés, les vases sableuses, les sables graveleux, les gravies envasés, les sables grossiers et fins graviers, les vases pures, le faciès rocheux) tel qu'illustré à la Figure 2.3.

Le sable fin et grossier domine la zone de Palm Beach-Azur sur la branche côtière de 0 à 20m. Au-delà de cette profondeur, la vase sableuse et pure prend place jusqu'à 100m de profondeur où apparait le gravier envasé.

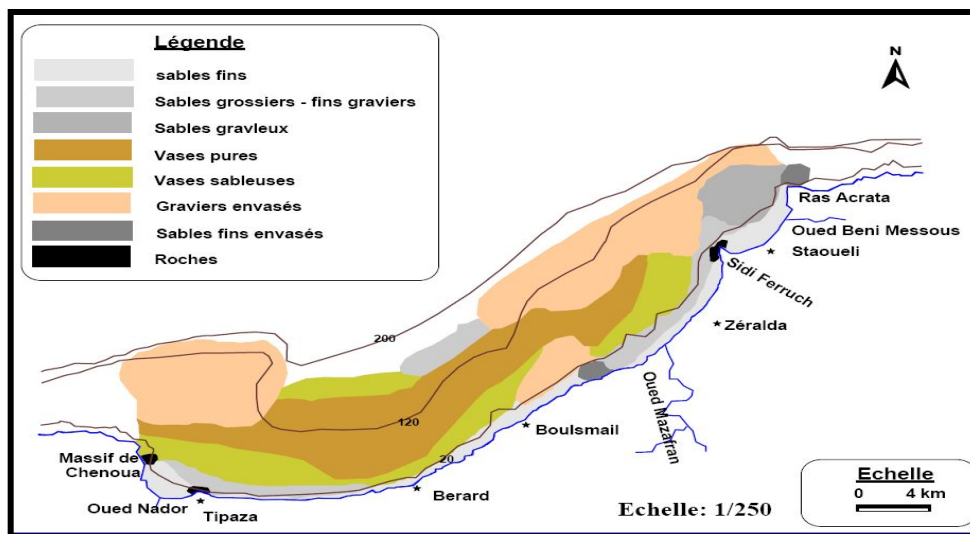


Figure 2.3: Sédimentologie de la baie de Bou-Ismaïl (LEM,1998)

## 2.3 Cadre climatologique et hydrologique :

### 2.3.1 Climatologie :

La détermination du caractère de climat est très importante pour mieux apprécier les régimes hydrodynamiques se déployant dans la zone d'étude et qui est responsables de toute transformation morpho-sédimentaire.

La baie de Bou Ismaïl comme l'ensemble de la côte algérienne est caractérisée par un climat méditerranéen tempéré ; relativement froid et humide en hiver, chaud et sec en été.

#### A. Étude des vents :

Les côtes sont toujours plus ventées que leur arrière-pays immédiat parce que les vents qui les abordent n'ont pas été freinés par des obstacles topographiques pendant leur course en raison de leur fréquence et de leur vitesse, ils jouent un rôle dans l'évolution des plages par leur participation à l'hydrodynamisme littoral.

- **Vent au large:**

Les vents sont générateurs de vagues et de courants, leurs impacts croient avec leurs vitesses. Lorsque l'action des vents est continue, elle génère des houles. Dans la baie de Bou-Ismaïl, la répartition des vents est parfaitement liée au régime annuel des houles. Les données recueillies par le SSMO (Summary of Synoptic Meteorological Observations) au large d'Alger confirment l'existence de deux périodes distinctes (Figure 2.4) :

- Une période hivernale (octobre-Mars): avec des vents dominants de secteur Ouest; avec une fréquence allant de 60 à 80%.
- Une période estivale (Avril-Septembre): les vents dominants sont de secteur Est et Nord Est, avec des fréquences de 45 à 75% pour le secteur Nord Est.

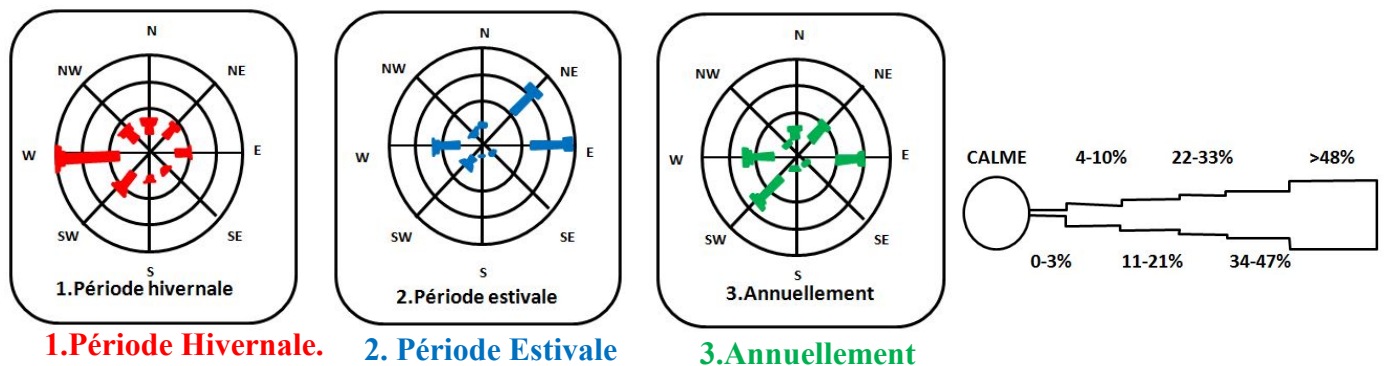


Figure 2.4: Roses récapitulatives saisonnières et annuelles des fréquences d'apparition du vent au large (L'US Naval Weather service, de 1963 à 1970)

- **Vent local:**

Le Tableau 1 et la Figure 2.5 montrent les données de vent sur une période de 20 ans de 01/01/1995 au 31/12/2015 (Office National de la Météo - ONM, 2016).

Tableau 1 : Distribution fréquentielle du vent à la station météorologique de DAR EL BEIDA selon seize (16) directions

<b>Direction</b>	<b>N</b>	<b>NNE</b>	<b>NE</b>	<b>ENE</b>	<b>E</b>	<b>ESE</b>	<b>SE</b>	<b>SSE</b>	<b>S</b>
Fréquence %	5	4	7	5	2	1	1	1	2
<b>Direction</b>	<b>S</b>	<b>SSW</b>	<b>SW</b>	<b>WSW</b>	<b>W</b>	<b>WNW</b>	<b>NW</b>	<b>NNW</b>	<b>calme</b>
Fréquence %	2	2	5	7	9	2	2	4	43

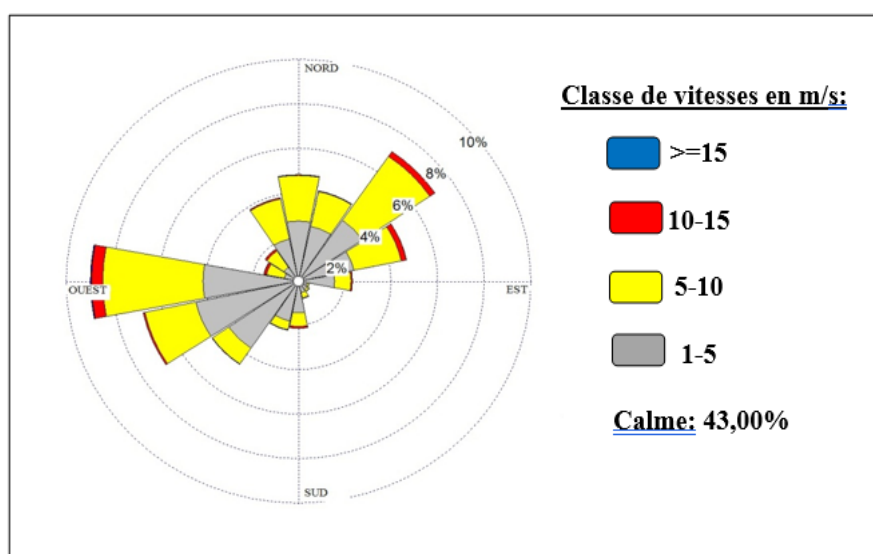


Figure 2.5: Répartition annuelle des vents en % (ONM, Dar-El-Beida, 1995-2015)

Les mesures de vent de la station de Dar-El-Beida indiquent que les vents soufflent environ 57% du temps dans la région. Cependant, les plus importants d'entre eux sont de secteur :

- **Ouest:** ne soufflent que 9% du temps, mais sont les plus significatives et dépassent la vitesse de 10m/s.
- **Nord-est:** qui soufflent 7% du temps, mais ont une vitesse dépassant les 10m/s.
- **Est-nord est:** soufflent 5% du temps avec une vitesse significative dépassant les 10m/s.

- **Ouest-Sud-Ouest** : ces vents ont une vitesse qui est aux alentours de 10m/s avec une fréquence d'apparition de 7% du temps.

## B. Précipitations et température

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par des pluies qui sont fréquentes en automne et en hiver, où la précipitation peut atteindre 351.7 mm, la température par contre sera très faible durant cette période arrivant en moyenne à 9.1C° (Figure 2.6).

La précipitation va diminuer dès la fin du printemps et devienne presque nulle en été, tandis que la température continue d'augmenter durant cette période arrivant jusqu'à 31.5 C° en mois d'Août.

Il existe cependant, une période transitoire entre mars et mai où les précipitations moyennes varient entre 124 et 187.2 mm, c'est ce qu'on appelle la période des crues.

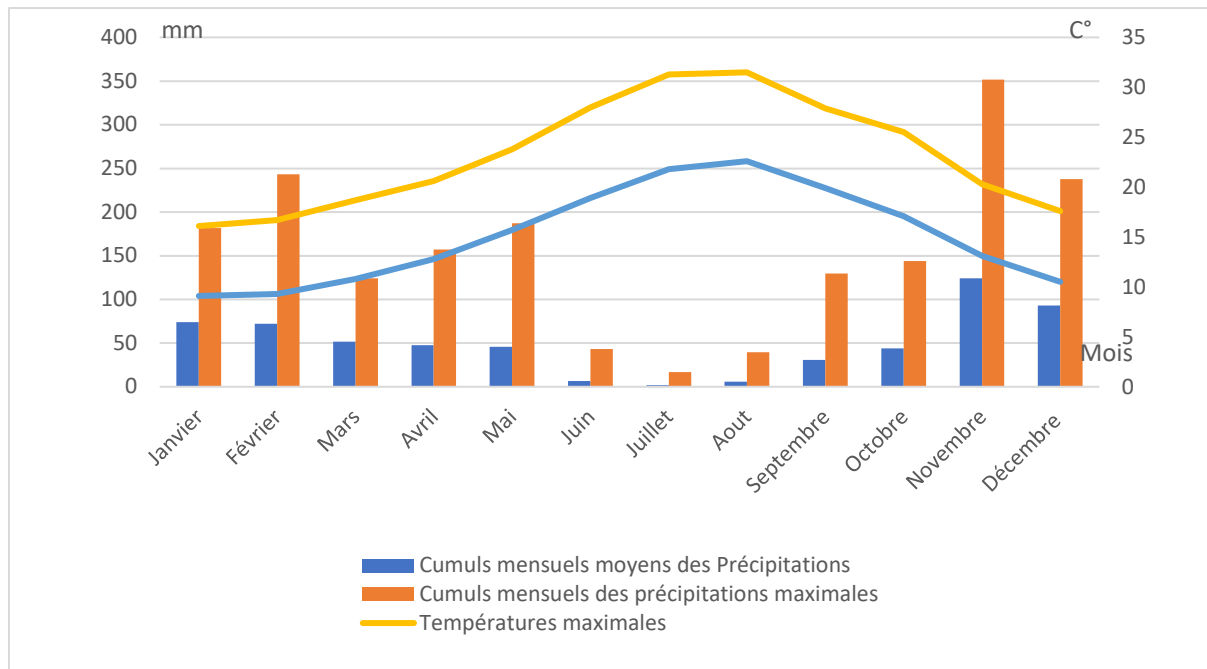


Figure 2.6: Répartition annuelle des précipitations et températures (ONM, Dar-El-Beida, 1995-2015)



### 2.3.2 Hydrologie

Pour la zone de Palm Beach-Azur, seul l'oued Mazafran (Figure 2.7) peut avoir une influence sur l'hydrodynamisme du site d'étude, compte tenu de ses caractéristiques.

