

# Systemes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet



---

# SYSTÈMES HOULOMOTEURS BORDS À QUAI, GUIDE DE CONCEPTION EN PHASE AVANT-PROJET

Collection Connaissances

Edition Cerema Eau, mer et fleuves  
134, rue de Beauvais 60280 Margny-lès-Compiègne  
[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

Cet ouvrage est une œuvre collective éditée sous la direction du Cerema

Elle a été coordonnée par  
Philippe Sergent (Cerema, Eau, mer et fleuves)

Ont contribué à sa rédaction :

*Aurélie Le Dissez (Artelia)*  
*Jeremy Dugor (CASAGEC)*  
*Didier Ribouey (CASAGEC)*  
*Georges Chapalain (Cerema)*  
*Bertrand Michard (Cerema)*  
*Valérie Ramelharison (Cerema)*  
*Nicolas Rouxel (Cerema)*  
*Philippe Sergent (Cerema)*  
*Hassan Smaoui (Cerema)*  
*Léa Thiébaud (Cerema)*  
*Virginie Baudry (École Centrale Nantes)*  
*Alain Clément (École Centrale Nantes)*  
*Moez Jellouli (ISL)*  
*Arnaud De Bonviller (ISL)*  
*Stéphane Abadie (Université de Pau et des Pays de l'Adour)*  
*François Marin (Université Le Havre Normandie)*  
*Sixtine Neuvéglise (Université Le Havre Normandie)*  
*Gaël Perret (Université Le Havre Normandie)*  
*Gregory Pinon (Université Le Havre Normandie)*

## **Remerciements**

Le projet a mobilisé des experts des laboratoires académiques (école Centrale de Nantes, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Université du Havre Normandie, Université de Caen Normandie, EIGSI La Rochelle), plusieurs bureaux d'études (ISL Ingénierie, Artelia, Casagec Ingénierie, Open Ocean, Globocean, Egis, Energie de la lune, IC Ingénieurs Conseils, Parlier Environnement), des experts d'institutions de recherche (Cerema, Ifremer), une PME innovante (Hydrocap Energy).

Le projet a été aussi suivi par des maîtres d'ouvrage potentiels (Communauté de Communes de la Pointe du Médoc, Département du Finistère, Grand Port Maritime du Havre).

Le projet était présidé par Henri Boyé du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable avec l'appui comme directeur scientifique d'Alain Clément de l'École Centrale de Nantes et comme directeur technique de Philippe Sergent du Cerema.

L'IREX avec Brice Delaporte a assuré le suivi administratif du projet.

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet.  
Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-427-2

# Sommaire

---

■	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
PREMIER CHAPITRE		
■	<b>Enjeux et intérêts des systèmes houlomoteurs bord à quai pour les aménageurs</b>	<b>6</b>
1	Qu'est-ce qu'un système houlomoteur bord à quai ?	8
2	La production électrique	9
3	Rôle dans la protection portuaire ou côtière et dans l'adaptation au changement climatique	10
4	Une contribution à la transition écologique pour la croissance verte	10
5	Développement d'une filière industrielle locale innovante	11
6	Estimation de rentabilité	11
7	Les différents systèmes de récupération de l'énergie de la houle bord à quai	12
8	Exemples de réalisation	13
DEUXIÈME CHAPITRE		
■	<b>Considérations pour l'identification des sites propices à l'installation de systèmes houlomoteurs bord à quai</b>	<b>16</b>
1	Estimation de la puissance récupérée	19
2	Évaluation de potentiels houlomoteurs sur le littoral français	25
3	Considérations géotechniques	44
4	Enjeux environnementaux et réglementations associées	48
5	Raccordement et stockage	53
6	Références bibliographiques	59
TROISIÈME CHAPITRE		
■	<b>Évaluation des différents concepts</b>	<b>62</b>
1	Les différents concepts	64
2	Estimation de production	73
3	Dimensionnement des WEC : Éléments de méthodologie et exemples d'application	110
4	Effets sur les ouvrages porteurs	131
5	Impact hydrosédimentaire	136
6	Références bibliographiques	148
QUATRIÈME CHAPITRE		
■	<b>Évaluation coût-bénéfice</b>	<b>154</b>
1	Choix et optimisation du dispositif de récupération de l'énergie de la houle	156
2	Coûts de construction	165
3	Coûts de production	174
4	Références bibliographiques	177
■	<b>Conclusion</b>	<b>180</b>

# Introduction

---

Ce guide présente les résultats du projet national intitulé EMACOP (Énergies Marines Côtières et Portuaires) qui a été initié en 2011 dans le cadre du réseau Génie Civil et Urbain (RGCU) piloté par le ministère de la Transition écologique et solidaire. L'objectif du projet a consisté à analyser les systèmes de récupération des énergies issues de la mer en interaction forte avec les infrastructures côtières et portuaires.

Les énergies marines sont au nombre de cinq, on distingue : l'énergie potentielle de la marée dite marémotrice, l'énergie des vagues dite houlomotrice, l'énergie des courants dite hydrocinétique, l'énergie thermique des mers ou thalassothermie associée au différentiel de température entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides du fond, et enfin l'énergie osmotique liée au différentiel de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce des fleuves affluents. D'autres énergies sont collectées en mer, comme l'éolien offshore ou le pétrole sous-marin, mais ne sont pas des énergies marines à proprement parler et n'ont pas été considérées.

Dans un premier temps, trois types d'énergies marines, a priori disponibles le long des côtes françaises métropolitaines, ont été analysés à savoir : l'énergie marémotrice, l'énergie hydrocinétique et l'énergie houlomotrice. La thalassothermie ainsi que l'énergie osmotique, malgré leur potentiel parfois intéressant, ont été écartées car ne faisant pas partie de la catégorie ciblée.

Historiquement la France a été jusqu'en 2011 la championne mondiale de la puissance installée en Énergie Marine Renouvelable (EMR) grâce à l'usine marémotrice de 240 MW installée sur l'estuaire de la Rance et achevée en 1966. Néanmoins, l'analyse du potentiel marémoteur dans le contexte particulier des énergies marines renouvelables (EMR) implantées sur des installations côtières ou portuaires a montré que l'énergie produite dans quelques bassins à flots reste limitée d'autant plus que des contraintes de gestion empêchent une utilisation optimale.

En ce qui concerne l'énergie hydrocinétique, des sites potentiels existent en particulier le long de la Manche et dans certains estuaires. Les zones propices restent globalement de taille limitée avec une interaction faible avec les infrastructures. Au final, l'énergie houlomotrice est apparue rapidement comme l'énergie la plus présente et la plus accessible au droit des infrastructures du littoral français.

Le guide issu du projet EMACOP s'est donc concentré sur l'analyse des systèmes houlomoteurs bord à quai en interaction forte avec les infrastructures côtières et portuaires. Récupérer l'énergie près des infrastructures a un sens dans les sites où le besoin d'alimentation électrique à quai est fort (par exemple dans les villes portuaires qui connaissent des problèmes de qualité de l'air associés aux émissions des navires) ou bien dans les sites très éloignés de grands centres de production d'énergie (par exemple les îles ou les phares). Les dispositifs peuvent aussi accessoirement permettre de réduire les franchissements des vagues et les dommages associés.

Le principe de récupération de l'énergie des vagues bord à quai est relativement ancien avec des projets notamment au Japon dans les années 1970 pour éclairer les phares. Depuis quelques années, le développement des dispositifs de récupération des énergies marines et la montée en puissance du concept « port neutre en énergie ou port à zéro émission » ont permis de faire émerger de nouveaux projets, notamment au Brésil (Pecem), au Portugal (Açores), en Espagne (Mutriku), au Royaume-Uni (Gibraltar et Limpet) par exemple. L'objectif du guide EMACOP est donc aussi de diffuser l'information sur la problématique de récupération de l'énergie des vagues bord à quai afin de promouvoir le développement d'un démonstrateur en France.

Le guide présente d'abord les enjeux et intérêts des dispositifs pour les aménageurs avec une première description des quatre familles de dispositifs (système à franchissement, colonne d'eau oscillante, batteur oscillant, flotteur pilonnant). Il dresse ensuite une liste de sites potentiels en France métropolitaine avec leurs caractéristiques, en approfondissant l'analyse pour quelques sites. Pour chaque famille de dispositif, une estimation de la production est donnée, le dimensionnement du convertisseur et de la structure est produit à travers notamment une analyse de la survivabilité. Une évaluation coût-bénéfice permet enfin de déterminer le coût de l'énergie pour les quatre familles sur le site particulier de Saint-Jean-de-Luz. La filière des génératrices houlomotrices étant encore aujourd'hui au stade de développement avec seulement quelques prototypes en fonctionnement

en conditions réelles, les méthodes utilisées dans tous les compartiments de l'étude sont issues de la recherche et sont elles-mêmes en constante évolution ; elles peuvent donc à ce stade comporter des incertitudes importantes. Il conviendra donc d'en tenir compte et de réserver l'usage de ce guide au stade de l'avant-projet ou de l'étude de faisabilité.

P R E M I E R C H A P I T R E

# Enjeux et intérêts des systèmes houlomoteurs bord à quai pour les aménageurs

Coordination :  
Philippe Sergent (Cerema)

Les systèmes houlomoteurs « bord à quai » sont relativement anciens puisque des projets au Japon dans les années 1970 existaient pour éclairer les phares après leur utilisation pour des balises de navigation. Depuis quelques années, le développement des dispositifs de récupération des énergies marines et la montée en puissance du concept « port neutre en énergie ou port à zéro émission » ont permis de faire émerger de nouveaux projets, notamment au Brésil (Pecem), au Portugal (Açores), en Espagne (Mutriku), au Royaume-Uni (Gibraltar et Limpet).

La France n'a pas lancé de démonstrateur pour la récupération de l'énergie des vagues bord à quai. Or le pays dispose de nombreuses infrastructures portuaires qui peuvent accueillir ce type de dispositif. Il dispose également de zones particulièrement propices pour l'énergie des vagues sur la côte Atlantique et la Manche occidentale (potentiellement, une dizaine de kilomètres de digues pourrait être équipée sur le littoral Manche et Atlantique).

Les intérêts pour un aménageur ou un exploitant de se lancer dans un projet d'implantation d'un système houlomoteur sont explicités ci-dessous. Ils sont d'ordre financier dans la mesure où ces aménagements engendrent des recettes de production électrique, mais ils sont aussi associés à l'amélioration de la fonction primaire de l'ouvrage qui est de protéger le port ou la côte. Le décideur peut enfin s'inscrire dans une démarche de développement durable avec la production d'énergie renouvelable à l'intérieur des infrastructures ainsi que dans une démarche de développement d'une filière industrielle innovante.

# 1. Qu'est-ce qu'un système houlomoteur bord à quai ?

---

Un système houlomoteur transforme l'énergie des vagues en énergie mécanique qui est elle-même convertie en énergie électrique. On distingue trois zones en mer pour installer un système : le large, la côte, « à quai » (*offshore, nearshore, on-shore* en anglais). Un système « à quai » apparaît différent des autres car il peut être considéré comme une activité « terrestre ». Comme les éoliennes terrestres (en comparaison des éoliennes *offshore*), les systèmes houlomoteurs « bord à quai » sont des systèmes plus faciles à installer et à maintenir que leurs homologues au large. Ils seront sans doute aussi rentables mais les puissances produites seront plus faibles.

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée à l'aide d'un récupérateur d'énergie souvent appelé PTO comme *Power Take Off* en anglais. La force générée par le récupérateur d'énergie est souvent assimilée à un amortissement linéaire. Une force de contrôle est parfois ajoutée pour améliorer le rendement.

## 2. La production électrique

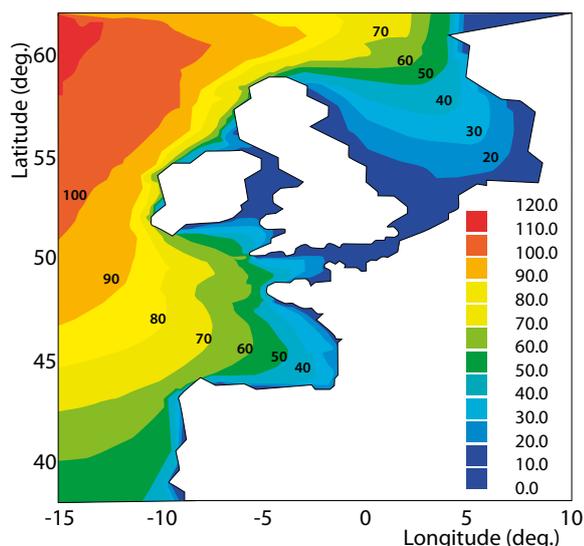
Les vagues sont un mouvement ondulatoire de la surface de la mer. Elles sont générées par le vent. Elles concentrent donc une partie de l'énergie de l'atmosphère dans la mer et transfèrent ensuite cette énergie vers la côte. L'énergie moyenne des vagues est proportionnelle au carré de la hauteur de la vague (distance entre le creux et la crête) et à la période des vagues (durée qui sépare l'arrivée de deux crêtes de vagues successives). On préfère souvent utiliser la puissance moyenne transportée par les vagues qui est donnée en kW par mètre linéaire. Elle est aussi proportionnelle au carré de la hauteur de la vague et à la période des vagues.

L'énergie de la houle est une énergie saisonnière. La puissance récupérable en hiver peut être 5 à 10 fois plus importante qu'en été avec une variabilité inter-annuelle significative. Le Finistère et le Pays Basque sont des zones particulièrement propices.

Les puissances moyennes sur l'année sont en général calculées pour des profondeurs supérieures à 20 m. Elles atteignent facilement 50 kW/m au large.

Elles sont estimées entre 5 et 20 kW/m au pied des ouvrages dans les zones propices car la houle est dissipée par déferlement bathymétrique ou bien est masquée par la présence de caps, pointes, îles ou récifs.

Figure 1-1. Puissance moyenne annuelle de la houle le long des côtes Ouest Européennes en kW/m.



La réfraction de la houle a en revanche des effets variables. On observe soit des concentrations de la houle soit des atténuations de la houle devant les ouvrages en fonction des conditions locales.

La puissance moyenne annuelle récupérable sur une infrastructure exprimée en kW est le produit de la longueur équipée par la puissance transportée par les vagues en kW par mètre linéaire. Pour obtenir la puissance produite, il faut encore multiplier par le rendement du dispositif.

Un dispositif installé sur un linéaire de 100 m, avec une bonne exposition à la houle, peut potentiellement produire une énergie annuelle de 2 GWh environ correspondant à une recette annuelle de 300 k€ environ.

### 3. Rôle dans la protection portuaire ou côtière et dans l'adaptation au changement climatique

La conversion d'énergie pour un dispositif « bord à quai » est une fonction secondaire de la structure côtière. La fonction primaire est d'abord la protection de la côte contre les aléas littoraux.

Les infrastructures côtières et portuaires en Europe sont diverses. Elles rencontrent fréquemment des problèmes de stabilité, franchissements, durabilité et érosion. De plus le changement climatique et en particulier la remontée du niveau marin vont accentuer les difficultés de maintenance de ce patrimoine déjà vieillissant. Les digues vont en effet être exposées dans le futur à des houles dont les hauteurs seront supérieures aux hauteurs de dimensionnement. Cela concerne en particulier les digues construites en faible profondeur où la profondeur impose l'amplitude maximale de la houle du fait du déferlement bathymétrique. Ces structures doivent donc être modernisées et adaptées au changement climatique. L'opportunité

de coupler la modernisation de ces infrastructures à l'installation d'un dispositif de récupération de l'énergie houlomotrice peut être tout à fait pertinente.

L'intégration du système houlomoteur modifiera la stabilité de l'ouvrage et les volumes de franchissements. Le dispositif qui absorbe l'énergie des vagues modifie en effet l'hydrodynamique autour de la structure. Cette absorption, associée parfois à de la réflexion et de la radiation, aura tendance à réduire les efforts et les franchissements sur la structure. L'intégration d'un système houlomoteur dans les structures côtières sera toujours plus facile pour une nouvelle structure que pour une structure existante. Dans ce dernier cas, des informations sur l'ouvrage sont indispensables. Les technologies adaptées diffèrent en fonction du climat de houle mais aussi du type de structure (digues en enrochements ou digues verticales notamment).

### 4. Une contribution à la transition écologique pour la croissance verte

Pour les régions littorales, les aménagements tels que l'implantation d'un système houlomoteur s'inscrivent dans la démarche de la transition écologique pour la croissance verte, avec une production d'énergie renouvelable intégrée aux infrastructures et donc une contribution à la réduction des émissions des gaz à effet de serre. L'énergie produite peut être utilisée directement pour la consommation d'énergie au sein d'une zone portuaire. L'intérêt se porte en effet de plus en plus vers un cycle court entre la production électrique et la consommation électrique, par exemple dans les ports. Les ports souhaitent notamment

développer le raccordement électrique à quai des navires afin de réduire l'usage du diesel et les émissions associées. Cela réduira l'empreinte carbone du port en alimentant par exemple les navires à quai avec de l'énergie verte. Actuellement ces navires utilisent leurs moteurs pour produire de l'électricité à bord même à quai. L'intégration de ces dispositifs houlomoteurs favorisera l'émergence de ports du futur à zéro émission. Il s'agira d'une vitrine technologique qui peut aussi permettre le développement du tourisme industriel.

## 5. Développement d'une filière industrielle locale innovante

Le développement d'une filière technique d'excellence locale, avec des projets rentables multi-objectifs (énergie, protection, cycle court, tourisme, innovation, ...) est également une démarche dans laquelle un aménageur peut s'inscrire. Les innovations pourront être testées « bord à quai » dans un environnement moins difficile qu'au large. Il s'agit donc de démonstrateurs pour la filière houlomoteur *offshore*.

Un démonstrateur présente un intérêt opérationnel clair avec la production d'énergie. Sur le moyen terme, il permet également aux acteurs :

- de développer un retour d'expérience sur le fonctionnement d'un tel dispositif et sur la gestion par exemple des conditions de survie aux événements extrêmes ;
- de progresser sur l'optimisation du système à travers des travaux sur le contrôle et sur l'optimisation du rendement ;
- de recueillir indirectement des informations précieuses sur les données de houle à la côte ;
- de réfléchir à l'intégration d'un tel dispositif en termes de cycle court dans la production d'énergie

locale avec le stockage de l'énergie en période de surproduction électrique et l'utilisation éventuelle de cette énergie directement par les navires du port.

Les infrastructures envisagées appartiennent généralement à des collectivités locales ou des opérateurs portuaires. Différentes configurations d'exploitation sont envisageables, par exemple des dispositions entre un industriel et un centre d'études public dans le cadre d'une opération innovante.

L'industriel peut ainsi détenir une expérience d'aménagement très utile qui peut aussi intéresser les entreprises de BTP qui recherchent des variantes de construction innovantes pour la France et l'étranger. Le centre d'études public peut aussi récupérer des données très précieuses dans le domaine des vagues et de la production d'énergie et se servir de cette base pour le développement du concept de port neutre en énergie ou d'éco-quartier. Le port a la possibilité d'utiliser diverses sources d'énergie tirées de l'eau comme la thalassothermie, l'énergie marémotrice, l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues bord à quai.

## 6. Estimation de rentabilité

La notion de *Levelised Cost of Energy* (LCOE) rapporte les coûts générés par l'installation à l'énergie produite tout au long de son cycle de vie. Pour les systèmes houlomoteurs, nous estimons le LCOE de 0,2 à 2 euros par kWh. Pour donner un élément de comparaison, il est de 5 à 50 fois plus élevé que pour l'hydroélectricité.

Il est nécessaire cependant de relativiser ce coût en prenant en compte notamment d'autres fonctions des systèmes houlomoteurs avec par exemple l'amélioration des performances de l'ouvrage. Pour une longueur

aménagée de 100 mètres, les recettes annuelles estimées par la revente de l'énergie s'inscrivent dans une fourchette de 60 à 260 k euros. Les bénéfices liés aux autres fonctions peuvent donc dépasser rapidement ces estimations.

Pour compléter, les coûts fixes d'installation (CAPEX) des différents systèmes houlomoteurs présentés pour 60 mètres de linéaire installé varient entre 2 et 7 millions d'euros en fonction de la famille de système retenue. Cela correspond grossièrement à 30 années de recettes associées à la revente de l'énergie.

## 7. Les différents systèmes de récupération de l'énergie de la houle bord à quai

Il existe de nombreuses technologies pour récupérer l'énergie des vagues. Elles sont généralement classées en quatre familles (colonne d'eau oscillante, système à franchissements, batteurs oscillants, flotteurs). Leurs déclinaisons « bord à quai » sont présentées ci-dessous.

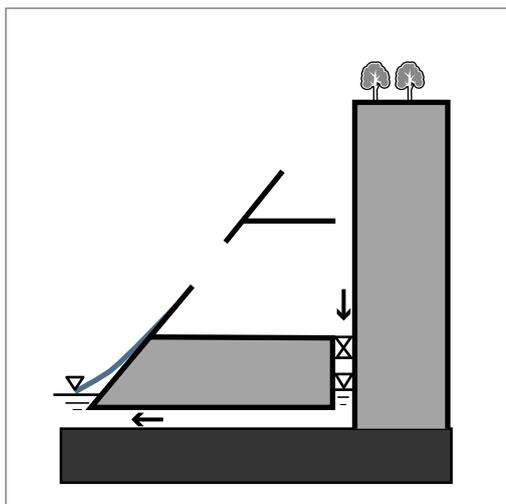
L'énergie des vagues est globalement plus faible « bord à quai » car les zones sont moins profondes.

Toutefois, ces dispositifs présentent trois points positifs :

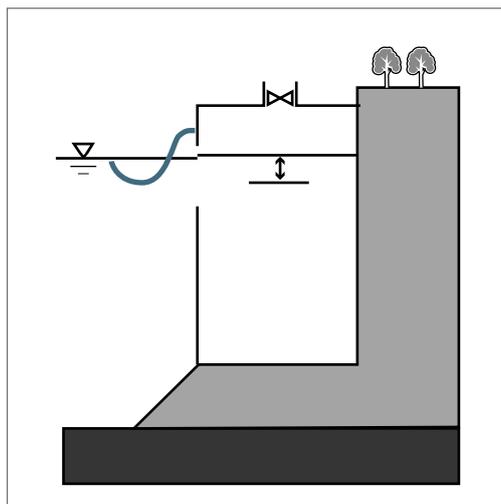
- grâce au phénomène de réfraction (concentration de la houle par les fonds), certains « spots » offrent la même énergie qu'au large ;
- la réflexion de la houle sur la digue peut augmenter le rendement ;
- la réfraction diminue l'étalement directionnel de la houle, ce qui améliore également le rendement.

Figure 1-2. Les 4 familles des systèmes houlomoteurs bords à quai

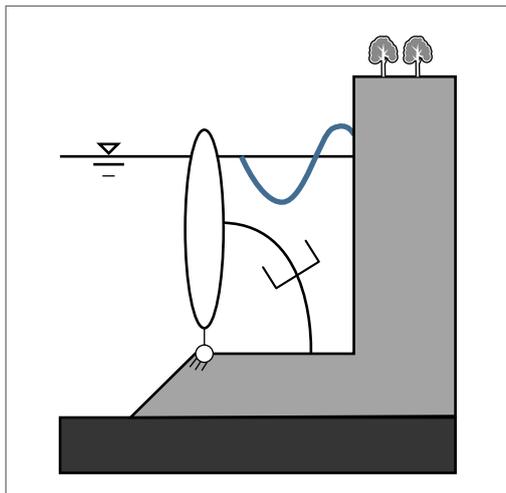
Système à franchissements



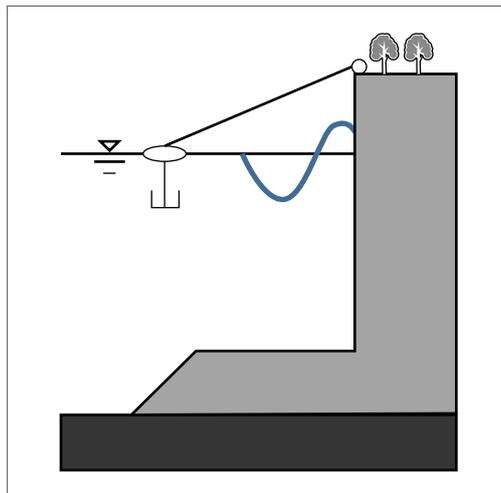
Colonne d'eau oscillante



Batteurs oscillants



Flotteurs



## 8. Exemples de réalisation

Tableau 1-1. Installations des systèmes houlomoteurs bords à quai dans le monde

Projet	Pays	Localisation	Mise en fonction	Puissance Max	Classe	Machine	Toujours en opération
Pico	PT	Açores	1992	400 kW	OWC	OWC	Non
Limpet	UK	Islay	2000	500 kW	OWC	Wavegen	Non
Wavestar	DK	Hanstholm	2009	600 kW	PA	Wavestar	Oui
Mutriku	ES	Mutriku	2011	300 kW	OWC	Wavegen	Oui
Pecem	BR	Pecem	2012	50 kW	PA	Univ. Rio	Oui
Eco Wave Power	UK	Gibraltar	2016	100 kW	PA	SDE	Oui

Les réalisations dans le monde sont principalement des colonnes d'eau oscillante (OWC – *Oscillating Water column*) ou des flotteurs (PA – *Point absorber*). Il faut noter que les premières réalisations, Pico et Limpet notamment, sont désormais arrêtées. Malgré tout, le tableau ci-dessus montre que l'intérêt est grandissant même si les puissances affichées restent encore modestes.

### 8.1 Colonne d'eau oscillante à Mutriku (Espagne)

Le port de Mutriku, situé en baie de Gascogne, est exposé aux tempêtes océaniques. Le gouvernement Basque a approuvé la construction par Iberdrola Renovables d'une digue en enrochements de 440 m de longueur avec un co-financement de la commission européenne. La colonne d'eau oscillante a été construite sur une longueur de 100 m de cet ouvrage extérieur. L'équipement est composé de 16 chambres à air qui hébergent chacune une turbine à air. La construction a démarré en 2006 et le projet a été inauguré en juillet 2011. La technologie de colonne d'eau oscillante utilisée à Mutriku est fournie par la filiale Wavegen de Voith Siemens Hydro. Elle a été testée sur l'île écossaise d'Islay lors du projet LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*) : première centrale houlomotrice connectée au réseau électrique du Royaume-Uni, en fonctionnement de 2000 à 2013. L'eau de mer entre

dans les chambres à air à travers une ouverture sur la face avant, l'air présent dans les chambres est comprimé et repoussé dans la cheminée au sommet de laquelle est placée la turbine connectée au générateur qui produit l'électricité. Lorsque le niveau d'eau baisse, la pression de l'air diminue et la turbine tourne à nouveau. L'eau n'est jamais en contact avec les turbines ce qui facilite la maintenance et la durée de vie de l'équipement. L'équipement produit 300 kilowatts qui alimentent en électricité 250 ménages.

### 8.2 Flotteurs pilonnants à Pecem (Brésil)

Deux flotteurs pilonnants reliés à une digue par un bras articulé ont été mis en place au sein du port de Pecem au Brésil sur la côte de l'État de Ceara à environ 60 km de Fortaleza en 2012 dans le cadre d'un projet de recherche d'environ 6,5 millions d'euros. Le mouvement du bras actionne une pompe reliée à un générateur. La puissance nominale de l'installation est de 50 kilowatts. Les flotteurs en forme de disque de 10 m de diamètre sont attachés à un bras de 22 m de longueur. Il s'agit d'un projet de Tractebel en partenariat avec Petrobras.

### 8.3 Flotteurs pilonnants à Gibraltar (Royaume-Uni)

À Gibraltar, Eco Wave Power a connecté au réseau, en juin 2016, 8 flotteurs avec une puissance de 100 kW. Les flotteurs sont attachés à une jetée avec 4 flotteurs d'un côté et 4 flotteurs en face de l'autre côté. Lors de conditions extrêmes, ceux-ci sont mis en position verticale de survie. Basé sur la technologie israélienne SDE, le projet bénéficie de l'expérience acquise lors de tests en Ukraine et en Israël. Il est prévu d'étendre la puissance installée à terme à un total de 5 MW.

### 8.4 Flotteurs pilonnants à Hanstholm (Danemark)

La machine Wavestar composée de 20 flotteurs tire l'énergie de la puissance des vagues avec des flotteurs qui s'élèvent et descendent en suivant le mouvement de la surface libre. Les flotteurs sont reliés par des bras articulés à un ponton ou plateforme. Comme dans le cas précédent, ils sont positionnés de part et d'autre du ponton. Le mouvement des flotteurs est transféré de manière hydraulique à un générateur qui produit l'électricité. Un démonstrateur de 600 kW a été installé à Hanstholm en 2009 et connecté au réseau en février 2010. Un pont a été construit pour accéder aux machines. Une machine de 1 MW est en projet avec des flotteurs de 10 m de diamètre.



## D E U X I È M E C H A P I T R E

# Considérations pour l'identification des sites propices à l'installation de systèmes houlomoteurs bord à quai

Coordination :  
Bertrand Michard (Cerema)

Contributeurs :  
Aurélie Le Dissez (Artelia)  
Nicolas Rouxel (Cerema)  
Philippe Sergent (Cerema)  
Léa Thiebaud (Cerema)

La reconnaissance de sites propices à l'installation de fermes houlomotrices (sur ouvrages côtiers existants ou non) nécessite en premier lieu une évaluation et une cartographie de l'énergie houlomotrice potentiellement convertissable ainsi que l'évaluation de puissance réellement convertie par le système houlomoteur envisagé, associé à son propre rendement. Une méthodologie dédiée à ces objectifs est proposée dans ce chapitre, accompagnée d'une application à la caractérisation des potentiels de deux sites français pressentis pour le développement de fermes houlomotrices sur ouvrages côtiers existants.

Cependant, le développement de fermes houlomotrices est également soumis à d'autres contraintes qui doivent être prises en compte pour la garantie de succès d'un projet de ferme sur un site pressenti.

Parmi ces contraintes, sont développées ici les contraintes géotechniques, ainsi que les contraintes environnementales et réglementaires nombreuses en zones côtières. L'analyse de la cartographie de ces contraintes combinée à celle de l'énergie potentiellement convertissable, permettra de désigner les sites propices au développement de fermes houlomotrices.

Enfin la problématique du raccordement et du stockage de l'énergie produite est abordée, à prendre en compte dès les premières étapes de la réflexion du développement d'une ferme dans la mesure où elle peut aussi orienter le projet.

# 1. Estimation de la puissance récupérée

La méthodologie appliquée pour estimer la puissance potentiellement récupérée par les systèmes houlomoteurs est similaire à celle utilisée plus généralement pour les autres sources d'énergie renouvelable en particulier l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydrolienne ou l'énergie marémotrice.

Il s'agit dans un premier temps d'estimer l'énergie disponible *in situ* et potentiellement récupérable.

Dans un second temps, est estimée la puissance réellement convertie par le système envisagé. Chaque technologie de récupération d'énergie renouvelable (comme les systèmes houlomoteurs pour la houle, les éoliennes pour le vent, les cellules photovoltaïques pour le solaire, les hydroliennes ou les usines marémotrices pour les courantstidaux ou fluviaux) possède son propre rendement qui dépend de la technologie utilisée et des conditions de la ressource disponible sur le site (comme les états de mer pour les systèmes houlomoteurs). Le rendement énergétique est pris en compte pour l'évaluation de la puissance qui sera réellement convertie par la ferme houlomotrice envisagée.

## 1.1 Exploitation des données environnementales

Les données environnementales nécessaires à l'estimation des potentiels d'énergie renouvelable peuvent être fournies par l'observation et la mesure *in situ* ou bien par des modèles prédictifs. Les données requises sont les suivantes :

- Vent : vitesse du vent devant la turbine en kilomètre par heure (km/h) ou en mètre par seconde (m/s) et sa direction en degré chaque heure pendant idéalement 10 ans (période suffisamment longue pour être statistiquement représentative du site étudié) ;
- Solaire : ensoleillement en heure par jour pendant idéalement 10 ans ;

- Hydrolien : vitesse des courants de marée devant la machine en mètre par seconde (m/s) et sa direction en degré chaque heure pendant idéalement 10 ans. Le taux de turbulence est également une grandeur utile ;
- Houle : hauteur de houle en mètre (m), sa période en seconde (s) et sa direction en degré chaque heure pendant idéalement 10 ans minimum. Ces caractéristiques sont aussi appelées couramment « état de mer ».

Pour chaque source d'énergie étudiée, il est nécessaire de bien recenser et qualifier les données et les informations disponibles :

- La localisation de l'information ;
- La source de l'information (mesure ou résultat de modélisation mathématique) ;
- La description des instruments de mesure ou les modèles utilisés, indiquant notamment leur précision.

Pour caractériser les conditions de vagues sur les sites envisagés pour le développement de fermes houlomotrices et à proximité des ouvrages, la combinaison de deux approches complémentaires est proposée, à savoir la simulation numérique de la houle dans la zone côtière enrichie de mesures de la houle à la côte sur les sites d'intérêt, pressentis à fort potentiel et investigués plus avant.

Cette combinaison a notamment permis l'étude des sites d'Esquibien (Finistère) et de Saint-Jean-de-Luz (Pyrénées Atlantiques). Ces deux exemples de mise en application sont présentés en sous-section 2.2.

L'objectif de la mesure *in situ* couplée à la modélisation est la définition de la répartition dans le temps dite « *scatter diagram* » de la valeur des paramètres suivants : la hauteur significative de la houle  $H_{m0}$  et la période énergétique  $T_e$ , cela sur une période suffisamment longue (supérieure à la décennie) pour dégager des statistiques caractéristiques du site.

À partir de ces paramètres, le potentiel houlomoteur disponible sur le site peut être calculé.

### Simulation numérique des vagues

L'intérêt de l'approche de la modélisation numérique est d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques qui conditionnent l'évolution des vagues en zone côtière, souvent complexes et spécifiques ; citons les effets de réfraction dus à la bathymétrie, les effets de levage (*shoaling*), de dissipation due au frottement sur le fond et au déferlement, les interactions houle-courant, les effets de diffraction et de réflexion à proximité des ouvrages...

La simulation numérique a pour autre intérêt de permettre l'optimisation de la disposition des convertisseurs pour un gain de puissance convertie à l'échelle de la ferme.

Deux types de modélisation numérique des vagues permettent de prendre en compte les phénomènes locaux affectant les caractéristiques des vagues en zone côtière :

- Une approche « à phases moyennées » basée sur l'utilisation de modèles spectraux dits de 3<sup>e</sup> génération, résolvant une équation d'évolution spatio-temporelle du spectre de variance, ou d'action, de l'état de mer (codes de type Tomawac, WaveWatch, Swan). Ce type de modèle couramment utilisé à l'échelle océanique, est appliqué à l'échelle du plateau continental et de la zone proche côtière pour les sites d'intérêt sélectionnés.
- Une approche « à résolution de phase », basée sur la résolution d'équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement permettant de simuler de façon déterministe l'évolution spatio-temporelle du champ de vague, et la cinématique associée. Cette approche plus innovante est adaptée aux processus d'interaction des vagues avec les ouvrages (diffraction, réflexion), tout en visant à prendre en compte les effets non-linéaires intervenant lors de la propagation des vagues (interactions vague-vague et vagues-fond, déferlement bathymétrique).

### Campagnes de mesures *in situ*

En complément et en appui à la simulation numérique, des campagnes de mesures *in situ* sont conseillées, comme pour l'étude des sites d'Esquibien et de Saint-Jean-de-Luz, avec plusieurs dispositifs de mesure, couvrant le site d'étude du large jusqu'aux ouvrages, comme des bouées houlographes et des capteurs de pression posés sur le fond marin.

Ces ensembles de mesures sont utilisés d'une part pour calibrer et valider les modélisations évoquées précédemment, d'autre part pour améliorer la connaissance locale des états de mer et du potentiel houlomoteur sur les sites.

## 1.2 Calcul des matrices d'énergie théoriquement récupérable

La caractérisation des conditions hydrodynamiques sur les sites et à proximité des ouvrages pressentis pour l'installation de systèmes houlomoteurs, en particulier la caractérisation des conditions de vagues, est une donnée de base fondamentale pour les aspects suivants :

- Sélection et choix des sites propices à l'installation de systèmes houlomoteurs ;
- Étude et prévision de la puissance maximale théorique qui peut être récupérée sur les sites en fonction des systèmes houlomoteurs retenus et de leurs caractéristiques ;
- Connaissance précise de la climatologie des états de mer pour une estimation de la survivabilité des systèmes et de l'accessibilité des sites en phases de construction (installation de la ferme) ou d'exploitation (opérations de maintenance). La climatologie de états de mer permet notamment la détermination des périodes favorables aux interventions selon les seuils d'opérationnalité fixés par les constructeurs du matériel requis pour ces interventions.

### ■ Formulation simplifiée du niveau de la puissance de houle

Le potentiel houlomoteur d'un site est caractérisé et quantifié à l'aide du flux linéique ou niveau de puissance de houle (i.e. niveau de puissance par unité de largeur de crête de vague). Il s'exprime en kW par mètre linéaire.

Aujourd'hui encore, la plupart des informations disponibles sur l'évaluation du potentiel des sites reposent sur des formules simplifiées, telles que la suivante (1) sous l'hypothèse de grande profondeur d'eau au large (i.e. profondeur supposée infinie) :

$$P_{w1} = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} H_{m0}^2 \cdot T_e \quad (1)$$

où

- $H_{m0}$  est la hauteur significative spectrale de l'état de mer (m),
- $T_e$  est la période moyenne énergétique (s).

Si l'on dispose de données locales concernant ( $H_{m0}$ ,  $T_e$ ) pour un état de mer, fournies soit par le biais de mesures *in situ* (bouée directionnelle houlologue ou capteurs de pression par exemple), par des données satellitaires ou par des simulations numériques, la formule ci-dessus permet une première estimation du potentiel énergétique de l'état de mer correspondant.

### ■ Formulation spectrale de la puissance de houle

Un état de mer réel est constitué de vagues pouvant varier considérablement en hauteur, période et direction de provenance. La répartition de l'énergie de l'état de mer selon les fréquences et selon les directions peut être décrite par la variable de l'équation (2) appelée spectre directionnel d'énergie  $E(f, \theta)$ , qui se décompose en un spectre de fréquence  $S(f)$  et une fonction de répartition angulaire  $D(f, \theta)$  (EQUIMAR, 2011) :

$$E(f, \theta) = S(f) \cdot D(f, \theta) \quad (2)$$

- $f$  est la fréquence des vagues,
- $\theta$  est leur direction de propagation.