Le bassin versant du Mazafran est de l'ordre de 1850 Km<sup>2</sup>, où la pluviométrie au niveau de celui-ci est de 720 mm/an. Cet Oued à fort débit (débit solide est estimé entre 1400 et 1800 t/km<sup>2</sup> tandis que le débit liquide est à 43,8 millions m<sup>3</sup>/an) se caractérise par un long étiage de six mois et des crues d'hiver et de printemps soudaines fortes et rapides.

Les aménagements existants sur ce cours d'eau sont : les barrages de Béni Amrane, de Ladrat et celui de Koudiat Asserdoun.

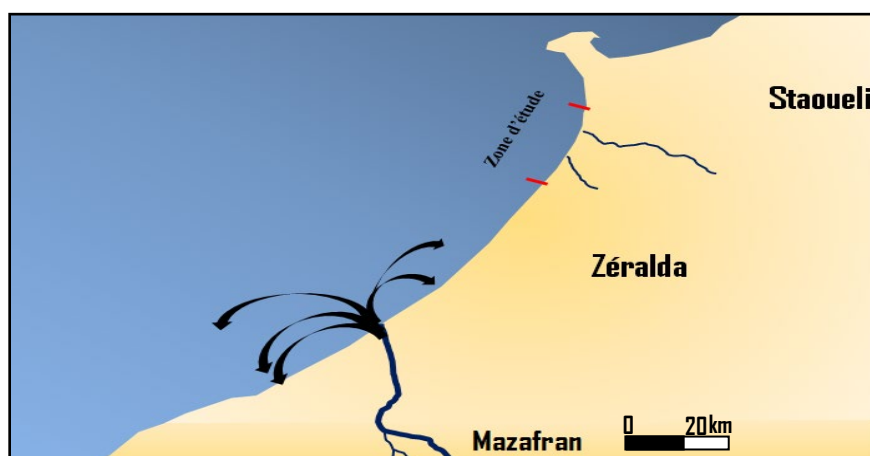


Figure 2.7 : Le bassin versant du Mazafran et son embouchure par rapport à la zone.

## 2.4 Courants et houles :

### 2.4 .1 Les courants :

Les courants jouent un rôle très important dans le transport sédimentaire et participent dans l'évolution de la morphologie côtière. Par conséquent, ils peuvent donner naissance aussi bien à

des accrétions (ensablement) qu'à des déficits sédimentaires (érosion). Il existe plusieurs types de courants qui peuvent réguler la zone côtière, parmi lesquels on peut citer :

### A. Les courants de densité et le courant général

C'est un courant qui est lié à la densité différentielle de l'eau de mer, lequel est également influencé par la rotation de la terre.

Le courant général relatif à notre zone d'étude est d'origine atlantique, il se déplace d'Ouest en Est le long des côtes algériennes sous l'effet de la force de Coriolis tel qu'illustré à la Figure 2.8. Sa vitesse est de 1.5 à 2 nœuds, son action se fait sentir jusqu'à une profondeur de 200m. Il est encore très sensible au large de la côte algéroise (vitesse de 0.7 nœuds).

Ce courant de surface est compensé en profondeur par un contre-courant qui longe les côtes espagnoles. La vitesse de ces courants peut être augmentée par un régime de vent d'Ouest pour atteindre 2.5 à 3 nœuds.

Ce courant général entre 1° et 2° Est devient instable pour former des tourbillons anticycloniques, accompagnés de phénomènes d'*upwelling* (Millot et al 1990).

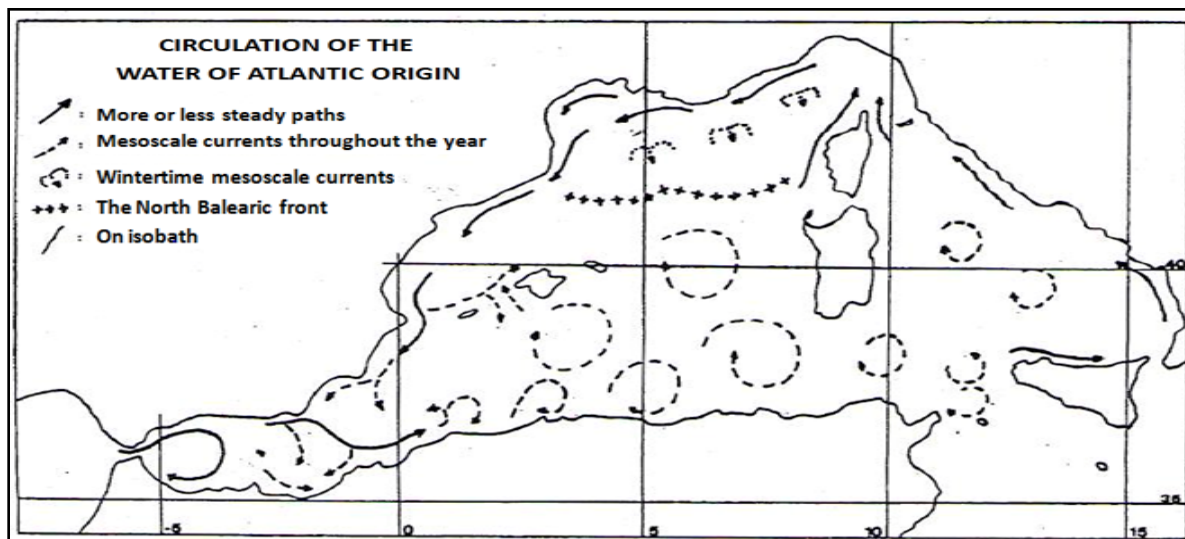


Figure 2.8 : Circulation de l'eau atlantique modifiée dans la Méditerranée (Millot, 1987).

## B. Courant de houle

Les transferts côtiers sont surtout conditionnés par les différentes dérives littorales engendrées par la houle, pendant l'hiver ils ont une direction Ouest-est du fait de la houle dominante de Nord-ouest (Figure 2.9). Le reste de l'année, les courants ont plutôt une direction Est-ouest.

Lorsque la houle est frontale, des échanges importants peuvent se faire entre la côte et le large par des courants orientés vers le large (rip current), ces courants traversent la zone de déferlement et peuvent être importants et dépassent 1m/s (**Rapport DTP 2009**).

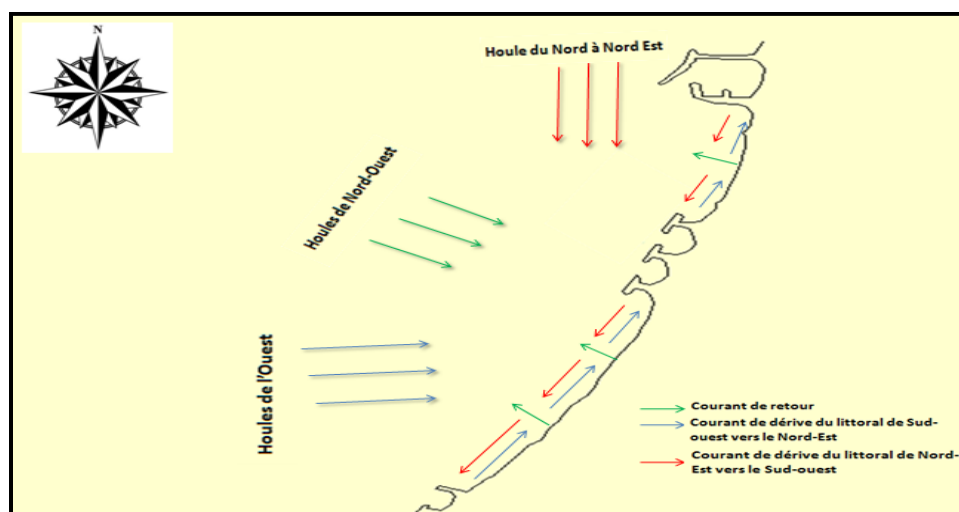


Figure 2.9 Schéma préalable de l'hydrodynamisme dans la zone d'étude (Palm Beach Azur).

### 2.4.2 Les houles au large

La connaissance des caractéristiques de la houle permet de comprendre le déplacement sédimentaire dans la zone de déferlement, le volume et le sens de transit littoral en fonction de son

incidence à la côte. Ces caractéristiques conditionnent le dimensionnement de l'ouvrage de protection de la côte ainsi que son implantation. On a utilisé deux sources de données :

**A. Observation du SSMO 1963-1970:**

Les données de houle au large sont prises du document « S.S.M.O Tome 2, zone Algiers »

• **Fréquences mensuelle de houle :**

Tableau 2: Fréquences mensuelles de la houle du large par direction (rapport DTP 2009)

Mois	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Janvier</b>	8.1	12.9	148.2	5.0	6.5	13.2	28.8	7.3
<b>Février</b>	8.8	10.3	12.6	4.0	6.1	16.9	35.6	5.8
<b>Mars</b>	11.3	12.6	15.8	3.6	4.5	12.3	30.5	9.2
<b>Avril</b>	11.7	15.4	16.0	2.0	4.4	13.7	26.7	10.2
<b>Mai</b>	8.2	26.3	31.9	3.0	3.3	7.2	13.9	6.2
<b>Juin</b>	9.2	29.1	29.8	1.8	1.4	8.2	16.4	4.2
<b>Juillet</b>	5.9	32.5	35.1	1.4	1.0	5.9	16.3	2.0
<b>Août</b>	8.8	27.7	37.3	1.9	1.1	5.0	13.4	4.9
<b>Septembre</b>	6.7	26.4	40.5	2.2	2.3	4.6	14.8	2.5
<b>Octobre</b>	7.8	14.1	20.3	3.2	4.2	14.8	28.8	6.8
<b>Novembre</b>	5.5	5.8	10.0	5.1	8.0	15.9	40.4	9.4
<b>Décembre</b>	10.2	6.2	9.4	4.6	7.5	15.0	37.1	10.0
<b>Moyenne</b>	8.5	18.3	23.1	3.2	4.2	11.1	25.2	6.5

- Les fréquences d'apparition les plus élevées sont celles des houles de secteur Ouest, Est et Nord-est, tandis que les plus faibles sont enregistrées pour les houles de secteur Nord et Nord-ouest.
- Les fréquences d'observations sur l'année des houles d'Est et d'Ouest sont sensiblement identiques avec toutefois une légère prédominance du secteur Est.
- Les houles de tempêtes proviennent essentiellement du secteur Ouest.

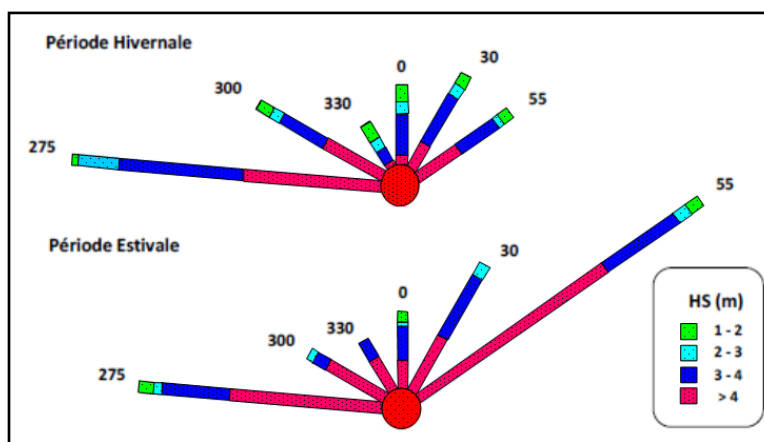


Figure 2.10 : Roses récapitulatives de direction des houles au large du secteur (275°-55°).

(K.N.M.I in Zemenzer 2004)

On déduit que la répartition des houles est globalement concordante avec le régime des vents (Figure 2.10) :

**En hiver :** Les houles d'Ouest dominent avec la majorité des amplitudes de 1 et 3 m et pouvant atteindre les 4m.

**En été :** Les houles les plus dominantes sont issues du secteur Nord-Est avec des amplitudes moins faibles et les houles de secteur Ouest sont assez importantes.

- **Relation période-amplitude de la houle au large :**

Tableau 3 : Répartition des états de mer par période (Rapport DTP 2009).

<b>Etat de la Mer</b>	<b>Amplitude (mètre)</b>	<b>Période de la houle-global</b>
<b>Calme (&lt;0)</b>	<0.25	5.3
<b>0</b>	0.25-0.75	23.1
<b>1</b>	0.75-1.75	41.1
<b>2</b>	1.75-2.75	12.2
<b>3</b>	2.75-3.75	3.3
<b>4</b>	>3.75	1.5
<b>Indéterminée</b>		13.5

Les houles observées ont pour la majorité une période courte, inférieure ou égale à 7s pour 75% des cas. Par contre, 3% seulement présentent une période comprise entre 10 et 13s

- Les houles extrêmes du large

**Tableau 4:** Amplitudes des houles en fonction des directions et leurs périodes de retour (*SSMO, 1963-1970*)

Direction de houle	Est	Nord-est	Nord	Nord-Ouest	Ouest	Toutes directions
<b>Biennale</b>	4.12 m	4.93 m	4.90 m	4.16 m	7.36 m	7.44 m
<b>Quinquennale</b>	4.70 m	5.67 m	5.75 m	4.87 m	8.43 m	8.34 m
<b>Décennale</b>	5.14 m	6.23 m	6.38 m	5.40 m	9.22 m	9.02 m
<b>Vingtennale</b>	5.59 m	6.79 m	7.02 m	5.94 m	10.02 m	9.70 m
<b>Cinquantenier</b>	6.17 m	7.53 m	7.87 m	6.65 m	11.08 m	10.60 m
<b>Centennale</b>	6.62 m	8.08 m	8.50 m	7.18 m	11.88 m	11.27 m

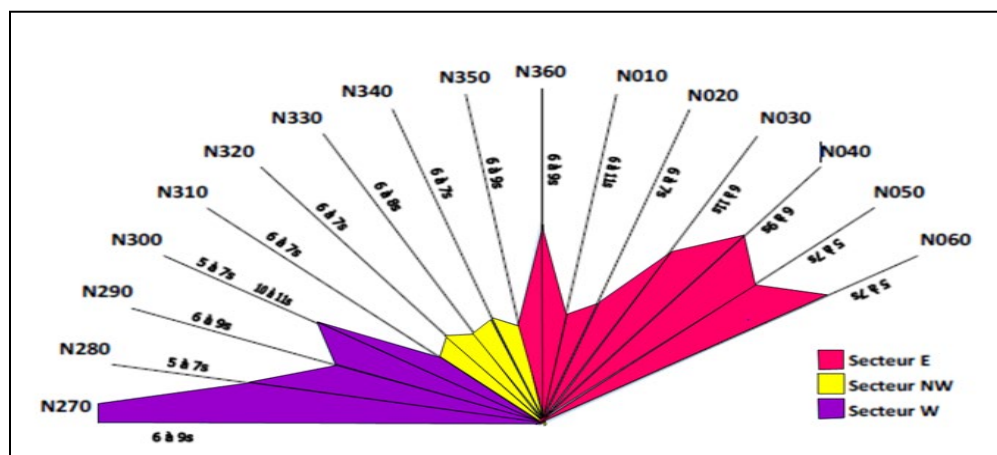


Figure 2.11: Répartition des énergies des houles en fonction de la direction et des périodes les plus courantes. (Source : K.N.M.I in Zemenzer 2004)

Les données du Tableau 4 concordent avec celles observées auparavant (Tableau 3), pour les périodes de retour biennales, on observe que ce sont les houles essentiellement de direction Ouest qui sont les plus énergétiques avec une valeur de 7.36m. Par contre les houles de direction Est sont les plus faibles avec des valeurs centennales ne dépassant pas une hauteur de 7m (Figure 2.11).

On conclue que :

- En hiver les houles prédominantes sont de secteur Ouest-nord-ouest, avec une période moyenne de 8 à 9s. Les périodes comprises entre 10 et 13s sont révélées lors de grandes tempêtes.
- L'amplitude moyenne la plus fréquente est de 2 à 3 m et certaines houles elle peut atteindre une valeur maximale de 4 à 6 m.
- La longueur d'onde des houles d'hiver les plus fréquentes est de 150 à 170 m avec une célérité de 14m/s. Par « gros temps » les valeurs sont plus élevées : longueur d'onde de 200m et célérité de 17m/s. Dans ces conditions, la profondeur de déferlement peut être estimée entre 5 et 8 m.

#### **B. Données de L'ONSM: 1998-2000**

Les données de houles au large sont issues de l'ONSM, avec des résultats toutes les 3 heures. Ce sont des enregistrements réguliers de l'amplitude et de la période des houles au large du Cap Matifou qui ont été obtenues à l'aide de bouée non directionnelle (DATAWELL) durant les années 1998, 1999, 2000.

Les résultats obtenus après dépouillement des enregistrements sont regroupés dans le Tableau 5 ci-dessous :



Tableau 5 : Moyennes mensuelles de Hs et Tp (1998-2000).

<b>Enregistrement</b>	<b>Hauteur significative (Hs en m)</b>	<b>Période significative (T en s)</b>	<b>Description</b>
<b>10/1998</b>	1,628	5,17	<b>Agitée</b>
<b>11/1998</b>	1,901	5,53	<b>Agitée</b>
<b>12/1998</b>	1,808	5,36	<b>Agitée</b>
<b>01/1999</b>	1,744	5,26	<b>Agitée</b>
<b>02/1999</b>	2,136	6,09	<b>Agitée</b>
<b>03/1999</b>	1,249	4,84	<b>Peu agitée</b>
<b>04/1999</b>	1,669	4,83	<b>Peu agitée</b>
<b>05/1999</b>	0,695	3,93	<b>Peu agitée</b>
<b>06/1999</b>	0,475	3,38	<b>Peu agitée</b>
<b>07/1999</b>	0,922	4,24	<b>Peu agitée</b>
<b>08/1999</b>	0,697	3,84	<b>Peu agitée</b>
<b>09/1999</b>	0,709	3,83	<b>Peu agitée</b>
<b>10/1999</b>	1,599	4,98	<b>Agitée</b>
<b>11/1999</b>	1,987	5,74	<b>Agitée</b>
<b>04/2000</b>	1,669	4,83	<b>Agitée</b>
<b>05/2000</b>	0,73	3,9021	<b>Peu agitée</b>
<b>06/2000</b>	1,206	4,54	<b>Agitée</b>
<b>07/2000</b>	0,922	4,24	<b>Peu agitée</b>

- **Pour l'année 1998**

Les 3 mois d'enregistrement d'octobre à décembre ont marqué des valeurs de Hs élevées avec des amplitudes de 1,62 à 1,90m pour des périodes respectives de 5,17 à 5,53s.

- **Pour l'année 1999**

Les hauteurs de houle les plus élevées sont marquées pour les mois de janvier, février, mars, avril, octobre, novembre avec des amplitudes qui varient de 1,24 à 2,13m pour des périodes allant de 4,83 à 6,09s.

Les faibles valeurs de Hs sont marquées pendant le mois de mai jusqu'au mois de septembre pour des amplitudes de 0,47m allant à 0,92m pour des périodes qui varient de 3,38 à 4,24s.

- **Pour l'année 2000**

Les hauteurs les plus élevées sont enregistrées pour le mois d'avril et le mois de juin avec des amplitudes maximales de 1,66m et une période respective de 4,83s. Les faibles hauteurs sont marquées pour le mois de mai avec une amplitude de 0,73m pour une période de 3,9s, et le mois de juillet avec une amplitude de 0,92m et une période de 4,24s.



## CHAPITRE 3

### METHODES, RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1 Interaction WEC-VAGUE

Afin de déterminer la meilleure configuration de l'emplacement des WEC en proximité de la côte, plusieurs études ont été faites. Nous avons analysé les interactions des WEC avec les vagues, dans le but de déterminer l'influence de ces équipements sur l'énergie des vagues qui rejoignent la terre. Nous avons évalué l'emplacement optimal pour diminuer les interactions négatives entre les WEC. Ces analyses ont été faites à l'aide de modèles numériques SWAN pour déterminer l'influence de différents paramètres. La disposition optimale des WEC dépend de certaines variables comme : (i) les conditions aux limites de la ferme houlomotrice, c'est-à-dire les conditions climatiques des vagues, (ii) l'emplacement de la ferme houlomotrice, par ex. la distance à la côte et la profondeur de l'eau, et (iii) le type de convertisseur d'énergie houlomotrice (Abanades.T, 2016). Le type de WEC est probablement l'aspect le plus important puisque les processus qui régissent l'interaction WEC-onde varient en fonction du WEC.

L'absorption d'énergie est le processus prédominant qui régit l'interaction entre les WEC et le champ de propagation d'énergie de vagues. Ces appareils absorbent l'énergie des vagues en capturant le volume d'eau des vagues dépassées dans un réservoir, puis en créant une charge hydraulique. Cela génère un sillage en arrière des équipements de captation qui affecte les performances des WEC installés dans les lignes suivantes. En somme, la redistribution de l'énergie houlomotrice dans la ferme variera en fonction du type de WEC déployé (Beels et al., 2010a). Child et Venugopal (2010), sur la base de leurs premiers travaux (Child & Venugopal, 2007), ont été les pionniers de l'optimisation des agencements de fermes à vagues. Ils ont analysé différentes configurations de réseaux dans différentes conditions de vagues. Le processus d'optimisation est réalisé avec des réseaux de cinq dispositifs flottants activés par les vagues, identiques en géométrie et en caractéristiques de prise de force. L'interaction de chaque réseau a été déterminée en appliquant un modèle numérique qui a pris en compte l'onde incidente, l'onde diffusée et rayonnée en conjonction avec le mouvement de l'appareil. De plus, un algorithme génétique (G) et la méthode



d'intersection parabole (PI) ont été utilisés pour obtenir la configuration. Les résultats ont montré que les formations échelonnées maximisaient la ressource de la ferme houlomotrice (Figure 3.1).

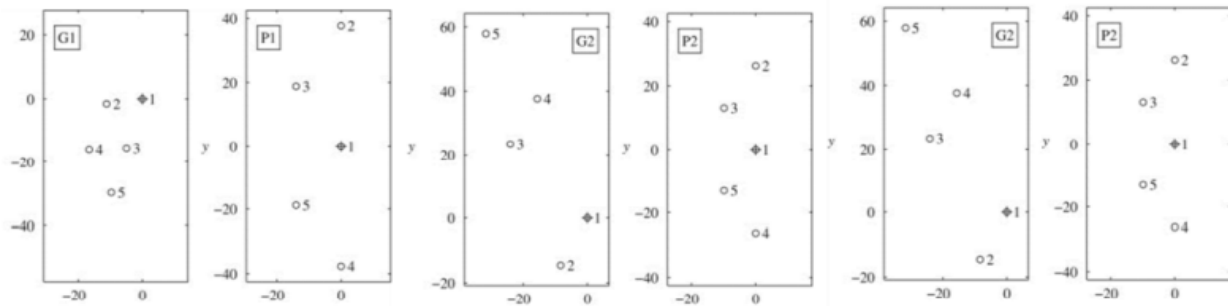


Figure 3.1 : Configuration optimale de la baie (unités : m). Le G et P désignent la méthode appliquée pour optimiser la mise en page et correspondent respectivement à l'algorithme général et à l'intersection de la parabole. Le nombre signifie l'objectif poursuivi : (1) maximiser la puissance dans un ensemble d'appareils à réglage réel, (2) maximiser la puissance dans un ensemble d'appareils à réglage réactif, et (3) minimiser la puissance dans un ensemble d'appareils à réglage réactif (Child et Venugopal, 2010).