Le niveau de puissance de houle est la mesure de puissance disponible par unité de longueur d'onde dans une direction qui s'exprime en kW/m par l'équation (3) :

$$P_{w2} = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^\infty c_g(f, d) E(f, \theta) df d\theta \quad (3)$$

où

- $\rho$  est la masse volumique de l'eau,
- $g$  est la gravité,
- $d$  est la profondeur d'eau locale,
- $c_g$  est la vitesse de groupe des vagues.

On peut montrer que la formule (3) se réduit à (1) sous l'hypothèse de profondeur d'eau infinie.

L'utilisation de la formule (3) requiert toutefois d'avoir accès au spectre directionnel des vagues, lequel peut être estimé à partir des mesures de certaines bouées houlologues, d'images SAR (Radars à Synthèse d'Ouverture, embarqués sur des satellites), ou encore à l'aide de modèles numériques de propagation d'états de mer, tels que Tomawac, Wavewatch III ou Swan pour ne citer que les plus utilisés.

### ■ Distribution d'occurrences

La première étape consiste à estimer des distributions d'occurrences (en heures par an) ou « *scatter diagram* » pour les différents paramètres caractérisant l'énergie.

Pour les états de mer, les paramètres caractéristiques retenus sont généralement la hauteur significative de houle et la période énergétique devant le site pressenti pour le développement de la ferme.

Ces deux paramètres entrent dans le calcul de la puissance. Les variations de la direction de la houle sont souvent négligées pour les systèmes houlomoteurs bord à quai mais ce paramètre est utile :

- si la donnée de houle est localisée au large (et non bord à quai). En effet, l'approche des vagues à la côte peut alors modifier la hauteur des vagues en fonction de la direction par le phénomène de réfraction notamment ;
- si la réponse du système houlomoteur dépend de la direction des vagues, ce qui est généralement le cas. La réfraction bathymétrique a cependant tendance à réduire l'étalement directionnel des vagues à la côte.

Des exemples de distribution d'occurrences (en heures par an) sont donnés plus loin pour le site de Saint-Guénolé et pour le site d'Esquibien.

#### ■ Matrice d'énergie théoriquement récupérable

En multipliant la distribution d'occurrences (en heures par an) par la puissance associée, on obtient une matrice d'énergie de houle, exprimée en MWh/m par an, pour chaque couple de paramètres caractérisant les vagues (hauteur, période).

Plus généralement, il est utile d'établir les distributions moyennes d'énergie de houle :

- sur l'ensemble de l'année (i.e. distribution annuelle) ;
- sur l'ensemble des hivers, des printemps, des étés ou des automnes (i.e. distribution saisonnière) ;
- sur l'ensemble de chaque mois de l'année (i.e. distribution mensuelle) ;
- à la pleine mer, basse mer ou mi - marée (i.e. distribution relative au niveau de la surface libre).

Ces matrices d'énergie sont basées uniquement sur des données environnementales (sans prise en compte d'information sur la technologie du convertisseur envisagé).

En additionnant toutes les cellules de la matrice d'énergie théoriquement récupérable, nous obtenons une énergie totale moyenne récupérable (par exemple annuellement, par saison, par mois, par niveau de surface libre).

### 1.3 Calcul des matrices d'énergie récupérée

#### ■ Matrice de rendement du système houlomoteur

Le rendement du système houlomoteur est estimé en fonction des mêmes paramètres (hauteur et période de la houle), bornés par une hauteur seuil et hauteur maximum inhérente au convertisseur considéré (bornes précisées par le constructeur du convertisseur). L'influence de la direction de la houle peut aussi être ajoutée.

#### ■ Matrice d'énergie récupérée

Les matrices d'énergie théoriquement récupérable sont multipliées cellule par cellule par la matrice de rendement d'un système convertisseur donné.

Le produit résultant est la matrice de l'énergie de houle récupérée.

L'addition de toutes les cellules de cette matrice d'énergie récupérée conduit à l'énergie totale moyenne récupérée (par exemple annuellement, par saison, par mois, par niveau de surface libre).

Les variations inter-annuelles et les incertitudes associées à l'estimation de l'énergie récupérée peuvent être aussi utilement estimées.

### 1.4 Éléments caractéristiques des sites influant sur l'énergie réellement convertie

#### Paramètres relatifs à la configuration de l'ouvrage porteur

Les paramètres suivants sont à prendre en compte pour la caractérisation des conditions de vagues et l'évaluation du potentiel énergétique des sites.

#### ■ Réflexion de la houle sur l'ouvrage

La réflexion sur l'ouvrage est un paramètre important qui influe sur la puissance récupérée. Lorsque la réflexion de la houle sur l'ouvrage est totale, elle peut augmenter le rendement du convertisseur d'un facteur deux voire plus.

Les paramètres importants sont le coefficient de réflexion sur l'ouvrage et éventuellement l'angle que font les digues entre elles (Sergent *et al.*, 2002). Il faut noter que la réflexion peut aussi avoir d'autres effets comme par exemple l'augmentation de la masse ajoutée pour un flotteur pilonnant. Un paramètre adimensionnel associé à ce phénomène est le rapport entre le dégagement (distance du flotteur à l'ouvrage) et la longueur d'onde des vagues.

### ■ Orientation de l'ouvrage

L'orientation de l'ouvrage peut influencer l'efficacité du système récupérateur. Il y a deux types de configurations, l'une considérant l'ouvrage porteur orienté face à la houle, l'autre considérant l'ouvrage porteur orienté dans l'axe de la houle (de type épi).

Dans la première, il est possible de tirer avantage de la réflexion de la houle. Cependant, la seconde configuration n'est pas à écarter. En effet, compte tenu du faible taux d'absorption de l'énergie par un système houlomoteur, une série de dispositifs peut être proposée. Les dispositifs n'interférant pas entre eux (par exemple en affaiblissant l'énergie de la houle récupérable au voisinage des convertisseurs adjacents) chacun des convertisseurs disposés sera exposé au potentiel de houle local maximum.

### ■ Profondeur et nature des fonds

Un dispositif bord à quai est souvent caractérisé par une faible profondeur, ce qui limite la puissance récupérable en particulier à marée basse. La faible profondeur peut aussi être responsable de la génération d'harmoniques du fait de la non-linéarité de houle en faible profondeur. Cela peut modifier le climat de houle à la côte, où justement l'énergie sera convertie.

Un paramètre adimensionnel important pour caractériser le site est dès lors le rapport entre la hauteur de la houle et la profondeur d'eau disponible.

Cette faible profondeur peut aussi être une contrainte pour le bon fonctionnement des dispositifs de type flotteur pilonnant. Un autre paramètre à considérer est le rapport entre le tirant d'eau et la profondeur.

Enfin la nature des fonds influe également, pouvant être contraignante en cas de fonds sableux. En effet, ceux-ci sont potentiellement fortement mobiles dans la zone des petits fonds soumis aux courants de houle. Courants qui sont capables de générer la remise en suspension des matériaux locaux (fonction de la taille des grains *in situ*) et une turbidité associée potentiellement conséquente et préjudiciable pour le fonctionnement optimal des dispositifs convertisseurs d'énergie.

À noter que la profondeur moyenne des fonds pourra varier durant la durée de vie du système houlomoteur du fait de la remontée du niveau marin avec le changement climatique. Cela pourra même avoir un effet indirect sur la puissance de houle récupérable qui augmentera (Sergent *et al.*, 2014).

### ■ Marnage et action des courants tidaux

Les côtes Atlantiques et de la Manche Occidentale, le long desquelles la ressource en énergie des vagues est forte, sont aussi caractérisées par un marnage important. Ce marnage est la cause d'une modulation significative de la ressource entre la marée haute et la marée basse pour la majorité des ouvrages dont la profondeur en pied d'ouvrage est inférieure à 5 m C.M. Certains dispositifs de récupération de l'énergie des vagues sont plus sensibles que d'autres au marnage. Il faut noter que les marées génèrent aussi des courants qui peuvent entrer en interactions avec la houle.

### ■ Longueur de digue utile

La puissance récupérée/convertie est le produit d'une puissance par unité de longueur, par une longueur de digue utile pouvant être équipée. Il est donc nécessaire d'estimer cette longueur qui peut dépasser le kilomètre ou être inférieure à 100 mètres.

### ■ Évènements extrêmes

La connaissance des évènements extrêmes est indispensable pour le dimensionnement à la fois de l'ouvrage porteur et du dispositif de conversion de l'énergie de la houle.

Il s'agit de définir le climat d'état de mer au large de la côte, d'analyser les évènements extrêmes et de définir les houles de projet à considérer pour le dimensionnement de l'ouvrage porteur (si pas pré-existant) et celles à considérer pour le dimensionnement du dispositif de conversion (elles ne sont en effet pas obligatoirement les mêmes), puis de les propager (au moyen d'un modèle numérique) du large à la côte pour obtenir les caractéristiques de ces houles de projet devant la digue. Celles-ci peuvent également être issues de mesures *in situ*.

### ■ Contraintes techniques, environnementales et socio-économiques sur le site

Les contraintes techniques, environnementales et socio-économiques jouent un rôle clé dans le choix des sites propices pour la conversion des énergies renouvelables. Ces contraintes sont désormais bien identifiées pour les énergies marines en mer telles que les éoliennes *offshores* ou les hydroliennes. Elles sont assez différentes pour un système houlomoteur bord à quai.

- les contraintes environnementales et socio-économiques : critères regroupant l'identification de sites Natura 2000 Directives Oiseaux et Habitats, les zones d'inventaires parcs nationaux et parcs marins et intégrant notamment, pour l'aspect socio-économique, le recensement des zones de mouillages, de pêches, d'immersion et d'extraction de granulats marins ;
- la nature des fonds : critère relatif à la stabilité des fonds et à l'impact morphologique de l'implantation de systèmes houlomoteurs.

## 1.5 Critères de sélection pour l'évaluation du potentiel houlomoteur

La caractérisation des sites pour ce qui concerne la puissance récupérable s'effectue au regard des critères suivants :

- la bathymétrie : critère influant sur la hauteur de houle au déferlement, et donc sur l'intensité des houles aux abords des sites ;
- le niveau d'eau moyen (NM) : critère influant la hauteur de houle au déferlement. Pour les littoraux de la Manche et de l'Atlantique, le marnage macro-tidal est un point important à considérer pour le fonctionnement des systèmes houlomoteurs ;
- le niveau de puissance de houle : critère de référence important (kW/m) calculé à partir des paramètres de houle obtenus sur les sites à partir de la propagation du large à la côte des données de bases numériques d'états de mer Anemoc et Homere ou des données de mesure de la base Candhis ;
- la longueur de digue pouvant être équipée : critère important pour le calcul de la puissance de houle (obtenue par multiplication du niveau de puissance de houle par le linéaire d'ouvrage). Ainsi, si l'énergie incidente est faible, elle peut être compensée par une grande longueur de digue utile. Cette longueur est estimée en sélectionnant le linéaire de digue le plus exposé à la profondeur la plus importante ;

## 2. Évaluation de potentiels houlomoteurs sur le littoral français

Ce chapitre vise à caractériser l'énergie des vagues théoriquement récupérable aux abords des structures existantes sur le littoral français et susceptibles d'être équipées de systèmes houlomoteurs.

### 2.1 Évaluation du potentiel houlomoteur de vingt-deux sites français en Manche et Atlantique

Le projet EMACOP a permis d'évaluer le potentiel houlomoteur de vingt-deux sites français afin de sélectionner les sites les plus pertinents parmi ceux pouvant être équipés de systèmes houlomoteurs. La sélection et la caractérisation des sites ont été effectuées notamment à partir des critères de bathymétrie, de niveau d'eau, de climats de houle, de niveau de puissance de houle (en kW/m) et de longueur de digue pouvant être équipée.

#### Méthodologie d'étude

##### ■ Présentation des sites

L'identification de sites côtiers ou portuaires des façades maritimes de la Manche et de l'Atlantique a permis de sélectionner vingt-deux sites d'études présentés sur la figure 2-1.

Figure 2-1. Localisation des sites et des points situés au large de l'atlas numérique de houle Anemoc : A : Manche, B : Bretagne et côte Ouest, C : côte Sud-Ouest de la France



### ■ Estimation des climats de houle

L'estimation des climats de houle des sites est réalisée à partir de l'analyse statistique de données de houle de l'atlas numérique Anemoc développé par le Cerema et EDF/Lnhe (Benoit *et al.*, 2008), et de mesures de bouées directionnelles du réseau Candhis, à laquelle ont été associés des calculs analytiques de propagation de la houle du large vers les sites (Goda, 2000).

Les houles subissent des déformations dues aux phénomènes de réfraction par les fonds, de *shoaling*, de déferlement, de réflexion et de diffraction dues aux ouvrages. L'intensité de l'énergie des vagues peut varier considérablement en fonction des configurations bathymétriques.

#### Climats de houle au large

Les données de houle, assimilées à des points de l'atlas numérique Anemoc, sont élaborées à partir de simulations rétrospectives sur la période de 1979 à 2002 et ont été sélectionnées à des profondeurs de

plus de 50 mètres pour fournir les climats de houle au large. Le traitement informatique des fichiers de plus de 200 000 lignes correspondant aux valeurs horaires d'états de mer des points au large de l'atlas Anemoc a permis de calculer, à partir de la formule (3), le niveau de puissance de houle au large  $P_w$  (Matarolo *et al.*, 2009).

La variabilité saisonnière des climats sur les côtes françaises a également conduit à réaliser l'analyse des données suivant les climats de houle annuel, hivernal (d'octobre à mars) et estival (d'avril à septembre) afin de bien caractériser le potentiel houlomoteur.

#### Climats de houle sur les sites

Les calculs de propagation de la houle du large vers les sites ont été élaborés à partir des formules analytiques (Goda, 2000) qui prennent en compte la réfraction, le *shoaling* et le déferlement pour les climats de houle annuel, hivernal et estival. Les résultats de calcul fournissent les paramètres de houle à la côte qui permettent de déterminer le niveau de puissance de houle à la côte  $P_c$  :

Tableau 2-1. Résultats des paramètres de houle obtenus au large des sites, suite au traitement statistique des points de l'atlas numérique de houle ANEMOC – période de 1979 à 2002 (23 ans et 8 mois de données).

Site d'étude correspondant	N° point atlas numérique ANEMOC	Localisation	Profondeur (m CM)	Distance à la côte (km)	Puissance annuelle $P_w$ (kW/m)	Puissance hivernale $P_{wh}$ (kW/m)	Puissance estivale $P_{we}$ (kW/m)	Hauteur de houle annuelle $H_s$ (m)	Période énergétique $T_e$ (s)	Direction de provenance de la houle (°/Nord)
Boulogne-sur-mer	1341	50°47'N / 1°26'E	57,6	10	2,9	4,4	1,4	0,8	5,7	250
Antifer	1890	49°50'N / 0°21'E	42,5	40	4,9	7,8	2,2	1	6,2	280
Cherbourg	1154	49°53'N / 1°32'O	63,7	24	9,3	14,5	4,1	1,3	6,8	270 ; 50
Flamanville	2291	49°34'N / 2°90'O	35	20	14,2	23,2	5,4	1,5	7,8	270
Roscoff	1080	48°50'N / 3°59'O	66,2	10	27,7	43,8	12	2	8,8	285
Molène	0730	48°30'N / 4°58'O	80	10	20,1	30,6	9,8	1,8	8,3	300
Le Conquet	0398	48°19'N / 5°11'O	97	30	54,1	88	20,8	2,6	9,1	285
Esquibien Saint-Guénolé	1232	47°49'N / 4°52'O	60	30	44,3	71,1	18	2,4	9	285
Lesconil	0281	47°32'N / 4°36'O	100	40	44,2	70,6	18,3	2,4	9,1	280
Groix	4150	47°38'N / 3°22'O	10,7	5	12,2	19,8	3,5	1,2	9,6	225
Quiberon	0874	47°32'N / 3°37'O	72	36	23,5	38,1	9,2	1,7	9	260
Belle-Île	2421	47°18'N / 2°54'O	32	12	11,2	18,4	4,1	0,9	9	250
Le Croisic	1499	47°12'N / 3°3'O	50	38	2,6	33,1	8,3	1,6	9,1	260
Port de Morin L'Herbaudière Port-Joinville	1544	46°55'N / 2°44'O	51	35	29	46,9	11,2	1,9	9,4	275
St-Gilles-Croix-de-Vie Les Sables d'Olonne	0315	46°21'N / 2°44'O	103	65	34,6	55,1	14,4	2,1	9,3	275
La Cotinière	1105	45°48'N / 1°53'O	65	44	28,3	44,8	12,1	1,9	9,2	275
Bayonne Saint-Jean-de-Luz	0016	43°39'N / 1°34'O	198	8	25,8	40,4	11,4	1,8	10,1	300

## ■ Évaluation du potentiel houlomoteur des sites

### Première phase d'évaluation

L'évaluation a été effectuée à partir des critères de caractérisation de site, et en particulier des critères de bathymétrie (en m CM), de niveaux de puissance de houle annuelle et hivernale (en kW/m) et de longueur de digue pouvant être équipée (en m).

Tableau 2-2. Résultats des paramètres de houle obtenus sur les sites au droit des ouvrages côtiers par la méthodologie d'étude présentée de propagation de la houle du large à la côte - période de 1979 à 2002 (23 ans et 8 mois de données).

Site d'étude	N° département	Bathymétrie (m CM)	Niveau d'eau moyen NM (m)	Puissance de houle annuelle Pc (kW/m)	Puissance de houle hivernale Pch (kW/m)	Puissance de houle estivale Pce (kW/m)	Hauteur de houle annuelle Hc (m)	Longueur de digue pouvant être équipée (m)	Obliquité houle / ouvrage (°)
Boulogne-sur-Mer	62	3	4,9	2,8	4,2	1,3	0,7	1600	25
Antifer	76	16	4,9	5,1	8,2	2,2	0,9	1900	20
Cherbourg	50	10	3,8	4,4	6,3	2,5	1	4000	-60 ; 60
Flamanville	50	3	5,4	13,6	22,2	5,4	1,4	700	15
Roscoff	29	2	5,3	7,8	10,8	4,9	1,2	300	45 ; 5
Molène	29	0	4,3	7,9	11,6	4,8	1,3	60	25
Le Conquet	29	1	4,0	21,1	30,2	11,8	2,1	140	40
Esquibien	29	2	3,1	6,9	8,4	3,4	1,3	340	40
Saint-Guénolé	29	2	3,0	21,1	30,2	12,6	2,1	250	15
Lesconil	29	0	3,1	8,1	9,7	5,2	1,5	200	10
Groix	56	1	3,1	x	x	x	x	200	x
Quiberon	56	0	3,1	5,8	8,2	3,2	1,1	350	0 ; 50
Belle-Île	56	2	3,1	0,9	1	0,7	0,5	200	25 ; 50
Le Croisic	44	-2	3,3	1,6	1,9	1,4	0,8	450	70
Port de Morin	85	-2	3,4	2,1	2,4	1,8	0,9	400	0
L'Herbaudière	85	-2	3,4	1,8	2,1	1,6	0,9	100	0
Port-Joinville	85	0	3,1	1,8	2,3	1,3	0,7	100	55
St-Gilles-Croix-de-Vie	85	1	3,2	12,2	17,9	6,6	1,6	250	90
Les Sables d'Olonne	85	1	3,2	10,3	13,4	5,1	1,4	100	30
La Cotinière	17	-2	3,6	2,5	3,11	1,9	1	150	20
Bayonne	64	7	2,5	24,3	37,8	11,1	1,8	500	70
Saint-Jean-de-Luz	64	10	2,5	21,8	33,8	10,1	1,6	500	25

Cette évaluation a permis d'identifier 14 sites susceptibles de présenter un niveau de potentiel intéressant et d'écarter 8 sites présentant de faibles niveaux de puissance de houle, inférieurs à 2,5 kW/m pour 6 d'entre eux. Les sites écartés sont : Molène, Groix, Belle-Ile, Le Croisic, Port de Morin, L'Herbaudière, Port-Joinville et La Cotinière (en noir dans les tableaux 2-1 et 2-2).

### Deuxième phase d'évaluation

Cette phase a été réalisée à partir de l'analyse détaillée des résultats statistiques de potentiel des 14 sites sélectionnés présentés sous la forme (cf. figures 2-3 et 4) :

- de distributions d'occurrence (en heures par an) pour les états de mer du site définis par la hauteur de houle Hc devant le site et la période énergétique Te ;

- de distributions d'énergie de houle (en MWh/m) par an ;
- de distributions cumulatives des occurrences et de l'énergie annuelle de  $P_c$ ,  $H_c$ ,  $T_e$ , et de direction de provenance ( $^\circ$  / Nord), (Lenee-Bluhm *et al.*, 2011) ;
- et d'évolution mensuelle du niveau de puissance de houle pour le point au large de l'atlas Anemoc et le site d'étude.

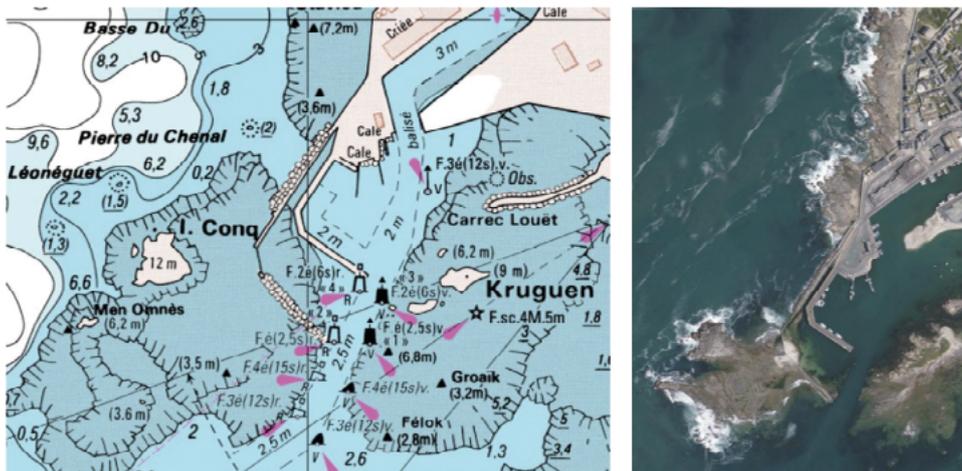
Cette phase a permis de sélectionner 9 sites d'étude présentant de forts niveaux de potentiel houlomoteur mais qui restent hétérogènes, car dépendant fortement de la localisation et de la longueur de digue pouvant être équipée.

Ainsi, les estimations de niveaux de puissance de houle annuelle varient de 4,4 kW/m à Cherbourg jusqu'à 24,3 kW/m à Bayonne et les longueurs de digues utiles varient de 140 m au Conquet, 500 m à Saint-Jean-de-Luz et jusqu'à 4 000 m à Cherbourg. Les sites de Boulogne-sur-Mer, Roscoff, Lesconil, Quiberon et Les Sables-d'Olonne, qui présentent un niveau de potentiel houlomoteur moyen, ont été écartés.

### Exemples de résultats présentés pour le site de Saint-Guérolé (Finistère)

La partie de digue utile retenue correspond à une section de 250 m de longueur, avec une côte, un pied de digue, de 2 m CM.

Figure 2-2. Extrait de la carte marine n° 6645 Pointe de Penmarc'h (source SHOM) et photographie aérienne du site de Saint-Guérolé (source Géoportail IGN)



Les houles sont très énergétiques le long de la digue (21,1 kW/m en moyenne annuelle et 30,2 kW/m en hiver) et arrivent avec une obliquité moyenne sur l'ouvrage de  $15^\circ$ .

Figure 2-3. Distribution d'énergie de houle (MWh/m) par an pour les états de mer du site définis par la hauteur de houle devant le site  $H_c$  (m) et la période énergétique  $T_e$  (s)

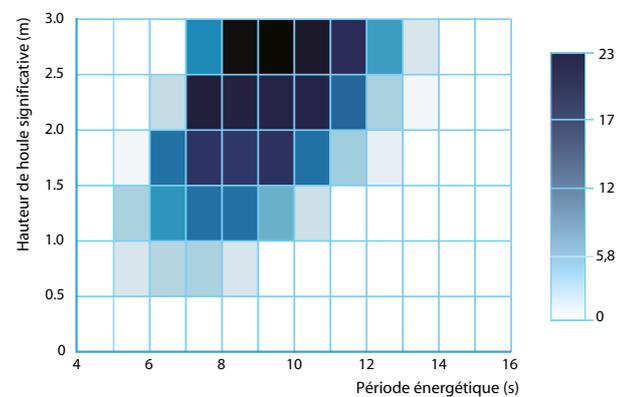
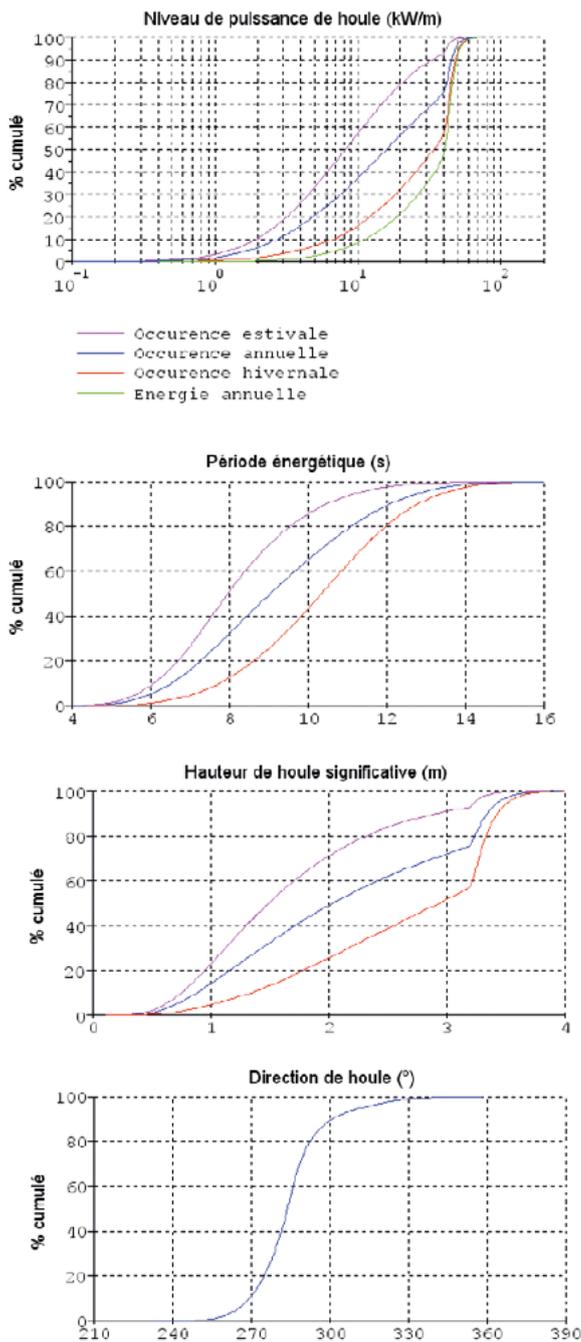


Figure 2-4. Distributions cumulatives des occurrences (annuelle, hivernale et estivale) et de l'énergie (annuelle) du niveau de puissance de houle  $P_c$  (kW/m), de la hauteur de houle  $H_c$  (m), de la période énergétique  $T_e$  (s) et de la direction de la houle ( $^\circ$ )



Le niveau de puissance de houle dépassant le niveau moyen de puissance annuelle (21,1 kW/m) représente 40% du temps annuel, soit 146 jours par an et compte pour 75% de l'énergie annuelle. En période hivernale, le niveau de puissance est supérieur à 21,1 kW/m pendant 62% du temps, soit 112 jours.

## Classification des sites

La classification est établie à partir de l'analyse des résultats présentés dans le tableau récapitulatif (cf. tableau 2-1) et les fiches de sites détaillées. L'évaluation a permis de sélectionner 9 sites d'études de fort potentiel, répartis sur les façades maritimes de la Manche pour 3 d'entre eux (Antifer, Cherbourg et Flamanville) et de l'Atlantique pour les 6 autres (Le Conquet, Esquibien, Saint-Guénolé, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Bayonne et Saint-Jean-de-Luz).

Il faut souligner que les sites présentant les niveaux de puissance de houle les plus forts (de 20 à 25 kW/m sur les sites), se situent à la pointe Bretagne et dans le Pays Basque.

L'énergie transférée du large à la côte est fortement atténuée pour les sites bretons, passant de 44,3 kW/m au large à 21,1 kW/m sur le site de Saint-Guénolé et à 6,9 kW/m sur le site d'Esquibien. En revanche, l'énergie transférée est conservée pour les sites basques, passant de 25,8 kW/m au large à 24,3 kW/m sur le site de Bayonne et à 21,8 kW/m sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

Ces deux types de transfert s'expliquent par les configurations bathymétriques très différentes des sites, avec en Bretagne, le plateau continental et la configuration complexe et découpée des côtes qui atténuent fortement l'énergie des houles du large, et dans le Pays Basque, la présence du gouf du Capbreton dans les Landes qui favorise au contraire leur transfert à la côte.

### ■ Limites de validité de la méthodologie

#### Formulation simplifiée

La méthode employée de propagation de la houle du large à la côte (Goda, 2000) présente certaines

limites dans la représentation des processus de réfraction, de convergence et divergence de houle et de transfert d'énergie. Les formules de calculs sont limitées pour mettre en évidence les zones de concentration d'énergie de houle autour des caps ou digues et de dissipation d'énergie pénétrant dans les baies.

La formule de calcul du niveau de puissance de houle, employée pour caractériser les sites, reste une formule simplifiée approximative, issue de l'approche spectrale, mais qui reprend la vitesse de groupe définie pour la houle régulière. L'utilisation de la formulation spectrale du niveau de puissance aurait été plus correcte, mais elle requiert l'utilisation de modèles numériques spectraux complexes à mettre en œuvre.

La diffraction autour des obstacles, qui peut s'interpréter comme un processus de transfert d'énergie des zones les plus agitées vers les moins agitées, reste compliquée à formuler et n'est donc pas intégrée à la méthode, en raison de la difficulté de prendre en compte les résultats d'abaques dans les calculs.

#### *Sites de configuration complexe*

Les résultats peuvent être surestimés pour des sites de configuration complexe, en raison de la présence d'obstacles ou de hauts fonds qui ne sont pas intégrés dans la méthode de calcul de propagation de houle. Ces obstacles peuvent atténuer et amortir considérablement les houles du large aux abords des sites comme Le Conquet, Cherbourg ou Roscoff, voire au contraire sous-estimer les résultats aux abords de sites comme Esquibien protégé par le cap de Lervily.

## 2.2 Caractérisation plus précise des vagues et du potentiel houlomoteur sur les neuf sites les plus pertinents

Le travail préalable d'identification et d'évaluation, réalisé à partir d'une méthode de calcul analytique de propagation du large à la côte, a permis de caractériser le potentiel houlomoteur de vingt-deux sites

en Manche et Atlantique et de retenir les neuf sites les plus pertinents (Michard *et al.*, 2013).

**Pour estimer plus précisément le potentiel houlomoteur sur ces sites, il a été décidé d'avoir recours à des modèles numériques** plus performants de propagation à phase moyennées (Tomawac, Swan) et de simulation de vagues à résolution de phase (Swash) ainsi qu'à des bases numériques de houle (Anemoc, Homere). Ces deux types de modélisation numérique ont été mis en œuvre pour l'étude approfondie des sites retenus.

L'approche à phases moyennées, basée sur l'utilisation de modèles spectraux, résolvant une équation d'évolution spatio-temporelle du spectre d'action de l'état de mer (codes de type Tomawac, Swan et WaveWatch III) a été employée pour :

- les sites de Bayonne et Saint-Jean-de-Luz (utilisation de Swan et Tomawac par le Casagec) ;
- pour les sites de Molène et du Conquet (exploitation des données Homere par Artelia) ;
- pour les sites de Cherbourg, Flamanville et Antifer (utilisation du code Tomawac par le Lusac).

L'approche à résolution de phase permettant de simuler de façon déterministe l'évolution spatio-temporelle des vagues pour une prise en compte des processus d'interaction des vagues avec les ouvrages (diffraction et réflexion) a été employée par :

- pour les sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé (utilisation du code Swash par le Cerema) ;
- l'évaluation des résultats de la base de données Homere développée par l'Ifremer est utilisée pour conforter les résultats obtenus, en s'inspirant de la démarche d'étude de l'*Electric Power Research Institute* (EPRI, 2011). L'analyse de ces données de houle reconstituées sur la période de 1994 à 2012 au plus proche des digues considérées, a pour objectif d'affiner les résultats de potentiels énergétiques des 9 sites sélectionnés.

## Évaluation du potentiel houlomoteur sur le site de Bayonne

Deux simulations numériques ont été réalisées dans le Sud du Golfe de Gascogne pour évaluer le potentiel houlomoteur au niveau de la digue Nord du port de Bayonne. Ces simulations consistent à forcer un modèle de propagation de vague (Swan) avec une base de données de rejeux (hindcast) globale.

### ■ Bases numériques de données d'états de mer Anemoc et Homere

Les bases numériques de données d'états de mer utilisées sont l'atlas Anemoc (EDF/LNHE et Cetmef ; période de 1979 à 2002 ; 23 ans et 8 mois) et la base Homere (Ifremer ; période de 1994 à 2012 ; 18 ans).

Figure 2-5. Vue aérienne digue nord de Bayonne



Ces bases numériques de données d'états de mer permettent de connaître le climat de houle en de nombreux points de sorties, cependant ces points de maillage situés au large ne correspondent pas forcément aux sites à étudier puisqu'il s'agit d'étudier des sites côtiers. Les simulations mises en œuvre permettent de calculer la propagation de la houle du large à la côte, cela au moyen d'un modèle numérique de terrain raffiné sur le site de la digue Nord du port de Bayonne. La bathymétrie haute résolution du site est prise en compte ainsi que le phénomène de marée qui permet d'avoir une très bonne précision sur le dimensionnement des ouvrages récupérateurs de houle.

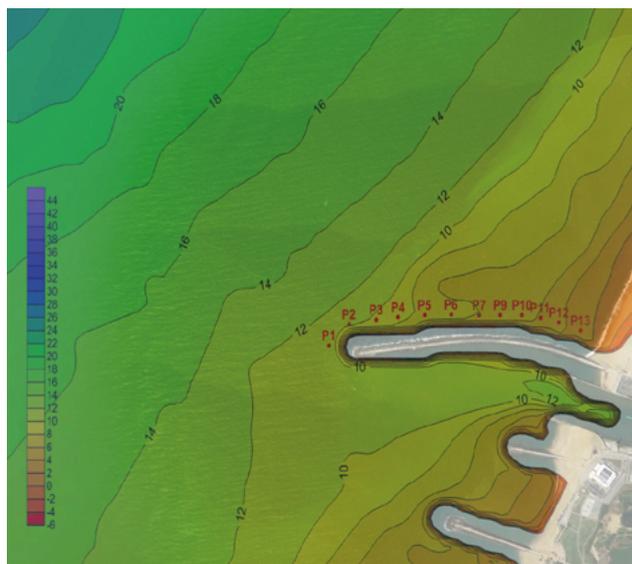
Cette méthode, coûteuse en temps de calcul, est une alternative aux formules paramétriques, beaucoup plus simples à mettre en œuvre mais dont la précision peut être remise en cause pour les sites à bathymétrie complexe et soumis à un fort marnage.

### ■ Simulations numériques réalisées avec Swan

Dans un premier temps, une comparaison des résultats a été effectuée sur des points de contrôle au large. Des différences marquées ont été observées entre le « Swan Anemoc » et le « Swan Homere » avec une puissance plus importante pour les mois hivernaux pour le « Swan Anemoc ».

Dans un deuxième temps, la comparaison entre les deux simulations s'est faite sur des points de contrôle situés au pied de la digue, côté nord, le plus exposé aux vagues. Bien que des différences importantes soient observées au large, les différences de puissances calculées sont moins marquées au niveau de la digue. De plus, la puissance calculée la plus élevée est donnée par la simulation forcée par la base Homere.

Figure 2-6. Localisation des points de contrôles sur la bathymétrie du MNT (convention profondeur et cotes marines)



### ■ Résultats de potentiel houlomoteur

Les résultats indiquent que la puissance moyenne annuelle est comprise entre 15 et 18 kW/m pour les points les plus au large et pour les deux bases de données. La puissance diminue ensuite fortement pour les deux points proches de la côte.

Cette puissance moyenne de 15 à 18 kW/m est disponible sur un linéaire d'environ 650 m. Pour faire un parallèle avec les digues de Saint-Jean-de-Luz, l'énergie disponible au pied de la digue de l'Artha était d'environ 14,2 kW/m sur un linéaire maximum de 250 m. La digue Nord du port de Bayonne représente donc un potentiel énergétique 3 fois plus important.

### Étude de la ressource houlomotrice disponible sur les sites du Conquet et de Molène

#### ■ Base numérique de données Homere

L'analyse de la ressource houlomotrice repose sur l'exploitation directe de la base numérique de données d'états de mer Homere spécifiquement développée pour une utilisation sur des projets en lien avec les énergies marines renouvelables. Plusieurs points de la base Homere ont été sélectionnés au voisinage des deux sites. Les données en chacun de ces points font l'objet d'une analyse du climat de houle et de calculs de puissance de houle incidente.