Babarit (2010) a étudié l'interaction WEC-onde en fonction de la distance entre les appareils, pour des raisons pratiques, par exemple les coûts de raccordement au réseau et d'amarrage, les distances entre les appareils d'environ des centaines de mètres ont été prises en compte. Les différentes configurations de réseaux ont été étudiées en eau profonde pour simplifier le problème, au moyen d'un modèle d'élément de frontière (BEM) basé sur la théorie de l'écoulement potentiel linéaire dans des conditions de vagues régulières et irrégulières. Sur la base des résultats présentés, il n'est pas recommandé de localiser les appareils à ondes à des distances inférieures à 100 m en raison de l'interaction négative entre les appareils. Pour des distances plus importantes, entre 100 et 500 m, les recommandations sont difficiles à établir, car l'interaction des ondes variait en fonction de la configuration du réseau, en particulier lorsque la direction des ondes incidentes n'était pas alignée avec le réseau. C'est l'un des principaux inconvénients des dispositifs oscillants par rapport aux dispositifs de dépassement puisque ces derniers disposent d'une certaine liberté de mouvement pour être toujours alignés avec la direction de l'onde et ainsi maximiser leurs performances. De même, Borgarino, Babarit et Ferrant (2012) ont évalué l'influence des interactions entre WEC dans la production d'énergie du réseau. Deux WEC ont été considéré :

cylindre de soulèvement et barge de déferlement, qui étaient disposés en réseaux de 9 corps avec des motifs réguliers, formant des grilles carrées ou triangulaires. Cette étude a révélé que la localisation des WEC dans des fermes de vagues formant des configurations carrées n'est pas appropriée, en particulier pour les courts espacements entre les appareils, car l'effet de masquage est exacerbé (Figure 3.2). Dans cette ligne, l'étude corrobore que les réseaux triangulaires, également appelés formations décalées, peuvent être la configuration la plus appropriée, car ils minimisent les interactions destructrices entre les WEC (Abanades.T, 2017).

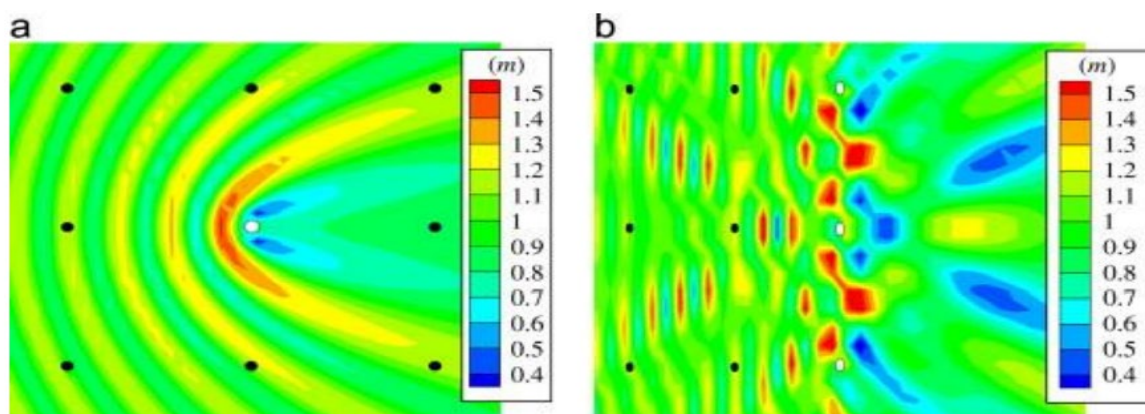


Figure 3.2 : Amplitude de l'onde autour d'un ensemble de cylindres de soulèvement 1 (a) ou 3 (b) dans une vue d'un réseau à 9 corps. La figure a montré l'amplitude de l'onde autour du cylindre blanc ; et la figure b, l'amplitude de l'onde autour des trois cylindres blancs en interaction.

(Borgarino, Babarit et Ferrant, 2012)

Pour compléter le résultat des modèles numériques, une modélisation physique a également été menée pour déterminer l'interaction entre les convertisseurs. Stratigaki et coll. (2014) ont analysé les effets dans de grands réseaux de jusqu'à 25 WEC absorbeurs à points de soulèvement pour une gamme de configurations et de conditions de vagues. Bien que toutes les configurations n'aient pas été analysées, les résultats du réseau rectiligne  $5 \times 5$  WEC ont montré l'atténuation de la hauteur des vagues sous le vent du réseau WEC. La figure 3.3 illustre la modification du champ d'ondes avec les dispositifs pour ondes à grandes crêtes. Alors que dans les premières rangées d'appareils, la hauteur des vagues augmentait, sous le vent de l'atténuation de l'appareil, jusqu'à 18,10% à une distance de  $30D$  - avec  $D$  indiquant le diamètre de l'appareil - a été trouvée. L'analyse

future des configurations de réseau permettront de déterminer la meilleure disposition pour minimiser l'interaction destructrice entre les appareils (Abanades.T, 2017).

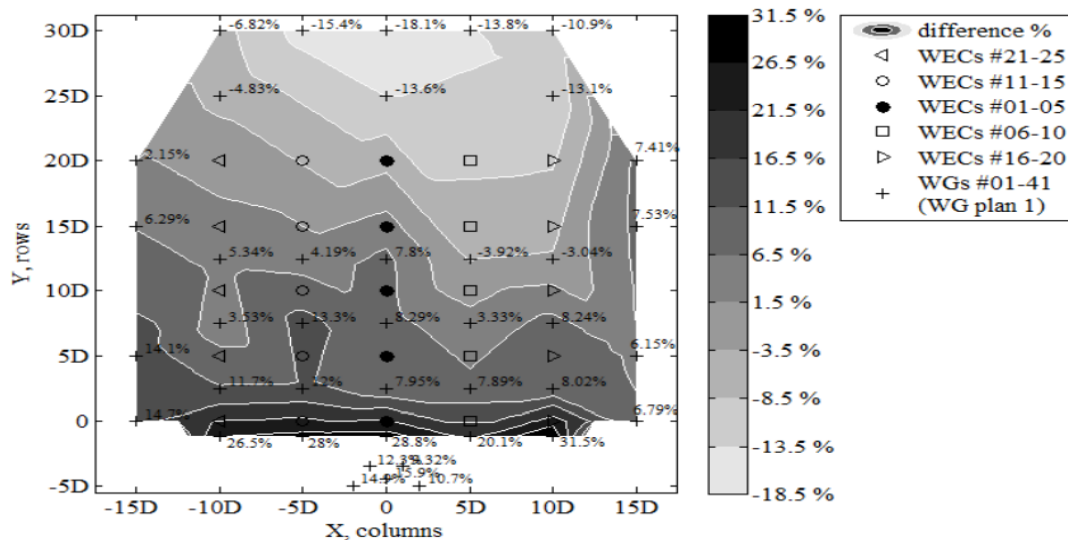


Figure 3.3 : Champ d'ondes perturbé normalisé par un champ d'ondes non perturbé enregistré pour la configuration du réseau 5 x 5 WEC (Stratigaki et al., 2014). La largeur du bassin (X, colonnes) et la longueur (Y, rangées) sont exprimées en nombre de diamètres unitaires WEC,  $D = 0,315$  m.

En ce qui concerne les convertisseurs de dépassement offshore, les études se sont principalement concentrées sur les dispositifs susmentionnés : Wave Dragon et WaveCat. Beels et coll. (2010a); (2010b) ont mis en œuvre le Wave Dragon WEC dans un modèle d'équation à pente douce dépendant du temps (MILDwave) pour établir la ferme de vagues optimale. Pour modéliser les effets combinés de réflexion, de transmission et par conséquent d'absorption d'un WEC, des essais en laboratoire d'un seul appareil ont été réalisés pour déterminer le coefficient de transmission des ondes.

L'optimisation du tracé a été réalisée au moyen de l'évaluation de deux paramètres clé : (i) la distribution des WEC et (ii) l'espacement entre les WEC. En ce qui concerne le premier, à la fois décalé et aligné (également appelé carré) ont été étudiés dans un réseau de 9 WEC disposés en 3 lignes. La représentation des effets sur la hauteur des vagues dans les WEC adjacents et sous le vent des dispositifs a été réalisée au moyen d'un coefficient d'absorption,  $KD$ , qui représentait



le rapport entre la hauteur de vague significative perturbée et la hauteur de vague significative incidente à la limite de la génération des vagues. La Figure 3.4 montre que la réduction de la hauteur significative des vagues est plus élevée devant les dispositifs situés dans la deuxième et la troisième rangée dans le cas de la formation alignée, et donc la formation échelonnée présente de meilleures performances que la grille carrée. Alors que le taux de capture dans la deuxième et la troisième rangée d'appareils était de 45% et 35%, respectivement pour la grille échelonnée, dans le cas de la grille alignée, les deux rangées présentaient des ratios de 30% (Beels et al., 2010a). Cependant, il convient de souligner que cette constatation n'implique pas que l'atténuation de la hauteur des vagues sous le vent du parc à vagues, qui est formé par des grilles décalées inférieure à celle des grilles alignées (Abanades.T, 2017).

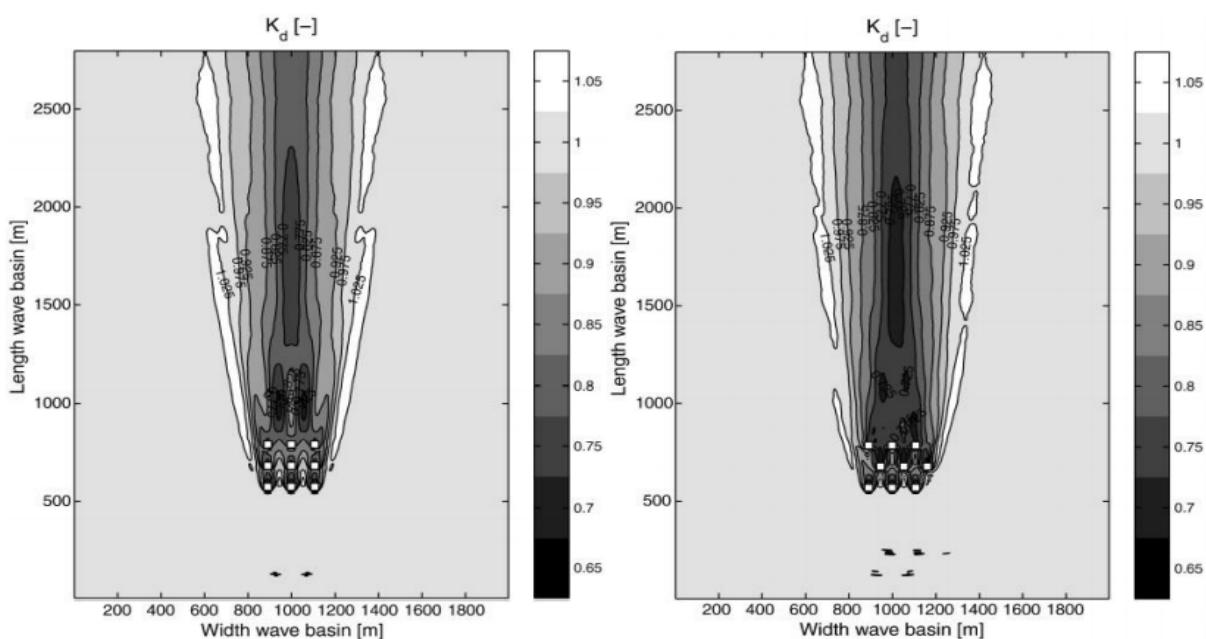


Figure 3.4 Coefficient de perturbation calculé,  $K_D$ , d'un réseau aligné (à gauche) et décalé (à droite) formé par 9 WEC Wave Dragon pour des ondes irrégulières à crête longue (Beels et al., 2010a).

Deuxièmement, et en considérant une formation échelonnée, l'influence de la distance entre les appareils est analysée. Une ferme de 5 « Wave Dragon » a été étudiée avec trois espacements :  $D$ ,  $2D$  et  $3D$ , avec  $D = 260$  m, soit la distance entre les arcs jumeaux de l'appareil. Pour les convertisseurs à débordement, plus l'espacement est grand, moins l'interaction est importante ;

pourtant, il doit également tenir compte du fait que plus la distance est petite, moins le coût de l'exploitation est bas. Les résultats ont montré que la configuration avec une distance entre les appareils de 2D soit 520 mètres était l'espacement optimal de la ferme (Figure 3.5), en tenant compte des considérations de coût et d'espace. En outre, il a été observé que cinq WEC Wave Dragon installés dans une grille échelonnée à une distance de 2D, produiraient pratiquement cinq fois plus d'énergie qu'un seul WEC Wave Dragon, car la puissance des vagues incidente dans la deuxième rangée est à peine affectée par la première rangée. (Beels et al., 2010b).