Les résultats de puissance de houle incidente ont été calculés sur 6 points :

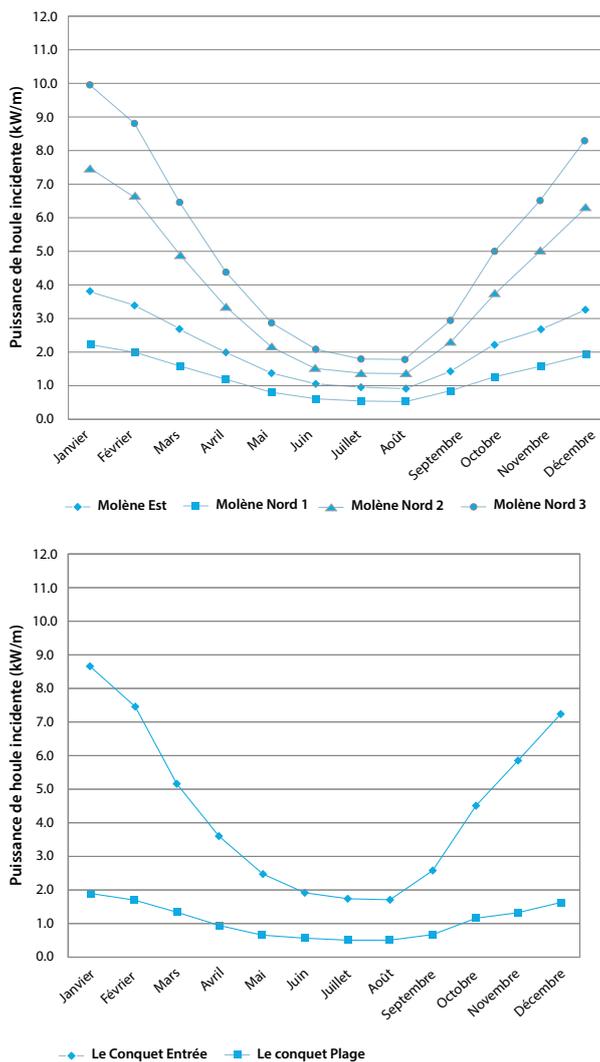
- 4 points pour Molène (Molène Est, Molène Nord 1, Molène Nord 2, Molène Nord 3) ;
- 2 points pour Le Conquet (Entrée 48 et Le Conquet Plage).

Les valeurs calculées correspondent à l'analyse statistique de la série temporelle (sur la période de 19 ans 1994-2012 couverte par les données Homere, avec un pas de temps horaire) du flux d'énergie fourni parmi les nombreux paramètres globaux de sortie de la base de données.

### ■ Résultats de potentiel houlomoteur

L'illustration suivante montre les variations saisonnières de la puissance de houle incidente pour chacun des sites du Conquet et de Molène.

Figure 2-7. Variations saisonnières de la puissance de houle incidente pour chacun des sites du Conquet et de Molène



Les puissances moyennes annuelles obtenues sur le site de Molène (par petits fonds, entre 0 et -5 m CM) sont comprises entre 1,3 et 5,1 kW/m. Les moyennes mensuelles maximales sont atteintes en janvier et varient entre 2,2 et 10,0 kW/m selon le point considéré.

Les puissances moyennes annuelles obtenues sur le site du Conquet sont de 1,1 et 4,4 kW/m par fonds de 0 et -7 m CM. Les moyennes mensuelles maximales, atteintes en janvier, sont de 1,9 et 8,7 kW/m.

Il est à noter que les valeurs obtenues ici sont nettement inférieures à celles obtenues pour les mêmes sites dans le cadre de l'évaluation préliminaire du potentiel houlomoteur des 22 sites identifiés du fait principalement d'un phénomène de masquage.

### Estimation du potentiel houlomoteur et classification des états de mer. Application aux sites de Cherbourg, Flamanville et Antifer

#### ■ Réalisation d'une classification des états de mer

La méthode la plus « naturelle » pour estimer la ressource houlomotrice d'un site côtier est de propager à la côte des états de mer disponibles au large (via une base de données ou via des mesures de houlographes) sur une période longue (20 ans typiquement pour pouvoir estimer la variabilité inter-annuelle de la ressource). Une fois que les états de mer sont propagés à la côte, le potentiel et sa variabilité peuvent être évalués.

Cette méthodologie est efficace mais difficile à mettre en œuvre dès lors que l'on souhaite utiliser un modèle numérique pour propager les vagues. La raison principale est le temps de calcul. Réaliser un calcul sur 20 ans avec une résolution de l'ordre du mètre à la côte nécessite d'importantes capacités de calcul.

Pour la présente étude, une méthode alternative a été développée. Plutôt que d'effectuer une simulation sur une vingtaine d'années, une classification des états de mer a été utilisée. L'idée est de synthétiser le signal de vagues au large avant de le propager à la côte. Ainsi, on ne propage pas l'ensemble du signal mais une information représentative du climat de vagues au large.

#### ■ Méthodologie en trois étapes et simulations réalisées avec Tomawac

La méthodologie comporte trois étapes :

- classer les états de mer du large pour obtenir un nombre limité de classes de vagues représentatives du régime de vagues au large ;

- propager chaque régime de vague avec le code Tomawac aussi proche que possible des digues où les convertisseurs pourraient être placés ;
- estimer la ressource en additionnant les puissances associées à chaque régime de vagues pondérées par leur fréquence d'occurrence.

Figure 2-8. Maillages des trois sites d'études réalisées avec le système TELEMAC

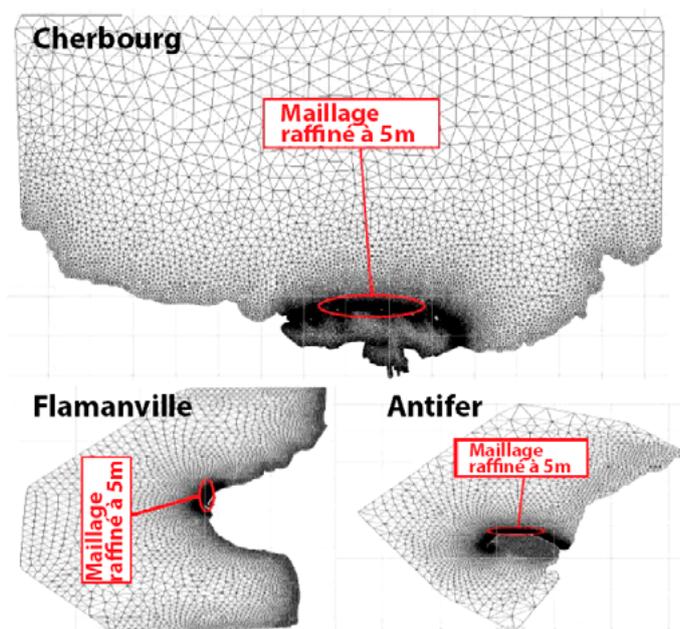
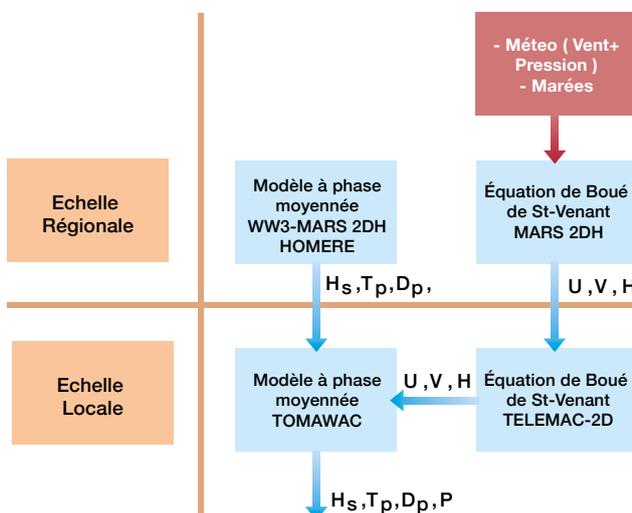


Figure 2-9 Couplage entre les modèles de vagues (Tomawac en local et WaveWatch III en régional) et les modèles d'écoulement (Telemac 2D en local et Mars 2D en régional)



### ■ Résultats du potentiel houlomoteur sur les sites de Cherbourg, Flamanville et Antifer

La méthode a été appliquée sur trois sites localisés dans la Manche : Cherbourg, Flamanville et Antifer. Les résultats obtenus avec cette méthodologie fournissent des puissances comparables sur les trois sites (3,4, 2,9 et 2,3 kW/m).

Comme le site de Cherbourg possède la plus grande longueur de digue, c'est le site qui peut fournir la plus grande puissance totale (13,3 MW).

Les résultats ont été comparés aux résultats obtenus lors de la première tranche du projet où une méthode sensiblement différente a été utilisée. Des différences importantes sont obtenues sur l'estimation de la puissance des vagues au large ou à la côte. Elles sont liées à la base de données utilisée (Anemoc pour Michard *et al.*, 2013 ; Homere pour le Lusac) et à la formule permettant d'estimer la puissance.

La méthode de propagation des vagues (utilisation des formules empiriques de Goda pour Michard *et al.*, 2013 et utilisation d'un modèle spectral pour Lusac) donne en revanche des résultats très proches.

### Caractérisation des conditions de vagues et du potentiel houlomoteur sur les sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé par simulation numérique

#### ■ Modèle numérique Swash

*Swash*, acronyme de *Simulating WAVes till SHore*, est un modèle numérique de transformation de vagues en proche côtier développé par l'Université de Technologie de Delft (NL), qui offre la possibilité d'étudier la propagation des vagues du large à la côte de façon déterministe. Le modèle résout les équations non linéaires en faible profondeur en y ajoutant un terme de pression non-hydrostatique (Zijlema *et al.*, 2011).

Le modèle Swash prend en compte de nombreux phénomènes affectant les vagues en proche côtier, comme la propagation, la dispersion de fréquence, le levage ou shoaling, la réfraction par le fond, la

diffraction, le déferlement, la friction sur le fond, les réflexions et les interactions non linéaires des vagues. Une description du modèle, du schéma numérique explicite retenu, des conditions aux limites de forçages et des applications, sont présentés sur le site dédié (<http://swash.sourceforge.net>).

**Tableau 2-3. Occurrences des couples (Hm0, Tp) en nombre d'heures ramenées sur 1 an**

Hm0 (m) \ Tp (s)		Tp (s)					
		5	7	9	11	13	15
5,5	6,5	0,0	0,0	0,2	5,0	21,6	28,7
	4,5	0,0	0,1	3,9	41,0	78,0	73,3
3,5	4,5	0,0	6,5	43,0	130,0	203,1	107,3
2,5	3,5	2,9	75,1	139,7	316,8	351,9	123,8
1,3	2,5	95,8	306,7	423,0	782,7	493,9	116,9
0,5	1,5	243,3	862,2	1348,6	1228,4	360,0	111,1
0	0,5	20,3	169,5	155,7	62,6	18,5	6,9

#### ■ Simulations numériques des deux sites

##### Localisation des sites

Les sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé, localisés en baie d'Audierne à la pointe de la Bretagne, présentent des potentiels prometteurs avec des puissances de houle annuelle respectives de 6,9 et 21,1 kW/m. Les longueurs utiles respectives des digues pouvant être équipées sont de 340 et 250 m, par des fonds de 2 m CM (Sergent *et al.*, 2014).

##### Création du modèle numérique du site d'Esquibien

Les conditions de houle sont simulées sur la frontière entrante sud, suivant un spectre de Jonswap et un étalement directionnel de 24,9° pour différentes combinaisons de hauteurs de houle significatives (Hm0), de périodes de pic (Tp), de direction de vague et de niveaux d'eau.

##### Estimation du climat de houle du site d'Esquibien

Le choix des couples de houle a été réalisé à partir de l'analyse des données d'états de mer par 30 m de fond au point large W458N4796 de la base Homere, couvrant une période de 19 ans (1994–2012), distribuée par l'Ifremer (Boudiere *et al.*, 2013). L'analyse statistique des 19 ans de données horaires reconsti-

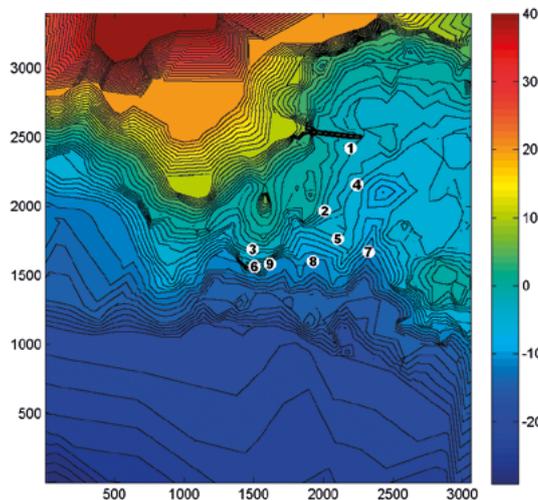
tuées a permis de créer le tableau d'occurrences des couples ( $H_{m0}$ ,  $T_p$ ) pour en faciliter la sélection.

L'examen a permis de choisir dix couples de houle ( $H_{m0}$ ,  $T_p$ ) surlignés en couleur rose sur le tableau 2-3 en conditions limites entrantes. En résumé, l'examen du climat de houle conduit à considérer 30 simulations (10 couples de houle associés à 3 niveaux de marée).

### Choix des points de sortie pour calculer les puissances et les spectres directionnels

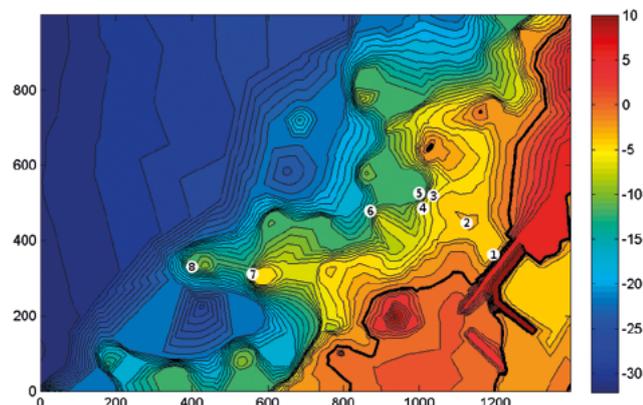
L'examen du site a permis de retenir 9 points pour la simulation des résultats. Ils ont été sélectionnés suivant des critères d'alignement devant la digue et de profondeurs. Les points de sortie 1, 2 et 3 sont positionnés sur l'isobathe 3 m, les points 4, 5 et 6 sur l'isobathe 5 m et les points 7, 8 et 9 sur l'isobathe 10 m (figure 2-10).

Figure 2-10. Carte bathymétrique d'Esquibien et emplacements des 9 points de sortie



Le calcul du climat de houle conduit à retenir 48 simulations, soit 16 couples ( $H_{m0}$ ,  $T_p$ ) associés à 3 niveaux de marée. L'examen du site a permis de sélectionner 8 points de sortie, dont 5 points positionnés devant la digue et 3 autres placés plus au large sur des hauts fonds.

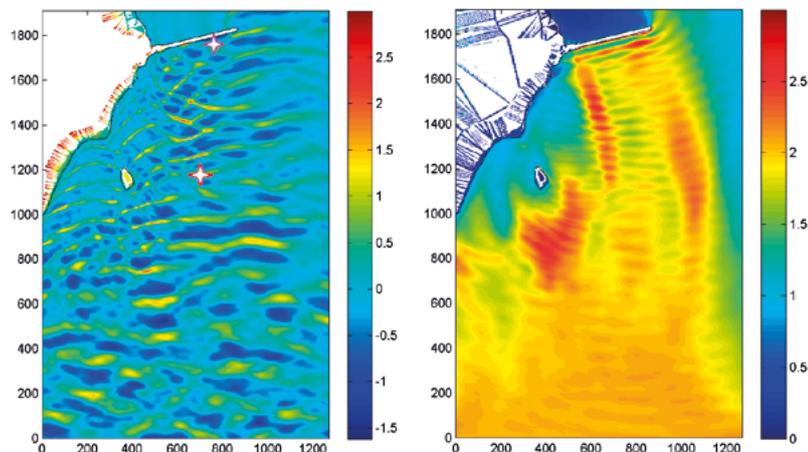
Figure 2-11. Carte bathymétrique de Saint-Guénolé et emplacements des 8 points de sortie



### Résultats du potentiel houlomoteur du site d'Esquibien

Les résultats exploités sont l'élévation de la surface libre, la hauteur de houle, les spectres directionnels et la puissance de houle  $P$  calculée à partir de la formule de densité de puissance de vagues exprimée en kW/m.

Figure 2-12. Résultats de l'élévation de la surface libre (à gauche) et de la hauteur de houle (à droite) pour la simulation ( $H_{m0}$  : 2 m,  $T_p$  : 12s, dir. : 220°, pleine mer 4,75 m)



Les résultats d'énergie  $E$  annuelle et de puissance de houle  $P$  pour les 9 points de sortie, présentés dans le tableau suivant, montrent des variations de puissance significatives allant de 9,3 à 20,8 kW/m suivant l'emplacement sur le site.

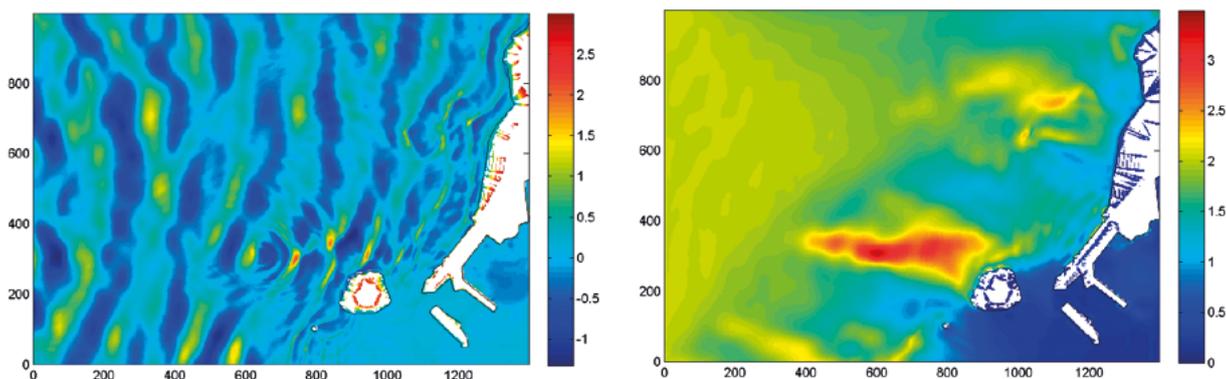
Tableau 2-4. Résultats d'énergie et de puissance des 9 points de sortie du site d'Esquibien

Point de sortie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E (MWh/m)	99,9	81,9	135,9	137,4	123,4	174,4	83,8	176,2	181,9
P (kW/m)	11,4	9,3	15,5	15,7	14,10	19,9	9,6	20,1	20,8

### Résultats des simulations numériques du site de Saint-Guénolé

#### Résultats obtenus pour une simulation type du site de Saint-Guénolé

La simulation type utilise les conditions de vagues suivantes : hauteur de houle  $H_{m0}$  de 2 m, période de pic de 12 s, direction de houle de  $270^\circ$  et niveau de mi-marée de 3,07m.

Figure 2-13. Résultats de l'élévation de la surface libre (à gauche) et de la hauteur de houle (à droite) pour la simulation ( $H_{m0} : 2 \text{ m}$ ,  $T_p : 12\text{s}$ , dir. :  $270^\circ$ , mi- marée 3,07m)

L'observation des deux cartes montre que les vagues se concentrent devant la zone de l'éperon rocheux, située au sud-ouest, qui s'explique par la bathymétrie du site, avec une forte remontée des fonds dans ce secteur. Les houles de plus de 3 m sur une distance de 400 m, représentent un grand intérêt pour l'implantation de systèmes de récupération d'énergie. En revanche, l'énergie des vagues se dissipe davantage devant la digue, avec des hauteurs de houle de 1,5 m.

Tableau 2-5. Résultats d'énergie et de puissance des 8 points de sortie du site de Saint-Guénolé

Point de sortie	1	2	3	4	5	6	7	8
E (MWh/m)	20,9	52,2	76,9	73,0	82,8	77,2	294,1	294,1
P (kW/m)	2,4	6,0	8,4	8,4	9,4	8,8	33,6	33,6

## Conclusion partielle

Les simulations numériques de vagues avec SWASH ont permis de caractériser les conditions de vagues et le potentiel houlomoteur de deux sites de la pointe Bretagne. Les résultats de puissances de houle obtenus près des digues d'Esquibien et de Saint-Guérolé sont respectivement de 11,4 et 2,4 kW/m. Ils diffèrent des résultats obtenus en tranche 1 du projet : 6,9 kW/m pour Esquibien et 21,1 kW/m pour Saint-Guérolé.

Ces écarts s'expliquent par des données de forçage de houle et des méthodes de calcul différentes. C'est principalement le processus de réfraction bathymétrique qui explique ces différences. Pour Esquibien, le résultat obtenu ici vient confirmer l'hypothèse d'une sous-estimation du potentiel en tranche 1 due à la configuration complexe du site. De plus, le résultat de potentiel très faible près de la digue de Saint-Guérolé s'explique par la présence de l'éperon rocheux au sud-ouest immédiat, qui concentre l'énergie des houles.

Un travail complémentaire a été mené pour conforter les résultats obtenus, en analysant les mesures *in situ* des capteurs de pression posés au fond durant la campagne hivernale de 2015, en effectuant des simulations avec un modèle spectral implicite Wavewatch III à haute résolution et en caractérisant les incertitudes des données de forçage et des modèles numériques utilisés.

## 2.3 Incertitudes des mesures *in situ* de houle versus le modèle numérique SWASH sur le site d'Esquibien

### Introduction

Cette partie présente la caractérisation des incertitudes des mesures *in situ* de houle versus le modèle numérique Swash (Zijlema *et al.*, 2011), qui a conduit à l'estimation de l'énergie houlomotrice produite sur le site d'Esquibien (Michard *et al.*, 2016).

Les campagnes de mesures *in situ* hivernales 2014 et 2015 et la méthodologie de traitement sont d'abord présentées. Il s'agit d'analyser les données de ces campagnes de mesure et d'interpréter les résultats, en montrant la variabilité spatio-temporelle sur le site et les limites de validité des mesures, en particulier en eaux peu profondes.

### Instrumentation du site d'Esquibien

#### ■ Présentation des campagnes de mesures

Des campagnes de mesures *in situ* ont été réalisées sur le site d'Esquibien pour les périodes hivernales 2014 et 2015, par la mise en place d'une bouée directionnelle *Waverider* (société Datawell, NL, <http://www.datawell.nl/>) et de trois capteurs de pression *Wave Gauge Blue* posés au fond (société Ocean Sensor Systems, Inc, USA, <http://www.oceansensorsystems.com/>). Il est à noter que la bouée directionnelle a été déployée au large uniquement lors de la campagne de mesures 2014.

Figure 2-14. Bouée directionnelle DATAWELL positionnée au large par une profondeur de 20 m CM et capteurs de pression OSSSI fixés sur un socle en béton, immergé à 3 m CM (capteur n° 2) et 8 m CM (capteur n° 3) et en pied de digue à -1 m CM (capteur n° 1)

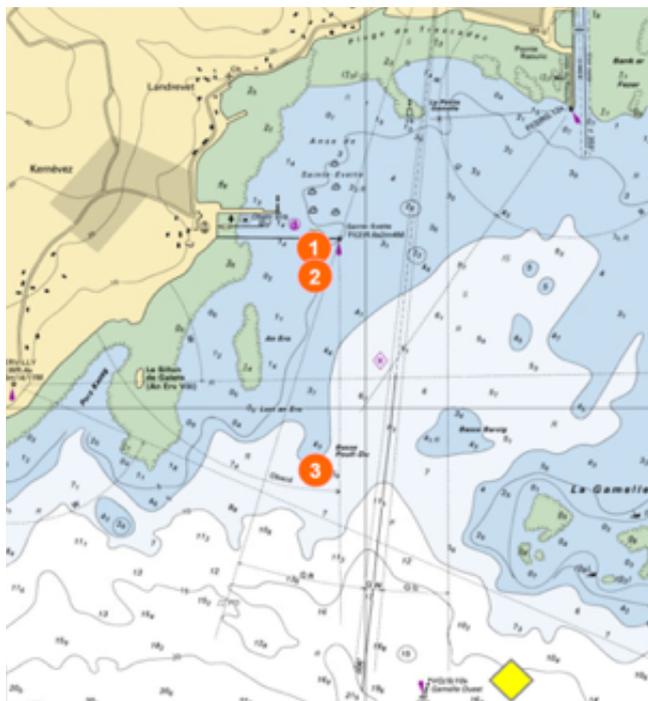


Pour la campagne 2014, les capteurs de pression immergés OSSSI ont fonctionné du 7 décembre 2013 au 3 mars 2014 pour les capteurs n° 1 (profondeur de -1 m CM (Côte Marine), et n° 2 (profondeur de 2 m CM) et du 1<sup>er</sup> mai à 30 juin 2014 pour le capteur n° 3 (profondeur de 8 m CM).

La bouée directionnelle Datawell, positionnée à l'est de la bouée de signalisation Gamelle Ouest, a déradé lors de l'événement de tempête du 23 décembre 2013 et n'a donc pas pu fournir de mesures après cette date. Un focus est donc réalisé sur la période du 12 au 21 décembre 2013.

L'implantation des dispositifs déployés par le Cerema et France Énergies Marines (FEM) est présentée sur l'illustration suivante. Pour la campagne 2015, la mise en place de trois capteurs OSSI a été réalisée sur la période du 20 janvier au 20 avril 2015 aux positions et profondeurs similaires.

**Figure 2-15. Positions des dispositifs (bouée directionnelle DATAWELL – losange jaune et trois capteurs de pression OSSI n° 1, 2 et 3 – cercles oranges) sur le site d'Esquibien – Campagnes de mesures *in situ* (carte marine n° 7147 du Shom ; [www.data.shom.fr](http://www.data.shom.fr))**



Les opérations de récupération des capteurs ont nécessité l'intervention d'une équipe de plongeurs du Conseil Départemental du Finistère. L'exercice de plongée dans ce secteur exposé aux houles reste délicat et quelque peu aléatoire, dépendant des conditions de mer et de la visibilité des fonds les jours d'opération.

Les capteurs OSSI de la campagne 2014 ont bien été récupérés tandis qu'en 2015, seuls les capteurs n° 1 et n° 3 ont été récupérés ; le dispositif de mesure n° 2, posé au fond par faible profondeur, n'a pas été retrouvé, malgré les efforts déployés par l'équipe. L'explication vient probablement du déplacement sur des dizaines de mètres du dispositif, d'un poids d'environ 60 kg avec le socle en béton, insuffisant pour qu'il reste en place durant les événements de tempêtes.

### ■ Méthodologie de traitement des mesures

Les capteurs de pression immergés OSSI ont fourni des mesures de pression au fond, qui ont été traitées sur des plages d'analyse pertinentes, à partir d'un script de calcul élaboré initialement par le Shom, suite aux campagnes de mesures *in situ* PROTEVS Littoral (Leckler *et al.*, 2016). Il permet de calculer, à partir des données de pression agrégées par pas de 30 minutes, les paramètres des états de mer suivants : hauteur de houle significative  $H_m0$  (en m), période de pic  $T_p$  (en s), niveau d'eau (en m) et puissance de houle  $P$  (en kW/m) calculée à partir de la formule de la densité de puissance de vagues (EPRI, 2011).

Ces paramètres sont obtenus à partir de la relation qui relie la pression mesurée et la hauteur des vagues, qui est donnée pour la théorie linéaire de la houle par les équations (4 et 5) (Bishop *et al.*, 1987 ; Tsai *et al.*, 2005) :

$$p_d(x, z, t) = \rho g K_{pL}(z) \eta(x, t) \quad (4)$$

$$K_{pL} = \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kh} \quad (5)$$

avec  $K_{pL}$ , la fonction de transfert de pression linéaire ;  $k$ , le nombre d'onde ;  $d$ , la profondeur d'eau et  $z$ , la profondeur d'installation du capteur au fond. Des paramètres statistiques des données de houle ont été calculés, permettant de définir les événements caractéristiques pour la comparaison des puissances de houle obtenus par mesures *in situ* et par simulation numérique avec le modèle Swash.

## Résultats des campagnes de mesures

### ■ Campagne de mesures hivernale 2014

#### Résultats du capteur de pression OSSI n° 1

Concernant la période du 7 au 21 décembre 2013, 90 % des hauteurs de houle ont été supérieures à 0,4 m pour une moyenne de 1,4 m. Ces hauteurs sont dispersées, avec un écart-type de 0,8 m. 80 % des périodes de pic sont comprises entre 10,2 et 17,1 s, avec un moyenne de 13,5 s.

La puissance moyenne est de 6,9 kW/m, avec une médiane à 5,2 kW/m. La puissance varie de façon importante, avec un écart-type de 6,4 kW/m et des valeurs comprises, 80 % du temps, entre 0,5 et 15,5 kW/m. Cette variabilité reste cependant peu représentative de toute la période hivernale 2014.

Tableau 2-6. Paramètres statistiques du capteur de pression OSSI n° 1, calculés sur la plage d'analyse allant du 7 décembre au 21 décembre 2013, site d'Esquibien

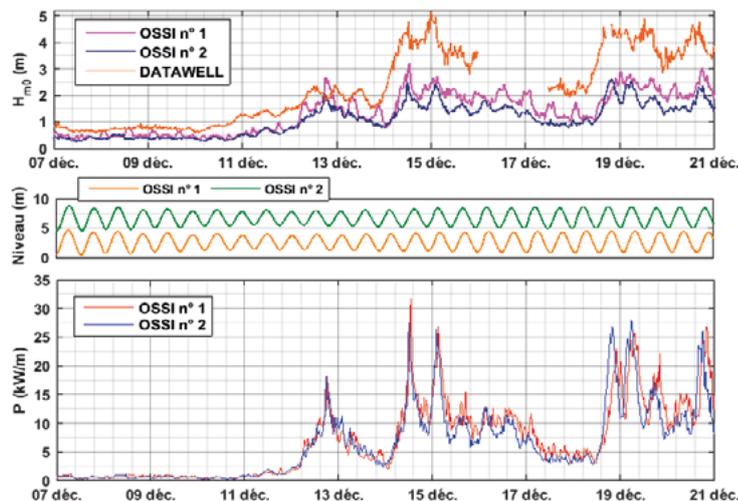
Capteur de pression OSSI n° 1	Hm0 (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	P (kW/m)
Moyenne / Médiane	1,4 / 1,4	13,5 / 13,7	2,6 / 2,7	6,9 / 5,2
Ecart-Type	0,8	3,2	1,1	6,4
Minimum / Maximum	0,3 / 3,2	3,4 / 20,5	0,5 / 4,7	0,2 / 31,8
D1 / D10 (déciles)	0,4 / 2,4	10,2 / 17,1	1,1 / 4,1	0,5 / 15,5

Deux forts événements de tempête sont survenus pour la période du 7 au 21 décembre, caractérisés par des hauteurs de houle dépassant les 4 mètres au niveau de la bouée Datawell les 14 et 15 décembre et du 19 au 21 décembre 2013.

Les hauteurs et les puissances de houle correspondantes des capteurs OSSI, atteignent, pendant ces événements, des valeurs importantes, avec des hauteurs Hm0 de 3 m et des puissances de houle P pouvant dépasser les 25 kW/m, aussi bien pour le capteur OSSI n° 1 positionné en pied de digue (courbes en rose (hauteur Hm0) et en rouge (puissance P) que pour le capteur OSSI n° 2 implanté à 100 m au sud (courbes en bleu Hm0 et P).

Les écarts de hauteurs de houle qui se produisent à la marée montante entre les deux capteurs de l'ordre de 0,5 m, résultent très probablement de l'action de la réflexion de la houle sur la digue, qui doit être amplifiée durant le flot de la marée.

Figure 2-16. Comparaison des capteurs de pression OSSI n° 1, n° 2 et de la bouée DATAWELL du 7 décembre au 21 décembre 2013 sur le site d'Esquibien



#### Bilan de campagne 2014

Les mesures acquises concordent sur l'ensemble de la plage d'analyse, avec une perte d'énergie entre le large et la côte, visible sur les courbes de hauteurs (écart jusqu'à 2 m entre la bouée et les capteurs), qui provient des processus de réfraction par le fond, de dissipation et de déferlement bathymétrique des vagues entre le cap de Lervily à l'Ouest, le Sillon de Galets et les hauts fonds de La Gamelle à l'Est. Concernant les capteurs, la puissance de houle en pied de digue (n° 1) est en moyenne 10 % supérieure à celle observée 100 m au sud (n° 2). Cette augmentation est due à la réflexion de la houle sur la digue.

### ■ Campagne de mesures hivernale 2015

#### Résultats du capteur de pression OSSI n° 1

Sur la période du 15 février au 16 avril 2015, la variabilité de la ressource énergétique est apparente : l'événement de tempête de plus grande intensité est intervenu les 24 et 25 février, générant une puissance de houle maximale près de 53 kW/m. La puissance disponible est très dispersée, avec un écart-type de 3,9 supérieur à la puissance moyenne de 3,1 kW/m.

**Tableau 2-7. Paramètres statistiques du capteur de pression OSSI n° 1, calculés sur la plage d'analyse allant du 15 février au 16 avril 2015, site d'Esquibien**

Capteur de pression OSSI n° 1	Hm0 (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	P (kW/m)
Moyenne / Médiane	0,9 / 0,8	13,9 / 13,7	3,3 / 3,3	3,1 / 2
Ecart-Type	0,5	2,6	1,2	3,9
Minimum / Maximum	0,0 / 3,8	3,4 / 30,3	1,0 / 6,1	0,0 / 52,9
D1 / D10 (déciles)	0,4 / 1,4	11,4 / 17,1	1,6 / 4,9	0,4 / 6,2

### Comparaison des capteurs de pression OSSI n° 1 et n° 3

En comparant les mesures des deux capteurs de pression, l'ensemble des événements de la période allant du 15 février au 16 mars 2015, coïncide. Un décalage sensible apparaît entre les séries de mesures sur la période allant du 17 mars au 16 avril 2015, avec un retard de phase du capteur n° 3, résultant sans doute d'un défaut d'étalonnage de la fréquence d'acquisition.

Il est à noter que, sur le capteur n° 1, fixé en pied de digue, des pics de hauteurs et de puissances de houle apparaissent pour les niveaux de basse mer, principalement en période de vive eau, caractéristique d'un niveau d'eau très faible, comme pour les dates voisines des 27 février et 23 mars (voir figure 2-18).

### Bilan de campagne 2015

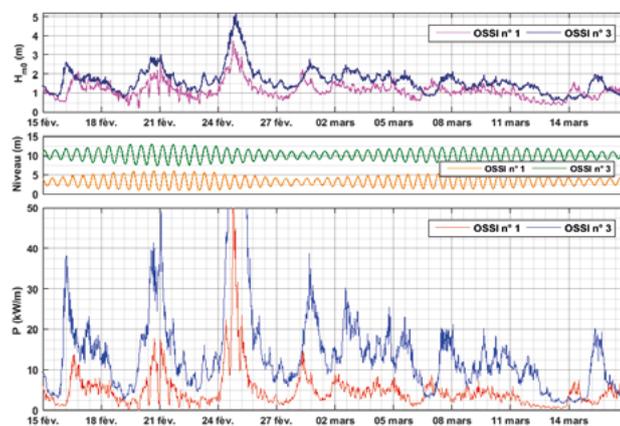
Il est à remarquer que la hauteur significative de houle est plus importante au large. La puissance obtenue au capteur n° 3 est en moyenne trois fois supérieure à celle obtenue au capteur n° 1 positionné en pied de digue ; ce qui s'explique par les profondeurs d'eau distinctes et les processus de dissipation d'énergie et de déferlement bathymétrique des vagues prépondérants à proximité de la digue.

### Variabilité entre les campagnes de mesures

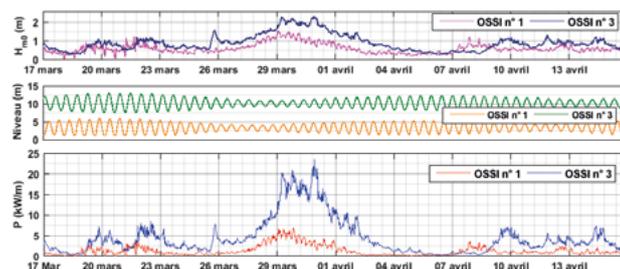
Les résultats des campagnes de mesures hivernales 2014 et 2015 n'apparaissent pas très représentatifs du climat de houle du site. En effet, la comparaison avec les données des bases numériques pour les périodes de 1979 à 2003 pour Anemoc et de 1994 à 2012 pour Homere (Michard *et al.*, 2014), permet d'indiquer que l'hiver 2014 a été plus énergétique que la moyenne des hivers des dernières décennies, et que l'hiver 2015 l'a été moins.

Il est à noter que les campagnes de mesures ont été réalisées à des périodes distinctes, de début décembre 2013 à la mi-janvier 2014 pour l'une et de la mi-février à la mi-avril 2015 pour l'autre. La variabilité mensuelle apparaît liée à la saisonnalité des événements, avec bien souvent une succession d'événements forts en pleine période hivernale, à savoir de décembre à février, plutôt qu'à la sortie de l'hiver en mars.

**Figure 2-17. Comparaison des capteurs OSSI n° 1 et n° 3 du 15 février au 16 mars 2015**



**Figure 2-18 : Comparaison des capteurs OSSI n° 1 et n° 3 du 17 mars au 16 avril 2015**



### Limites de validité des mesures in situ réalisées

Les capteurs de pression immergés sont employés pour les mesures de vagues depuis les années 1960. Pour convertir les données de pression mesurées en informations de houle en surface, une fonction de transfert de pression dérivée de la théorie linéaire de la houle a longtemps été utilisée ; il s'agit des équations (4) et (5). Cependant, il subsiste des interroga-

tions sur la précision de la fonction de transfert employée pour obtenir les paramètres d'états de mer en surface en eaux peu profondes.

Ainsi, une vaste expérience de laboratoire a montré dans les années 1980 que la hauteur de la houle de surface pouvait être obtenue de manière satisfaisante en eaux profondes, avec une précision de  $\pm 5\%$ , en utilisant la fonction de transfert de houle linéaire, mais qu'en eaux peu profondes, une modification de la fonction de transfert semblait nécessaire pour prendre en compte les effets non-linéaires de la houle (Bishop *et al.*, 1987).

Par conséquent, le problème de l'adéquation de la fonction de transfert de pression linéaire est resté ouvert jusque ces dernières années et des recherches ont continué sur ce sujet. Les travaux réalisés ensuite ont montré une cohérence de la fonction de transfert linéaire pour les eaux profondes et intermédiaires (Tsai *et al.*, 2005 ; Huang *et al.*, 2008), mais pas pour les eaux peu profondes, qui correspondent aux profondeurs des capteurs OSSI n° 1 et n° 2 immergés près de la digue.