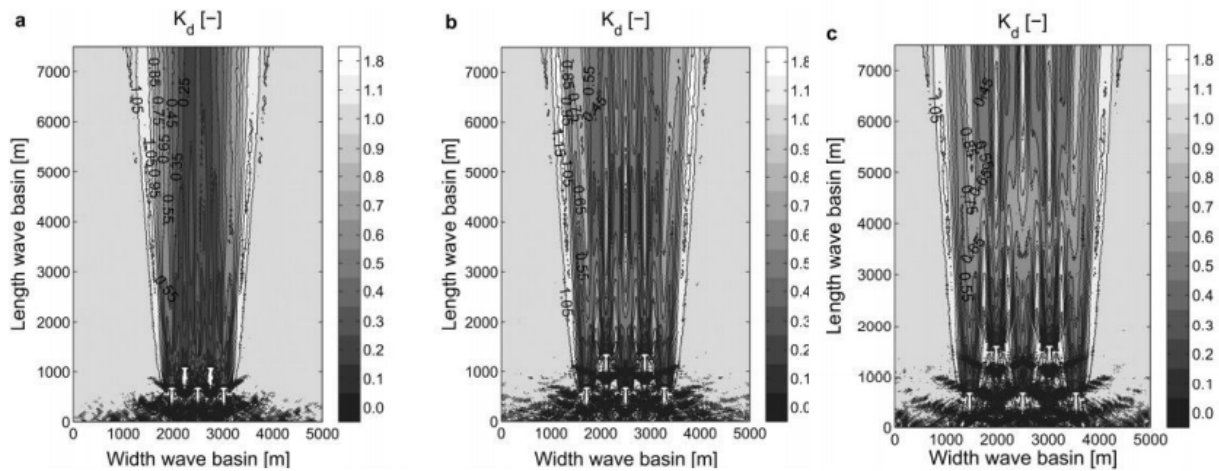


Figure 3.5 Coefficient de perturbation calculé,  $K_d$ , d'un réseau 5 Wave Dragon disposé en deux rangées avec un espacement de  $D$  (gauche - a),  $2D$  (milieu - b) et  $3D$  (droite - c), avec  $D = 260$  m, pour les vagues irrégulières à crête longue (Beels et al., 2010b)

En ce qui concerne le WaveCat, Carballo et Iglesias (2013) ont étudié deux configurations de 12 WaveCat différentes, la première avec les WEC disposés sur une seule rangée, et la deuxième avec les appareils sur deux rangées dans une formation échelonnée. Ce travail visait à prouver que les performances de la ferme houlomotrice ne sont pas radicalement affectées par l'absorption de la première rangée d'appareils. À cette fin, le modèle spectral SWAN à moyenne de phase (Booij, Holthuijsen & Ris, 1996) a été appliqué en utilisant les valeurs rassemblées dans la campagne expérimentale menée pour déterminer l'interaction WaveCat WEC-onde dans différentes conditions de vagues (Fernandez et al., 2012). Sur la base des études précédentes, une séparation de  $2,2D$  - avec  $D$  égal à 90 m et correspondant à la distance entre les deux arcs de l'appareil - a été considérée. Dans ce cas, les résultats ont montré que la hauteur des vagues devant les appareils de

la deuxième rangée étaient inférieures à la première et que, par conséquent, la performance globale de la ferme houlomotrice était plus élevée avec une seule ligne. En revanche, l'aménagement à une rangée est moins approprié que les deux rangées étant donné que ses performances supérieures ne justifient pas l'augmentation des coûts (maintenance, câbles, entrave à la navigation entre autres) (Abanades.T, 2017).

En résumé, bien qu'il n'y ait pas de mise en page prédominante, ce qui est conforme à l'absence de WEC dominant, un certain nombre de recommandations peuvent être extraites de cette section. L'espacement entre les dispositifs en dessous de 100 m est totalement inapproprié, en particulier pour les dispositifs de dépassement, dans lesquels l'absorption par le WEC est le processus le plus pertinent. Les travaux examinés ont montré qu'il est essentiel d'éviter les interférences destructrices entre les appareils dans la conception des aménagements des parcs houlomoteurs afin de ne pas diminuer leurs performances et, par conséquent, leur viabilité économique. En revanche, les distances entre les WEC de plus de 300 à 400 m ne sont pas recommandées, car elles augmenteraient considérablement les coûts de la ferme houlomotrice (Abanades.T, 2017).

## **3.2 Propagation des houles à la côte**

### **3.2.1 Modèle de propagation de la houle du large à la côte :**

La simulation des vagues et houles à la côte requiert une méthodologie prenant en considération les différents effets non-linéaires pouvant être induit par les différentes interactions qui peuvent se faire au niveau de la zone des eaux peu profondes. En effet, il existe plusieurs modèles pour la simulation des vagues et houles au large, au niveau de la zone des eaux profondes (WAM, WW3, etc). Cependant, au niveau de la zone côtière, le modèle doit prendre en considération les effets non-linéaires très fréquents dans la zone des eaux peu profondes (Abanades.T, 2017).

➤ **SWAN Model mathématique:**

Simuleing WAVes Nearshore, SWAN (Booij, Ris & Holthuijsen, 1999), est un modèle de vague de troisième génération qui estime les caractéristiques des vagues (hauteur de vague significative, période de pointe, direction moyenne, etc., ou encore plus précisément, le spectre des vagues directionnelles) dans les zones côtières, les lacs et les estuaires à partir du vent, du fond et du courant.

Le modèle résout l'équation de l'équilibre de l'action des ondes spectrales sans hypothèses a priori sur la forme du spectre d'ondes. Le champ d'onde est décrit par le spectre de densité d'action d'onde bidimensionnel,  $N(\omega, \theta)$ , où  $\omega$  est la fréquence d'onde angulaire et  $\theta$  est la direction de l'onde. Le spectre de densité d'action des vagues est utilisé à la place du spectre de densité d'énergie, car la densité d'action est conservée en présence de courants alors que la densité d'énergie ne l'est pas ; dans tous les cas, le spectre d'énergie des vagues peut être calculé à partir du spectre d'action des vagues. L'équation d'équilibre de l'action des vagues est discrétisée au moyen de la méthode des différences finies dans le temps, l'espace géographique ( $x, y$ ) et l'espace spectral ( $\omega, \theta$ ) (Abanades.T, 2017). L'équation de l'équilibre de l'action des ondes spectrales se lit

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\omega N)}{\partial \omega} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\omega} \quad (8)$$

Le premier terme sur le côté gauche représente la vitesse locale de changement de la densité d'action des vagues dans le temps; les deuxième et troisième termes désignent la propagation de l'action des vagues avec des vitesses de propagation  $c_x$  et  $c_y$  dans la direction  $x$  et  $y$  respectivement; le quatrième terme quantifie le décalage de la fréquence relative dû aux variations de profondeurs et de courants, enfin, le cinquième terme représente les effets de réfraction induits soit par des variations de profondeur, soit par des courants, avec vitesse de propagation  $c_\theta$  dans la direction de  $\theta$ . Les expressions des vitesses de propagation ci-dessus sont dérivées de la théorie des ondes linéaires. Quant au côté droit de l'équation,  $S$  inclut les termes source et puits des processus physiques qui génèrent, dissipent ou redistribuent l'énergie des vagues :

$$S = S_{n/4} + S_{n/3} + S_{in} + S_{wc} + S_{bot} + S_{brk} \quad (9)$$

Ici,  $S_{nl4}$  fait référence à la redistribution de l'énergie par les interactions vague-vague quadruplet non linéaire,  $S_{nl3}$  la redistribution de la triade non linéaire de l'énergie des vagues,  $S_{in}$  le transfert d'énergie du vent vers les vagues et la dissipation de l'énergie des vagues due au whitecapping,  $S_{bot}$  le terme de dissipation d'énergie par frottement de fond et  $S_{brk}$  la dissipation d'énergie en ondes aléatoires due à la rupture induite par la profondeur (Abanades.T, 2017).

Le flux d'énergie des vagues, également appelé puissance des vagues, est calculé sur ses composantes x et y avec les deux expressions suivantes :

$$J_x = \int_0^{2\pi} \int_0^{360} \rho g c_x E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (10)$$

$$J_y = \int_0^{2\pi} \int_0^{360} \rho g c_y E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (11)$$

Où  $E(\sigma, \theta)$  est la densité spectrale directionnelle, qui spécifie comment l'énergie est répartie sur les fréquences ( $\sigma$ ) et les directions ( $\theta$ ). La magnitude de la puissance des vagues est alors calculée comme :

$$J = (J_x^2 + J_y^2)^{1/2} \quad (12)$$

L'ensemble des équations régissant la description spectrale des vagues de vent, la propagation de l'énergie des vagues, la source et les puits, l'influence du courant ambiant sur les vagues, la modélisation des obstacles et la configuration induite par les vagues peuvent être trouvés dans le manuel du logiciel SWAN (SWAN, 2007).

### 3.2.2 La réfraction de la houle :

A l'approche des côtes, et à partir d'une certaine profondeur (d'après la théorie linéaire  $d=1/2L_0$ , soit la demi-longueur d'onde de la houle au large) la propagation des houles est influencée par la bathymétrie, et les crêtes de houles tendent à devenir parallèles aux isobathes.

Ce phénomène se nomme réfraction des houles. Il induit une concentration de l'énergie sur les saillants (cap, flèches, etc.) et un étalement sur les rentrants (criques, golfes, etc.).

L'étude de la réfraction a pour but la connaissance des caractéristiques de la houle (direction et hauteur) au cours de sa propagation, depuis le large jusqu'à l'approche de la côte.

### **3.2.3 Application de modèle numérique :**

Le logiciel modélise la propagation de la houle en prenant compte les phénomènes de :

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

La meilleure pratique pour appliquer efficacement le modèle consiste à utiliser diverses grilles, en affinant la grille vers la zone d'intérêt. Dans cette ligne, le concept d'imbrication est une implémentation très importante afin de réduire le temps de calcul et d'améliorer la précision, et il se réfère aux calculs effectués d'abord sur une grille grossière pour une plus grande région et en utilisant les résultats comme conditions aux limites pour une grille plus fine dans la région d'intérêt.

Les mêmes types de coordonnées (cartésiennes ou sphériques) doivent être utilisés pour appliquer l'imbrication. De plus, SWAN peut également simuler des grilles non structurées, également appelées grilles irrégulières et se compose de triangles ou de tétraèdres dans un motif irrégulier. Ceci est pertinent pour les topographies de fond complexes dans les zones peu profondes et les rivages irréguliers. Par conséquent, comme les calculs sont effectués sur une grille, SWAN est un modèle eulérien qui tient compte de la propagation réfractive sur différentes bathymétries et champs de courant en résolvant l'équation d'équilibre discrète.

SWAN fournit une représentation du spectre directionnel et non directionnel en tout point des grilles de calcul à travers des paramètres spectraux et dépendant du temps des ondes, par exemple hauteur des vagues, période maximale ou moyenne, direction des vagues et transport d'énergie.

Pour ces raisons, l'application de SWAN dans cette thèse sera menée à l'aide de deux grilles de calcul, une grille grossière du large à la côte et une grille imbriquée haute résolution dans la zone d'intérêt. La résolution de la grille imbriquée permet la définition précise de la position WEC dans le tableau et leur simulation avec précision. C'est une condition préalable à une évaluation détaillée des effets de la ferme à vagues (Carballo et Iglesias, 2013). Le dispositif qui sera considéré pour l'étude est le WaveCat Overtopping WEC. L'interaction WEC-champ d'ondes sera modélisée à l'aide des coefficients de transmission des ondes obtenus lors des essais en laboratoire réalisés au laboratoire de Porto par Fernandez et al. (2012). Les coefficients de transmission ont été calculés comme le rapport entre les hauteurs de vagues mesurées sous le vent et devant l'appareil dans différentes conditions de vagues. Les résultats ont montré que le coefficient de transmission des vagues présentait une très faible variabilité ( $K_t \sim 0,76$ ), et donc une valeur constante sera utilisée dans l'analyse à moyen et long terme. La gamme limitée des conditions de vagues a empêché le développement d'un modèle dépendant de la fréquence ; cependant, cela est inclus dans les futures lignes de recherche dans le cadre du projet européen WAVEIMPACT dirigé par le professeur Gregorio Iglesias et qui se concentre sur l'interaction entre une ferme houlomotrice et l'océan à travers des tests en laboratoire et la modélisation numérique).