En effet, par faibles profondeurs, la forme des vagues devient de plus en plus non-linéaire dans la zone de levage (*shoaling zone*), puis dans la zone de déferlement (*surf zone*), avec l'asymétrie verticale des vagues (*skewness*) qui devient très importante. Elle peut amener à une sous-estimation des hauteurs et des puissances de houle associées, comme le montrent les résultats présentés dans la partie suivante.

## Comparaisons des résultats obtenus de puissances de houle

### ■ Mesures *in situ* versus simulations numériques SWASH

Les puissances de houle obtenues par mesures *in situ*, à partir des capteurs de pression OSSI, et calculées par simulations numériques, sont présentées pour le couple de houle (3 m, 14 s) relatif à l'événement du 15 décembre 2013, à 20 heures.

Les résultats de simulations numériques ont été traités avec le logiciel Matlab et les boîtes à outils Wafo

(*Wave Analysis for Fatigue and Oceanography* ; [www.maths.lth.se/matstat/wafo](http://www.maths.lth.se/matstat/wafo)) et Diwasp (*Direction-al WAve SPectra toolbox* ; [www.metocean.co.nz](http://www.metocean.co.nz)).

Les résultats exploités en sortie de modèle numérique sont l'élévation de la surface libre, la hauteur de houle et les spectres directionnels correspondants aux emplacements des capteurs de pression n° 1, en pied de digue et n° 2, positionné à 100 m au sud de la digue (voir figure 2-19).

La puissance de houle est calculée à partir de la formule de densité de puissance de vagues de l'EPRI présentée en tranche 2 (Michard *et al.*, 2016). Les résultats de puissance de houle montrent des écarts relatifs très significatifs de 86 % entre les mesures *in situ* et les calculs de simulations numériques à l'emplacement du capteur n° 1 et de 265 % à l'emplacement du capteur n° 2.

Figure 2-19. Résultats de l'élévation de la surface libre et de la hauteur de houle pour la simulation (Hm0 : 3 m, Tp : 14 s, dir. : 220°, niveau de pleine mer : 4,75 m)

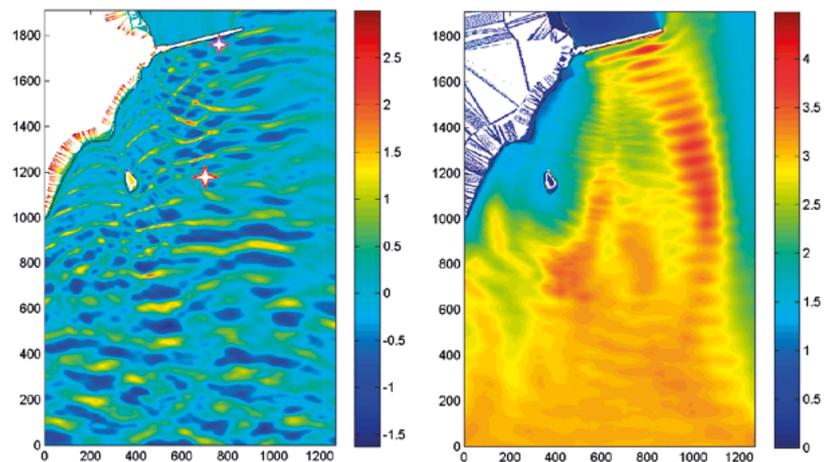


Figure 2-20. Résultats de spectres directionnels aux points de sortie n° 1 (à gauche) et n° 2 (à droite) pour la simulation (Hm0 : 3 m, Tp : 14 s, dir. : 220°, niveau de pleine mer)

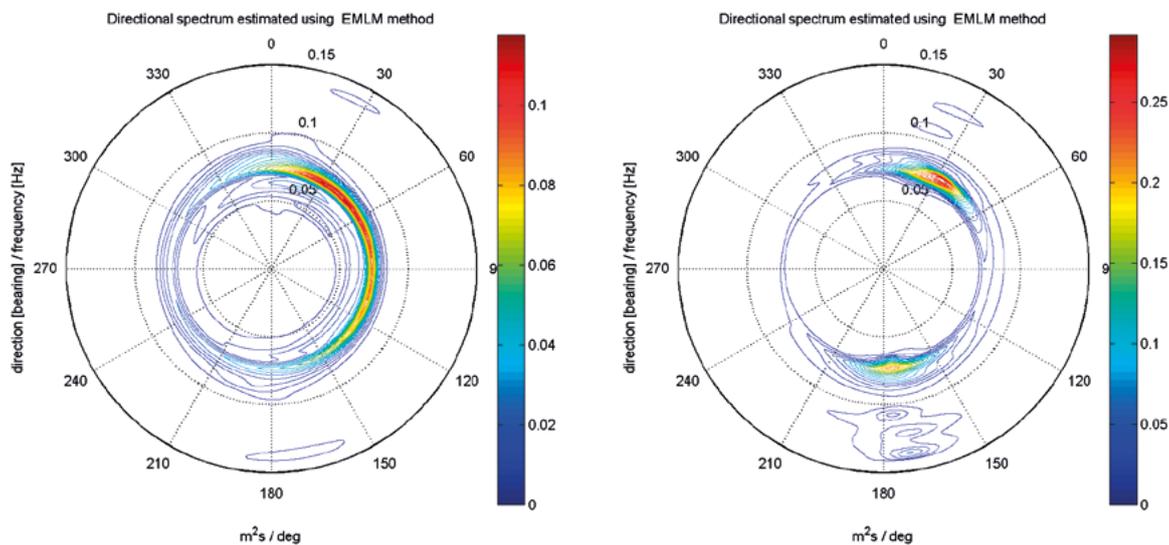


Tableau 2-8. Comparaison des puissances de houle P obtenues par mesures *in situ* et calculée par simulation numérique ; couple de houle (3 m, 14 s) relatif à l'événement du 15 décembre 2013 à 20 heures, niveau de pleine mer

Campagne 2014 : emplacement du capteur de pression (point de sortie de simulation numérique)	n° 1 (pied de digue ; à -1 m CM)	n° 2 (100 m au sud ; à 3 m CM)
P mesures obtenue par mesures <i>in situ</i> (kW/m)	27,9	43,8
P simulation calculée par simulation numérique (kW/m)	86 %	265 %
Écart relatif : P mesures (versus) P simulation	0,4 / 1,4	11,4 / 17,1

Il est à noter que des écarts significatifs ont été observés aussi entre les mesures *in situ* et les simulations réalisées avec le modèle à résolution de phase Bosz pour l'événement du 18 décembre 2013, à 1 heure sur le même site (Varing *et al.*, 2017).

Ces écarts peuvent s'expliquer par les limites de validité des mesures *in situ* réalisées en eaux peu profondes, ou bien sur les incertitudes des simulations numériques liées aux processus de réflexion sur la digue. Il faut signaler que les interactions non-linéaires des vagues, mentionnées dans le paragraphe précédent, y deviennent très importantes et même prépondérantes.

#### ■ Proposition envisagée de mesures complémentaires

Il a été remarqué que la fonction de transfert de pression linéaire reste insuffisante pour restituer le spectre dans le cas d'une houle réelle en eaux peu profondes, rendant très difficile l'utilisation d'un seul capteur de pression en un unique point de mesure. Cela pourrait être compensé en utilisant plusieurs capteurs (3 à 6 idéalement) en un même point de mesure afin de déduire la pression au fond et les composantes de la vitesse  $U(x)$  et  $V(y)$ , et d'obtenir ainsi les spectres d'élévation correspondants ( $C_{xx}$ ,  $C_{yy}$  et  $C_{zz}$ ), et les co-spectres ( $C_{xy}$ ,  $C_{xz}$  et  $C_{yz}$ ), qui permettraient de calculer, via un estimateur statistique, comme la méthode de l'entropie maximale par exemple utilisée en tranche 2, le spectre

directionnel en ce point, mais sans la prise en compte des courants de houle.

Il est également envisageable d'utiliser d'autres types de capteurs, comme le profileur acoustique à effet Doppler ADCP qui permet d'obtenir les données nécessaires à ce calcul de spectre directionnel avec un seul instrument. La comparaison des mesures *in situ* et des calculs issus des modèles numériques à résolution de phase comme Swash (Zijlema *et al.*, 2011) ou Bosz (Roeber *et al.*, 2012), serait plus pertinente pour calibrer les modèles et analyser les spectres directionnels en eaux peu profondes.

### ■ Proposition de méthodes de reconstruction non-linéaire

Les approches récentes sur les méthodes de reconstruction non-linéaire de l'élévation de la surface libre et de la hauteur de houle en eaux peu profondes, tout comme le modèle numérique à résolution de phase SWASH, prennent en compte ces effets non-linéaires.

La résolution d'une équation implicite, avec l'existence de solutions est proposée entre la hauteur de houle et la pression mesurée (Oliveras *et al.*, 2014). Une méthode d'implémentation de formule de reconstruction non-linéaire de l'élévation de la surface libre à partir des mesures de pression au fond est également recommandée pour des états de mer réels. Une proposition de reconstruction non-linéaire, efficace et économique en temps de calcul, basée sur une transformation de Fourier directe et trois transformations de Fourier inverses, a été réalisée pour prendre en compte la non-linéarité des vagues (Bonneton *et al.*, 2017).

Ces méthodes semblent montrer de bons résultats pour les états de mer réels, mais leur mise en œuvre et l'interprétation des résultats, comme celle des formes des spectres directionnels obtenues aux points de sorties, requièrent une attention et des compétences toutes particulières.

## Conclusion partielle

Le travail réalisé a permis de caractériser les incertitudes des mesures *in situ* versus les simulations numériques, qui ont conduit à l'estimation du potentiel houlomoteur sur le site d'Esquibien. Les résultats obtenus lors des campagnes hivernales 2014 et 2015 ont montré les limites de validité des mesures réalisées avec des capteurs de pression OSSI. Ces limites proviennent de la non-prise en compte, par la fonction de transfert de pression utilisée, de la non-linéarité des vagues en eaux peu profondes.

Les simulations numériques réalisées avec Swash, qui intègrent les interactions non-linéaires des vagues, apportent des résultats qui diffèrent des observations des capteurs de pression, avec des écarts relatifs très significatifs, qui varient suivant les capteurs (86 % pour le n° 1 et de 265 % pour le n° 2) pour l'évènement de tempête présenté du 15 décembre 2013. Les cinq autres simulations réalisées pour des évènements caractéristiques de la même période de 7 au 21 décembre 2013, mais non présentées ici, viennent confirmer dans l'ensemble ces écarts relatifs importants.

C'est pourquoi, des propositions de mesures *in situ* complémentaires et de méthodes de traitement des données existantes des capteurs, comme la reconstruction non-linéaire, sont présentées comme perspective de recherche intéressante. La variabilité spatio-temporelle étudiée apparaît également importante aux échelles mensuelles, annuelles et inter-annuelles. L'évaluation des incertitudes des mesures et des données disponibles reste donc délicate et nécessite de réaliser des campagnes de mesures sur de plus longues périodes pour estimer le potentiel houlomoteur du site.

## 3. Considérations géotechniques

Les ouvrages porteurs de systèmes de récupération d'énergie sont soumis à des efforts horizontaux importants (poussées des terres qu'ils soutiennent, action de la houle, etc.). Les reconnaissances préalables géotechniques doivent permettre de déterminer les caractéristiques des paramètres géotechniques intervenant dans la justification de l'ouvrage :

- reconnaissance du toit de l'horizon porteur,
- paramètres intervenant dans le calcul de la capacité portante (et des éventuels tassements),
- coefficient de frottement à l'interface base de l'ouvrage – assise de fondation,
- identification et valeurs des paramètres des matériaux constituant le remblai arrière,
- conditions hydrauliques et hydrodynamiques, etc.

Dans le cas de l'adaptation d'un système de récupération d'énergie sur un ouvrage ancien, une première étape pour la prise en compte de la structure existante consiste à déterminer son mode de fonctionnement. La deuxième étape relative au dimensionnement de la nouvelle structure (ancien ouvrage et système de récupération d'énergie) est plus délicate : elle suppose que soient quantifiés la répartition des charges sur les appuis de l'ouvrage existant et le niveau des contraintes dans le sol.

De plus, les ouvrages anciens peuvent être atteints de pathologies qui devront être identifiées et quantifiées afin de vérifier qu'un système de récupération d'énergie peut bien y être implanté.

Que l'ouvrage porteur soit neuf ou ancien, la présence du récupérateur d'énergie a un impact sur la stabilité de l'ouvrage.

La reconnaissance des terrains en sites portuaires, et plus généralement en sites aquatiques, pose un certain nombre de problèmes spécifiques, bien plus difficiles à résoudre que ceux qui sont posés par la plupart des études en sites terrestres.

### 3.1 La logistique

En plus des problèmes d'accès et de conditions de travail aux points de sondage, le problème de repérage en plan et en profondeur des sondages et essais *in situ* doit être résolu avec la précision requise.

Dans les zones à fort marnage, dégageant un estran important pendant un laps de temps suffisant, il est facile d'utiliser les méthodes pratiquées « à terre » c'est-à-dire par mise en œuvre d'engins légers, rapidement déplacés d'un point de sondage à l'autre. Leur montage sur chenilles, voire sur porteur amphibie est la meilleure solution.

Dans l'étude des rempiètements d'ouvrage, le positionnement de la sondeuse en encorbellement est une bonne solution.

Dans tous les autres cas, la présence de la tranche d'eau impose le recours à des méthodes spécifiques : travail à partir d'une plate-forme fixe ou à partir d'un engin flottant.

#### La plate-forme auto-élévatrice

L'utilisation d'une plate-forme auto-élévatrice est la solution idéale mais aussi la plus onéreuse. Le plan de travail est constitué par une plate-forme tenue hors d'eau par quatre pieds (pieux) posés au fond.

Hormis les quelques problèmes posés par la hauteur libre au-dessus du sol (risque de flambement des tiges de forage, « repiquage » du trou de forage...), on se trouve placé dans la même situation qu'à terre et aucune adaptation des méthodes de forage n'est alors nécessaire.

Le choix d'une plate-forme auto-élévatrice peut s'imposer lorsque l'on a à étudier un important ouvrage ponctuel, mais elle est probablement non-compétitive dans le cas d'ouvrages étendus qui nécessitent de fréquents déplacements d'un point à un autre.

Sa mise en œuvre implique également que la topographie du fond marin s'y prête (terrain pratiquement plan, relativement homogène et présentant une portance suffisante pour supporter les pieds de la plate-forme).

## Le travail à partir d'un engin flottant

Cette solution est utilisée dans le cas général.

### ■ Bateaux

Pour les besoins de la géophysique, pour les campagnes de forage par lançage ou autres qui ne nécessitent que des moyens légers (engins tenus manuellement), le recours à de petits bateaux peut être suffisant. Le cas échéant, ces petits bateaux pourront être équipés d'une plate-forme de travail construite à cet effet.

### ■ Petits pontons

Dans le cas de forages et/ou d'essais (prélèvement de vases superficielles, essais au scissomètre) et en zone abritée (bassin à flot), on pourra recourir à de petits pontons montables puis démontables en fin de chantier. Le montage et la mise à l'eau de ces pontons ne nécessitent aucun engin de levage particulier et le transport routier n'est pas un problème. Par contre, le pouvoir flottant étant modéré, l'extraction à l'aide d'outils du terrain peut être quelquefois délicate.

### ■ Pontons lourds

Dans la plupart des cas on devra recourir à des pontons lourds dont les caractéristiques doivent être adaptées au travail de forage, même si, le plus souvent, on est contraint d'utiliser les équipements disponibles localement.

Les pontons avec puits de forage central sont à déconseiller : la présence d'un tube de forage fiché au travers de ce puits peut interdire un déplacement rapide du ponton.

La forme en plan recommandée est donc la forme en U, le creux du U pouvant être temporairement ponté par un platelage léger, facile à démonter.

La surface du ponton doit être suffisante pour porter la sondeuse et permettre le stockage et la maintenance des tiges et tubes de forage en toute sécurité.

Pour pouvoir arracher les tubes et tiges en fin d'opération, il est souhaitable que la capacité portante du ponton soit au moins de 10 tonnes.

Avec de tels engins, il doit être possible de travailler avec une houle ou un clapot de 20 à 30 cm. Le travail par un clapot qui dépasse 40 à 50 cm est impossible.

À partir d'un ponton flottant, trois types de méthode de travail sont envisageables :

1. La sondeuse et l'outil de forage ou d'essai sont fixes par rapport au ponton. Dans ce cas, peu orthodoxe, l'outil est tributaire des mouvements du ponton et le phénomène de pilonnement est à craindre. Cette technique est donc à réserver à l'étude des sols mous de surface et par temps calme. Elle peut être utilisée à la rigueur pour la réalisation de forages à la tarière à main, d'essais au scissomètre ou au pressiomètre, ainsi que pour le prélèvement d'échantillons de sols mous au piston stationnaire.
2. La sondeuse et le train de tige de forage sont reliés par un système à coulisseau et à cardan : le coulisseau permet de reprendre les mouvements verticaux du ponton et le cardan ses mouvements transversaux. La mise en place préalable d'un tubage guide est très souhaitable. Elle s'effectue en général par battage. Ce système conduit à de bons résultats, y compris dans le cas difficile où le rocher est affleurant en surface. Toutefois, dans le cas d'un site marnant, il demande aux sondeurs un travail soutenu pour visser ou dévisser les tiges et les tubes au fur et à mesure du mouvement de la marée.
3. Le travail à partir d'un tube préalablement fiché dans le terrain. La méthode consiste à ficher par battage un tube dans le terrain. Ce système est totalement désolidarisé du ponton flottant. Deux cas peuvent se présenter :

- ce tube est un carottier continu, dans ce cas il suffit de l'extraire en fin d'opération pour récupérer la carotte de sol ;
- ce tube est un tube de travail mis en place uniquement pour favoriser la suite des opérations. À partir de ce tube de travail, il est alors possible de forer sous sa base, soit pour effectuer des prélèvements soit pour réaliser des essais pressiométriques. Ce forage s'effectue à l'aide d'une tête de rotation hydraulique posée sur la tête du tube.

### 3.2 Les méthodes de reconnaissance

Dans ce paragraphe on indique, sans les décrire, les méthodes géotechniques les mieux adaptées aux problèmes posés.

Parmi ces méthodes, les plus usuelles sont décrites sommairement en annexe.

Le choix des méthodes de reconnaissance sera le plus souvent un choix résultant de compromis entre plusieurs facteurs :

1. le type de problème géotechnique à traiter et le degré d'avancement de l'étude ;
2. les conditions de site et le matériel dont on dispose ;
3. les délais d'intervention et la période d'intervention ; l'été étant, en général, une période plus favorable que l'hiver.

L'attention doit être attirée sur le fait que trop souvent les projeteurs ne s'intéressent qu'à la portance du sol. L'aspect faisabilité des ouvrages, bien que très important, est presque toujours négligé. Cet aspect ne doit pas être oublié lors de la définition de l'étude géotechnique.

Les principaux problèmes de faisabilité rencontrés sont :

- l'aptitude à battre des palplanches jusqu'à une cote donnée ;
- la réutilisation des déblais en remblais ;
- l'évaluation des débits d'exhaure ;
- la tenue d'une fouille dans un batardeau ;
- la susceptibilité d'un ouvrage ancien à des travaux neufs voisins.

Dans tous les cas, la reconnaissance des terrains doit être réalisée avec une densité de sondages adéquate. Pour définir la coupe de sol, il convient d'identifier les sols (nature des couches) et la puissance des différentes couches concernées ce qui implique des prélèvements et des essais d'identification en laboratoire.

#### La reconnaissance générale d'un site

Elle concerne en général les problèmes de terrassement et notamment de dragage (d'entretien, d'approfondissement ou par ouvrages neufs).

C'est le domaine de la géophysique ou des sondages rapides, par lançage ou autres.

La géophysique est un domaine très vaste aux moyens d'investigation multiples. Il convient que la méthode utilisée soit adaptée aux conditions de site, ces conditions étant déterminées en l'occurrence par la hauteur de la tranche d'eau.

Sur l'estran on pourra utiliser la sismique réfraction qui renseigne sur la coupe des terrains et les problèmes de terrassabilité.

Cette méthode est inopérante pour les sites immergés en permanence.

On devra donc utiliser la prospection électrique par courant continu décrite dans le chapitre suivant.

La reconnaissance à la lance à eau (lançage) donne quelques indications sur l'épaisseur de la couche molle de surface, intéressante surtout pour les dragages d'entretien où ses indications peuvent être comparées avec la situation antérieure, sous réserve que la bathymétrie soit à jour.

L'utilisation de petites sondeuses manuelles est intéressante car on peut ainsi disposer d'échantillons sommaires et surtout d'une courbe de pénétration (temps de pénétration en fonction de la profondeur).

## La faisabilité et le dimensionnement des fondations

La portance des fondations (semelles, pieux ou caissons...) doit être étudiée à partir des méthodes usuelles, notamment de l'essai pressiométrique Ménard (NF P 94-110).

Toutefois, cette norme ne traite pas explicitement de l'essai pressiométrique en site aquatique et certaines de ses prescriptions méritent d'être modifiées pour tenir compte de la tranche d'eau.

Dans certains cas particuliers, notamment dans le cas de fondations massives sur le rocher, il convient d'être prudent et de ne pas se contenter d'essais pressiométriques.

En effet, le massif rocheux peut comporter des plans de glissement potentiels que le pressiomètre ne peut, de par son principe, mettre en évidence.

Il convient donc soit d'effectuer des carottages spécifiques (diamètre 100 mm minimum) soit de réaliser le forage pressiométrique par carottage et d'étudier la carotte ainsi prélevée (détermination en particulier du R.Q.D.).

Dans les cas jugés critiques, une analyse structurale du massif rocheux s'impose, à partir des carottes convenablement orientées et des affleurements rocheux voisins.

Dans les massifs rocheux, des essais d'eau de type Lugeon sont également recommandés, notamment si des injections s'avèrent nécessaires.

# 4. Enjeux environnementaux et réglementations associées

## 4.1 Intégration des projets dans l'environnement

### Évaluation environnementale

L'évaluation environnementale est un processus visant à intégrer l'environnement dans l'élaboration d'un projet, ou d'un document de planification, et ce dès les phases amont des réflexions. Elle sert à éclairer à la fois le porteur de projet et l'administration sur les suites à donner au projet au regard des enjeux environnementaux de santé publique relatif au site presenti. L'évaluation environnementale a également pour but d'informer et garantir la participation du public. Elle doit rendre compte des effets potentiels ou avérés du projet, du plan ou du programme sur l'environnement et permet d'analyser et de justifier les choix retenus au regard des enjeux identifiés sur le territoire concerné. L'évaluation environnementale doit être réalisée le plus en amont possible, notamment, en cas de pluralité d'autorisations ou de décisions, et porter sur la globalité du projet et de ses impacts potentiels.

Les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements peuvent être soumis à évaluation environnementale de façon systématique ou après à examen au cas par cas. Par exemple, les installations en mer de production d'énergie autres que les éoliennes en mer sont soumises à examen au cas par cas. Dans cette situation, seuls les projets identifiés par l'autorité environnementale comme étant susceptibles d'avoir des incidences négatives notables sur l'environnement doivent être soumis à évaluation environnementale. Un formulaire d'examen au cas par cas et son annexe d'informations nominatives relatives au maître d'ouvrage ou pétitionnaire sont à renseigner par les porteurs de projet de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements. Les modalités précises d'envoi du formulaire sont inscrites à l'article R. 122-3 du code de l'environnement.

### Autorité environnementale

Cette instance donne des avis, rendus publics, sur les évaluations des impacts des grands projets et programmes sur l'environnement et sur les mesures de gestion visant à éviter, atténuer ou compenser ces impacts, mais l'autorité environnementale peut aussi statuer sur l'évaluation d'un projet local, dès lors qu'il dépend du ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES), et qu'il est soumis à étude d'impact.

En application des articles R.122-2, R.122-3 et R.122-17 du code de l'environnement, l'autorité environnementale décide après examen au cas par cas si certains projets ou plan-programmes sont ou non soumis à obligation de réaliser une évaluation environnementale.

### Étude d'incidences et autorisations

**La mise en place des installations en mer de production d'énergie ainsi que leur raccordement peuvent nécessiter à la fois la réalisation d'études d'incidences et l'obtention de plusieurs autorisations auprès des autorités compétentes.**

#### Études d'incidences :

- une étude d'impact : le code de l'environnement prévoit que « les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés, qui par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation, sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine sont précédés d'une étude d'impact » (article L. 122-1) ;
- une étude d'incidence Natura 2000, si le projet est partiellement ou totalement en zone Natura 2000 ;
- une étude d'incidence au titre de la loi sur l'eau (se référer au paragraphe ci-dessous sur l'autorisation environnementale unique).

**Autorisations :**

- Une autorisation d'exploiter au titre du code de l'énergie :
  - pour des projets d'une puissance installée supérieure à 50 MW ;
  - autorisation ministérielle.
- Un certificat d'obligation d'achat auprès de l'acheteur de l'énergie :
  - pour des projets hors appels d'offres.
- Une déclaration (projet d'un montant entre 160 000 € et 1 900 000 €) ou autorisation (projet d'un montant supérieur à 1 900 000 €) au titre de l'autorisation environnementale. Cette autorisation, délivrée par le préfet de département, inclut l'ensemble des prescriptions des différentes législations applicables, et relevant des différents codes :
  - code de l'environnement : autorisation et déclaration au titre des IOTA, autorisation spéciale au titre de la législation des réserves naturelles, autorisation spéciale au titre de la législation des sites classés, dérogations à l'interdiction d'atteinte aux espèces et habitats protégés, ...;
  - code forestier : autorisation de défrichement ;
  - code de l'énergie : autorisation d'exploiter les installations de production d'électricité ;
  - code des transports ;
  - code de la défense ;
  - code du patrimoine.
- Une autorisation d'occupation du domaine public maritime (AOT ou concession).
- Une AOT portuaire donnée par la commune ou le département ou la région ou encore la CCI.
- Un avis conforme si le projet est dans un Parc Naturel Marin.
- Une déclaration d'utilité publique.
- Un permis de construire.

Le gestionnaire du réseau public de transport d'électricité assure la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre des études et travaux nécessaires à la réalisation des ouvrages de raccordement et exploite et procède à la maintenance de ces ouvrages.

Il sollicite les autorisations administratives requises pour le raccordement : déclaration d'utilité publique, demande d'occupation du DPM, demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau, demande d'autorisation au titre de la réglementation électrique, demande d'autorisation du ministre de l'aviation civile et du ministre de la défense, études environnementales et permis de construire pour le poste de raccordement à terre.

## 4.2 Analyses des impacts sur l'environnement

### Contenu des études d'impacts

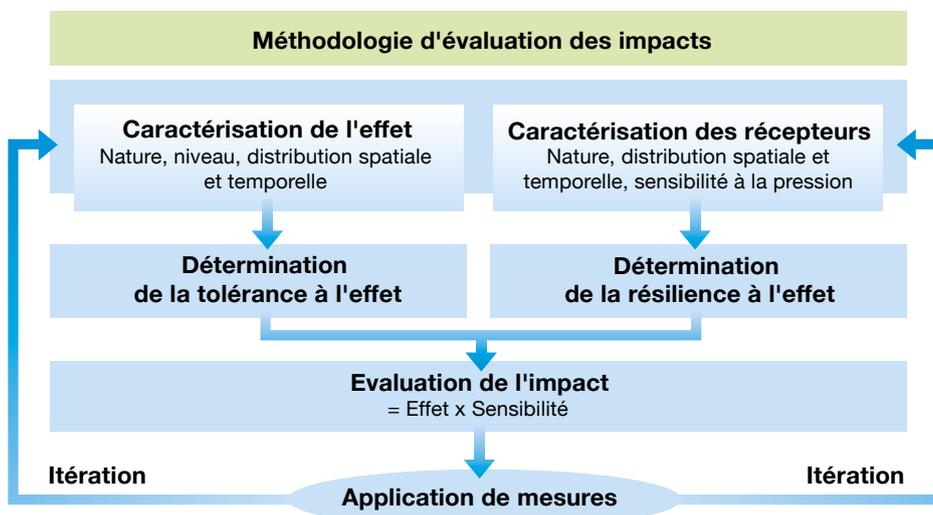
Le dossier d'étude d'impact doit comporter :

- une description du projet ;
- une analyse de l'état initial du site ;
- une analyse des effets négatifs et positifs, directs, indirects, temporaires et permanents, à court, moyen et long termes ;
- une analyse des effets cumulés du projet avec d'autres projets connus ;
- une esquisse des principales solutions de substitution examinées et des raisons du choix retenu ;
- la compatibilité du projet avec les autres plans et programmes ;
- les mesures pour éviter, réduire ou compenser les impacts du projet avec justification, les impossibilités des mesures compensatoires et les modalités de suivi des effets et des mesures ;
- une analyse des méthodes utilisées, des difficultés éventuelles et auteurs (noms et qualités).

### Méthode d'analyse des impacts

L'analyse des impacts nécessite de définir un périmètre adapté au projet. On peut définir plusieurs aires d'études adaptées aux impacts étudiés : une aire d'étude éloignée, une aire d'étude rapprochée et une aire d'étude immédiate.

Figure 2-21. Méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un projet d'aménagement (source, MTES, 2012)



L'impact est ensuite évalué en **croisant une pression** (un des effets du projet) **exercée sur le milieu avec la sensibilité du milieu** (exemple : sensibilité des espèces/habitats présents sur la zone impactée).

Les impacts peuvent être caractérisés par :

- leur intensité : nul ou négligeable / faible / moyen / fort ;
- le type d'impact : direct / indirects ;
- la nature de l'impact : négatif / positif ;
- la durée de l'impact : temporaire / permanent.

### Effets du projet et sensibilité du milieu

Les effets du projet sur l'environnement sont étudiés en phase de construction, d'exploitation et de démantèlement du projet. Ils portent sur le milieu physique, biologique, sur le patrimoine et paysage et sur les aspects socio-économiques et usages du milieu. Comme pour les impacts, les effets du projet peuvent être caractérisés par :

- leur intensité : nul ou négligeable / faible / moyen / fort ;
- le type d'effet : direct / indirects ;
- la nature de l'effet : négatif / positif ;
- la durée de l'effet : temporaire / permanent.

Les composantes du milieu potentiellement impactées par les projets, sont listées ci-dessous :

- **milieu physique** : morphostructure marine, hydrodynamique marine, dynamique hydrosédimentaire, qualité des sédiments et des eaux, acoustique sous-marine ;
- **milieu naturel** : biocénoses benthiques, biocénoses planctoniques, ressources halieutiques poissons amphihalins, mammifères marins, tortues marines, autres grands pélagiques, avifaune ;
- **patrimoine archéologique et paysage** ;
- **activités socio-économiques et usages** : zones maritimes réglementées, navigation maritime, contraintes aéronautiques et hertziennes, activité de pêche professionnelle, cultures marines, le territoire et les activités socio-économiques, le tourisme et les activités de loisirs.

### État initial et suivi environnemental

L'évaluation environnementale et socio-économique des projets avant (étude d'impact) et après leur réalisation (suivi) suppose de disposer d'une connaissance suffisamment précise de l'environnement et des usages sur les sites directement ou indirectement influençables par les opérations de chantier et les aménagements. La pertinence des

sources d'information est la garantie d'une bonne évaluation environnementale et socio-économique.

**État initial**

Toute démarche d'évaluation environnementale et socio-économique repose sur la réalisation d'un état initial des milieux qui a pour objectifs de :

- valider, et le cas échéant, préciser le champ d'investigation (aires d'étude, composantes de l'environnement au sens large) ;
- regrouper, pour chaque composante de l'environnement et des activités socio-économiques, les données nécessaires à l'évaluation environnementale et socio-économique du projet ;
- identifier les enjeux environnementaux et socio-économiques du territoire qui pourront subir des effets directs ou indirects du projet ;
- affiner la définition du périmètre de projet ;
- proposer une hiérarchisation des enjeux environnementaux et socio-économiques qui risquent d'être concernés par le projet.

L'analyse de l'état initial du site et de son environnement au sens large doit se fonder non seulement sur des données documentaires et bibliographiques, mais également s'appuyer sur des investigations de terrain qui pourront être approfondies progressivement en même temps que le projet technique sera affiné.

**Suivi environnemental**

Le suivi environnemental est une opération à caractère analytique et scientifique qui sert à mesurer les impacts de la réalisation d'un projet sur l'environnement et à évaluer la performance des mesures d'atténuation proposées en amont. Le suivi est donc l'examen continu ou périodique d'un projet, d'une partie ou d'un ensemble de projets. Les suivis sont réalisés aux différentes phases de vie du projet :

- des suivis préalables permettant de définir un état de référence de l'environnement ;
- des suivis en temps réel des travaux de mise en œuvre des installations ;
- des suivis post-travaux pour évaluer les incidences à moyen ou long terme des travaux, de l'exploitation et du démantèlement des installations.

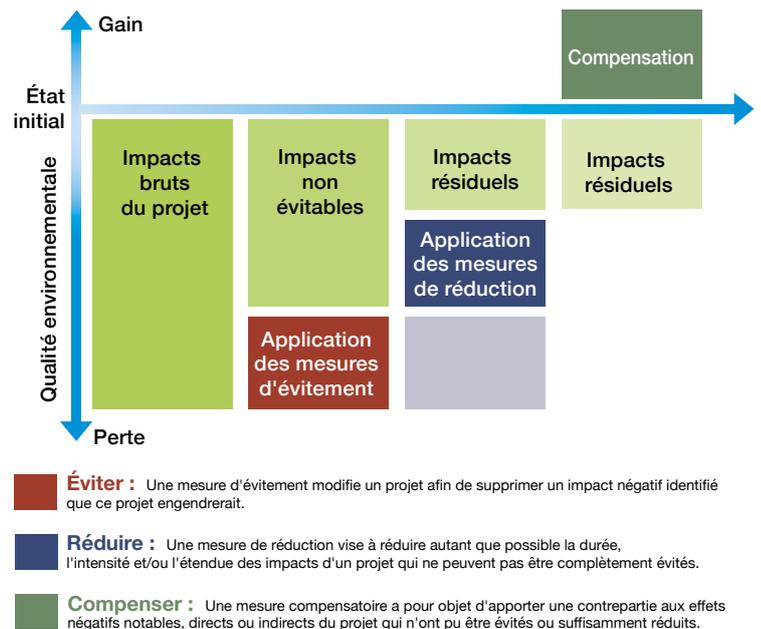
La démarche d'établissement et de réalisation d'un suivi environnemental peut se scinder en six étapes majeures : analyse du contexte, définition des objectifs de suivi, détermination des indicateurs de suivi et de situation de référence, définition de la méthode de suivi, définition des moyens et des coûts, analyse des données et évaluation.

**Mesures « éviter, réduire, compenser » et analyse des effets cumulés**

**Éviter, réduire et compenser**

La séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits. Elle s'applique aux projets et aux plans et programmes soumis à évaluation environnementale ainsi qu'aux projets soumis à diverses procédures au titre du code de l'environnement (autorisation environnementale, dérogation à la protection des espèces, évaluation des incidences Natura 2000, etc.).

Figure 2-22. Bilan écologique de la séquence ERC (source : Collection Théma MTEs 2017)



### Analyse des effets cumulés

Une analyse des effets cumulés avec d'autres projets connus doit figurer dans l'étude d'impacts. Les projets à prendre en considération sont ceux qui :

- ont fait l'objet d'un document d'incidences au titre d'article R214-6 du code de l'environnement ET d'une enquête publique ;
- ont fait l'objet d'une étude d'impact et d'un avis de l'autorité environnementale publié.

## 4.3 Signalisation maritime

Tout nouveau projet maritime ou portuaire doit être soumis au service phares et balises de la Direction Interrégionale de la Mer (DIRM) afin, *a minima*, de figurer dans les documents nautiques. Si un balisage maritime s'avère nécessaire une procédure CMS

(« Création modification suppression d'aide à la navigation ») sera instruite et une décision ministérielle sera rendue. Le schéma ci-dessous présente la procédure de demande de mise en place d'un balisage maritime.

**Étape 1** : le porteur de projet expose son projet au service phares et balises de la DIRM ;

**Étape 2** : la DIRM analyse la demande ;

**Étape 3** : le Cerema est consulté par la DIRM pour donner un avis sur le besoin en balisage maritime du projet ;

**Étape 4** : si un balisage doit être créé ou modifié, le projet doit être pris en considération par la Direction des Affaires Maritimes ;

**Étape 5 & 6** : la Direction des Affaires Maritimes saisit la Commission Nautique et demande un avis de la Commission des Phares ;

**Étape 7** : la décision ministérielle est rendue ;

**Étape 8** : la décision est ensuite notifiée officiellement.

Figure 2-23. Procédure pour la mise en place du balisage adapté (source : Cerema)

1	2	3	4	5	6	7	8
Expression du besoin	Analyse du besoin et constitution du dossier (Subdivision des Phares et Balises)	Avis de l'expert nautique (Cerema)	Prise en considération par la DAM	Saisine de la Commission Nautique	Saisine avec avis de la Commission des Phares	Décision ministérielle (DAM)	Notification

L'installation de dispositifs EMACOP sur des ouvrages en mer ou des structures portuaires peut nécessiter la création d'aides à la navigation. Le balisage doit répondre à la recommandation de l'AI SM O-139 sur la signalisation des structures artificielles en mer, et le maître d'ouvrage doit suivre le processus afin d'obtenir une décision ministérielle.

# 5. Raccordement et stockage

Le raccordement électrique est a priori aisé en zone portuaire. Il relève en général de la compétence du gestionnaire du réseau de distribution qui est Enedis (ex ERDF). L'opération peut être plus complexe si une liaison sous-marine est nécessaire. Pour différentes raisons, il peut être décidé de ne pas raccorder les machines au réseau. Dans ce cas, une solution de stockage de l'énergie peut être envisagée.

## 5.1 Raccordement au réseau électrique

Si l'on souhaite que l'électricité produite soit utilisée par le plus grand monde, les dispositifs de récupération de l'énergie des vagues doivent être raccordés au réseau électrique. Cette opération est appelée le raccordement au réseau électrique. La transparence et l'aspect non-discriminatoire de l'accès au réseau sont garantis par la Commission de régulation de l'énergie (CRE).

**La demande de raccordement au réseau doit être effectuée auprès d'Enedis (ex ERDF) si la puissance de l'installation est inférieure à 12 MW**, ce qui sera le plus souvent le cas des installations de récupération de l'énergie des vagues. En matière d'électricité, on distingue généralement la production, le transport, la distribution assurée par Enedis et le client final.

**Un contrat dit « d'obligation d'achat » avec EDF ou une entreprise locale de distribution** peut être conclu afin que la production électrique soit achetée en partie ou en intégralité au tarif fixé par l'État durant une durée de 20 ans. L'État, par un arrêté du 1<sup>er</sup> mars 2007, a fixé à 15 c€/kWh le tarif d'achat pour l'énergie hydraulique des mers (houlomotrice, marémotrice ou hydrocinétique). Ce tarif est supérieur au prix de marché de l'électricité.

**Un producteur d'électricité choisit sa puissance de raccordement.** Les études et les coûts pour le raccordement sont établis sur la base de

la puissance de raccordement et de la zone où se situe le raccordement.

**Le raccordement d'un dispositif bord à quai sera en général assimilable à un raccordement terrestre. Cependant si le dispositif est éloigné de l'ouvrage, une liaison sous-marine et la mise en place d'un atterrissage seront nécessaires.**

## 5.2 Liaison sous-marine et atterrissage

### Liaison sous-marine

#### ■ Choix de la technique de pose et protection du câble

Le choix de la technique de pose du câble dépend notamment de la longueur à poser, des protections à mettre en place pour le câble, de la nature des fonds, des conditions d'agitation ou de courants sur le site de projet, ...

Ainsi, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Dans le cas de sols sableux, ensouillage du câble à l'aide d'une « charrue » tractée à l'arrière du navire câblé.
- Pour des fonds rocheux ne permettant pas un ensouillage :
  - réalisation d'une tranchée dans la roche et recouvrement du câble (matériaux excavés, autres protections). La réalisation d'une telle tranchée reste souvent difficile à envisager sur des sites soumis à une forte agitation. Cela génère également des travaux lourds difficiles à mettre en œuvre et très coûteux ;
  - dépose d'un câble « blindé » à l'aide de coquilles métalliques et lesté sur le fond comme cela a été réalisé dans le cadre du projet hydrolien de Bréhat. Cette solution technique semble aujourd'hui la plus réaliste. Cela sous-entend une absence de navigation (et risques de croches) sur le fuseau du câble.

### ■ Choix du matériel de pose

À ce stade, seules quelques généralités peuvent être fournies à titre indicatif.

Les navires câbliers spécialisés sont équipés et conçus pour la pose de câble à de grandes profondeurs et sur de grandes distances. Par ailleurs, les faibles profondeurs ne permettent pas toujours d'envisager un navire câblier.

Les pontons n'ont pas de propulsion propre et sont déplacés en utilisant un système d'ancrage. La barge se déplace en tirant sur les chaînes des ancres avec des winchs. Les ancres sont déplacées par des navires annexes au fur et à mesure de la pose.

Pour des projets de faible importance (câble de faible distance) ou par faible profondeur, qui correspond à la situation traitée dans cet ouvrage, il est probable que les entreprises aient recours à des pontons standards ou des navires *offshore* de type « supply » à positionnement dynamique convertis provisoirement à la pose de câble. Le matériel mobilisé par les entreprises doit en tout état de cause présenter des garanties en termes de :

- capacité de transport du câble ;
- manœuvrabilité ;
- surface de pont disponible pour la gestion du câble, la chambre de jointure, le confort de l'équipage ;
- tenue à la mer et stabilité.

## Atterrage

### ■ Choix du site

Le choix d'un site d'atterrage va dépendre du choix de la zone en mer (recherche du tracé le plus court) et de la proximité au réseau électrique existant ; mais également des contraintes environnementales ou d'usages à considérer.

### ■ Solutions techniques d'atterrage

Plusieurs solutions techniques sont envisageables pour l'atterrage d'un câble :

- mise en œuvre en tranchée sur le tronçon terrestre, l'estran et en mer dans les petits fonds, jusqu'à une profondeur accessible au matériel flottant de pose ;
- mise en œuvre par forage dirigé depuis un parking en bord de mer ou terrain retenu pour le poste de livraison jusqu'à un point en mer.

La technique du forage dirigé est de plus en plus employée pour la mise en œuvre de conduites en mer ou l'atterrage de câbles, lorsque la réalisation d'une tranchée n'est pas envisageable pour des questions techniques, environnementales ou réglementaires.

## 5.3 Stockage de l'énergie

### Les raisons du stockage

Nous nous intéressons ici uniquement au stockage de l'énergie électrique en excluant le stockage de chaleur. À l'échelle régionale, il est souhaitable d'ajuster la production et la consommation d'énergie électrique en limitant les pertes. En France, la variabilité annuelle de la consommation nationale est forte avec une consommation électrique journalière minimale de 30 GW et un pic annuel de 90 GW environ. Un pic de 102 GW a même été observé le 8 février 2012. La puissance moyenne utilisée en France est de 65 GW alors que la puissance installée est proche de 120 GW. Une variabilité hebdomadaire et journalière est aussi relevée avec un pic journalier de consommation situé peu après 19h en hiver. Quant à la production, sa variabilité a aussi progressé depuis l'insertion dans le réseau d'une production intermittente d'énergies renouvelables. Un mauvais ajustement entre production et consommation peut mener à un changement de fréquence du signal électrique, une surtension ou une sous-tension. Pour assurer la flexibilité de l'offre électrique, outre la mise en place des smart grids qui sont des solutions de pilotage dynamique du réseau électrique, l'effacement tarifaire ou piloté ou le pilotage d'unités de production décentralisées, le stockage de l'énergie est la solution la plus préconisée. L'énergie est ainsi stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins. A certains moments,

le coût de l'énergie sur les marchés de gros est en effet nul voire négatif ce qui amène le producteur à réfléchir à des solutions de stockage. L'énergie stockée est ensuite restituée au réseau lorsque les besoins sont forts et les tarifs de l'énergie remontent. Le stockage peut aussi avoir un intérêt pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre, pour alimenter un pic de demande occasionnel, enfin en secours en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

Le système dit de « Merit Order » ou préséance économique qui a eu pour effet d'intégrer de manière prioritaire les énergies renouvelables au dépend des centrales à gaz a réduit la flexibilité du système électrique ce qui renforce le besoin de stockage. Le besoin de stockage pourrait encore augmenter dans le futur avec une part de renouvelable aujourd'hui de 20 % mais qui peut augmenter fortement avec même des scénarios à 80 % voire 100 % qui sont à l'étude. Outre le réseau électrique, les besoins de stockage concernent la mobilité et les appareils nomades.

À l'échelle locale, le producteur pourrait voir à terme, dans certaines conditions, des tarifs d'achats devenir inférieurs au tarif de vente. Le tarif d'achat garanti pour les renouvelables est en effet progressivement remplacé depuis 2016 par un système où les producteurs doivent vendre eux-mêmes leur électricité sur le marché avec un complément de rémunération qui leur est reversé pour couvrir l'écart de coût avec les moyens conventionnels de la production de l'électricité d'origine renouvelable. Or les prix de vente au marché sont en baisse depuis plusieurs années. A contrario, les prix de vente qui incluent un certain nombre de taxes continuent à augmenter.

Le producteur ou son environnement local aura donc intérêt à utiliser l'énergie produite pour sa propre consommation ou la consommation locale. C'est alors que le stockage d'énergie pourra devenir une réponse pour les besoins d'autoconsommation ou de consommation locale d'autant plus que l'énergie des vagues est une énergie très intermittente.

## Les techniques de stockage

Les techniques de stockage sont d'abord classées en fonction de la nature du stockage : mécanique, chimique, électrochimique, thermique ou électrique. Les éléments de comparaison entre systèmes de stockage sont notamment la capacité de stockage, le temps de décharge, le coût, le vieillissement, le temps de réponse, la densité énergétique et le rendement énergétique.

Parmi les techniques mécaniques, on cite en particulier les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui ont un rendement de 75 %. Depuis les années 1970, les STEP de l'eau des barrages se développent et représentent, en 2017, 97 % des systèmes de stockage toutes technologies confondues. La capacité mondiale installée des usines de stockage par pompage était d'environ 140 GW en 2010. On cite également les systèmes à air comprimé avec un rendement de 50 % et les volants d'inertie. Parmi les techniques électro-chimiques, les batteries Lithium-ion présentent plusieurs avantages : une tension très stable sur presque toute la décharge, un rendement supérieur à 70 %, un coût en forte baisse mais encore supérieur à celui des STEPS, une densité énergétique de 500 kWh par m<sup>3</sup> environ.

Parmi les techniques chimiques, l'électricité peut être transformée en hydrogène par électrolyse. Le rendement de la chaîne complète est de 25 % et la densité énergétique est supérieure à 900 kWh par m<sup>3</sup> et peut atteindre 1 500 kWh par m<sup>3</sup>. Il existe toujours un problème d'acceptabilité car l'utilisation présente un risque d'explosion.

Le stockage d'électricité par conversion thermique est une technique encore en cours de développement. L'énergie est stockée dans des matériaux réfractaires à haute température.

Le stockage sous forme électrique utilise des condensateurs électriques à temps de décharge très court.

### ■ Stockages centralisé et décentralisé

En prolongeant le précédent raisonnement selon deux échelles, on peut aussi classer les stockages en deux catégories, suivant que les stockages sont centralisés lorsqu'ils sont directement connectés au réseau et associés à la production ou au transport d'énergie ou bien décentralisés lorsqu'ils sont directement associés à l'utilisation de l'énergie électrique.

Les stockages centralisés sont en règle générale massifs et utilisés pour la gestion du réseau de transport électrique afin d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables de façon journalière, hebdomadaire ou saisonnière et, dans le futur, pour sécuriser la production face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente d'énergie électrique d'origine renouvelable.

Les stockages décentralisés sont de dimensions plus modestes et viennent en appui d'applications stationnaires précises, alimentation électrique sans coupure, stockage pour pallier localement l'intermittence d'une source d'énergie renouvelable, ou répondent aux exigences particulières des applications mobiles dans les transports.

Compte tenu de la taille de nos installations, **nous nous focalisons ici sur cette dernière catégorie à savoir les stockages décentralisés**. Pour plus de détails sur l'ensemble des technologies, le lecteur pourra se référer au panorama de Boyé (2013), de Ngô et Rojey (2016) ou Bart *et al.* (2017).

### ■ Stockage décentralisé avec technologies directes et indirectes

Les technologies directes stockent l'électricité sous forme électrostatique au moyen de condensateurs ou sous forme électromagnétique sous la forme d'un courant continu introduit dans une bobine supraconductrice réfrigérée par cryogénie.

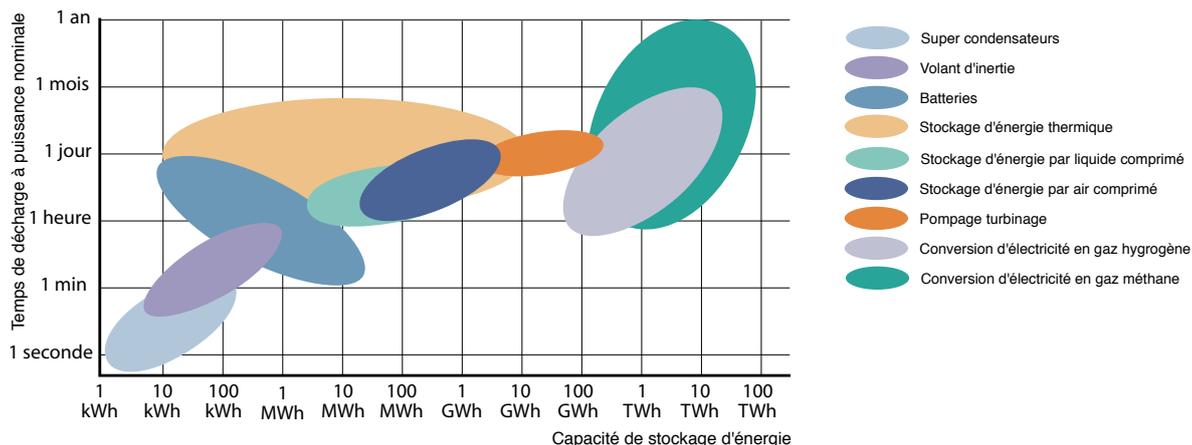
Les technologies indirectes stockent l'électricité sous forme d'énergie mécanique ou électrochimique. Le stockage cinétique par l'intermédiaire d'un moteur entraînant une masse en rotation – un volant d'inertie – est réservé à des applications de décharge de puissance ultra-rapide. Le stockage électrochimique est quant à lui effectué par batteries rechargeables. Les micro-STEPs peuvent aussi être considérées soit dans la catégorie des technologies centralisées ou décentralisées avec une énergie stockée sous forme mécanique.

Certains auteurs limitent la terminologie « indirecte » au stockage thermique et au stockage d'hydrogène comme le font Bart *et al.* (2017) dans leur ouvrage.

### ■ Quelques technologies adaptées aux zones portuaires

Sont présentées ci-dessous quelques technologies de stockage de l'énergie adaptées aux zones portuaires.

Figure 2-25. Technologies en fonction du temps de décharge et de la capacité énergétique



Le graphique page précédente rappelle que le temps de décharge est un élément très discriminant dans le choix de la technologie.

### **Stockage centralisé : stations de transfert d'énergie par pompage (micro – STEP portuaire)**

L'énergie hydroélectrique est en général une forme de stockage massif d'énergie associée à un réservoir en amont. Cependant, pour nos applications portuaires, cette technologie peut être utilisée à partir des bassins à flots en utilisant la différence de niveau de surface libre entre l'intérieur et l'extérieur des bassins.

L'énergie potentielle de la masse d'eau, qui est proportionnelle à la fois à la surface du plan d'eau et à la hauteur de chute, est transformée, rapidement et à la demande, en énergie cinétique puis en énergie électrique dans des turbines et alternateurs hydrauliques. Le pompage-turbinage est une technologie éprouvée de valorisation de l'énergie hydraulique, connue depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, qui permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Utilisant cette technique, les STEP permettent d'éviter le gaspillage d'énergie pendant les heures creuses (nuit et week-end) et de pallier à l'intermittence de la production électrique. Une station STEP est une installation de stockage hydraulique gravitaire qui comprend un réservoir amont et une retenue d'eau inférieure, entre lesquels est placée l'usine hydroélectrique réversible de turbinage/pompage.

En zone portuaire, cette solution sous la forme de micro-STEP est applicable dans la mesure où la surface du bassin est suffisamment grande, où la hauteur de chute est aussi suffisante et où les contraintes opérationnelles associées aux bassins ne limitent pas significativement leur utilisation comme bassin de stockage d'énergie sous forme d'énergie hydraulique.

### **Stockage décentralisé indirect : batteries électrochimiques pour les navires**

L'énergie électrique peut également être stockée par voie électrochimique. On distingue deux principaux systèmes de stockage : les piles, non rechargeables,

dont l'usage n'est pas réversible, et les accumulateurs, pouvant être rechargés à travers des réactions électrochimiques inverses, qui fournissent de l'énergie électrique à un circuit extérieur sous forme de courant continu en basse tension, en transformant progressivement leurs éléments chimiques internes suivant une réaction d'oxydation/réduction aux électrodes. En fin de transformation (décharge), le stockage énergétique est vidé.

Les facteurs de mérite des batteries sont le nombre de cycles de charge/décharge supportés avec un niveau de dégradation acceptable de l'électrolyte, la puissance massique, l'énergie massique, la durée de la recharge, la plage de température de fonctionnement et évidemment le coût.

Les batteries sont pour l'essentiel utilisées dans les transports terrestres, notamment dans l'automobile comme batteries de démarrage. La majorité de ces batteries (95 %) sont de type plomb-acide, mais d'autres technologies ont été développées telles que les accumulateurs cadmium-nickel et lithium-ion ainsi que les batteries à circulation ou « flow batteries » utilisant différents couples électrolytiques.

Une utilisation potentielle est aussi le transport maritime où l'électricité stockée peut être utilisée pour la propulsion du navire ou bien pour les divers besoins techniques et la vie à bord. **La propulsion électrique permet une grande souplesse des allures, des modes de fonctionnement silencieux, l'absence de pollution de l'air par des particules fines.** Ce dernier point est particulièrement important avec des contraintes réglementaires sur les particules fines qui deviennent de plus en plus contraignants dans les ports.

### **Stockage décentralisé indirect : vecteur hydrogène et pile à combustible pour les navires**

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur décompose de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation  $2 \text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Ce gaz est ensuite stocké, sous forme liquide, comprimé ou solide, par formation dans ce dernier cas de

composés chimiques, généralement des hydrures métalliques. Il existe ensuite trois moyens différents de réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène ainsi stocké :

- alimenter une pile à combustible, ce qui suppose que l'hydrogène soit traité pour atteindre un niveau de pureté ;
- synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation et, soit l'injecter directement dans le réseau de gaz existant, soit l'utiliser pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- enfin utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet.

Ces technologies sont assez prometteuses puisque l'hydrogène a une densité énergétique élevée et permettrait ainsi de stocker d'importantes quantités d'énergie. La pile à combustible peut aussi être utilisée pour la propulsion. **Ainsi un projet de navire de pêche à propulsion hydrogène a été lancé en 2014 en France sous le nom de projet Filhypyne** (pour filière hydrogène pour la pêche polyvalente). Un bateau touristique à hydrogène Nemo H<sub>2</sub> est utilisé depuis 2010 pour la visite des canaux autour d'Amsterdam. Le navire Viking Lady est aussi un prototype d'étude récemment construit dans le cadre du projet *European Fellowships*.

Pour des raisons de qualité de l'air (émission de particules fines) et atténuation du changement climatique (émission de CO<sub>2</sub>), on envisage de plus en plus, comme indiqué plus haut, le remplacement de la flotte actuelle par des navires décarbonés. L'hydrogène, gaz très léger, concentre énormément d'énergie pour une masse donnée : 1 kg d'hydrogène contient trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence. Il est donc particulièrement adapté pour la mobilité et notamment pour devenir l'énergie du futur des navires. La pile à combustible utilise un mode de combinaison de l'hydrogène à l'oxygène  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$  qui est une combustion électrochimique contrôlée produisant de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. L'usage de l'hydrogène comme vecteur énergie permettra donc également la production d'eau douce par la pile à combustible. Or l'eau douce est une ressource très importante

pour la vie à bord des navires. La pile à combustible produit également de la chaleur qui peut être récupérée et utilisée à bord.

Il existe désormais des solutions pour résoudre le caractère inflammable et explosif de l'hydrogène si bien que ce vecteur d'énergie est considéré comme un recours peut-être encore un peu lointain mais inéluctable (Darkim-Lamari et Malbrunot, 2016).

## 6. Références bibliographiques

- AIMS (2013). IALA Recommendation O-139 on The Marking of Man-Made Offshore Structures » Edition 2
- Bart *et al.* (2017). Le stockage de l'électricité – Un défi pour la transition énergétique – 114 pages – Editions Lavoisier
- Benoit M., Lafon F., Goasguen G. (2008). Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans. Base ANEMOC en Atlantique, Manche et Mer du Nord. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 12/1-2, pp 35-50.
- Bishop C.T., Donelan M.A. (1987). Measuring waves with pressure transducers, Coastal Engineering, Vol. 11, pp 309-328.
- Bonneton P., Lannes D. (2017). Recovering water wave elevation from pressure measurements, Journal of Fluid Mechanics, 833, pp 399-429.
- Boudiere E., Maisondieu C., Ardhuin F. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters, International Journal of Marine Energy, Vol. 3-4, pp e40-e52.
- Boyé H. (2013). Le stockage de l'énergie électrique – Panorama des technologies – Revue de l'électricité et de l'électronique
- Cetmef (2002). Signalisation maritime – Documentation technique – Principes de base des dispositifs d'aide à la navigation maritime
- Cetmef (2010). Balisage maritime des installations de production d'énergie en mer, Présentation au cluster maritime
- Cetmef (2012). Suivi environnemental des aménagements portuaires et littoraux
- Darkim-Lamari F., Malbrunot P. (2016). Combustible hydrogène pp 239 – 249 dans Stockage de l'énergie – Techniques de l'ingénieur
- EPRI (2011). Technical Report Mapping and assessment of the United States Ocean Wave Energy Resource, Palo Alto, CA: 2011.1024637. 176 p.
- EQUIMAR (2011). Deliverable D2.2: Wave and Tidal Resource Characterisation, 83 p.
- France énergies marines (2013). Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer
- Goda Y. (2000). Random seas and design of maritime structures, Advanced series on Ocean Engineering, Vol. 15, World Scientific, Singapore, 443 p.
- Huang M.-C., Tsai C.-H. (2008). Pressure transfer function in time and time-frequency domains. Journal of Ocean Engineering, Vol. 35, pp. 1203-1210.
- Leckler F., Huchet M., Dodet G., Varing A., Filipot J.-F. (2016). Modélisation des vagues à haute résolution, Séminaire National Litto3D, Sea Tech Week, Brest, 12 octobre.
- Lenee-Bluhm P., Paasch R., Tuba Özkan-Haller-HALLER H. (2011). Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest, Renewable Energy, Volume 36, pp 2106-2119.
- Mattarolo G., Benoit M., Lafon F. (2009). Wave energy resource off the French coasts: the ANEMOC database applied to the energy yield evaluation of Wave Energy Converters, 8th European Wave and Tidal Energy Conference Series, Uppsala, Sweden.
- Michard B., Cosquer E., Dufour G. (2014). Projet EMACOP : évaluation du potentiel houlomoteur de 22 sites français, XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque, pp. 751-758.

Michard B., Cosquer E., Mallégo A., Coignard J., Filipot J.F., Kpogo-Nuwoklo K.A., Olagnon M., Sergent P. (2016). Projet EMACOP : caractérisation des vagues et du potentiel houlomoteur des sites d'Esquibien et de Saint-Guénolé par simulation numérique, XIVèmes JNGCGC, Toulon, pp 497-508.

MTES (2012). Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables

MTES (2016). Note technique du 11 juillet 2016 relative aux mesures de sécurité maritime applicables à la planification d'un champ éolien en mer

MTES (2017). La séquence « éviter, réduire et compenser » un dispositif consolidé, collection Théma MTES

MTES (2017). L'autorisation environnementale : des démarches simplifiées, des projets sécurisés

Ngô et Rojey (2016) – Stockage de l'énergie – Techniques de l'ingénieur – 388 pages

Oliveras K.L., Vasan V., Deconinck B., Henderson D. (2012). Re-covering the water-wave problem from pressure measurements, SIAM Journal on Applied Mathematics, 72(3), pp 897-918.

Roeber V., Cheung K. F. (2012). Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments, Coastal Engineering, Vol. 70, pp 1-20.

Sergent P., Ropert F., Orce O., Houari M., Duhamel D., Dhatt G. (2002). Water waves in harbor areas: Appreciation of open boundary conditions. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 128 (5), pp 184-189

Sergent P., Clément A., Baudry V. (2014). Récupération des énergies marines par dispositifs houlomoteurs, Revue Travaux n° 908, pp 56-62.

Sergent P., Prevot G., Mattarolo G., Brossard J., Morel G., Mar F., Benoit M., Ropert F., Kergadallan X., Trichet J.J., Mallet P. (2014). Adaptation of coastal structures to mean sea level rise. La houille blanche. 6. pp 54-61.

Tsai C.-H., Huang M.-C., Young F.-J., Lin Y.-C., Li H.-W. (2005). On the recovery of surface wave by pressure transfer function, Ocean Engineering, Vol. 32, pp 1247-1259.

Varing A., Filipot J.-F., Roeber V., Leckler F., Duarte R., Michard B., Delpey M. (2017). Phase-resolving wave modeling for Marine Renewable Energy sites characterization. Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, Cork, Ireland, 27 August - 1 September 2017.

Zijlema M., Stelling G., Smit P. (2011). SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal water. Coastal Engineering, Vol. 58, pp 992-1012



T R O I S I È M E   C H A P I T R E

# Évaluation des différents concepts

---

Coordination :  
Virginie Baudry (École Centrale de Nantes)

Contributeurs :  
Aurélie Le Dissez (Artelia)  
Alain Clément (École Centrale de Nantes)  
Didier Rihouey (CASAGEC)  
Jeremy Dugor (CASAGEC)  
Georges Chapalain (Cerema)  
Valérie Rameliarison (Cerema)  
Philippe Sergent (Cerema)  
Hassan Smaoui (Cerema)  
Arnaud De Bonviller (ISL)  
François Marin (Université Le Havre Normandie)  
Sixtine Neuvéglise (Université Le Havre Normandie)  
Gaël Perret (Université Le Havre Normandie)  
Gregory Pinon (Université Le Havre Normandie)  
Stéphane Abadie (Université de Pau et des Pays de l'Adour)

# 1. Les différents concepts

## 1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter succinctement les différents concepts houlomoteurs qui pourraient être envisagés pour une installation en zone côtière ou portuaire dans le cadre d'un couplage avec un ouvrage porteur de type digue. Essentiellement, quatre classes de dispositifs houlomoteurs peuvent être identifiées pour répondre aux exigences d'une installation côtière ou portuaire (Clément *et al.* (2002), Falcao (2010)) : (1) les dispositifs à franchissement, (2) les dispositifs de type batteur inversés, (3) les dispositifs oscillants flottants, et (4) les colonnes d'eau oscillantes.

Outre les contraintes techniques et structurelles inhérentes à l'installation d'un dispositif houlomoteur sur un ouvrage côtier existant ou neuf, le choix du type de dispositif pour un site donné devra être fait pour garantir la meilleure adéquation entre les contraintes du site et les performances (coût du kWh) du dispositif houlomoteur. Ainsi, l'intégration des dispositifs houlomoteurs aux ouvrages doit être effectuée en tenant compte d'un certain nombre de contraintes, notamment :

- La géométrie des ouvrages existants,
- La préservation de la fonction primaire de l'ouvrage,
- La minimisation de l'impact sur la structure des ouvrages en place,
- L'optimisation du génie civil (minimisation des travaux de déblais, remblais et construction en béton armé).

Par ailleurs, les contraintes liées au site d'implantation sont également fondamentales et doivent être prises en compte pour effectuer le choix d'une technologie houlomotrice. Les paramètres fondamentaux mentionnés ci-après doivent être évalués au pied de l'ouvrage porteur :

- La profondeur d'eau devant et le long de l'ouvrage,
- La bathymétrie locale,

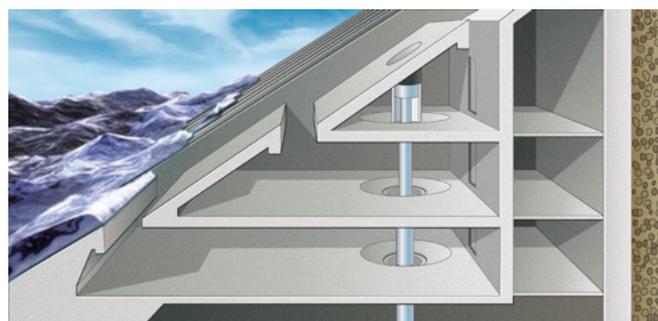
- Le marnage (vives eaux et mortes eaux),
- La direction de la houle dominante,
- Le potentiel houlomoteur pour chaque saison,
- La possibilité de mettre le dispositif en condition de repli devra également être évaluée.

## 1.2 Dispositifs à franchissement

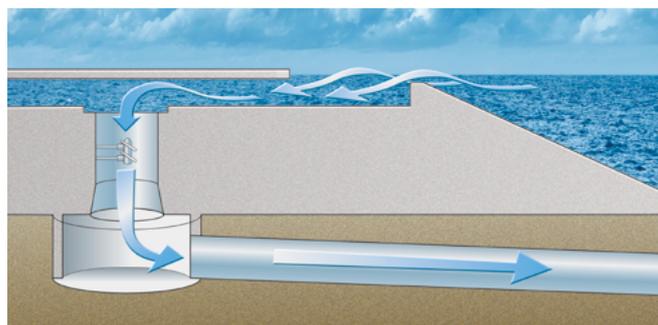
### Principe de fonctionnement

Le système à franchissement consiste à capturer dans un réservoir les volumes d'eau de vagues lorsque celles-ci déferlent et franchissent par effet de « *Run-up* » le parement amont d'une digue présentant une plage inclinée face aux vagues incidentes. Les volumes d'eau stockés dans le réservoir représentent une énergie potentielle ; ils sont ensuite turbinés par une turbine basse chute (faible charge) couplée à un générateur électrique.

Figure 3-1. Schémas de principe du dispositif à franchissement



D'après Vicinanza *et al.* (2012)



D'après Aqua-RET®

## Exemple de projets

Les projets les plus significatifs de dispositifs à franchissement sont mentionnés ci-après, et illustrés en figure 3-2 :

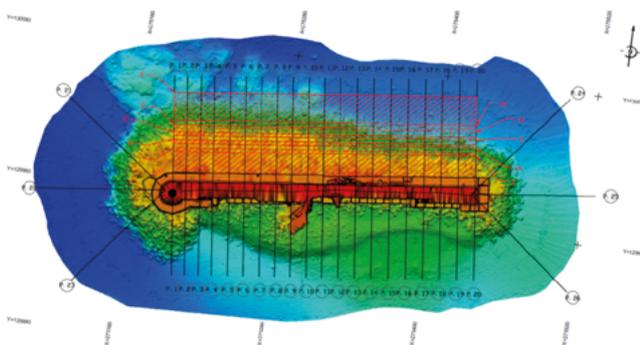
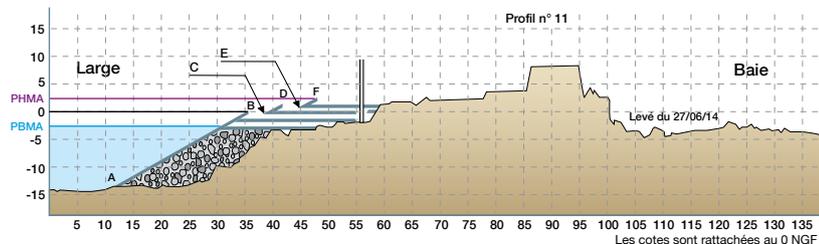
Le dispositif Tapchan (350kW) a été installé sur une île norvégienne en 1985. Comme le montre le schéma, ce dispositif est équipé d'un collecteur. Ce prototype a été détruit par une très violente tempête en 1991.

Le projet SSG (système à franchissement à 3 réservoirs, développé par la société norvégienne Wave Energy AS) a fait l'objet de nombreuses études et travaux de recherche qui ont permis d'étudier les performances et la faisabilité de ce type de dispositif (Kofoed (2000), Folley *et al.*, 2007 ; Henry *et al.*, 2010). Dans le cadre d'EMACOP, des études d'implantation et d'évaluation des performances énergétiques d'un dispositif de ce type ont été menées sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

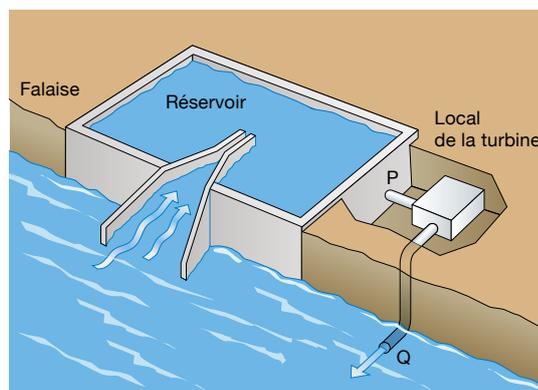
Le prototype de système à déferlement OBREC (*Overtopping Breakwater For Energy Conversion*) (Contestabile *et al.*, 2016 et Luppa *et al.*, 2016) est installé dans le port de Naples depuis janvier 2016, avec une puissance installée de 2,5 kW. Il est prévu d'installer une turbine de type vis d'Archimède pour augmenter la puissance installée à 8 kW, avant de passer à une puissance de 20 kW.

Figure 3-2. Dispositifs à franchissement : exemples de projets

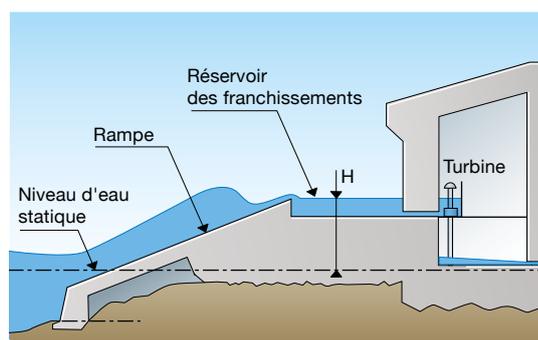
Système SSG – Étude d'implantation d'un dispositif à 3 réservoirs sur le site de Saint-Jean-de-Luz (d'après Mory *et al.*, 2015)



Tapchan (350 kW prototype)



OBREC Prototype



D'après Luppa *et al.*

### 1.3 Dispositifs de type « batteur inversé »

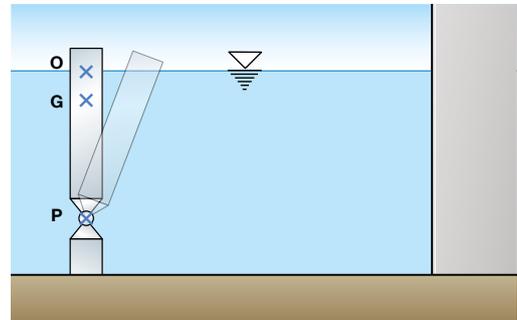
#### Principe de fonctionnement

Pour récupérer l'énergie des vagues, Falnes et Budal (1978) ont insisté sur le fait qu'un bon amortisseur de vagues devrait pouvoir être un bon générateur de vagues si utilisé à l'inverse (« *a good wave absorber must be a good wavemaker* ») ; c'est ce concept qui a motivé les études des dispositifs de type « batteur inversé ». Les batteurs inversés fonctionnent comme un amortisseur de l'énergie des vagues en récupérant l'énergie de cavalemt/tangage du mouvement d'un piston ou d'un volet (figure 3-3). Ce mouvement est ensuite converti en énergie électrique avec un système de PTO (*Power Take Off*) hydraulique ou électrique.

Parmi ces projets, notons l'existence de deux sous-catégories de concepts : l'un ne perçant pas la surface libre (1), l'autre perçant la surface libre (2). Plusieurs projets de type batteurs inversés ont fait l'objet d'études récentes, à des stades de développement divers, du concept aux premières installations en mer (Oyster) : Oyster(2), WaveRoller(1), BIOWAVE (2), EB Front (1) et WRASPA (1).

En comparaison avec d'autres WEC (*Wave Energy Converter*), qui sont adaptés à un fonctionnement au large, ces dispositifs sont typiquement développés pour de faibles profondeurs (on parle dans le jargon de systèmes « *near-shore* »). Dans cet environnement, l'énergie des vagues disponible est moindre que ce qu'elle est au large à cause du frottement au fond et éventuellement du déferlement des vagues dans sa propagation jusqu'à la côte. En revanche, du fait des effets de réfraction et de déferlement, les événements extrêmes et l'étalement spectral sont aussi réduits, ce qui peut localement augmenter l'efficacité de ces dispositifs (Folley *et al.*, 2007). Ces types de WEC sont adaptés à un fonctionnement en eau peu profonde et à une intégration dans ou devant des ouvrages côtiers.

Figure 3-3. Schéma de principe du dispositif de type batteur inversé devant une digue verticale



#### Exemples de projets

- Le système **OYSTER** a été développé par le Queen's University Belfast et Aquamarine Power Ltd. pour récupérer l'énergie des vagues dans des profondeurs de 10 à 15 m. Le premier prototype, l'Oyster 1 (315 kW), a été installé sur la côte de Orkney en Écosse (European Marine Energy Centre, EMEC) en novembre 2009 à la suite de séries de tests en laboratoire. Depuis cette première installation, une autre série de tests a été effectuée pour améliorer l'efficacité de l'Oyster 1 pour produire l'Oyster 2 (Henry *et al.*, 2010 ; Whittaker et Folley, 2012). Un prototype à l'échelle 1/1 d'Oyster 2 d'une puissance de 800 kW a été testé à l'EMEC entre 2012 et 2015 (<http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>), avant l'arrêt du projet et la liquidation de la compagnie Aquamarine fin 2015.
- Le **WaveRoller** (<http://www.aw-energy.com/>), d'AW-Energy Ltd., une compagnie finlandaise, est un batteur inversé de type volet oscillant qui consiste en une ou plusieurs aile(s) rectangulaire(s) référencée(s) au fond de la mer et oscillant en tangage. Assez semblable au système Oyster, WaveRoller se distingue par le fait qu'il reste totalement immergé en permanence. En comparaison avec d'autres dispositifs de type batteur inversé, le fonctionnement du WaveRoller est optimal dans l'eau de 10 à 25 m de profondeur, entre la ligne de déferlement de vagues et la profondeur qui correspond à la moitié de la longueur des vagues à la surface. Cette gamme de profondeur est optimale parce que les forces de cavalemt sont au

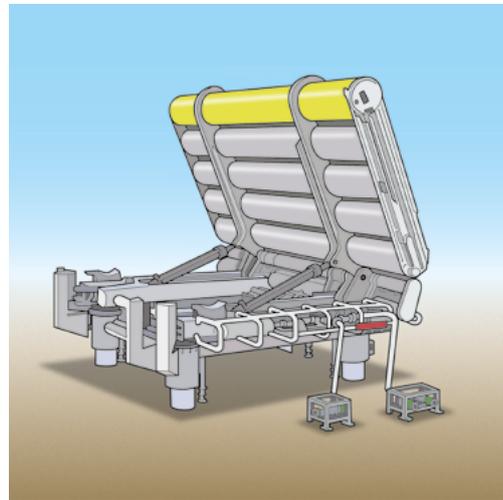
maximum dans cette zone, en particulier sur les côtes exposées à la houle avec des périodes longues. En janvier 2012, trois dispositifs sont installés à Peniche, au Portugal, pour une exploitation face à la plage Almagreira entre 8 et 20 m de l'eau. Avant cela, plusieurs tests ont été effectués sur des modèles réduits en laboratoire et aussi en mer à l'EMEC en Écosse et aussi en Équateur, mais les données concernant ces tests ne sont pas publiées.

Les dispositifs bioWave et WRASPA sont également décrits ci-dessous à titre d'exemple. Toutefois, ces dispositifs sortent du cadre d'une installation en combinaison avec un ouvrage de type digue car les profondeurs envisagées pour l'installation de ces dispositifs se situent entre 20 et 45 m.