### 3.2.4 Les étapes de calcul de la réfraction :

Les étapes de calcul de la réfraction sont résumées dans l'organigramme suivant :

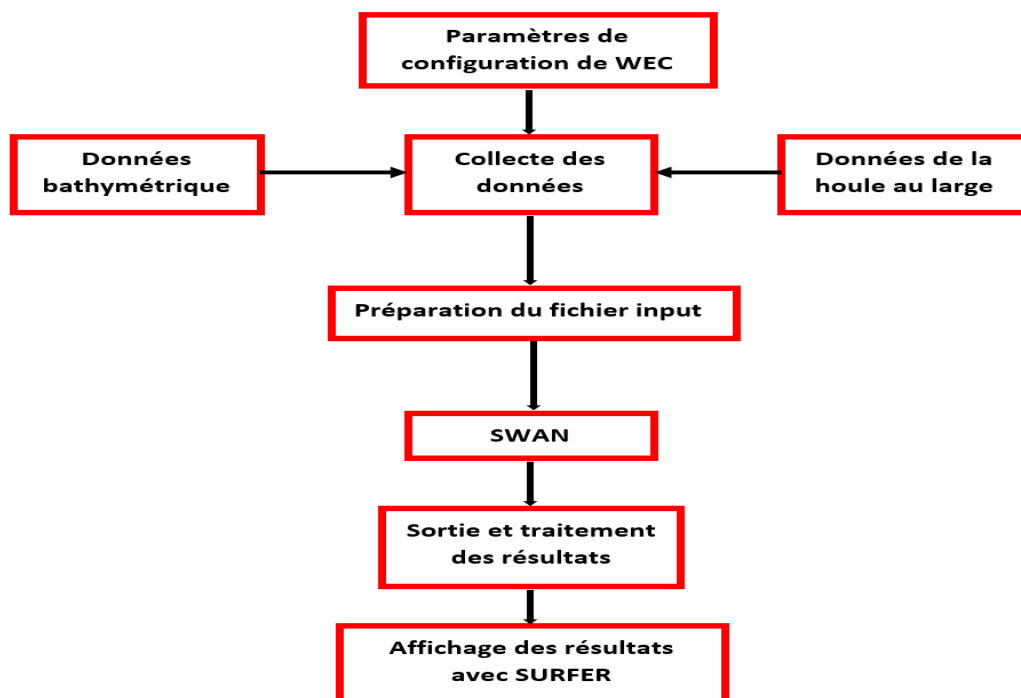


Figure 3.6 : Organigramme du déroulement des étapes de calcul de la réfraction.



### **3.3 Les Données utilisées dans la modélisation :**

#### **3.3.1 Données bathymétriques :**

La bathymétrie utilisée pour l'étude de réfraction est celle issue du site internet GEBCO, à l'aide du logiciel Surfer, on a pu extraire la bathymétrie sous forme d'un tableau, mais pour la zone côtière (-22m jusqu'à 0m) les données extraites du site ont été remplacé par les données issues lors de la sortie sur terrain (2016), afin d'avoir plus de précision.

Ainsi, on a préparé deux grilles bathymétriques, la grosse grille qui couvre les grandes profondeurs allant jusqu'à -100m, et une petite grille de 50m. Dans notre travail, c'est la grille de 50m qui nous intéresse, l'autre elle sert seulement pour déterminer les caractéristiques aux frontières de la houle pour la grille de 50m.

Une fois la carte de la bathymétrie projetée par le logiciel surfer, on fait l'extraction de la bathymétrie pour tous les points de la grille, en enregistrant les profondeurs sous forme de fichier (.dat) pour les intégrer dans le model Matlab afin d'obtenir les profondeurs dans chaque point de la grille pour les transférer dans le logiciel SWAN.

#### **3.3.2 Données de houles au large :**

Les données de la houle au large utilisées pour le calcul de la réfraction sont celles du SSMO de l'US NAVAL WEATHER-SERVICE. Elles consistent à des observations de navire sur la période de 1963 à 1970 en zone centre.

Un traitement statistique de ces données a permis de déterminer les fréquences d'apparition de houle par direction et par période. Le choix des périodes est fait en fonction de la répartition des probabilités de dépassement d'une houle d'amplitude donnée. Les houles de fortes amplitudes, ont une probabilité d'apparition relativement faible.

Ci-après est présenté le Tableau 6 portant sur les conditions de houles retenues dans le cadre de cette étude

Tableau 6 : Les caractéristiques des houles décennales utilisées dans le modèle SWAN.

Direction de la houle au large	Période du pic (s)	Hauteur significative au large (m)
N 340°	8	6.8
N 30°	9	7
N 280°	10	8

#### Principe de calcul de la réfraction de la houle :

On tient compte de ce phénomène par le calcul des coefficients de réfraction ( $K_r$ ) en plusieurs points d'un littoral pour les secteurs de houle dominants, et pour une période de houle donnée. Pour ce faire, on calcule aussi le coefficient de shoaling  $K_s$ .

$$K_s = \frac{H_s \text{ local}}{H_s \text{ large}}$$

Les valeurs de  $K_s$  calculées jusqu'à la côte traduisent :

- L'atténuation de l'énergie lorsque  $K_s < 1$  (divergence des vagues).
- La conservation de l'énergie lorsque  $K_s = 1$  (propagation rectiligne des vagues).
- la concentration de l'énergie lorsque  $K_s > 1$  (convergence des vagues).

Les calculs de la réfraction de la houle entre le large et la côte sont effectués par le modèle numérique SWAN.



### 3.3.3 Données de vent

Les vents de direction Ouest (W) est d'une vitesse maximale moyenne de 19.5 m/s (il s'agit de la moyenne des vitesses en conditions extrêmes) (SSMO).

### 3.3.4 Données d'intégration de WEC

Afin de déterminer les effets des capteurs d'énergie des vagues (WEC) sur le profil des plages on a suivi la méthode des travaux de Carballo et Iglesias (2013) qui ont utilisé 11 WEC placés en 2 rangées disposés parallèlement ; la première ligne dispose 6 WECs et celle de derrière contient 5 WECs implémentés à une profondeur de 20m. La distance entre les appareils est estimé à  $2.2D$  où  $D=45m$  ; dont  $D$  représente la distance entre les deux arcs d'un seul WaveCat WEC ; le coefficient de transmission des ondes WEC est celui déterminé par les tests de laboratoire faite par Fernandez et al. (2012), qui a été estimé par  $K_t=0.76$ .

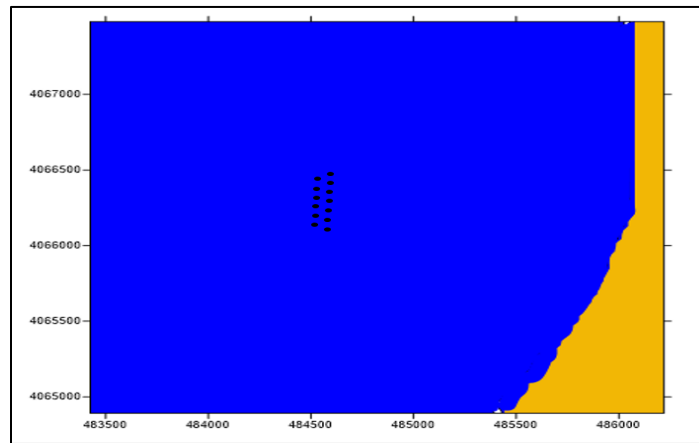


Figure 3.7 : Image montrant la configuration des WEC dans la zone d'étude



### 3.4 La bathymétrie de la zone

Après avoir intégré les données bathymétriques de la zone Palm Beach Azur dans le logiciel SURFER on a obtenu les cartes suivantes :

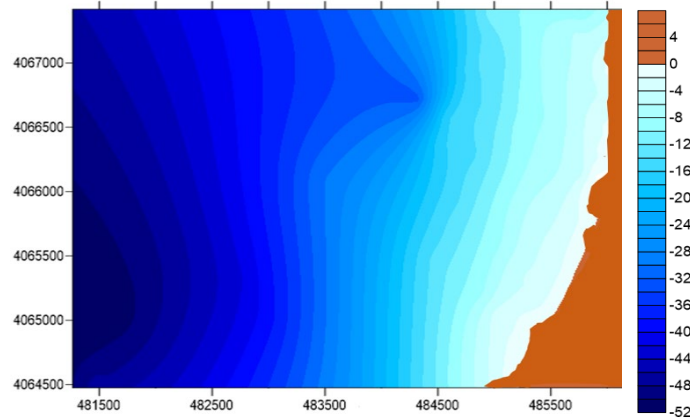


Figure 3.8: La carte bathymétrique de Palm Beach-Azur

La vue du relief montrée par la Figure 3.8, que les isobathes sont réguliers et parallèles à la côte venant vers la côte et plus espacés en allant vers le large ; avec présence d'une fosse dans les -23m sur le côté Nord Est qui est due au mixage de données du site GEBCO et celles prises par l'échosondeur.

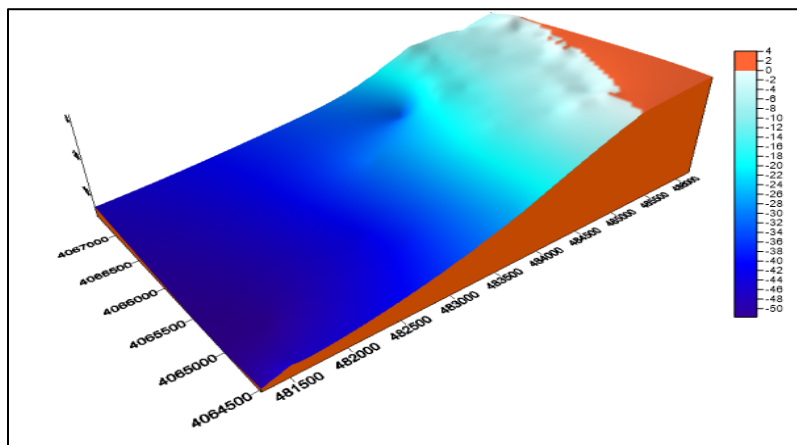


Figure 3.9: Le profil bathymétrique de Palm Beach-Azur en 3D

Le profil bathymétrique de Palm Beach Azur en 3D, confirme un fond régulier avec présence de fosse, la pente moyenne générale de fonds est de l'ordre de 1%.

### 3.5 Modélisation des vagues :

Pour l'étude de la propagation des vagues on a fait plusieurs essais, mais on a choisi d'exposer le cas le plus significatif comme suite : hauteur de vague  $H_s=8\text{m}$ , Période  $T=10\text{s}$ , direction de  $280^\circ\text{N}$ , sans l'intégration des capteurs d'énergies dans la grille (Cas 1), le model SWAN nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

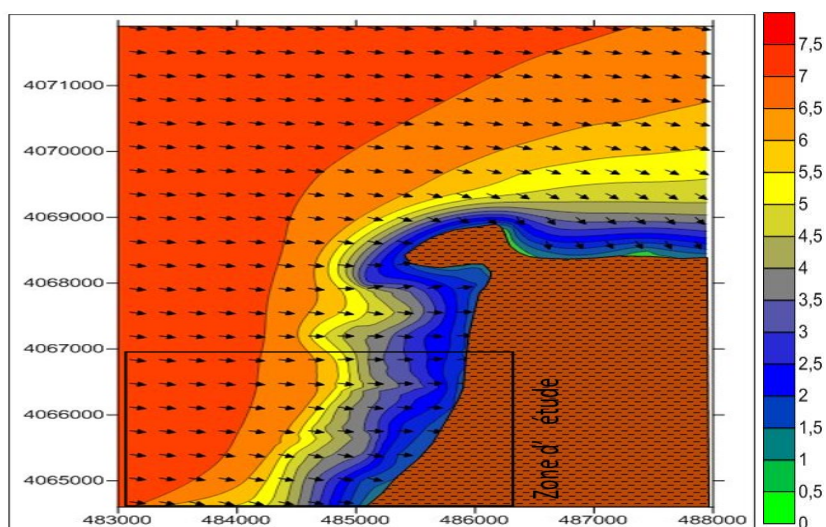


Figure 3.10: Réfraction de la houle pour une direction  $280^\circ\text{N}$  et une période de 10s

Cette figure montre la propagation de la houle du large vers la côte de la grosse grille, venant des profondeurs de plus de 100m. La représentation de la hauteur des vagues (en m à la Figure 3.10) suit les isobathes qui sont réguliers et parallèles à la côte. Leur principale direction de propagation est perpendiculaire à la côte.