- Le dispositif **bioWAVE** (<http://www.biopowersystems.com/biowave.html>) a été créé par la société BioPower Systems en Australie. La forme du dispositif est inspirée de la biologie, avec une forme inspirée d'une plante avec plusieurs ailes (figure 3-4). Le BioWave a été créé pour un fonctionnement optimal pour une profondeur de 35 à 45 m, et il est censé avoir une haute efficacité. Il existe plusieurs sites potentiels pour des projets d'installation des dispositifs bioWAVE, et le premier projet de démonstration de 250 kW a été installé fin 2015 en Australie (<http://tidalenergytoday.com/2017/01/30/bps-readies-new-cable-for-biowave-unit/>).

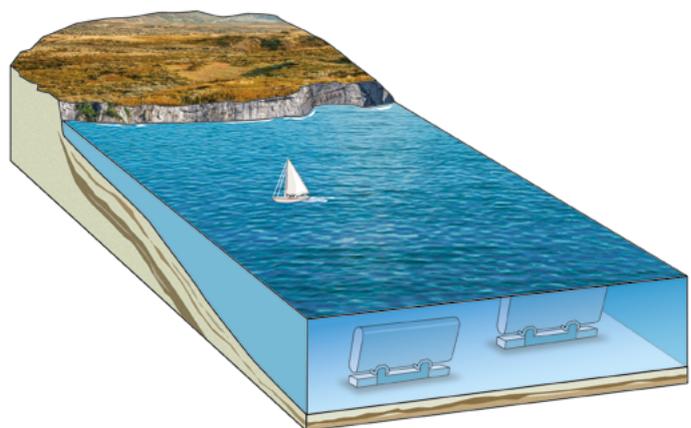
- Le dispositif **WRASPA** a été développé dans le laboratoire de l'Université de Lancaster en collaboration avec des chercheurs du Manchester Metropolitan University après une série d'expériences avec d'autres WEC qui ne récupèrent que l'énergie de cavement. Ce dispositif récupère l'énergie de cavement ainsi que l'énergie de tangage, dans l'eau de 20 à 50 m de profondeur. Depuis la conception du WRASPA, plusieurs essais ont été réalisés en laboratoire ainsi que des tests numériques en utilisant le code Flow-3D (Chaplin *et al.*, 2010). ([http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/group\\_research/wave\\_energy\\_research/wraspa.php](http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/group_research/wave_energy_research/wraspa.php)).

Figure 3-4. Dispositifs de type batteur inversé : Exemples de projets



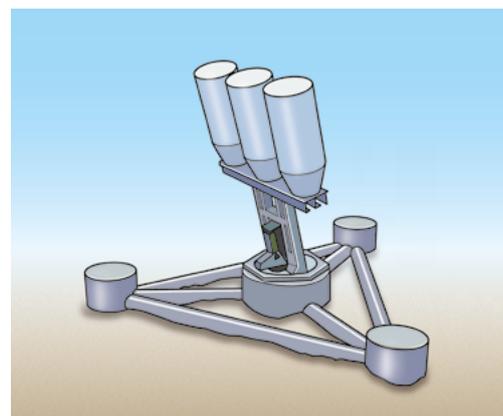
#### Oyster

Schéma d'Oyster 1, déployé en 2009 (d'après Whittaker T, Folley, 2012)



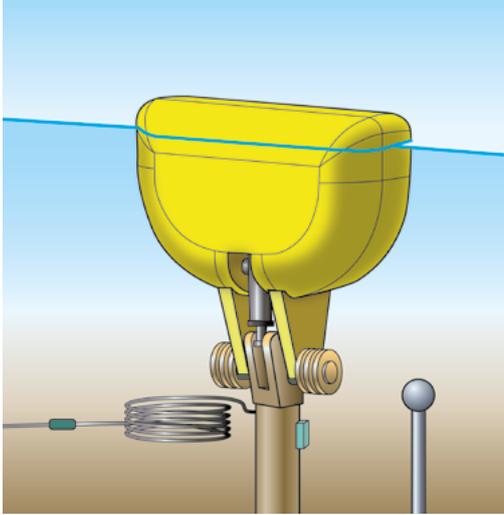
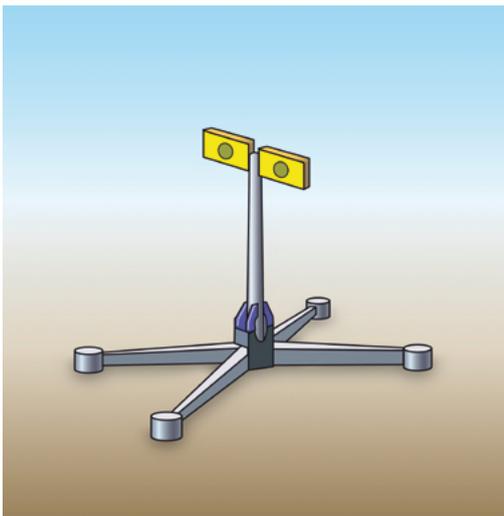
#### WaveRoller

Concept du waveroller - d'après : <http://aw-energy.com>.



#### BioWave

d'après <http://www.marineinsight.com>.

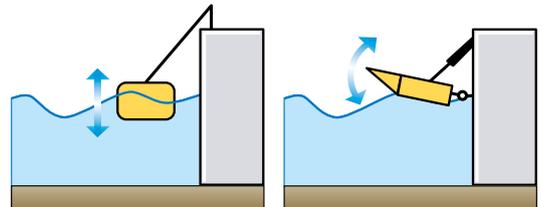
**Wraspa**D'après Aggidis *et al.* (2009)**EB-Front**D'après Folley *et al.* (2007)

## 1.4 Dispositifs de type flotteur oscillant

### Principe de fonctionnement

Dans le cadre d'une installation combinée avec une digue, des dispositifs houlomoteurs de type bouées pilonnantes ou flotteurs fonctionnant en tangage peuvent être envisagés, comme le montre le schéma de principe ci-dessous (figure 3-5). Les dispositifs de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peuvent être assez variés, dépendamment du système et de la configuration d'installation retenue. Dans le cas d'un PTO hydraulique, par exemple, le mouvement du flotteur peut être utilisé pour actionner une pompe et mettre sous pression un fluide hydraulique pour faire tourner un moteur hydraulique entraînant lui-même un alternateur. Il peut également être envisagé d'utiliser directement le déplacement du flotteur pour entraîner un alternateur.

Figure 3-5. Dispositifs oscillants flottants : schéma de principe

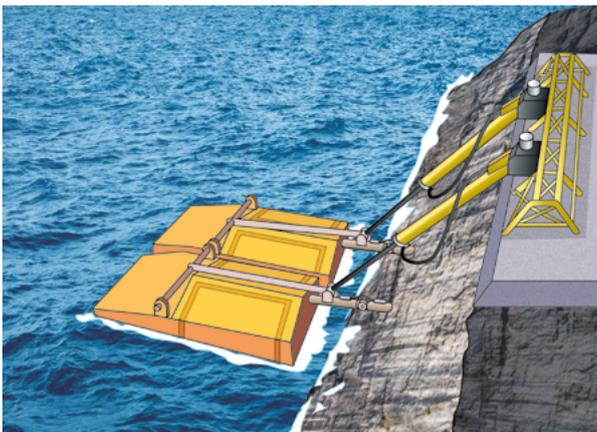


### Exemples de réalisation

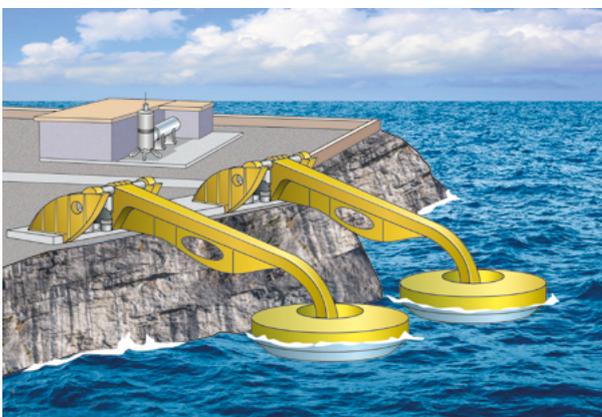
- Le système SDE (figure 3-6, gauche) développé par la société israélienne SDE Ltd est constitué de deux plateaux flottants, lesquels se soulèvent à l'arrivée d'une vague et s'abaissent lorsque l'eau se retire. Ce dispositif utilise l'énergie cinétique et potentielle des vagues pour générer de la pression hydraulique qui est ensuite transformée en électricité. Un système de 40 kW fonctionne en Israël, et un groupe de trois unités a été installé à Gibraltar en 2016.

- Le système « *hyperbaric converter* » dont un prototype a été installé dans le port de Pecem au Brésil. Ce système est constitué de plusieurs unités pilonnantes : le mouvement de pilonnement des corps flottants actionne des pompes qui permettent de faire circuler l'eau d'un circuit fermé jusqu'à un accumulateur hydropneumatique relié à une chambre hyperbare préalablement pressurisée. Le flux pressurisé sortant de l'accumulateur actionne une turbine reliée à un générateur électrique. Le capture width ratio déterminé à partir d'essais en bassin à l'échelle 1/6,5<sup>e</sup> et 1/10<sup>e</sup> est estimé entre 19 et 36 % par unité (Estefen *et al.*, 2012).

Figure 3-6. Dispositifs oscillants flottants :  
Exemples de réalisation



Le système SDE



Le dispositif Hyperbaric converter  
D'après Estefen *et al.* (2012)

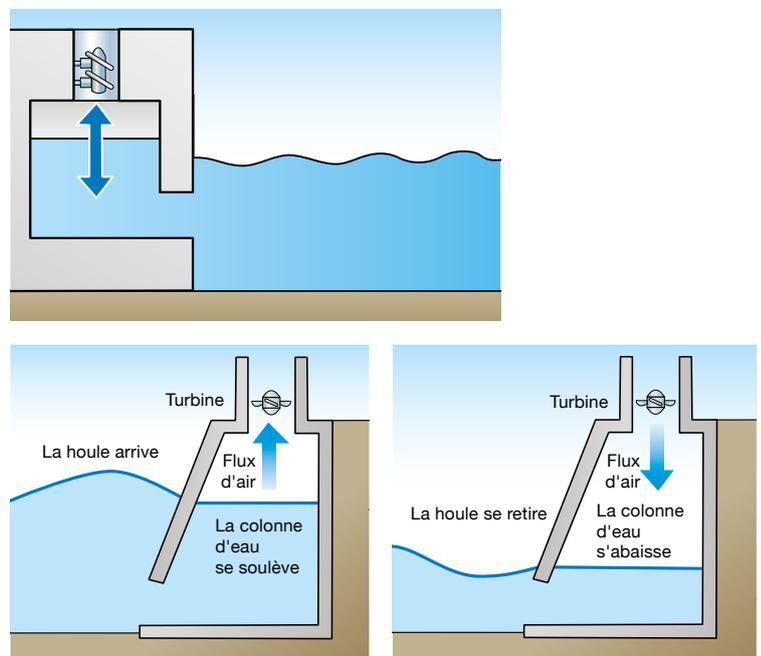
## 1.5 Dispositifs de type colonne d'eau oscillante (OWC)

### Principe de fonctionnement

Les dispositifs de type OWC (*Oscillating Water Columns*) comptent parmi les dispositifs houlomoteurs les plus étudiés, notamment du fait de la simplicité de cette technologie. Les OWC sont des technologies soit fixes soit flottantes et l'on s'intéressera dans le cadre du projet EMACOP, uniquement aux OWC fixes, isolées ou intégrées à un digue.

Une OWC comprend une cavité emplies d'eau de mer, ouverte au fond et communiquant avec l'extérieur. Les mouvements oscillants de la surface libre interne engendrés par les vagues incidentes créent un flux d'air à travers une turbine qui pilote un générateur électrique.

Figure 3-7. Colonne d'eau oscillante : schéma de principe



## Exemples de réalisation

Dans les années 1990, la décision de la commission européenne d'inclure l'énergie des vagues dans les programmes de R&D Energies renouvelables a abouti à l'étude, la conception et à la construction de deux prototypes d'OWC fixes à échelle réelle :

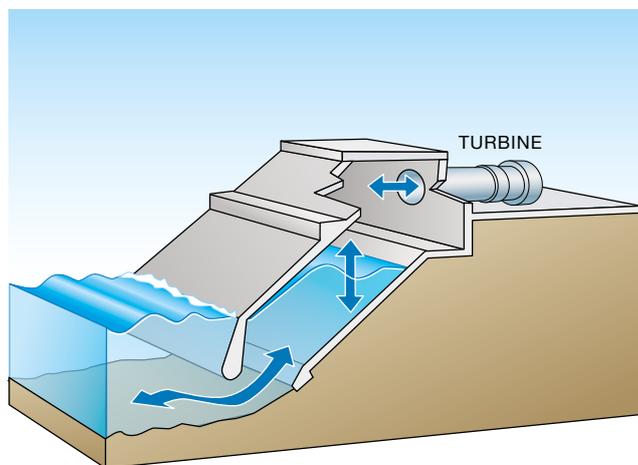
- l'OWC de Pico (Pecher *et al.*, 2011), aux Açores, développée par l'Instituto Superior Tecnico de Lisbonne, d'une puissance installée de 400 kW.
- l'OWC d'Islay, en Ecosse développée par la société Wavegen (Irlande) et la Queen's University of Belfast (QUB). Après un premier prototype de 75 kW développé par QUB, l'OWC LIMPET 500 kW a été construite.

### ■ Les OWC fixes, isolées :

Les OWC de Pico et LIMPET sont équipées de turbines de type WELLS. Les principales caractéristiques de ces deux OWC, ainsi que les données de performances énergétiques issues de l'étude du Carbon Trust (2005) sont présentées en figure 3-8 et figure 3-9.

L'article de Falcao et Henriques (2016) présente également un état de l'art assez complet des projets d'OWC, des turbines à air associées et des principes de modélisation de ce type de dispositif houlomoteur.

Figure 3-8. Caractéristiques principales, OWC Limpet (d'après Carbon Trust)

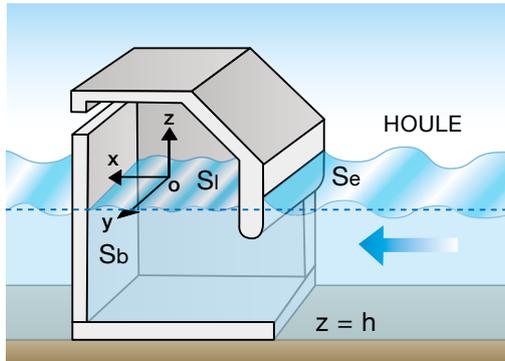


Géométrie		Caractéristiques de la mer, de la houle	
Largeur totale	21 m	Profondeur au niveau de l'embouchure	6,0 m
Nbre de chambres et largeur	3 x 6,0 m	Hauteur des vagues max.	4,4 m
Angle de la chambre	40° à l'horizontale	Fréquence des vagues	13,4 s
Profondeur de l'embouchure sous le Niveau Moyen de la mer	2,3 m	Période de retour	Non disponible
Hauteur totale au-dessus du Niveau Moyen de la mer	12,8 m	Pression maximale de la vague	600kN/m <sup>2</sup>
Turbine		Générateur	
Diamètre	2,6 m	Type	F3GTS 400 G8G
Vitesse de fonctionnement	1050 tour par minute	Puissance aux bornes du générateur	2 x 250 kW
Nbre de turbines	2	Type de service	Conduite continue inversée
Disposition	En ligne, contra-rotatif	Type de rotor mais utilisé avec des rotors en court-circuit	Rotor bobiné
Forme des pales	NACA 12	Tension nominale	400 V
Nombre de pales	7	Vitesse nominale	1016 Tours par minute
Corde de la pale	320 mm	Vitesse maximale testée	1500 Tours par minute
Rapport moyeu / pointe	0,62	Inertie	Générateur 11,5 kgm <sup>2</sup> Charge 1300 kgm <sup>2</sup>

Climat de vagues : 12kW/m

Type de conversion d'énergie	Structure / Dispositif	Efficacité estimé %	Efficacité mesuré %
De la Houle au pneumatique (mesuré à l'embouchure)	Colonne d'eau oscillante	80	64
Du pneumatique au mécanique	Turbine de Well	60 moyenne	40 (moyenne)
Du mécanique à l'électrique	Générateur	100	32
Efficacité	-	48 (moyenne)	8

Figure 3-9. Caractéristiques principales, OWC Pico (source : Carbon Trust)



La production moyenne de la Centrale de Pico est évaluée à  $247 \pm 35$  MWh, soit un rendement global – de l'énergie de la houle à la production d'électricité de  $6,2 \pm 0,9$  %.

Géométrie		Caractéristiques de la mer, de la houle	
Largeur totale	12 m	Profondeur au niveau de l'embouchure	8m à l'embouchure, 8 à 10m en approche
Nbre de chambre et largeur	1 x 12,0 m	Hauteur des vagues, max.	7,5 m
Angle de la chambre	60° à l'horizontale	Fréquence des vagues	12,0 s
Profondeur de l'embouchure sous le Niveau Moyen de la mer	2,5 m	Période de retour	Non disponible
Hauteur totale au-dessus du Niveau Moyen de la mer	15,0 m	Pression maximale de la vague	700 kN/m <sup>2</sup>

Turbine		Générateur	
Diamètre	2,3 m	Type	Induction, rotor bobiné, Kramer
Vitesse de fonctionnement	750 – 1500 tour par minute	Puissance aux bornes du générateur	400 kW
Nbre de turbines	1 x 12,0 m	Type de service	50Hz, 8 poles
Disposition	Axes horizontaux	Type de rotor	Bobiné, bagues collectrices
Forme des pales	3D symétrique NACA15 À la base et NACA12 au sommet	Tension nominale	400 V
Nombre de pales	8	Vitesse nominale	1400 Tours par minute
Corde de la pale	375 mm	Vitesse maximale testée	1500 Tours par minute
Rapport moyen / pointe	0,59	Inertie	600 kgm <sup>2</sup>

Type de conversion d'énergie	Structure / Dispositif	Efficacité estimé %	Efficacité mesuré %
De la Houle au pneumatique (mesuré à l'embouchure)	Colonne d'eau oscillante	NA	NA
Du pneumatique au mécanique	Horizontal à l'axe de la turbine de Well	75 (en pic)	NA
Du mécanique à l'électrique	Rotor bobiné, induction, générateur	NA	NA
Efficacité	-	35 (moyenne)	NA

### ■ Les OWC intégrées à une structure de type digue

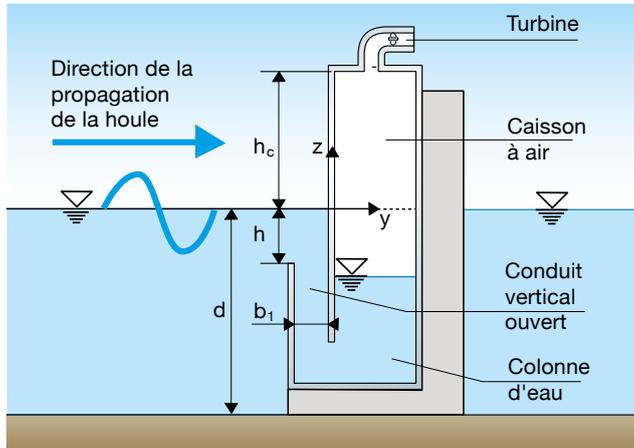
Parmi les projets d'OWC fixes, on peut citer quelques projets d'OWC intégrées à des digues (Falcao et Henriques, 2016) (figure 3-10) :

- L'OWC installée dans le port de Sakata au Japon, en 1990. Le projet d'OWC à 5 chambres a été construit mais, après une période de test, 3 chambres seulement ont été utilisées pour la production d'énergie. Les principales caractéristiques de cette OWC, issues de l'étude du Carbon Trust sont données dans le tableau de la figure 3-9.
- Plus récemment, une OWC intégrée à une digue a été construite à Mutriku, dans le Pays Basque espagnol. Elle comprend 16 chambres et est

équipée de 16 turbines WELLS de 18,5 kW (Torre-Encisco *et al.*, 2009).

- Un autre type d'OWC intégré à une digue a été proposé par Boccotti (2007), avec une section d'OWC en U. Une OWC de ce type est actuellement en cours de construction dans le port de Civitavecchia en Italie, avec 17 caissons et 136 OWC. Ce type de conception permettrait d'obtenir de meilleurs rendements que les OWC conventionnelles, principalement pour les deux raisons suivantes : la période propre est plus élevée et l'amplitude des fluctuations de pression est plus élevée (Boccotti 2007).

Figure 3-10. OWC intégrées à une structure portuaire : exemples de réalisation

Sketch of an U-OWC plant (Malara *et al.*, 2013)

Géométrie		Caractéristiques de la mer, de la houle	
Largeur totale	200 m	Profondeur	18,0 m
Nbre de chambres et largeur	5 x 3 m	Hauteur des vagues, max.	15,3 m
Angle de la chambre	Chambre de houle – verticale air 45°	Fréquence des vagues	14,5 s
Profondeur de l'embouchure sous le Niveau Moyen de la mer	3,0 m	Période de retour	NA
Hauteur totale au-dessus du Niveau Moyen de la mer	12,5 m	Pression maximale de la vague	NA
Turbine		Générateur	
Diamètre	1,337 m	Type	NA
Vitesse de fonctionnement	NA	Puissance aux bornes du générateur	60 kW
Nbre de turbines	NA	Type de service	NA
Disposition	NA	Type de rotor mais utilisé avec des rotors en court-circuit	NA
Forme des pales	NA	Tension nominale	200V AC
Nombre de pales	16	Vitesse nominale	NA
Corde de la pale	NA	Vitesse maximale testée	NA
Rapport moyeu / pointe	NA	Inertie	NA

Les principaux projets d'OWC fixes développés depuis les années 1980 sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Projet	Pw installée (kW)	Turbine	Année d'installation	Lieu	Remarque
<b>OWC Fixes, isolées</b>					
Pico	400	Wells Variable pitch	1999	Portugal (Açores)	
Limpet	500	Wells	2001	Islay, Scotland	
Shanwei OWC	100	Wells, contra-rotating	1999	Chine	
Osprey	1000	Airwave bi-directionnal	1995	Scotland	Détruite par la mer peu après son installation
OceanLinx	1000	impulse		Australie	Echouée en 2014, suite à un accident pendant le remorquage entre 2 ports
OWC Yongsoo	500	Wells		Corée du sud	
Toftestallen OWC	500	Wells	1985	Norvège	Détruite par la mer en 1988
Trivandrum	125			Inde	
<b>OWC intégrées à une digue</b>					
Sakata	60	Wells with guide vanes	1990	Japon	
Mutriku	296	Wells, biplane	2010	Espagne	
U-Shaped, REWEC			En construction	Civitavecchia, Italie	

## 2. Estimation de production

### 2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les méthodologies d'évaluation de la production des dispositifs houlomoteurs couplés à un ouvrage portuaire ou côtier étudiés dans le cadre du projet EMACOP. De nombreuses recherches récentes ont été menées autour de l'évaluation de la production de dispositifs houlomoteurs *offshore* (Babarit *et al.*, 2012), ou de dispositifs *onshore* ou *nearshore* isolés, de type OWC par exemple (Brito-Melo, 1999) (Falcao *et al.*, 2012) (Delauré et Lewis, 2001).

De façon générale, des modèles *Wave to Wire* numériques ou analytiques basés sur la résolution de l'équation du mouvement du dispositif sont développés, en utilisant des modèles hydrodynamiques adaptés.

Cette ouvrage s'intéresse aux dispositifs houlomoteurs installés en zone côtière ou portuaire et qui sont de plus couplés à un ouvrage de type digue ; soit intégrés à la digue, soit placés très près d'une digue. Cette spécificité a nécessité l'adaptation des outils numériques existants pour l'évaluation de la production aux contraintes d'installation côtière.

Ainsi, on présentera dans ce chapitre quelques éléments de méthodologies développées pour évaluer la production des WEC dans le cadre d'un couplage avec une digue, puis les modèles numériques développés.

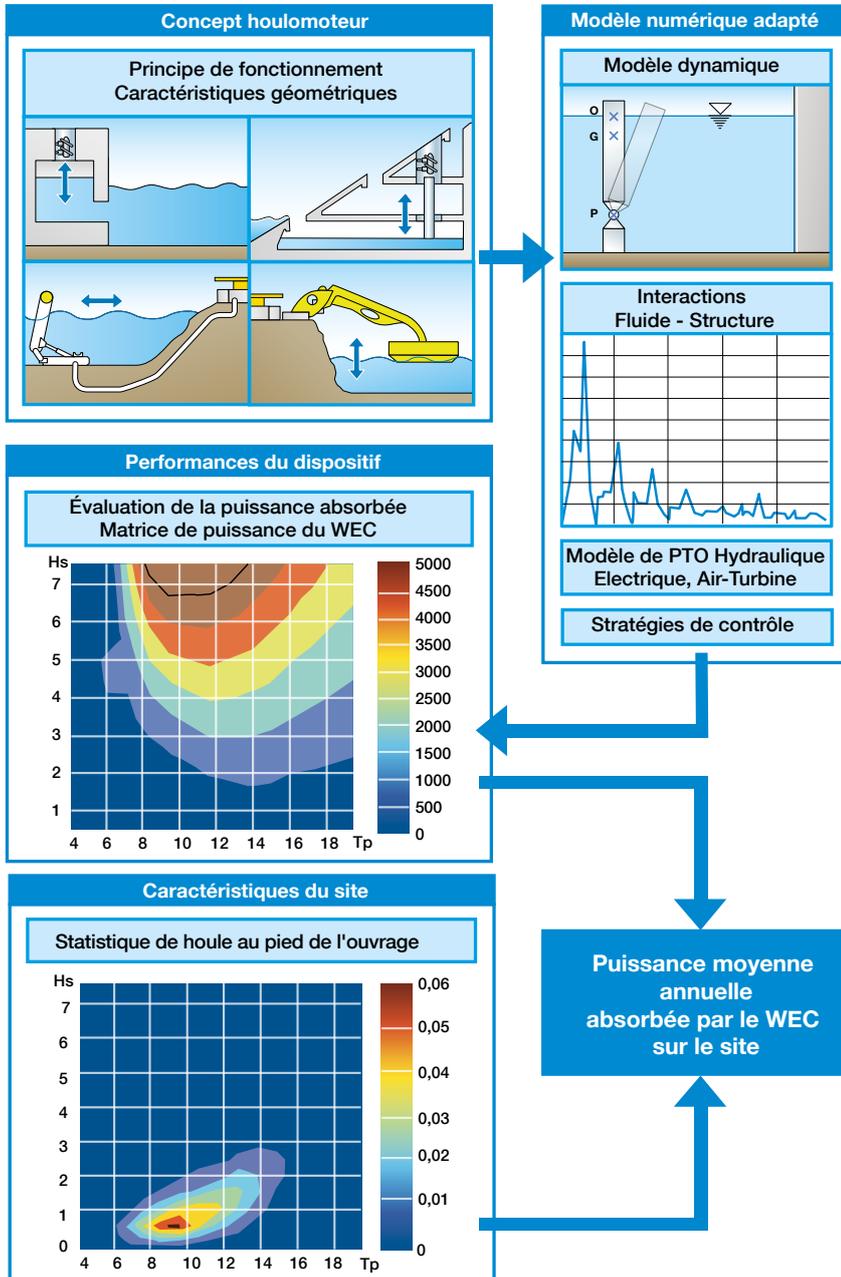
Ces modèles numériques dits « *Wave To Wire* » (de la vague au réseau, en anglais) sont spécifiques à chaque grande famille de WEC que sont :

1. Les dispositifs oscillants : les modèles *Wave to Wire* sont essentiellement basés sur la résolution de l'équation du mouvement. Ces dispositifs peuvent être déclinés en 2 sous-catégories :
  - a. Les dispositifs de type batteur inversés, partiellement immergés (D2)
  - b. Les dispositifs oscillants flottants (D3)
2. Les colonnes d'eau oscillantes OWC (D4)
3. Les dispositifs à franchissement (D1) : le principe d'évaluation de la production consiste à déterminer le débit franchissant, puis à calculer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie potentielle que représentent les volumes d'eau stockés dans les réservoirs pour un état de mer et un niveau marin donnés.

L'évaluation de la puissance moyenne annuelle d'un dispositif houlomoteur sur un site donné requiert la connaissance de la ressource en pied d'ouvrage, avec la prise en compte du marnage. Il est donc nécessaire de disposer des statistiques de houles locales. Les méthodologies existantes pour évaluer la ressource houlomotrice en zone côtière sont décrites dans le chapitre concernant la ressource.

Quel que soit son principe de fonctionnement, le principe d'évaluation de la production d'un dispositif houlomoteur sur un site donné consiste à élaborer un modèle numérique qui va permettre d'établir sa matrice de puissance, puis à multiplier cette matrice par la matrice des probabilités d'occurrence des états de mer sur le site envisagé (voir schéma de la figure 3-10).

Figure 3-10. Évaluation des performances énergétiques d'un WEC : Schéma de principe



Le présent chapitre présente les principales méthodes d'évaluation de la production qui peuvent être proposées en fonction du type de dispositif houlomoteur, et présente à titre d'illustration quelques exemples.

## 2.2 Critères de choix d'un outil d'évaluation du rendement des dispositifs houlomoteurs

Le panel d'outils numériques existants pour modéliser le comportement des dispositifs houlomoteurs est assez large, et plus spécifiquement, les modèles hydrodynamiques associés couvrent un spectre très large de méthodes ; allant des modèles basés sur la théorie potentielle linéaire aux modèles les plus

avancés en CFD permettant de représenter très finement les interactions fluide-structure. Face à la diversité de ces modèles, il est nécessaire de se fixer des critères de choix en fonction de l'objectif fixé qui est ici d'évaluer le rendement des dispositifs.

Ainsi, les paramètres de temps de calcul et de capacité du modèle à effectuer des calculs en houle irrégulière sont essentiels pour des évaluations de rendement qui nécessitent de pouvoir simuler de nombreux états de mer, sur une durée de simulation significative (de l'ordre de 20 minutes de temps physique au réel), afin de pouvoir calculer la puissance moyenne annuelle absorbée par le dispositif sur un site donné.

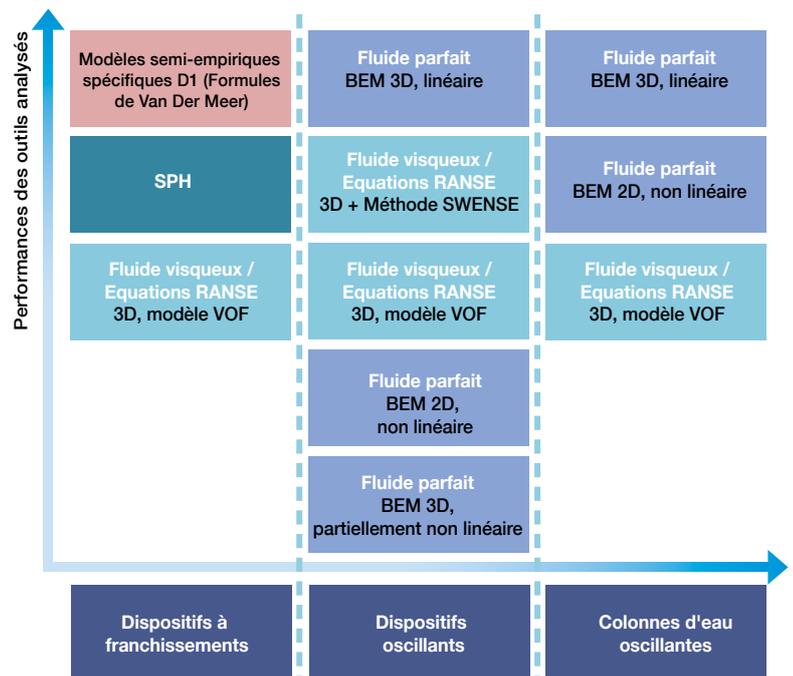
Une étude de l'état de l'art des outils d'évaluation du rendement et de la survivabilité des dispositifs houlomoteurs a permis de recenser les outils existants, analyser leurs capacités, leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs besoins d'adaptation pour répondre aux spécificités d'installation côtière, en combinaison avec un ouvrage de défense maritime.

- *Critères concernant les aspects hydrodynamiques :*
  - (1) Précision/qualité du modèle hydrodynamique,
  - (2) Possibilité d'intégrer la bathymétrie locale/topographie dans le modèle,
  - (3) Possibilité d'effectuer les calculs en houle irrégulière avec le modèle,
  - (4) Prise en compte des effets visqueux dans le modèle,
  - (5) Temps de calcul
- *Critères concernant la conversion d'énergie :*
  - (1) Capacité à intégrer un modèle de PTO dans le modèle pour les dispositifs oscillants,
  - (2) Pour les OWC : Capacité à intégrer un modèle de chambre (prise en compte de la compressibilité de l'air ou non), de turbine (avec prise en compte des vannes de décharge si nécessaire et de générateur dans le modèle)

Concernant l'évaluation du rendement des dispositifs oscillants (de type bouée pilonnante, volet (partiellement) immergé,...), tous les outils de l'état de l'art analysés sont adaptés à des dispositifs détachés de tout ouvrage, et ne prennent ainsi en compte ni l'effet de couplage avec une digue proche, ni les contraintes d'installation côtière

(marnage, ressource en zone côtière,...). Ces outils ont donc fait l'objet d'adaptations spécifiques dans le cadre du projet EMACOP.

Figure 3-11. Outils numériques d'évaluation du rendement des dispositifs houlomoteurs



Comme précisé ci-dessus, les performances des outils analysés sont évaluées en fonction de l'objectif fixé et doivent donc répondre aux deux exigences suivantes :

- Capacité à effectuer des calculs en houle irrégulière
- Faible temps de calcul afin de pouvoir évaluer toute une matrice de puissance

Ces deux paramètres justifient que les méthodes fluide parfait de type BEM 3D soient de bonnes candidates pour l'estimation de la production des dispositifs oscillants et également des OWC (voir figure 3-11). Dans la mesure où l'approche retenue pour la modélisation du problème hydrodynamique est une approche simplifiée basée sur la théorie potentielle linéaire, il conviendra d'identifier et si possible de quantifier les incertitudes liées à l'utilisation de ce type de modèle.

## 2.3 Éléments sur la ressource houlomotrice

Les méthodologies d'évaluation de la ressource sont décrites dans le chapitre 2.1. L'objectif ici est simplement de rappeler succinctement les éléments nécessaires à l'estimation de la production d'un dispositif houlomoteur.

L'évaluation des performances énergétiques d'un WEC en zone côtière requiert d'avoir des données de houle à la côte, au plus proche de l'ouvrage concerné par l'installation du WEC. Pour obtenir des données de houle en zone côtière, plusieurs types de méthodologies sont envisageables (voir chapitre 2.1) parmi lesquelles on peut citer :

1. Les mesures *in situ* ;
2. Les méthodes analytiques (type Goda), qui permettent de transporter des données de houle au large à la côte en prenant en compte de manière approchée les phénomènes tels que la réfraction, la diffraction, la shoaling, le déferlement (Goda, 2000) ;
3. Les modèles numériques spectraux de propagation de vagues (type SWAN – voir références) qui, permettent de modéliser la houle à la côte à partir de données au large.

Dans le cadre de l'évaluation des performances énergétiques d'un dispositif houlomoteur, il est souhaitable d'avoir une évaluation la plus fine possible de la ressource en pied d'ouvrage, et d'utiliser prioritairement les méthodes de type 1 ou 3. De plus, il est nécessaire de prendre en compte le marnage sur le site, et donc d'intégrer l'impact de la marée sur les caractéristiques de houle.

Cependant, à des stades d'avant-projet, il se peut que seules des méthodes de type 2 soient disponibles pour évaluer les caractéristiques de houle à la côte. Dans ce cas, en l'absence de données de houle intégrant la marée, il conviendra a minima de faire une étude de la sensibilité des performances du dispositif au marnage sur le site envisagé.

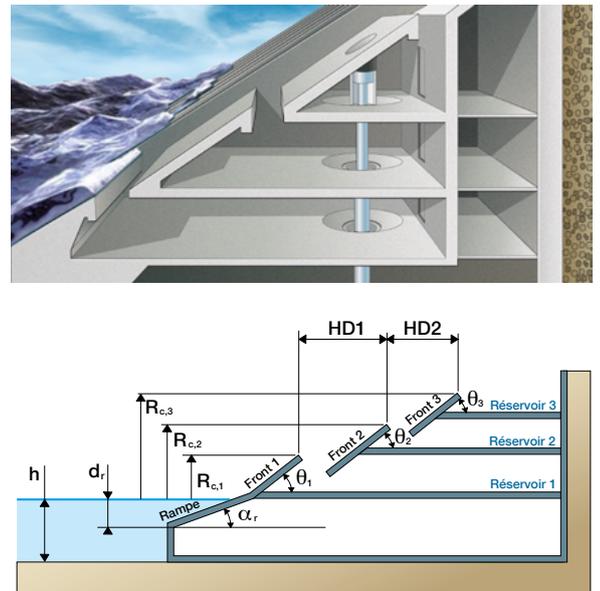
Une fois établies les caractéristiques de houle en zone côtière, deux éléments sont indispensables pour évaluer les performances énergétiques d'un WEC :

- Le *scatter diagram* du site (matrice des probabilités d'occurrence des états de mer)
- Les caractéristiques du/des spectres de houle représentatif(s) du site envisagé

## 2.4 Dispositifs à franchissement

Les systèmes houlomoteurs à franchissement captent l'énergie des vagues en récupérant dans des réservoirs à différentes hauteurs l'eau des vagues qui remontent sur l'ouvrage. L'électricité est produite par des turbines basse charge qui exploitent la différence d'énergie potentielle entre le niveau d'eau dans les réservoirs et le niveau de la mer. La figure 3-13 montre le système SCG (*Slot Cone Generator*).

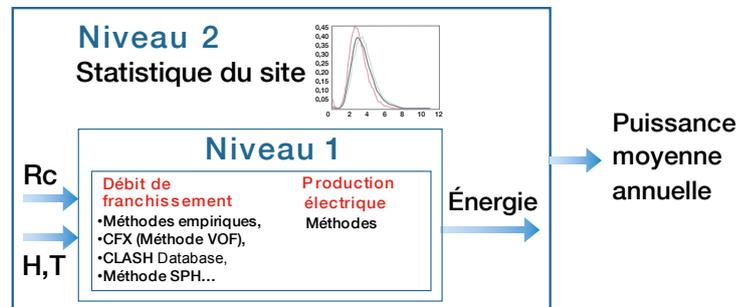
Figure 3-12. Schéma de principe du système de récupération de l'énergie des vagues par franchissement, exemple de système à trois réservoirs (d'après Vicinanza *et al.*, 2012)



### Outils de détermination de la récupération d'énergie par les dispositifs à franchissement

Le calcul du rendement et de la puissance moyenne annuelle produite se décompose en deux étapes de calcul, résumées sur la figure 3-13.

Figure 3-13. Principe d'évaluation du rendement du dispositif à franchissement



#### Niveau 1 :

- Calcul des débits  $q_{ov,n}(h, H_s, T_p)$  franchissant (overtopping flow rate) les crêtes de chaque réservoir pour un état de mer  $(H_s, T_p)$  donné et un niveau marin donné (hauteur d'eau sur l'ouvrage  $h$ ). L'indice  $n$  se réfère au réservoir  $n$ .

Le calcul des débits de franchissement est l'étape cruciale du modèle. Une large variété de méthodes sont utilisées pour ce faire. Les méthodes empiriques sont l'utilisation de corrélations issues d'études expérimentales en laboratoire. Nous détaillons cette approche dans la section 3.2. Des outils numériques de CFD, que nous présentons dans la section 3.3, permettent aussi de calculer les débits de franchissement.

La qualité de la modélisation de l'hydrodynamique de franchissement des vagues ne peut pas être le seul critère de choix d'une méthode d'estimation des débits de franchissement. La capacité à traiter les situations de houle irrégulière et les temps de calculs sont aussi des paramètres importants, puisqu'ils conditionnent la capacité à réaliser l'étape 2.

- Calcul de l'énergie électrique produite de la différence d'énergie potentielle entre chaque réservoir et le niveau marin. En notant  $R_{c,n}$  la hauteur de crête du réservoir  $n$ , la puissance récupérée par le dispositif pour l'état de mer  $(H_s, T_p)$  et le niveau marin  $h$  s'écrit en sommant les puissances récupérées par les  $N$  réservoirs constituant le dispositif houlomoteur à franchissement

$$P_{rec}(H_s, T_p, h) = \sum_{n=1}^N \rho g R_{c,n} q_{ov,n}(H_s, T_p, h)$$

Cette étape ne pose pas de difficulté conceptuelle. Des raffinements sont apportés par certains modèles à l'équation ci-dessus, par exemple en prenant en compte que le niveau d'eau dans le réservoir  $n$  n'est pas nécessairement la hauteur  $R_{c,n}$  de son seuil, ou en prenant en compte le rendement des turbines basse chute qui convertissent en électricité l'énergie potentielle captée dans les réservoirs.

#### Niveau 2 :

- Calcul du rendement annuel en tenant compte les probabilités d'apparition des états de mer et des niveaux de marée.

$$P_{rec, moy} = \iiint P_{rec}(H_s, T_p, h) f(H_s, T_p, h) dH_s dT_p dh$$

Cette étape ne pose pas non plus de difficulté conceptuelle. La mener à bien nécessite seulement que les temps de calculs des opérations de niveau 1 soient suffisamment réduits pour calculer la matrice de puissance pour l'ensemble des conditions du site.

### Estimation du débit de franchissement à partir de formulations empiriques

Les formules empiriques de Kofoed (2002), qui déterminent le débit de franchissement pour un système SSGC multichambres, résultent d'une régression appliquée à un ensemble de données de laboratoire. La forme provient elle-même des formules de Van der Meer et Jansen (2002). Kofoed a élargi les formules de Van de Meer à différentes configurations géométriques et des coefficients de corrections ont été appliqués. Il a également étudié la distribution verticale du franchissement pour prendre en compte les systèmes à franchissement à plusieurs réservoirs.

Le débit de franchissement dans le réservoir  $n$  est calculé par la relation :

$$q_n = \left( \prod_j \lambda_j \right) \sqrt{g H_s^3} \frac{A}{B} e^{C \frac{R_{c,n}}{H_s}} \left( e^{B \frac{R_{c,n+1}}{H_s}} - e^{B \frac{R_{c,n}}{H_s}} \right)$$

Le débit de franchissement recueilli dans le réservoir  $n$  dépend donc essentiellement :

- de la hauteur significative des vagues  $H_s$
- des hauteurs de crête des réservoirs  $R_{c,n}$

La période des vagues n'intervient pas dans la corrélation.

Dans la formule ci-dessus les hauteurs de crête des réservoirs  $R_{c,n}$  sont prises à partir du niveau d'eau moyen de la mer. La variation de ce niveau avec la marée est facilement prise en compte. En mesurant les hauteurs de crête des réservoirs, notées  $R'_{c,n}$ , et le niveau de marée  $z_{mar}(t)$  par rapport au niveau de la PBMA (niveau de Plus Basses Mers Astronomiques), il suffit de remplacer  $R_{c,n}$  dans la formule de Kofoed ci-dessous par

$$R_{c,n} = R'_{c,n} - z_{mar}(t)$$

tandis que la profondeur d'eau à la position de l'ouvrage est liée au niveau de marée par

$$h = z_{mar}(t) + h_o$$

où  $h_o$  est la profondeur d'eau à la position de l'ouvrage lorsque la marée est à son plus bas niveau.

Les valeurs empiriques de la corrélation sont les constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Différents jeux de valeurs ont été proposés par Kofoed selon les situations. Pour le réservoir le plus haut ( $n=N$ ) on prend  $R_{c,N+1} = \infty$ . Ceci ne pose pas de problème mathématique puisque  $B$  est toujours négatif.

Les facteurs correctifs (termes  $\lambda_j$ ) prennent en compte l'effet de la rugosité, l'obliquité de la houle, la présence de bermes, ...

Les corrélations de Kofoed sont utilisées pour dimensionner un système SSG sur la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz.

Le modèle WOPSim, développé à l'Université d'Aalborg (logiciel en accès libre), est fondé sur les corrélations de Kofoed, qu'il complète d'une gestion des niveaux d'eau dans les réservoirs et du fonctionnement des turbines. Il prend ainsi en compte :

- le niveau réel d'eau dans les réservoirs (qui n'est pas nécessairement au niveau des crêtes) ;
- les cas où un débit retourne à la mer pour cause de réservoir plein ;
- les niveaux hauts dans les réservoirs au-dessus desquels la turbine est mise en fonctionnement ;
- les niveaux bas dans les réservoirs en dessous desquels la turbine s'arrête ;
- le temps de démarrage et d'arrêt de la turbine dépendants de l'inertie du générateur ;
- les caractéristiques de la turbine définies par deux courbes dépendantes de la charge : le débit dans la turbine et l'efficacité.

Nous discutons aussi plus tard les résultats du modèle WOPSim obtenu pour un dimensionnement sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

### Utilisation de codes CFD pour la détermination des débits de franchissement

Dans le cadre du projet EMACOP (Abadie S., Mokrani, 2013) le code de calcul THETIS simulant les écoulements diphasiques a également été utilisé pour évaluer les débits de franchissement. Les écoulements sont représentés par une approche

eulérienne et les équations de Navier-Stokes sont résolues pour des fluides incompressibles. Une méthode de projection est utilisée et la discrétisation des équations est effectuée en suivant la méthode des volumes finis. Le déplacement de l'interface est déterminé par la méthode *Volume of Fluid*. Les obstacles sont modélisés pas la méthode des domaines fictifs associée à une pénalisation par perméabilité. D'un point de vue physique, cela revient à considérer que le solide est un milieu poreux à perméabilité nulle. Numériquement, on pénalise la perméabilité K du fluide sur la partie du domaine que l'on souhaite rendre solide via un terme supplémentaire dans l'équation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{du}{dt} + \frac{\mu u}{K} = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + {}^t \nabla u)]$$

En pratique, une valeur de 1040 est fixée pour la perméabilité d'un milieu solide.

Une zone dissipative est introduite dans le domaine de calculs afin d'amortir les ondes réfléchies sur les limites du domaine. Elle est obtenue en introduisant aussi un terme supplémentaire dans l'équation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{du}{dt} + L_{NS}u = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + {}^t \nabla u)]$$

Un batteur de houle génère la houle à partir d'un terme source dans l'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = S(x, y, t)$$

Des simulations effectuées sur 2 cas-test pour valider les calculs en houle régulière et irrégulière (spectres de JONSWAP) sont présentées ci-après.

### Franchissement de houles régulières

Le cas-test utilisé ici correspond aux essais à échelle réduite réalisés en laboratoire dont la géométrie est schématisée sur la figure 3-14. Six cas sont considérés et tous les essais ont été réalisés avec une hauteur de houle fixée à  $H_0=1\text{m}$ . Nous comparons dans la figure 3-15 les débits de franchissements

déduits des résultats des simulations numériques par Hu *et al.* (2000) (code numérique AMAZON), par Kobayashi et Wurjanto (1989) ainsi que par le code THETIS. Hu *et al.* et Kobayashi et Wurjanto utilisent un code résolvant les équations de Saint Venant. Contrairement à ces derniers, le code THETIS résout les équations de Navier-Stokes complètes, en incluant l'écoulement de la phase air. La figure 3-16 montre (à droite) que les valeurs moyennes de débit calculées numériquement sont proches des résultats expérimentaux et que le code THETIS fournit des résultats encore plus précis (Hu *et al.*, 2000).

Figure 3-14. Cas-test : Houles régulières

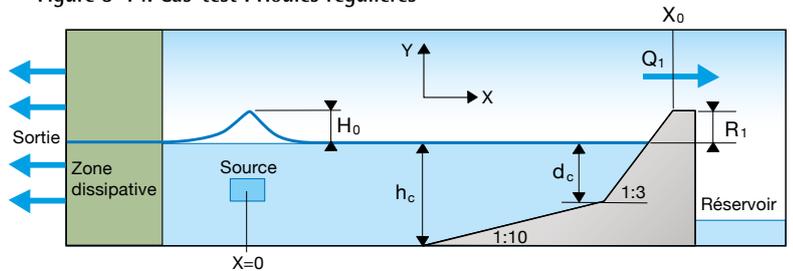
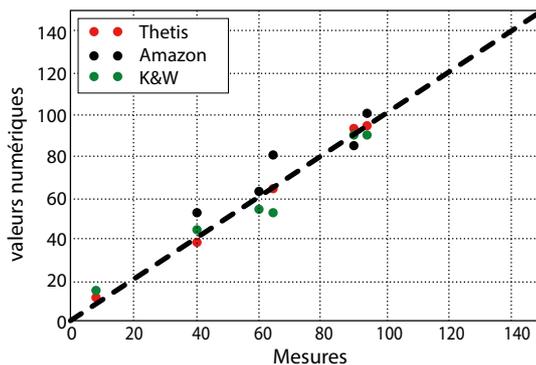


Figure 3-15. En haut : récapitulatif des caractéristiques des expériences et des résultats numériques et expérimentaux. En bas : Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux sur les débits de franchissement moyennés

Cas	$h_0$ [m]	$d_0$ [m]	$R_1$ [m]	$T_0$ [s]	$Q^*$ (10 <sup>-3</sup> ) Saville	$Q^*$ (10 <sup>-3</sup> ) AMAZON	$Q^*$ (10 <sup>-3</sup> ) K&W
1	3,0	1,50	0,50	4,73	64	81	53
2	4,0	2,00	0,67	6,55	90	86	81
3	4,0	0,75	0,50	7,98	60	64	54
4	4,0	1,50	0,50	7,98	94	101	91
5	4,0	1,50	1,00	7,98	40	53	45
6	4,0	1,50	1,50	7,98	8	24	16

$Q^*$  représente les débits de franchissements moyennés



Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux sur les débits de franchissement moyennés

### Franchissement de houles irrégulières

Le cas-test utilisé ici pour la validation des débits de franchissement par des houles irrégulières est celui publié par Kofoed (2002) dont la géométrie est présentée sur la figure 3-17. Les caractéristiques des houles irrégulières testées pendant les essais de Kofoed et les paramètres d'Iribaren correspondants sont donnés dans le tableau 3-1.

Le paramètre d'Iribaren

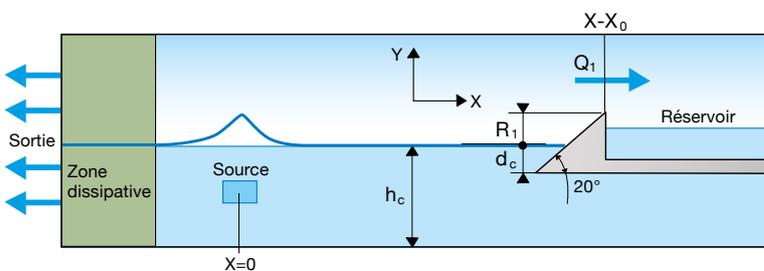
$$\xi_{p0} = \frac{T_p \tan(\alpha) \sqrt{g}}{\sqrt{2\pi} H_s}$$

qualifie le type de déferlement selon qu'il est de type plongeant ou gonflant. D'après la classification de Battjes (1974), les cas 8 et 10 donnés dans le tableau 3-1 correspondent à des déferlements gonflants tandis que tous les autres correspondent à des déferlements plongeants.

Tableau 3-1. Caractéristiques des houles irrégulières utilisées dans les essais de Kofoed (2002) et paramètres d'Iribaren correspondants

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_p$ [s]	0,566	0,849	0,849	1,131	1,131	1,131	1,414	1,697	1,697	1,131
$H_s$ [m]	0,4	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,16	0,12	0,16	0,04
$R_c$	2	1	0,8	0,64	0,55	0,5	0,48	0,64	2	2
$\xi_{p0}$	1,3	1,4	1,2	1,5	1,4	1,3	1,6	2,2	1,9	2,6

Figure 3-16. Schématisation de la modélisation THETIS de l'expérience de Kofoed (2002)



Un exemple de résultat de simulation (cas 5) est montré sur la figure 3-17. La formation du jet plongeant est bien observée (cas a). La figure 3-17 à droite présente les valeurs de débits moyennés pour chaque cas considéré, en fonction de la hauteur  $R_c^*$  (Hauteur de l'obstacle divisée par  $H_s$ ). Les débits sont adimensionnalisés par

$$Q_0 = H_0 \sqrt{g H_0}$$

À l'exception du cas 2, l'erreur par rapport aux valeurs expérimentales est de l'ordre de 50% et la tendance globale de la courbe est très proche des valeurs expérimentales.

Un des avantages du code THETIS réside dans la simulation des équations de Navier-Stokes sans hypothèse simplificatrice. Contrairement aux codes Saint Venant, il est possible de représenter des phénomènes locaux (forme locale du jet avant impact) qui peuvent avoir une influence sur le processus de franchissement.

Figure 3-17. Visualisation du processus de franchissement pour le cas 5 – Iso contours de la fraction volumique d'eau, (a) :  $t=10,2$  s, (b) :  $t=10,4$  s, (c) :  $t=10,6$  s, (d) :  $t=10,9$  s, (e) :  $t=11,2$  s

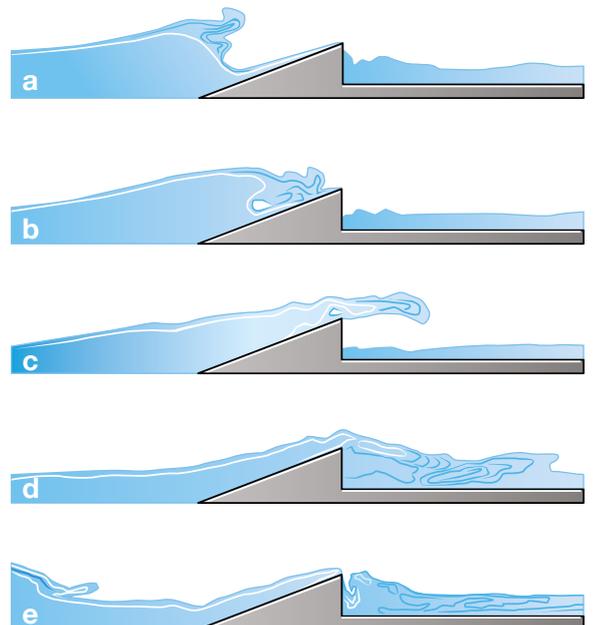
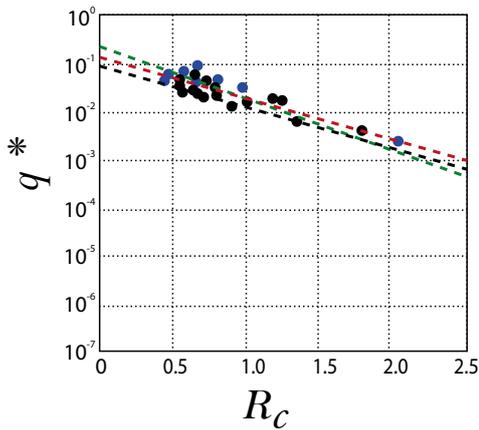


Figure 3-17 (suite).  
 Valeur des débits de franchissement moyennés –  
 (oo) : THETIS, (oo) : valeurs expérimentales [Kofoed  
 2002], (–) : Courbe de tendance issue de Kofoed (2002),  
 (---) : Formule de Van der meer (1995), (---) :  
 régression linéaire à partir des résultats THETIS



**Synthèse : dispositifs à déferlement**

Les outils de CFD (notamment le code THETIS et la méthode VOF) permettent de déterminer correctement les débits de franchissement, et par suite la production de ce type de WEC. Ils permettent aussi de calculer les efforts auxquels les vagues soumettent les structures. Leur utilisation pour le

calcul des débits de franchissement appliqué à l'étude d'un site réel est cependant pénalisée par des temps de calculs importants qui empêchent de déterminer la matrice de puissance dans son ensemble pour un coût raisonnable.

Le tableau 3-2 synthétise la capacité des différents modèles à réaliser les étapes des niveaux 1 et 2 en regards de divers critères.

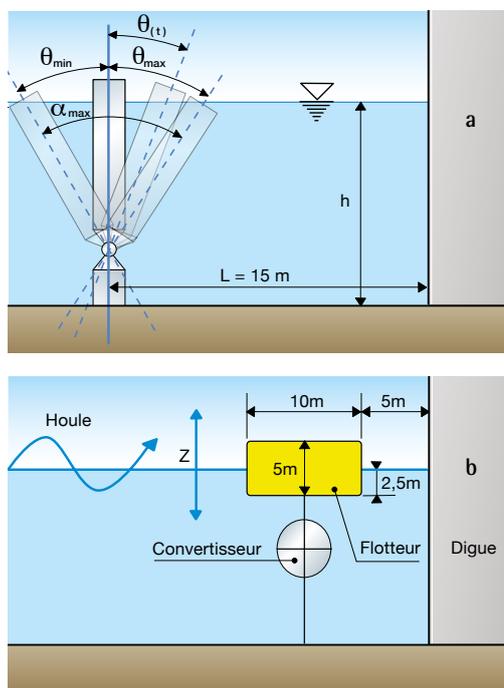
L'outil WOPSIM (de niveau 2), développé à l'université de Aalborg, se révèle le plus pertinent pour évaluer la puissance moyenne annuelle produite sur un site donné selon les critères définis dans le tableau 3-2. En incluant notamment des paramètres liés au fonctionnement des turbines et à la gestion de l'eau dans les réservoirs, il est le plus complet. Néanmoins, WOPSIM est un logiciel libre et l'utilisateur n'a pas accès au code source. L'utilisation du code WOPSIM présente des difficultés pour calculer la matrice de puissance pour l'ensemble des conditions de houle sur un site donné. Cette discussion est reprise dans l'étude de cas sur le site de Saint-Jean-de-Luz pour lequel le modèle WOPSIM et les corrélations de Kofoed ont tous deux été mis en œuvre.

Tableau 3-2. Pertinence des outils pour l'évaluation du rendement des dispositifs à franchissement

Coefficient du critère	Niveau 2						Total
	Niveau 1						
Outils	Modèle Hydrodynamique	Rapidité de calcul	Plusieurs réservoirs	Couplage au modèle de conversion d'énergie	Couplage à un modèle de rendement annuel	Disponibilité	
WOPSim	2	2	2	2	2	1	17
Van Der Meer	2	2	1	2	2	2	15
VOF (CFX) + tableur	2	0	2	2	2	1	13
Neural Network + tableur	2	2	0	2	2	2	12
Overtopping + tableur	2	1	0	1	0	1	7
CLASH + tableur	1	1	0	1	0	2	6

## 2.5 Dispositifs oscillants : Batteurs inversés et dispositifs oscillants flottants

Figure 3-18. Schémas de principe du dispositif de type batteur inversé (8a) et d'un dispositif pilonnant flottant (8b). L'ouvrage est une digue schématisée comme un mur vertical à l'arrière (vis-à-vis de la direction de propagation des vagues incidentes) des systèmes houlomoteurs



### Méthodologie

Du point de vue des méthodologies utilisées pour l'évaluation de la production des dispositifs houlomoteurs, on peut regrouper les dispositifs de type batteur inversés et les dispositifs oscillants flottants (figure 3-18).

Du point de vue de l'hydrodynamique, comme spécifié dans l'introduction, les outils numériques utilisant des modèles basés sur la théorie potentielle linéaire sont de bons candidats pour l'évaluation de la production de ce type de dispositifs houlomoteurs, dans la mesure où ces outils offrent un bon compromis entre la qualité du modèle hydrodynamique et la possibilité d'effectuer de nombreuses simulations en houles irrégulières requises pour

calculer la puissance moyenne annuelle absorbée par le dispositif sur un site donné. Des modèles BEM 3D de type Nemoh (Babarit et Delhommeau, 2015), Aquaplan (Delhommeau, 1993) ou WAMIT sont alors utilisés pour estimer les efforts de pression hydrodynamiques sur les dispositifs.

Une fois déterminé le modèle hydrodynamique, la méthodologie globale consiste à développer un modèle numérique « *Wave to Wire* » temporel ou fréquentiel basé sur la résolution de l'équation du mouvement, puis sur le calcul de la matrice de puissance du dispositif. La matrice de puissance obtenue est ensuite multipliée par le *scatter diagram* d'un site pour déterminer la puissance moyenne annuelle absorbée sur un site donné. Ce type d'approche est communément utilisé pour l'étude des dispositifs houlomoteurs.

De façon générale, le comportement d'un dispositif houlomoteur oscillant est donc régi par l'équation du mouvement suivante :

$$(M + \mu_\infty)\ddot{X} = F_{ex} - \int_0^t K(t - \tau)\dot{X}(\tau)d\tau + F_H + F_{PTO} + F_V + F_{OT}$$

- M : masse du dispositif
- $\dot{X}$ ,  $\ddot{X}$  : vitesse et accélération du dispositif
- $F_{ex}$  : efforts d'excitation dus à la houle
- $K(t)$  : effet mémoire des efforts de radiation
- $\mu_\infty$  : Matrice de masse d'eau ajoutée
- $F_H$  : effort hydrostatique
- $F_{PTO}$  : effort appliqué par le PTO
- $F_V$  : effort d'amortissement dû aux effets visqueux
- $F_{OT}$  : autres efforts (ancrages, butées, ...)

L'intégration de cette équation permet ainsi d'étudier les mouvements du dispositif et d'évaluer la puissance absorbée par le houlomoteur.

La réponse du dispositif à un état de mer irrégulier est alors déterminée en utilisant le principe de superposition :

$$F_{ex}(t) = \sum_i \left( \sqrt{2S(f_i)\Delta f} \right) F_{ex}(f_i) e^{-i(2\pi f_i t + \phi_i)}$$

Le *Power Take Off (PTO)* est le système qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Dépendamment du type de dispositif houlomoteur et du type de PTO associé, différents modèles de PTO peuvent être utilisés :

- Le modèle de PTO linéaire :

De façon générique, l'effort de PTO sera modélisé par un effet d'amortissement, qui pourra être complété, en fonction du type de dispositif houlomoteur par un terme d'inertie et / ou par un terme de raideur afin d'améliorer les capacités en termes de puissance absorbée.

$$F_{PTO} = -M_{PTO}\ddot{X} - B_{PTO}\dot{X} - K_{PTO}X$$

- Le modèle de PTO hydraulique :

Dans le cas d'un PTO hydraulique, on peut introduire un modèle de type amortissement de Coulomb selon :

$$F_{PTO} = -M_{PTO}\ddot{X} - C_{PTO}\text{sign}(\dot{X}) - K_{PTO}X$$

Les pertes par effet visqueux peuvent être prises en compte de façon simplifiée dans le modèle temporel en introduisant un effort de traînée issu de l'équation de Morison. Cette approche permet de prendre en compte de façon simplifiée les pertes par effet visqueux et de fournir un ordre de grandeur de ces pertes, mais les incertitudes associées à l'utilisation de cette méthode peuvent être relativement importantes. L'utilisation de codes CFD peut permettre d'obtenir une quantification plus fine de ces pertes.

La résolution de l'équation du mouvement permet dans un premier temps de calculer la RAO (*Response Amplitude Operator*) du système, c'est-à-dire sa réponse à une excitation harmonique.

Cet élément permet d'effectuer une première vérification de la dynamique du système (fréquence de résonance notamment) par rapport aux spécifications initiales du projet.

Une fois intégrée l'équation du mouvement, et connaissant les éléments de modélisation du PTO, la puissance absorbée par le dispositif est alors calculée. Pour une houle purement sinusoïdale, la

puissance moyenne absorbée sur une période de houle est :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T B_{PTO} \dot{X}^2 dt = \frac{1}{2} B_{PTO} \omega^2 |\hat{X}|^2$$

où  $\hat{X}$

est l'amplitude complexe du mouvement du houlomoteur.

À partir de ces éléments, la puissance absorbée par le WEC sur une large gamme d'états de mer irréguliers couvrant les capacités du WEC est évaluée pour former la matrice de puissance du dispositif. Cette matrice synthétise les capacités de production du WEC.

L'évaluation de la production moyenne sur un site s'effectue en multipliant cette matrice de puissance par la matrice donnant la probabilité d'occurrence des états de mer.

Enfin, l'optimisation des coefficients de PTO sur une plage de valeurs réalistes avec les contraintes mécaniques et physiques de l'ensemble, et ce sur chaque état de mer, permet d'optimiser les performances du houlomoteur.

#### Ressource houlomotrice

Dans le cadre du projet EMACOP (Michard *et al.*, 2013) et plus particulièrement dans les exemples d'évaluation des performances énergétiques des dispositifs oscillants, les *scatter diagrams* des sites envisagés sont évalués à la côte à partir de points ANEMOC au large et d'un calcul analytique de type Goda (2000) pour la propagation à la côte (voir chapitre 2). Chaque état de mer est représenté par un spectre de JONSWAP ( $\gamma=3,3$ ) ; le niveau de puissance de chaque état de mer est calculé comme suit :

$$P = \rho g \int_0^{\infty} C_g(f) S(f) df$$

Où :

$\rho$  : la masse volumique de l'eau

$g$  : la gravité

$C_g(f)$  : vitesse de groupe de la houle

$S(f)$  : spectre de houle

En connaissant le niveau de puissance de chaque état de mer et le *scatter diagram* de chaque site, la puissance moyenne annuelle de la houle est alors calculée sur les sites d'intérêt pour la profondeur d'eau à mi-marée. En effet, cette section présente uniquement les principes et capacités des outils d'évaluation du rendement, avec quelques exemples d'illustration qui ne prennent pas en compte la marée. En revanche, l'étude de cas sur le site de Saint-Jean-de-Luz prend en compte plus finement la ressource houlomotrice sur le site.

#### Hypothèses du modèle

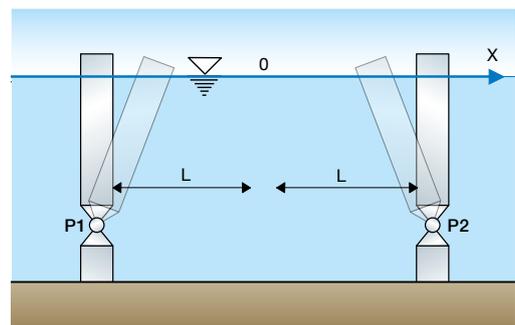
- Les interactions houle-structure sont modélisées dans le cadre de la théorie potentielle linéarisée ; le modèle est donc basé sur les hypothèses suivantes : le fluide est supposé incompressible et non visqueux et l'écoulement irrotationnel, les amplitudes du mouvement du dispositif houlomoteur sont petites devant ses dimensions et l'étude est ici limitée aux houles de faible amplitude devant leur longueur d'onde. Les effets du second ordre sont négligés.
- La direction de propagation de la houle incidente est perpendiculaire à la digue.
- La digue est verticale et totalement réfléchissante.
- Les pertes par effet visqueux sont prises en compte par le biais d'une approche simplifiée de type Morison qui permet simplement de fournir l'ordre de grandeur de ces pertes.

#### Principe de modélisation de la digue

L'approche utilisée consiste à modéliser la présence d'une digue verticale totalement réfléchissante par le biais d'une symétrie. Le principe de modélisation de la digue est ici illustré dans le cas du volet partiellement immergé : on introduit dans le modèle un second flap à 2 fois la distance à la digue et on lui impose un mouvement opposé à celui du premier flap. Ce modèle engendre une modification des efforts de radiation et des efforts d'excitation qui est décrite dans (Baudry *et al.*, 2015).

Pour les efforts d'excitation, la symétrisation du problème nous conduit à considérer la superposition de deux ondes : l'une se propageant vers les  $x$  positifs (voir figure 3-19), l'autre vers les  $x$  négatifs.

Figure 3-19. Principe de modélisation du flap devant une digue verticale totalement réfléchissante par le biais d'une symétrie



Par rapport à une configuration isolée (sans digue), la présence d'une digue verticale derrière le flap conduit à modifier les efforts de pression résultant des interactions fluide-structure (efforts d'excitation et de radiation) de la façon suivante :

#### Flap isolé

$$\tau_{WS} = \tau_{ex} - C_M(\omega)\ddot{\theta} - C_A(\omega)\dot{\theta}$$

Les coefficients hydrodynamiques (masse ajoutée  $C_M(\omega)$ , amortissement de radiation  $C_A(\omega)$  et effort d'excitation  $\tau_{ex}$ ) peuvent être calculés par un code BEM standard (NEMOH, Aquaplan, Wamit,...).

$\dot{\theta}$  et  $\ddot{\theta}$  sont respectivement la vitesse angulaire et l'accélération du flap.

### Flap à une distance L de la digue verticale

Lorsqu'il est placé devant une digue totalement réfléchissante, le couple d'excitation vu par le flap est le suivant :

$$\tau_{ex}^d = \tau_{ex1}^+ + \tau_{ex1}^- e^{2ikL}$$

La symétrie introduite pour modéliser la digue conduit à modifier également les efforts de radiation pour prendre en compte l'effort induit par la présence du 2<sup>nd</sup> flap, pour aboutir à l'expression suivante des efforts hydrodynamiques :

$$\tau_{WS}^{bw}(P) = \tau_{ex}^d(P) - (CM_{1155} - CM_{1255})\ddot{\theta} - (CA_{1155} - CA_{1255})\dot{\theta}$$

$CM_{1155}$  et  $CM_{1255}$  sont respectivement les coefficients de radiation (calculés par un code BEM standard) correspondant à un effort sur le flap 1 associé à un mouvement de tangage du flap 1, et à un mouvement du flap 2 (respectivement  $CA_{1155}$  et  $CA_{1255}$ ).

Cette représentation de la digue comme un mur vertical est certes très idéalisée, puisque les variations topographiques des fonds marins au voisinage de la digue et du système houlomoteur sont ignorées et la digue est ici parfaitement réfléchissante, mais elle permet d'étudier à moindre coût l'effet de la réflexion des vagues par la digue sur la récupération de la puissance des vagues par le dispositif oscillant.

Le positionnement d'un dispositif houlomoteur oscillant devant une digue doit être effectué avec soin en regard des valeurs de la longueur d'onde de la houle  $\lambda$  vis-à-vis de la distance L à laquelle le dispositif est placé du mur vertical.

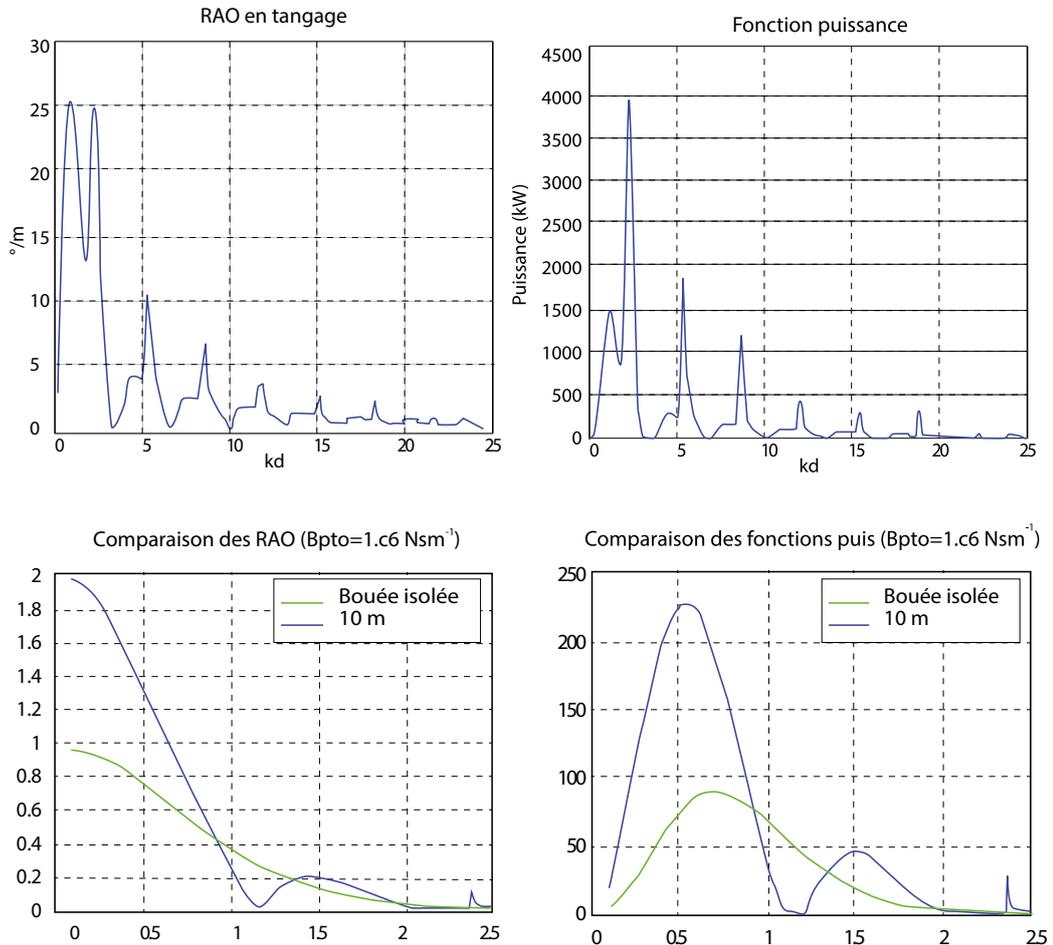
On compare, sur la figure 3-20, l'amplitude de la réponse en tangage et en pilonnement d'un volet oscillant et d'une bouée pilonnante, respectivement, selon sa distance L au mur réfléchissant. Les variations de la puissance récupérée sont aussi tracées. Dans les deux cas, on remarque que la RAO (*Response Amplitude Operator* qui est défini comme l'amplitude de la fonction de transfert) et la fonction puissance comportent des minima pour des distances L qui sont liées à la position des nœuds et des ventres de l'onde stationnaire produite devant un mur vertical réfléchissant.

Pour le volet oscillant (figure 3-20a), des développements analytiques récents (Sarkar *et al.*, 2013) pour un système similaire montrent que les minima du couple d'excitation sont situés en  $kL = m\pi$  ( $k = 2\pi/\lambda$  : nombre d'onde, L : distance à la digue). La position de ces minima correspond aux ventres de l'onde stationnaire développée devant la digue, là où la composante horizontale de la vitesse est nulle. Lorsque le volet oscillant est placé en ce point, il n'est plus excité par les vagues, son mouvement s'éteint et la puissance récupérée s'annule. C'est bien ce que confirme la figure.

Pour la bouée pilonnante (figure 3-20b), la composante verticale de la vitesse s'annule aux nœuds de l'onde stationnaire devant le mur, c'est à dire aux positions  $kL = (2m+1)\pi/2$ . Lorsque la bouée est placée en ce point, la réponse en pilonnement et la puissance récupérée s'annulent.

La figure 3-20 explicite l'intérêt qu'il y a à placer un volet oscillant près d'un nœud de l'onde stationnaire, tandis que la bouée pilonnante devra préférentiellement être placée près d'un ventre. Elle montre que la présence du mur peut modifier considérablement les conditions de récupération de l'énergie des vagues.

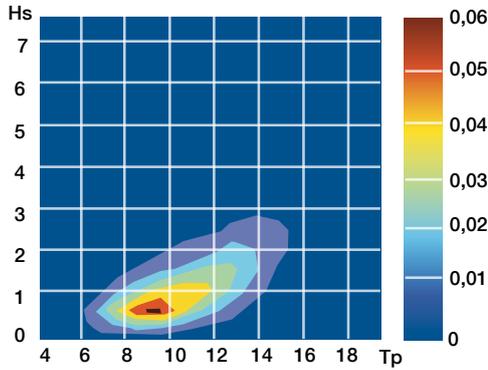
Figure 3-20. (a) : RAO et puissance récupérée par un volet oscillant en fonction  $kd$  ( $k$  : nombre d'onde,  $d$  : distance à la digue). (b) : RAO et puissance récupérée par un flotteur oscillant. Comparaison entre une bouée placée à 10m de la digue (bleu) et une bouée isolée (vert)



Cette illustration de l'effet de la présence d'une digue verticale derrière le WEC a été effectuée dans le cas théorique d'une houle monochromatique, mais les simulations en houles irrégulières ont montré que les critères de distance à la digue pour optimiser la puissance absorbée par les WEC exposés ci-dessus restaient valables pour des spectres de JONSWAP de paramètre de forme  $\gamma=3,3$ . Le site de Saint-Jean-de-Luz a été choisi à titre d'exemple dans un premier temps pour illustrer les capacités des outils d'évaluation du rendement. La puissance houlomotrice sur ce site a été évaluée pour une profondeur de 10 m, sans prise en compte de la marée. Les puissances moyennes annuelles évaluées pour différentes distances à la digue pour les deux

types de WEC sont données en illustrant la nécessité de placer le dispositif à une distance optimale en fonction du principe de fonctionnement du WEC, comme mentionné dans le paragraphe ci-dessus (Baudry *et al.*, 2015). Par ailleurs, les puissances moyennes annuelles absorbées sur ce même site pour des dispositifs houlomoteurs isolés, sans digue, montrent le gain potentiel apporté par une digue verticale idéale sur les performances du dispositif houlomoteur. Dans le cadre d'une étude de cas, il sera indispensable de prendre en compte le coefficient de réflexion de la digue, qui sera au mieux de 75%, ce qui atténuera nécessairement les performances énergétiques du dispositif par rapport au cas de la digue verticale idéale présenté ici.