La figure ci-dessous montre la petite grille où on a calculé à partir de la grosse grille les conditions de houles dans les 50m. Les calculs sont faits pour la direction  $280^\circ\text{N}$   $H_s=5\text{m}$  et  $T=7\text{s}$ . Les résultats sont présentés à la Figure 3.11 d'abord avant l'installation des WECs, ensuite avec les WECs installés :

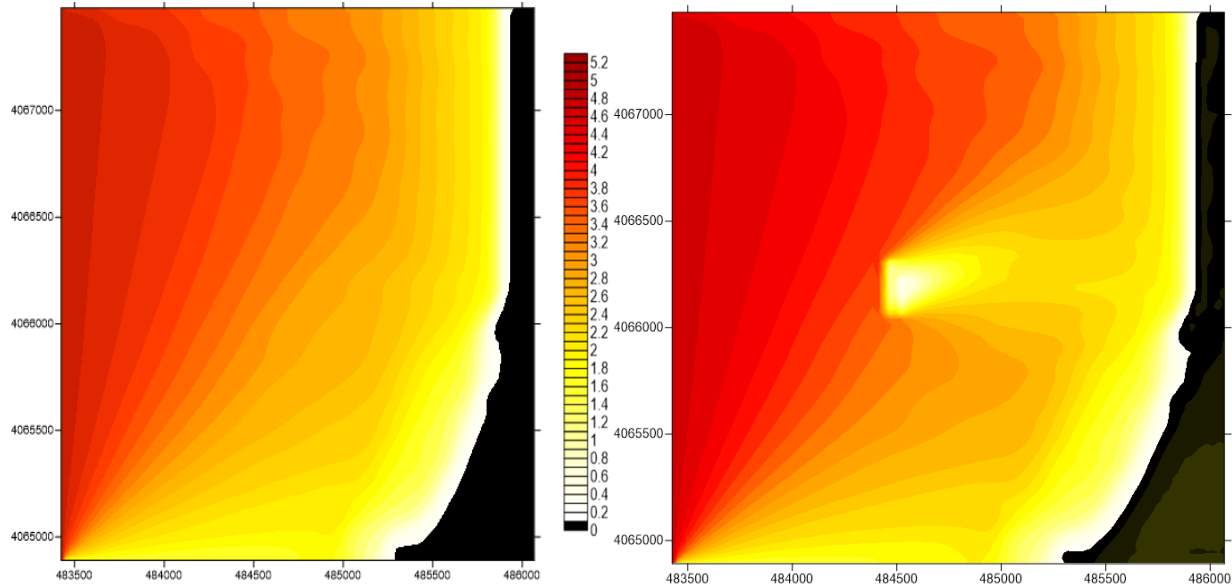


Figure 3.11: Cartes montrant la réfraction de la houle obtenue à l'aide du model SWAN cas 1 : avant l'intégration des WEC, cas 2 après l'intégration des WEC pour une direction 280°N et  $H=5$  m et  $T=7$  s

Les houles de direction Ouest sont les plus énergétiques dans la zone. De ce fait c'est celle qu'on a choisi pour analyser dans ce travail. Leur propagation se fait d'une façon perpendiculaire à la plage de Palm Beach-Azur du fait de la morphologie de cette dernière qui est ouverte à cette direction.

A la Figure 3.11, la carte du cas 1, en absence de WEC, montre des isolignes de  $H_s$  régulières. Par contre, en présence des WEC dans la Figure 3.11, le cas 2 montre une diminution de la hauteur des vagues au niveau de l'implantation de ces dernières. Ceci est observé jusqu'à l'arrivée à la côte, en présence des WEC le  $H_s$  est à 1.1m au lieu de 3.6 m et elle continue de diminuer le long de son trajet jusqu'à son arrivé à la côte avec 0m. Cette diminution de  $H_s$  est interprétée par la dissipation d'énergie dans la zone en présence des WEC.

Afin de calculer le  $\Delta H_s$  on a devisé la zone pour sélectionner le côté influencé par la présence de WEC entre les 2 cas en présence et absence des WEC, comme est montré dans la carte suivante (Figure 3.12) :



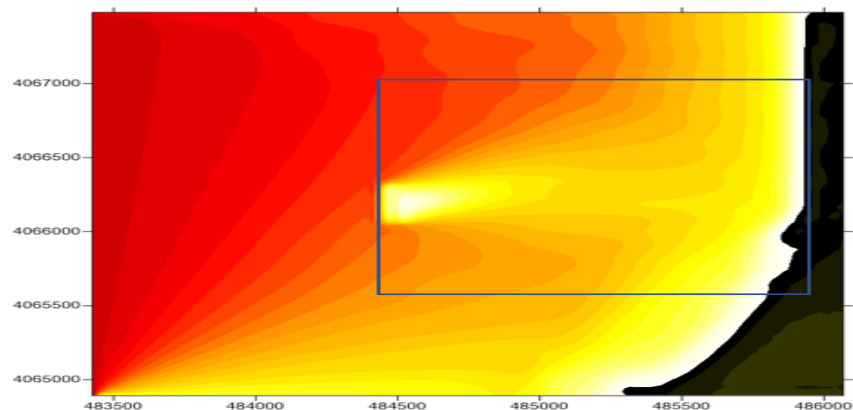


Figure 3.12: Carte délimitant la zone de calcul de Moyenne de Hs et  $\Delta Hs$  moyen.

De ce fait on a calculé les moyennes des Hs entre les 2 cas ainsi que le  $\Delta Hs$  tel que montré dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Les  $\Delta Hs$  moyens et le coefficient de shoaling entre l'absence des WEC (premier cas) et la présence des WEC (deuxième cas).

	Premier cas	Deuxième cas
Moyenne de Hs	2.56	2.26
$\Delta Hs$ moyen	0.3	
$\Delta Hs$ moyen%	30%	
Coefficient de shoaling Ks	0.512	0.452

Comme on remarque ici, il y a une diminution claire dans la moyenne de Hs qui est représentée par  $\Delta Hs = 0.3$  m ce qui signifie une diminution de la hauteur des vagues significatives dans la zone de 30% ; cela est expliquée par une diminution d'énergie dans la zone par un facteur de 30% après l'intégration des WEC.

Ceci est confirmé par les résultats du Shoaling, qui est en moyenne égal à **0.512** à 10 m de profondeur pour le cas 1 et de **0.452** pour le cas 2, d'où ces houles atteignent le trait de côte sans qu'elles changent de direction. Elles ne perdent que peu de leur énergie de large de façon à

diminuer leur énergie au fur et à mesure de leur évolution vers la côte. La dissipation de l'énergie se présente par un pivotement des orthogonales en direction Nord-Ouest à Ouest avec un angle moyen de  $280,08^\circ$  et  $282,41^\circ$  pour le cas 2 et cas 1 respectivement.

### 3.6 Profil bathymétrique :

Dans cette étude on a pris seulement le profil le plus proche de la zone d'intégration des WEC pour mieux comparer l'influence des WEC sur le profil bathymétrique. Après avoir superposé les cartes obtenues pour les deux cas, on a tracé le profil entre l'emplacement des WEC et la côte (Figure 3.13).

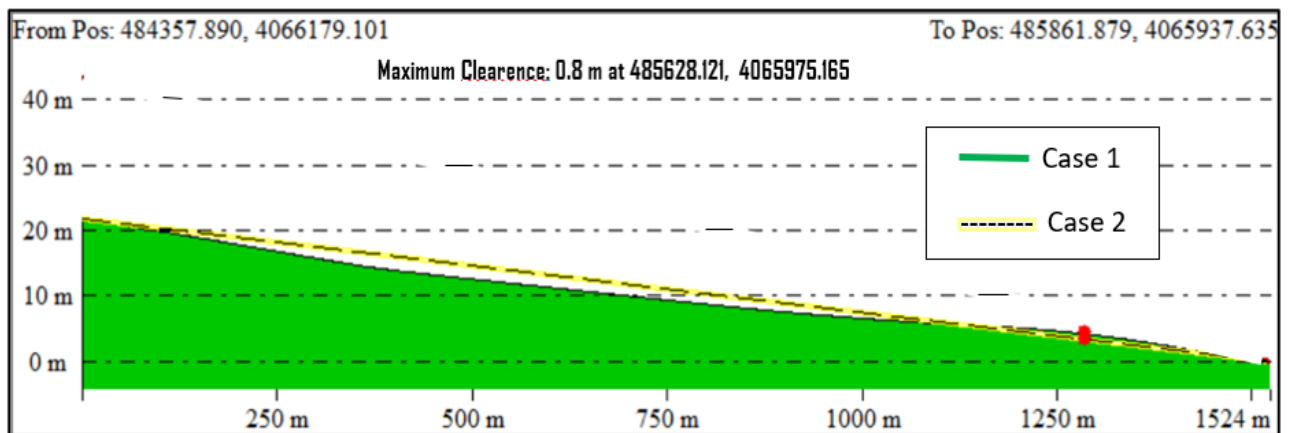


Figure 3.13: Profils bathymétriques des 2 cas: cas 1 en absence des WEC et cas 2 en présence des WEC

Comme on remarque dans la Figure 3.13, il y a un changement clair entre les 2 profils bathymétriques, celui sans l'intégration des WEC se situe au-dessous du profil avec WEC. Cela indique qu'on a une accumulation après l'installation des WEC, avec une accumulation maximale de 0.8 m.

Ce changement bathymétrique est la conséquence de la diminution de  $H_s$  et de l'énergie des vagues dans la zone, ce qui confirme l'approche proposée dans cette recherche.

En conclusion, l'installation des WEC peut servir à un rôle double, l'extraction de l'énergie marine pour la convertir en énergie électrique, mais aussi la protection des côtes contre l'érosion marine.





## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les vagues ont le potentiel de fournir une source d'énergie durable qui peut être transformée au moyen de convertisseurs d'énergie en énergie électrique dans des eaux peu profondes ou profondes.

L'érosion est un phénomène naturel essentiellement liée aux effets météorologiques et hydrodynamiques. Toutefois, l'emprise humaine sur le rivage accélère et aggrave ce dernier.

La plage de Palm Beach Azur qui a fait l'objet de zone d'étude se trouve dans la partie Est de la Baie de Bou Ismaïl. Elle est parmi les plages les plus importantes du littoral Algérien.

De ce fait, dans notre travail l'intérêt était de déterminer l'impact des capteurs d'Énergie des vagues (WEC) sur la côte et l'effet sur l'érosion marine.

Dans cette étude on a pu déterminer que les WECs jouent un double rôle d'extraction de l'énergie et la protection des plages contre l'érosion marine.

On a pu prouver que la hauteur des vagues diminue en présence des WEC, ce que signifie la dissipation de l'énergie marine, confirmé par la diminution du coefficient de shoaling.

Ainsi on a pu voir que le profil bathymétrique a changé en présence des WEC, de telle une accumulation de sédiment apparaît, ce qui confirme notre approche.

De ce fait, on conclut que les WEC peuvent servir à protéger les berges de l'érosion marine, donc elles servent à défendre tout en transformant l'énergie des vagues en énergie électrique.

En concluant que les WEC peuvent jouer un double rôle de production d'énergie et de protection des berges, leur faisabilité économique pourrait être améliorée. Malgré leur coût d'installation élevé cela pourrait être compensé par le fait que ces dernières permettent d'éliminer la construction d'ouvrages de protection contre l'érosion.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Abanades Tercero (2016) 'Beach morphodynamics in the lee of a wave farm: synergies with coastal defence' University of Plymouth (PEARL), Marine Science and Engineering.*

*ADEME (2010), 'Feuille de route : sur les énergies renouvelables marines'.*

*AMGHAR. L., SAHRAOUI. E. (2005). Etude géologique et géotechnique d'un projet de complexe hôtelier de Staoueli. Mémoire d'ingénieur. Aménagement du littoral. Alger : ISMAL, 74 p.*

*Amplitude des marées (2018) ' [https://mareespeche.com/af/algeria/arzew#\\_temperature\\_eau](https://mareespeche.com/af/algeria/arzew#_temperature_eau)'.*

*Armando Alexandre (2013) 'WAVE ENERGY CONVERTER STRINGS FOR ELECTRICITY GENERATION AND COASTAL PROTECTION' School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering.*

*Arne Vögler, David Christie, Malcolm Lidster, James Morrison (2011) 'Wave energy converters: sediment transport and coastal erosion' University of the Highlands and Islands (UHI), ICES CM 2011/S:17.*

*AUGRIS. C., CRESSARD. A. (1984). Les granulats marins. Publications du Centre Nationale pour l'Exploitation des Océans. Rapports scientifiques et techniques. N°51, 87 p. ASSASSI. C.,*

*AWS Ocean Energy (2015) 'https://www.awsocan.com'.*

*Babarit, A. (2010) 'Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters'. Ocean Engineering, 37 (8–9). pp 718-729.*

*Beck A., Décuré N., Gaillard P., et al. (2005). 'SWANS, un système auteur de synchronisation et d'annotation pour un apprentissage multimodal des phénomènes accentuels en langue vivante 2': Partie 1 : enjeux et positionnement théorique. Edt Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Montpellier. 13 P.*

*Beels, C., Troch, P., De Backer, G., Vantorre, M. & De Rouck, J. (2010a) 'Numerical implementation and sensitivity analysis of a wave energy converter in a time-dependent mild-slope equation model'. Coastal Engineering, 57 (5). pp 471-492.*

*BELAIDI.S et RAHMAN. Z. (2000). 'Pour une nouvelle approche de l'aménagement des ZET, cas de la ZET de Zeralda'. mémoire d'ingénieur en aménagement du territoire, USTHB, Alger.*



Benoit M. (2010). 'Modélisation et simulation des vagues de l'échelle océanique à l'échelle d'une structure côtière. Edt Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre', Marseille.2P.

Bonnefille. R. (1992) 'Cours D'Hydraulique Maritime'. Edition Masson, 208 pages.

Borgarino, B., Babarit, A. & Ferrant, P. (2012) 'Impact of wave interactions effects on energy absorption in large arrays of wave energy converters'. *Ocean Engineering*, 41 (0). pp 79-88.

Booij et al. (1999) 'JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH', VOL. 104, NO. C4, PAGES 7649–7666, APRIL 15, 19997649).

Booij, N., Holthuijsen, L. & Ris, R. (1996) 'The "SWAN" wave model for shallow water', *Coastal engineering conference. ASCE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, pp. 668-676

Booij, N., Ris, R. C. & Holthuijsen, L. H. (1999) 'A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation'. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104 (C4). pp 7649-7666.

Boutiba. M. (1996) 'Étude en vraie grandeur du mode de fonctionnement des ouvrages de protection de la plage Est de Sidi Fredj (Ouest d'Alger) '. *Thèse de magister ISMAL*, p122-123.

BOUTIBA. M. (2006). *Les risques côtiers en Algérie : Rapport d'activité. Document non publié. Alger : MATE-PAP RAC. 46 p.*

Carballo, R. & Iglesias, G. (2013) 'Wave farm impact based on realistic wave-WEC interaction'. *Energy*, 51 pp 216-229.

Carballo, R., Sánchez, M., Ramos, V., Fraguera, J. & Iglesias, G. (2015) 'The intraannual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain)'. *Energy*

Chertouk, N & Hamidi, F (2010) 'Travaux de protection de la zone de Palm Beach Azur' *ENSSMAL*.

Child, B. F. M. & Venugopal, V. (2010) 'Optimal configurations of wave energy device arrays'. *Ocean Engineering*, 37 (16). pp 1402-1417.

Child, B. & Venugopal, V. (2007) 'Interaction of waves with an array of floating wave energy devices', *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal*.

CLAUDET. J. (2006). *Méthodes d'évaluation et les protocoles expérimentaux des aires marines protégées et des récifs artificiels. Thèse de doctorat. Environnement. France: Université des sciences et technologie, p.67-77.*

Clément, A., McCullen, P., Falcão, A. F. d. O., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M. T., Schild, P., Sjöström, B., Sørensen, H. C. & Thorpe, T. W. (2002b) 'Wave energy in Europe: current status and perspectives'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (5). pp 405-431.

Coe, R. G. & Neary, V. S. (2014) 'Review of methods for modeling wave energy converter survival in extreme sea states'.

Dalrymple, R. A. & Dean, R. G. (1991) *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Prentice-Hall.

Drew, B., Plummer, A. R. & Sahinkaya, m. N. (2009b) 'A review of wave energy converter technology'. *Journal of Power and Energy*, 223 (8). pp 887-902.

DTP (2009) 'Étude de protection de la plage Palm Beach-Azur'. *Rapport de synthèse (Mission3)*. Direction des travaux publics, Alger, p89.

D.T.P. (2011). *Etude de protection de la plage Palm Beach-Azur. Rapport de synthèse (Mission 1)*. Document non publié. Alger : D.T.P.

D.T.P. (2011). *Etude de protection de la plage Palm Beach-Azur. Rapport de synthèse (Mission 2)*. Document non publié. Alger : D.T.P.

D.T.P. (2011). *Etude de protection de la plage Palm Beach-Azur. Rapport de synthèse (Mission 3)*. Document non publié. Alger : D.T.P.

D.T.P. (2011). *Etude de protection de la plage Palm Beach-Azur. Rapport de synthèse (Mission 4)*. Document non publié. Alger : D.T.P. D.T.P. (2011). *Etude de protection de la plage Palm Beach-Azur. Rapport de synthèse (Mission 5)*. Document non publié. Alger : D.T.P

Egbert, G. D., Bennett, A. F. & Foreman, M. G. (1994) 'TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model'. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 99 (C12). pp 24821-24852.

*Encyclopædia Universalis (2013), schéma de pélagamis, France.*

ENEA (2012), *LES ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES*.

EU-OEA (2010) *Oceans of Energy. European Ocean Energy Roadmap 2010-2050*. Bietlot, Belgium: European Ocean Energy Association,. 36 pp. Available at: <http://www.eu-oea.com/wp-content/uploads/2012/02/EUOEA-Roadmap.pdf>.

European Commission (2007) *A European Strategic Energy Technology Plan (SETPlan)–Towards a low-carbon future*. 723.

EVE (2014) 'Ente Vasco de la Energia'.

Falcão, A. F. d. O. (2010a) 'Wave energy utilization: A review of the technologies'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (3). pp 899-918.

Falcão, A. F. O. (2010b) 'Wave energy utilization: A review of the technologies'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (3). pp 899-918.

Falnes, J. (2007) 'A review of wave-energy extraction'. *Marine Structures*, 20 (4). pp 185-201.

Falnes, J. (2007) 'A review of wave-energy extraction'. *Marine Structures*, 20 (4). pp 185-201

Fernandez Diez, P. (2004) 'II Modificación de la Energía de las olas'. [in Departamento. (Accessed: Fernandez Diez, P

Fernandez, H., Iglesias, G., Carballo, R., Castro, A., Fraguela, J. A., Taveira-Pinto, F. & Sanchez, M. (2012) 'The new wave energy converter WaveCat: Concept and laboratory tests'. *Marine Structures*, 29 (1). pp 58-70.

Fiche Prisme, No15. (2018) ' Les énergies marines'

Gao, S, Collins. M. B. (1994) *Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environments. Journal of Coastal Research*, , p10, 70-78.

Ghezali, F. (2004). *Dynamique sédimentaire dans la zone de déferlement de la houle, application du modèle mathématique vectoriel de: MC LAREN ET BOWLES DEVELOPPE PAR GAO ET COLLINS entre le port de Jijél et oued Jen Jen. Mémoire d'Ingéniorat, ENSSMAL, Alger.*

Grid Magazine (2020). *PowerBuoy function*

Holthuijsen, L. H. (2007) *Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press.*

Iglesias, G., Alvarez, M. & García, P. (2010) 'WAVE ENERGY CONVERTERS', in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). UNESCO.*

Iglesias, G. & Carballo, R. (2009) 'Wave energy potential along the Death Coast (Spain)'. *Energy*, 34 (11). pp 1963-1975.

Iglesias, G. & Carballo, R. (2010a) 'Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay'. *Renewable Energy*, 35 (11). pp 2490-2500.

Iglesias, G. & Carballo, R. (2010b) 'Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain)'. *Energy*, 35 (5). pp 1964-1972.

Iglesias, G. & Carballo, R. (2010c) 'Wave power for la isla bonita'. *Energy*, 35 (12). pp 5013-5021.

Iglesias, G. & Carballo, R. (2011) 'Wave resource in El Hierro—an island towards energy self-sufficiency'. *Renewable Energy*, 36 (2). pp 689-698.

Iglesias, G. & Carballo, R. (2014) 'Wave farm impact: The role of farm-to-coast distance'. *Renewable Energy*, 69 (0). pp 375-385.

Iglesias, G., Carballo, R., Castro, A. & Fraga, B. (2008) 'DEVELOPMENT AND DESIGN OF THE WAVECAT™ ENERGY CONVERTER'. *Coastal Engineering*, pp 3970-3982.

Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguela, J. A. & Frigaard, P. (2009) 'Wave energy potential in Galicia (NW Spain)'. *Renewable Energy*, 34 (11). pp 2323- 2333.

Judicael Aubry, Aurélien Babarit, Hamid Ben Ahmed, Bernard Multon (2009). 'La récupération de l'énergie de la houle, partie 2 : systèmes de récupération et aspects électriques' *La Revue 3 E.*

I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication. pp.26-32. fihal-00676186f.

Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. & Sørensen, H. C. (2006) 'Prototype testing of the wave energy converter wave dragon'. *Renewable Energy*, 31 (2). pp 181-189.

Lambert, N. (2009). *Modélisation de la dissipation de l'énergie des vagues par la végétation de marais littoral. Mémoire en Océanographie, Université du Québec*, pp. 9-45.

*Les centrales d'énergie thermique des mers dans le monde (2010)* '<https://www.ocean-energy-systems.org/oes-projects/task-11-status-of-otec-and-its-resource-assessment/#tab-results>'

McCormick, M. E. (1981) *Ocean Wave Energy Conversion*. New York: WileyInterscience.

Mc Laren, P., Little, D. (1987). *The effects of sediment transport on contaminant dispersal: An example from Milford Haven. Marine Pollution Bulletin. Vol.1. pp. 586-594.*

Mezouar, K. (2009). *Étude comparative entre les méthodes de protection des deux littoraux Algérien et Roumain. Thèse de Doctorat, Université Technique de construction de Bucarest, Roumanie.*

Millot. C, (1989). *La circulation générale en Méditerranée occidentale, Aperçue de nos connaissances et projets d'études ? Annales de géographie. n°549, XCVII. pp 498-515.*

Millot, C., Taupier - Letage, I., et Benzohra, M. (1990). *The Algerian eddies. Earth Sciencia Reviews, 27,203-219p.*

*Ocean Power Technologies Inc (2014) 'OPT web page'.*

Paskoff, R. (1992). *Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. 2ème éd. Paris: Masson. 256 p.*

*Pelamis Wave Power Ltd 'Pelamis Wave'. [Online]. Available at: <http://www.pelamiswave.com/> (Accessed: March 2013).*

*Prisme (2018), FICHE N° 15 : LES ÉNERGIES RENOUVELABLES*

SSMO (1970). *Summary of Synoptic Meteorologie Observations. U.S Naval weather service Command. Mediteranean marine areas, Volume2, Octobre 1970, Octobre1970, 632p.*

Stratigaki, V., Troch, P., Stallard, T., Forehand, D., Kofoed, J. P., Folley, M., Benoit, M., Babarit, A. & Kirkegaard, J. (2014) 'Wave Basin Experiments with Large Wave Energy Converter Arrays to Study Interactions between the Converters and Effects on Other Users in the Sea and the Coastal Area'. *Energies*, 7 (2). pp 701-734.

Tedd, J. & Kofoed, J. P. (2009) 'Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter'. *Renewable Energy*, 34 (3). pp 711-717.

*Thorpe, T. W. (1999) A brief review of wave energy. Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit.*

*Tolman, H. L. (2002b) 'User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22'.*

*Toutain P.L., Bousquet-Mélou A. (2007). 'Modèles et modélisation : Généralités. Mémoire Pharmacocinétique', Université Toulouse. P 1-14.*

*Wave Dragon AS (2005) ' <https://www.energy-xprt.com/products/wave-dragon-wave-energy-converter-74055>'*

*Yalin, M.S. (1963). 'An expression for bedload transportation, Journal of Hydraulics Division, Proceedings' ASCE 89 (1963) (HY3), pp. 221–250.*

*Zemenzer. S. (2004) 'Ensemblement du port par transport sédimentaire simulation et application du modèle de Gao et Collins (1994) au port de Sidi Fredj' Mémoire d'ingéniorat, ISMAL, p6-7, 31-41.*