Figure 3-21. À gauche : *Scatter diagram* du site de Saint-Jean-de-Luz, À droite : illustration des capacités de l'outil d'évaluation du rendement –  $P_w$  : puissance absorbée sans prendre en compte le rendement du convertisseur – Effets visqueux pris en compte. Incertitudes associées à ces résultats :  $\pm 20\%$  pour la bouée pilonnante, et  $\pm 30\%$  pour le volet oscillant (prise en compte des pertes par effet visqueux notamment)



Site de Saint-Jean-de-Luz – Puissance houlomotrice incidente : 16,5kW/m				
Configuration digue / WEC	Sans digue	d=10m	d=15m	d=30m
<b>Bouée pilonnante</b>				
Pw (kW)	26	53		26
Capture width ratio (%)	16	32		16
<b>Volet oscillant</b>				
Pw (kW)	150		320	349
Capture width ratio (%)	46		95	105

## 2.6 Colonnes d'eau oscillantes

De la même façon que pour les autres dispositifs houlomoteurs, il existe différents types d'outils numériques permettant de modéliser le comportement des OWC, comme mentionné dans les schémas de la figure 3-22.

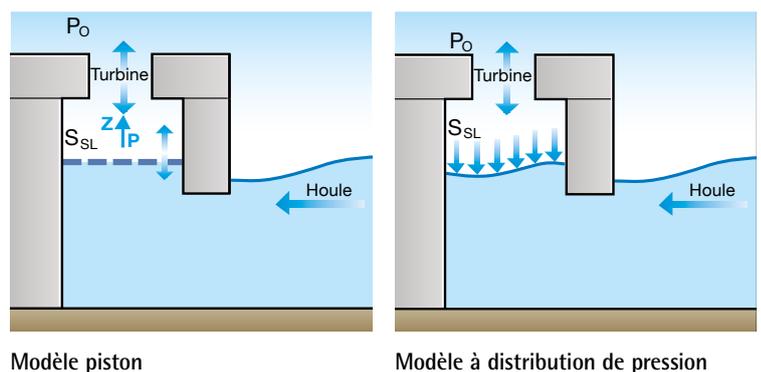
L'évaluation de la production électrique d'une OWC nécessite de prendre en compte les différents étages de conversion. Ce chapitre sera consacré à la présentation de méthodologies permettant d'évaluer la puissance pneumatique d'une OWC ; les rendements de la turbine, du générateur ainsi que l'évaluation des pertes dans la chaîne de production ne sont pas présentés ici.

Différentes approches de modélisation des OWC se sont succédées depuis le milieu des années 1970 : Evans (1978) a développé un modèle analytique pour une géométrie simplifiée d'OWC, en 2D, basé sur la théorie potentielle linéaire pour la résolution du problème hydrodynamique, la surface libre interne étant considérée comme un piston plan horizontal. Ce piston est modélisé comme un corps flottant dont la masse d'eau ajoutée, l'amortissement de radiation et efforts d'excitation peuvent être calculés à l'aide des codes de diffraction-radiation standards (NEMOH (Babarit et Delhommeau (2015), WAMIT, etc.). Ce type de modèle simplifié ne prend pas en compte les déformations de la surface libre interne, ce qui peut aboutir à des résultats irréalistes.

Toutefois, le modèle piston reste valable lorsque les contraintes suivantes sont respectées : les dimensions de la surface libre interne sont très petites par rapport à la longueur d'onde de la houle incidente et également petites par rapport à la longueur de l'OWC. Des modèles plus rigoureux faisant l'hypothèse d'une distribution de pression uniforme sur la surface libre interne (alors déformable) sont développés depuis les années 80 et appliqués à des géométries complexes (Delauré *et al.*, 2001).

Les modèles de type piston plan sont toujours communément utilisés car ils permettent d'utiliser directement les modèles d'interaction houle-structure d'usage courant en génie océanique et naval développés dans le cadre de la théorie des écoulements potentiels.

Figure 3-22. Modèles utilisables



Modèle piston

Modèle à distribution de pression

La compressibilité de l'air dans la chambre de l'OWC est un facteur important à prendre en compte dans le processus de modélisation d'une OWC. La compressibilité de l'air agit comme un ressort, de telle façon que la vitesse de l'air entrant dans la turbine est déphasée par rapport à la vitesse de la surface libre. Les équations thermodynamiques sont fondamentalement non-linéaires, mais peuvent être linéarisées en faisant les mêmes hypothèses que pour l'hydrodynamique sur les amplitudes du mouvement qu'on supposera petites.

Le choix d'une modélisation fréquentielle ou temporelle des OWC se pose et dépend du degré de complexité du modèle et des objectifs fixés en termes d'évaluation des performances de l'OWC.

En première approche et, sous réserve que la surface libre interne soit de petites dimensions devant la longueur d'onde de la houle incidente et la longueur de l'OWC, le choix d'un modèle fréquentiel, avec une approche de type piston plan peut être envisagé pour évaluer le rendement d'une OWC équipée par exemple d'une turbine WELLS dont les caractéristiques pression / débit sont linéaires.

Dans un deuxième temps, l'approche temporelle permet d'intégrer des non-linéarités dans le modèle tant dans le modèle hydrodynamique que dans la chaîne de conversion d'énergie (modèle de compressibilité de l'air, vannes de décharge, stratégies de contrôle, caractéristiques de turbine), pour aboutir à des modèles plus précis d'OWC mais plus coûteux en temps de calcul. Également, des efforts d'excitation non linéaires peuvent être introduits, tout comme une modélisation non linéaire de la surface libre.

Des modèles de type CFD (*Computational Fluid Dynamics*) peuvent être envisagés pour représenter finement la physique de l'écoulement dans l'OWC (Zhang *et al.*, 2012)). Dans le cas d'une OWC, l'utilisation de ce type de modèle peut être particulièrement intéressant pour la compréhension et la prise en compte de phénomènes de type impact de vagues sur l'OWC, détachement de vortex

au niveau du mur avant, ou *sloshing* dans la chambre. Cependant, la durée des calculs, la difficulté de mise en œuvre de simulations 3D et la difficulté liée à la génération/propagation de vagues dans ce type de modèle restreint l'utilisation de ce type de modèles à des cas de houle isolés. Par exemple, ce type de modèle peut être envisagé pour évaluer l'importance des effets visqueux et ainsi évaluer les incertitudes liées à l'utilisation de modèles potentiels linéaires sur des cas de houles assez fortes.

L'évaluation des performances énergétiques d'une OWC requiert de pouvoir effectuer un grand nombre de simulations sur des états de mer variés (*scatter diagram* d'un site) ; des méthodes présentant un bon compromis temps de calcul / précision des résultats telles que les approches potentielles linéaires pour la résolution du problème hydrodynamique sont donc à privilégier dans le cadre de notre problématique.

## Outils d'évaluation du rendement des OWC : Méthodologie

### ■ Modèles basés sur une approche de type piston plan

Comme précisé dans l'introduction de ce chapitre, les hypothèses suivantes doivent être vérifiées pour pouvoir utiliser une approche de type piston plan :

- les dimensions de la surface libre interne doivent être très petites devant la longueur d'onde de la houle incidente ;
- les dimensions de la surface libre interne doivent être petites devant la longueur de l'OWC.

Dans le cadre de la théorie potentielle, l'équation du mouvement des corps flottants est adaptée à un degré de liberté pour représenter le mouvement de pionnement de la masse d'eau à l'intérieur d'une OWC.

### 1) Modèles temporels

Cette approche simplifiée ne prend pas en compte les déformations de la surface libre et peut être déclinée soit pour un modèle fréquentiel, soit pour un modèle temporel :

$$(m + A_{\infty})\ddot{z}(t) = F_{exc}(t) - \int_0^t K(t-\tau)\dot{z}(\tau)d\tau + F_{hstat}(t) + F_{visc}(t) + F_{air}(t)$$

$m$  : masse d'eau à l'intérieur de l'OWC

$A_{\infty}$  : masse d'eau ajoutée à fréquence infinie,

$z(t)$  : déplacement de la surface libre (en pilonnement)

$F_{exc}(t)$  : effort d'excitation due aux vagues incidentes

$F_{hstat}(t)$  : rappel hydrostatique

$F_{visc}(t)$  : efforts modélisant les effets visqueux au niveau du mur avant

$F_{air}(t)$  : efforts aérodynamiques agissant sur la surface libre interne

$\int_0^t K(t-\tau)\dot{z}(\tau)d\tau$  : terme d'effet mémoire des efforts de radiation.

Détaillons les termes du second membre de cette équation :

- Effort hydrostatique :

$F_{hstat}(t) = -\rho g S z(t)$ , avec  $\rho$  la masse volumique de l'eau,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $S$  l'aire de la surface libre interne.

- Pertes par effet visqueux :

Les pertes par effets visqueux au niveau du mur sont exprimées en fonction de la vitesse verticale de la masse d'eau à l'intérieur de la chambre et peuvent se décomposer en une contribution linéaire et non linéaire comme suit :

$$F_{visc}(t) = -k\dot{z}(t) = -(k_l + k_{nl}|\dot{z}(t)|)\dot{z}(t),$$

où les coefficients  $k_l$  et  $k_{nl}$  peuvent être déterminés numériquement ou expérimentalement (Itturioz et al., 2014).

- Effort dû à la pression de l'air dans la chambre :

Ensuite, il est nécessaire de modéliser l'influence de l'air présent dans la chambre sur les mouvements de la surface libre interne. Le terme  $F_{air}(t)$  représente ainsi la force due à la pression de l'air dans la chambre :  $F_{air}(t) = -\Delta P(t)S$  ;  $\Delta P(t)$  représentant la pression dynamique dans la chambre.

• Enfin, il est nécessaire de modéliser la turbine associée à l'OWC, ou d'envisager une modélisation simplifiée du dispositif de PTO en considérant un orifice au niveau du plafond de l'OWC si la turbine est de type impulse, ou une couche de matériau poreux dans le cas d'une turbine Wells (caractéristique Pression-Débit Linéaire).

Pour obtenir l'équation qui permet de décrire les variations de la pression de l'air à l'intérieur de la chambre, les hypothèses suivantes sont effectuées :

- (1) : l'air est considéré comme un gaz parfait ;
- (2) : les compressions et détente sont considérées comme adiabatiques et isentropiques.

Le débit massique à travers la valve doit être égal à la variation de la masse d'air dans la chambre :

$$\dot{m}_{air} = -\frac{d}{dt}(\rho_{air}(t)V_{air}(t))$$

Le volume d'air dans la chambre est exprimé en fonction de la position de la surface libre interne :

$$V_{air}(t) = V_0 - S z(t)$$

Sous les hypothèses thermodynamiques ci-dessus (processus de compression et détente isentropiques), l'égalité suivante doit être vérifiée :

$$\rho_{air}(t)(P_0 + \Delta P(t))^{-1/\gamma} = C_1$$

avec  $C_1$  une constante, et  $\gamma=1,4$  pour l'air aux températures considérées.

• Dans le cas où le PTO est modélisé de façon simplifiée par la présence d'un orifice, le débit massique peut alors être exprimé comme suit :

$$\dot{m}_{air} = c_d A_0 \text{sgn}(\Delta P(t)) \left[ \frac{2m_{air}(t)|\Delta P(t)|}{V_{air}(t)} \right]^{1/2}$$

où  $A_0$  est la section de l'orifice, et  $c_d$  le coefficient de décharge.

Dans le cas où un modèle simplifié de turbine de Wells est envisagé, turbine dont la courbe caractéristique pression/débit peut être considérée comme linéaire, le débit d'air à travers la turbine s'exprime comme suit :

$$p_c(t) = K_T q(t) \text{ et } \dot{m} = \rho_a K_T \Delta P$$

La résolution des équations permet d'évaluer le déplacement de la surface libre et la pression dans la chambre afin d'évaluer la puissance absorbée par l'OWC qui s'exprime comme suit :

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T p_c(t) q(t) dt$$

où  $p_c$  est la pression de l'air dans la chambre, et  $q$  est le débit volumique :

$$q(t) = - \frac{dV_{air}(t)}{dt} - \frac{V_0}{\gamma P_a} \frac{dp_c(t)}{dt}$$

## 2) Modèles fréquentiels

L'équivalent fréquentiel de l'équation qui permet de représenter le mouvement de pilonnement de la masse d'eau à l'intérieur de l'OWC est :

$$\left[ -\omega^2(m+A) + i\omega B + K_H \right] Z = F_e + F_{air} + F_{visc}$$

Avec:

$\omega$  : la pulsation

$m$  : la masse d'eau à l'intérieur de la chambre

$A(\omega), B(\omega)$  : la masse d'eau ajoutée et amortissement de radiation (éléments qui peuvent être calculés par un code BEM)

$K_H = \rho g S$  : la raideur hydrostatique

$Z$  : le déplacement vertical de la surface libre interne

$F_e$  : les efforts d'excitation (houle incidente)

$F_{air} = -p(\omega)S$  l'effort permettant de modéliser l'influence de l'air sur les mouvements de la surface libre interne

$F_{visc}$  : le terme permettant de modéliser les pertes par effets visqueux à l'entrée de la chambre

On suppose que l'air est un gaz parfait et que les processus de compression et décompression sont isentropiques.

La masse volumique de l'air est ainsi donnée par :

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/\gamma}$$

Après linéarisation, sa dérivée s'exprime comme suit :

$$\dot{\rho} = \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \dot{p}$$

On obtient alors l'expression du débit d'air à travers la turbine :

$$\dot{m} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \frac{\rho_0}{\gamma p_0} \dot{p} V_0 + \rho_0 \dot{V}$$

- Dans le cas où un modèle de turbine de WELLS est envisagé comme PTO, on peut utiliser les coefficients de pression et de débit adimensionnels, avec la relation linéaire suivante (Falcao et Rodrigues, 2002)

$$\Phi = K \Psi$$

Où

$$\Psi = \frac{p}{\rho_0 N^2 D^2}$$

est le coefficient de pression

Et

$$\Phi = \frac{\dot{m}}{\rho_0 N D^3}$$

est le coefficient de flux.

Avec  $D$  : diamètre de turbine (m) et  $N$  : vitesse de rotation (rad/s).

Dans le cadre de l'approche fréquentielle, les différentes variables de notre système seront notées comme suit :

$$\{p, \dot{m}, z\} = \{\hat{p}, \hat{m}, \hat{z}\} e^{-i\omega t}$$

où  $\hat{p}$ ,  $\hat{m}$ ,  $\hat{z}$  sont les amplitudes complexes de la pression, du débit, et du déplacement de la surface libre. Le volume d'air dans la chambre est donné par :

$$\hat{V} = V_0 + S_{SL} (h_0 - \hat{z})$$

En utilisant les coefficients adimensionnalisés de pression et débit, on obtient les expressions suivantes :

$$\frac{KD\hat{p}}{N} = -\frac{d\rho\hat{V}}{dt} = \frac{i\rho_0 V_0 \omega}{\gamma P_0} \hat{p} - i\omega S_{SL} \hat{z}$$

et

$$\left( \frac{KD}{N} - \frac{i\rho_0 V_0 \omega}{\gamma P_0} \right) \hat{p} = -i\omega S_{SL} \hat{z}$$

On obtient :

$$\hat{p} = \frac{\rho_0^2 \omega^2 S_{SL} V_0}{\gamma P_0 D_1} \hat{z} - i \frac{\rho_0 \omega S_{SL} KD}{N D_1} \hat{z}$$

avec

$$D_1 = \left( \frac{KD}{N} \right)^2 + \left( \frac{\rho_0 \omega V_0}{\gamma P_0} \right)^2$$

Enfin, à partir de ces éléments, l'équation de mouvement est résolue dans le domaine fréquentiel. Les coefficients de radiation  $A(\omega)$  et  $B(\omega)$ , ainsi que les efforts d'excitation  $F_e(\omega)$  peuvent être calculés par un code BEM (WAMIT, NEMOH<sup>1</sup>).

Une fois évalués la pression dans la chambre, et le débit volumique d'air  $Q_T$ , la puissance pneumatique moyenne absorbée par l'OWC est alors évaluée comme suit :

$$\langle P_{OWC} \rangle = \langle \text{Re}(p e^{i\omega t}) \text{Re}(Q_T e^{i\omega t}) \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(p^* Q_T)$$

Le rendement pneumatique défini comme le quotient de la puissance pneumatique sur la puissance de la houle incidente

$$\xi = \frac{\langle P_{OWC} \rangle}{\langle P_{inc} \rangle}$$

de l'OWC est alors calculé pour une houle régulière de puissance incidente

$$\langle P_{inc} \rangle = \frac{1}{2} \rho g A^2 C_g L_c$$

sur la largeur  $L_c$  de l'OWC, où  $A$  est l'amplitude de la houle, et  $C_g(f)$  la vitesse de groupe.

La puissance moyenne convertie pour un état de mer  $i$  donné est alors évaluée :

$$P_{i,OWC} = \rho g \sum_f \xi_{OWC}(f) C_g(f) S_{i,\eta}(f) df$$

Où  $S_{i,\eta}(f)$  est le spectre de l'état de mer  $i$ ,  $C_g$  la vitesse de groupe.

Pertes par effets visqueux à l'entrée de la chambre : Les effets visqueux à l'entrée de la chambre sont ici pris en compte de façon simplifiée par le biais d'un amortissement visqueux globalisé et linéarisé s'exprimant comme suit :  $F_v = -B_v \dot{z}$ , où  $B_v$  peut être déterminé numériquement ou expérimentalement (Itturioz *et al.*, 2014).

#### ■ Les modèles à distribution de pression

Ici la surface libre interne dans la chambre est déformable, à l'inverse du modèle piston. Le problème hydrodynamique est décomposé en deux sous-problèmes élémentaires de diffraction et radiation, de telle manière que le potentiel des vitesses s'écrit :

$$\varphi = \varphi_D + \varphi_R$$

$\varphi_D$  est résolu en considérant un flux nul à toutes les frontières du domaine. Le débit de diffraction  $Q_D$  (chambre ouverte) est défini comme étant le débit dû à la houle incidente, lorsque :

$$p_c = 0 : Q_D = \iint_{SL} \frac{\partial \varphi_D}{\partial z} \cdot n ds$$

Le débit de radiation est quant à lui lié aux variations de pression dans la chambre, sans houle incidente.

<sup>1</sup> Le logiciel Nemoh n'est actuellement pas adapté aux géométries concaves caractéristiques des OWC ; une approche simplifiée permettant tout de même son utilisation pour le calcul des coefficients hydrodynamiques est proposée à titre d'exemple

Si un modèle à distribution de pression est utilisé, on introduit la décomposition suivante pour le débit volumique  $q(t)$  :

$$q(t) = q_r(t) + q_d(t)$$

où :

$q_r$  est le débit de radiation dû à la pression oscillante  $P_0$  dans la chambre en l'absence de houle incidente et  $q_d$  est le débit dû à la houle incidente si la pression dynamique dans la chambre est nulle (chambre ouverte).

Les fonctions de transfert de diffraction et radiation sont respectivement définies comme suit :

$$H_D = \frac{Q_D}{i\omega S_{sl} A}$$

où  $A$  est l'amplitude de la houle incidente et

$$H_R = \frac{Q_R}{i\omega S_{sl} P_0}$$

Dans cette configuration, pour la résolution du problème hydrodynamique, la surface libre interne est modélisée par une surface déformable dont le comportement peut être décrit par une superposition modale. Delauré et Lewis (2000) ont montré qu'un modèle basé sur les 2 premiers modes (mode piston et premier mode longitudinal) permettait d'obtenir un modèle d'OWC suffisamment précis. L'intérêt de ce type d'approche par rapport à un modèle de type piston est qu'il prend en compte des modes qui ne sont pas nécessairement productifs (mode de *slashing* par exemple) et dont l'omission dans un modèle de type piston peut engendrer une surestimation de la puissance absorbée par l'OWC.

Le débit de radiation est défini comme suit :

$$Q_R = \iint_{S_i} \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} n dS$$

et le potentiel des vitesses  $\varphi_R$  est exprimé par le biais d'une superposition modale.

Le débit volumique total s'écrit alors :

$$Q_T = Q_R + Q_E = \frac{P_c}{\Delta}$$

où  $p_c$  est la pression pneumatique (complexe) dans la chambre et  $\Delta$  est un coefficient complexe qui dépend du mécanisme de PTO, de la compressibilité de l'air et des pertes aérodynamiques. Lorsque ces deux derniers paramètres sont supposés négligeables, le débit d'air est en phase avec les déplacements de la surface libre et  $\Delta = \delta$  est alors réel.

On peut exprimer le débit volumique total à partir des fonctions de transfert en diffraction et radiation :

$$Q_T = i\omega S_{sl} [A H_D + p_c H_R] = \frac{P_c}{\delta}$$

puis :

$$p_c = \frac{i\omega S_{sl} A H_D}{\frac{1}{\delta} - i\omega S_{sl} A H_R}$$

et

$$Q_T = \frac{i\omega S_{sl} A H_D}{1 - i\omega \delta S_{sl} A H_R}$$

Les fonctions de transfert de diffraction et radiation peuvent être calculées à l'aide d'un code de diffraction-radiation standard (WAMIT, ...)

Une fois connus  $p_c$  et  $Q_T$ , la puissance pneumatique peut être calculée aisément :

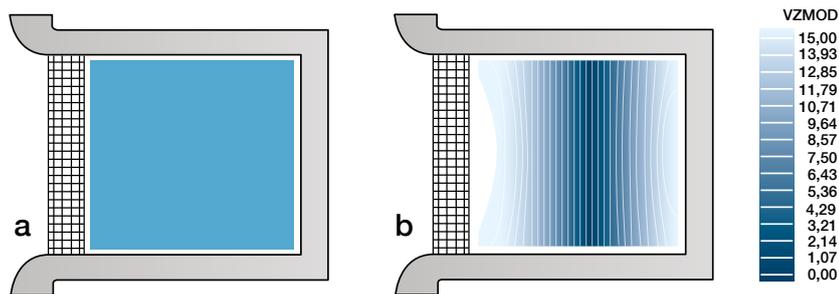
$$\langle P_{owc} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(p^* Q_T)$$

Puis la puissance moyenne absorbée sur un état de mer donné est calculée comme précédemment (voir S. Modèle piston).

Brito-Melo (1999) a étendu un code de diffraction / radiation initialement développé pour l'étude de corps flottants à des systèmes de type colonnes d'eau oscillantes en complétant le problème de radiation par un terme permettant de tenir compte des variations de pression dans la chambre. Cet ajout se traduit par une modification de la surface libre interne qui est modélisée par une surface sans masse déformable décrite avec le mode piston et le mode de *sloshing* (voir figure 3-23). Les équations intégrales du problème aux limites sont établies en appliquant la 3<sup>e</sup> formule de Green et une distribution mixte de sources et doublets est utilisée. Afin de

résoudre les équations intégrales, les surfaces d'intégration sont discrétisées sur chaque panneau et le système est résolu par une méthode de Gauss. Ces modèles sont intéressants pour évaluer le rendement des dispositifs, car ils permettent d'atteindre un bon compromis entre la représentation physique satisfaisante du comportement des OWC en condition de production (ces modèles sont valides pour des houles faibles à modérées) et des temps de calcul raisonnables. Egalement, ce sont des modèles 3D qui peuvent prendre en compte l'effet de l'incidence de la houle, ou encore de la bathymétrie locale.

Figure 3-23. Résultats de A. Brito-Melo (1999): Module du champ de vitesse vertical dans la chambre aux fréquences 0,62rad/s (a) et 1,68rad/s (b)



### ■ Les apports des modèles CFD

Les modèles basés sur la théorie potentielle linéaire permettent comme on vient de le voir d'évaluer les performances énergétiques globales des OWC, avec des temps (et coûts associés) de calculs raisonnables. Cependant, de nombreux effets non linéaires, comme la réponse de l'OWC à des houles de grande amplitude ou les effets liés à la prise en compte de la viscosité du fluide, à la turbulence ou aux détachements de vortex au niveau du mur avant ne peuvent être modélisés par ce type de modèle. Pour affiner la simulation on pourra alors utiliser des codes CFD pour modéliser finement la physique des écoulements au niveau du mur avant, les pertes par effets visqueux au niveau du mur avant, ou également effectuer quelques évaluations de puissance pneumatique absorbée sur des configurations de houle assez sévères pour évaluer les incertitudes liées à l'utilisation de modèles potentiels sur ce type d'états de mer. Toutefois, les résultats issus de ces

codes requièrent également une validation expérimentale. L'utilisation de codes CFD est très coûteuse en temps de calcul ; les modèles développés sont donc essentiellement 2D et la génération/propagation de houle est également un point limitant, notamment pour les houles irrégulières.

De nombreux modèles CFD d'OWC ont été développés ces dernières années (Zhang *et al.* (2012), Rameliarison *et al.* (2015), Karmath *et al.* (2015)).

Citons à titre d'exemple Zhang *et al.* qui utilisent une méthode RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) avec une discrétisation de type volumes finis, une méthode level-set diphasique pour la capture de la surface libre, une approche de type frontière immergée pour modéliser l'interaction des vagues avec une OWC. L'étude considère une géométrie simplifiée d'OWC et la turbulence n'est pas prise en compte dans le modèle. Le modèle permet de bien représenter la surface libre interne et

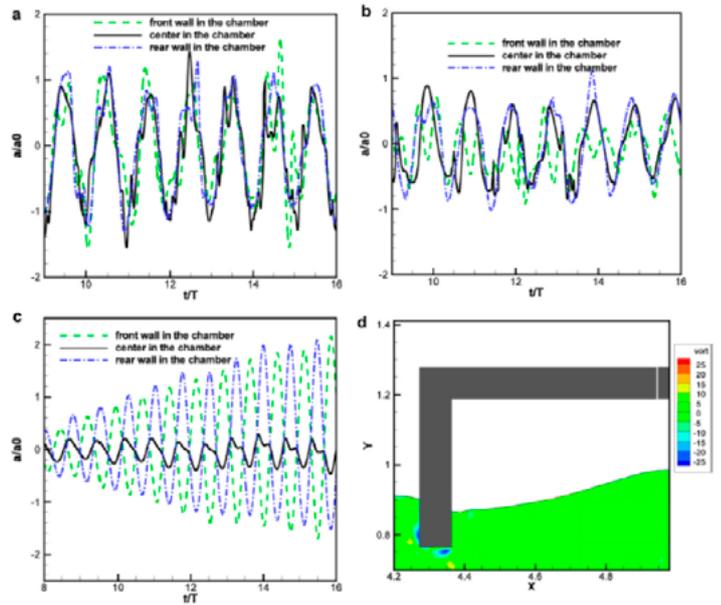
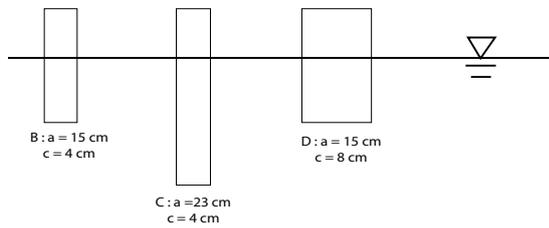
la distribution de pression dans la chambre à différents instants et de montrer ainsi la formation de vortex au niveau du mur avant et la dissipation visqueuse au niveau de l'orifice. L'auteur étudie également l'effet de l'immersion, de l'épaisseur du

mur et de la taille de l'orifice avant sur les performances de l'OWC.

Figure 3-24. Modèle numérique d'une colonne d'eau oscillante par Zhang *et al.* (2012)

**Modèle numérique de Zhang *et al.* (2012)**

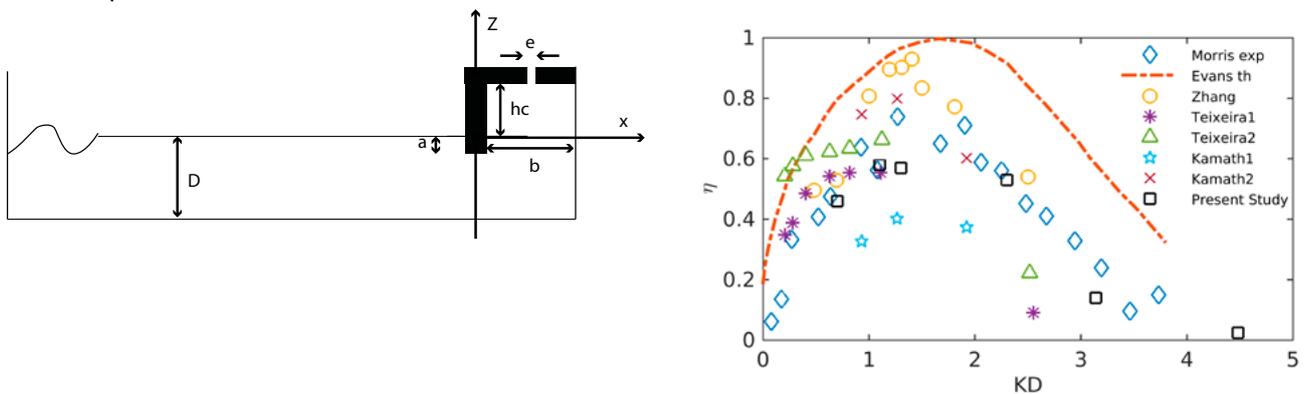
L'effet du PTO est ici modélisé par un orifice de 5mm, près du mur arrière de l'OWC



Dans le cadre du projet EMACOP, un modèle numérique 2D (Rameliarison V. *et al.*, 2015) a été mis en œuvre afin d'analyser le comportement dynamique d'un système houlomoteur à colonne d'eau oscillante (OWC). Il résout les équations de Navier-Stokes (CFD) en Simulation Numérique Directe (DNS) pour représenter les écoulements au sein de l'OWC et en calculer le rendement hydrodynamique. Une méthode VOF est couplée aux équations pour suivre le déplacement de

la surface libre. Une approche de type frontière immergée est également utilisée ici pour modéliser les éléments solides (mur avant de l'OWC). L'emprise du modèle est limitée au champ proche de l'ouvrage (quelques longueurs d'onde de houle, figure 3-25). Les champs de vitesses et de vorticité au sein de l'OWC sont étudiés en fonction de la fréquence de la houle incidente et de l'amortissement de la turbine (modélisé par un orifice de taille variable  $e$ ).

Figure 3-25. Comparaison de rendements  $\eta$  calculés par le modèle aux résultats analytiques (Evans), expérimentaux (Morris) et numériques de la littérature



Les résultats de rendement confrontés à ceux de plusieurs travaux analytiques, numériques ou expérimentaux mettent en évidence l'existence d'un rendement optimal en fonction du nombre d'onde  $k$  adimensionné par la profondeur  $D$  (figure 3-25). La méthode analytique d'Evans ne prend en compte aucune dissipation visqueuse, le rendement obtenu est donc un rendement théorique maximal qui surestime largement le rendement expérimental (Morris). Les modèles numériques intègrent cette dissipation. À chaque valeur de la fréquence incidente et de l'amortissement de la turbine correspond un régime de fonctionnement de l'OWC

distinct. L'énergie de la houle incidente est soit dissipée essentiellement dans l'eau ou dans l'air, soit dissipée dans les mouvements internes de la surface libre soit transmise de façon optimale à l'air ensuite extrait de l'OWC. La dissipation d'énergie dans l'OWC va se traduire par la formation de tourbillons dans l'eau (figure 3-27) ou dans l'air, ou encore par l'excitation de la fréquence de ballottement de la masse d'eau dans la chambre (figure 3-26). Les écarts de rendement observés entre les différents travaux numériques s'expliquent notamment par le choix du modèle de turbulence et du modèle d'amortissement de la turbine.

Figure 3-26. Excitation de la fréquence de ballottement du fluide dans l'OWC ( $kD=4,5$ ) à différentes phases de la houle ( $\varphi=\pi/2$ ,  $\varphi=\pi$  et  $\varphi=3\pi/2$ )

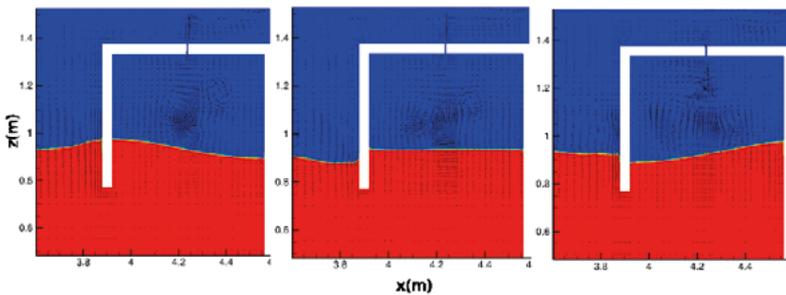
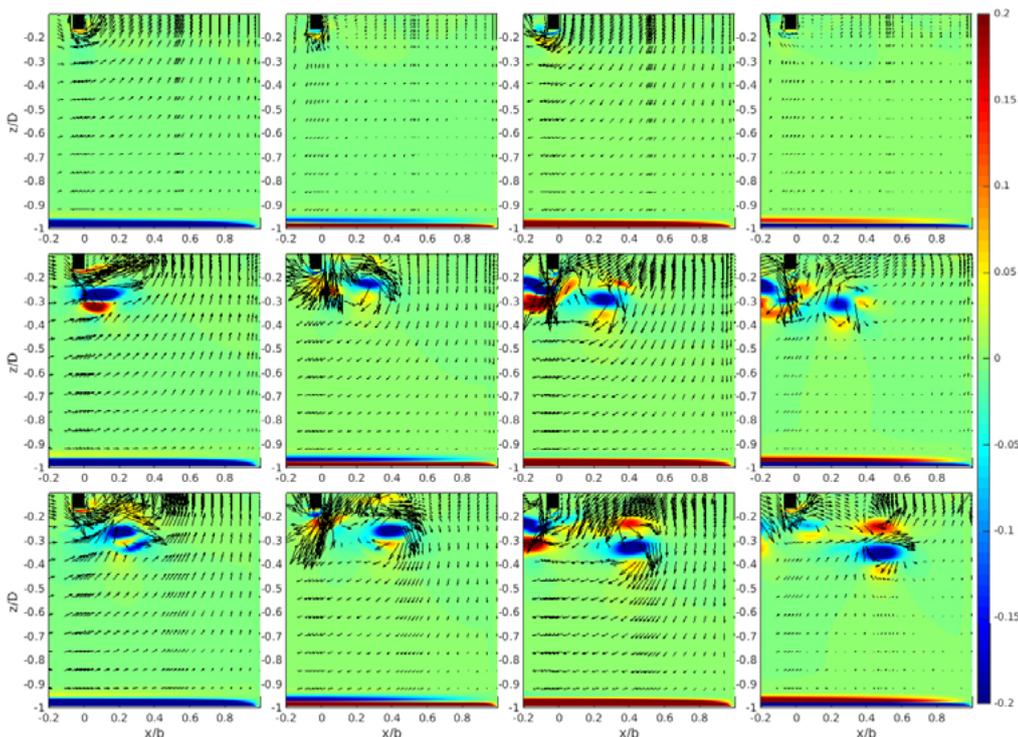


Figure 3-27 Formation de tourbillons au pied du mur avant semi-immersé de l'OWC aux phases  $\varphi=0$ ,  $\varphi=\pi/2$ ,  $\varphi=\pi$  et  $\varphi=3\pi/2$  ( $kD=1,3$  et  $e=b$ )



### ■ Remarques sur la modélisation physique des OWC

Les essais d'OWC en bassin peuvent permettre de valider des simulations numériques, de déterminer des éléments isolés nécessaires à la mise en œuvre des simulations numériques (coefficients de frottement pour la détermination des effets visqueux au niveau du mur avant, valeur du coefficient de décharge  $C_d$  de l'orifice permettant de simuler un PTO), ou encore de déterminer expérimentalement les performances énergétiques. Les essais en bassin des OWC sont généralement effectués à des échelles comprises entre  $1/10^e$  et  $1/100^e$ , et des problématiques spécifiques de similitude se posent lors de la mise en œuvre de ces essais du fait de la présence d'une turbine à air et de l'effet de la compressibilité de l'air dans la chambre. La similitude de Froude est communément utilisée pour les essais sur houle afin de respecter le ratio d'échelle pour les longueurs d'onde. Ce faisant, c'est-à-dire en appliquant également la similitude de Froude pour traiter le problème aérodynamique dans la chambre, on considère une échelle géométrique pour le volume de la chambre au-dessus de la surface libre, tel que

$$\frac{V_{\text{modèle}}}{V_{\text{réel}}} = \varepsilon^3 = \left( \frac{L_{\text{modèle}}}{L_{\text{réel}}} \right)^3$$

où  $L$  est une longueur caractéristique (longueur de la chambre par exemple). L'utilisation de cette échelle géométrique pour la chambre implique que le rapport des pressions atmosphériques entre le modèle et le réel soit de

$$\frac{P_{\text{atm},m}}{P_{\text{atm},\text{réel}}} = \varepsilon \frac{\rho_m}{\rho_{\text{réel}}}$$

Cette condition est impossible à réaliser pratiquement, sauf si l'échelle du modèle est proche de 1/1. Il est donc nécessaire de préciser les hypothèses du modèle et de préciser les similitudes à utiliser pour traiter de façon satisfaisante la partie aérodynamique. Ainsi, de façon réaliste, on suppose que les pressions atmosphériques sont identiques au modèle et au réel, et on suppose que les oscillations de pression dans la chambre sont très inférieures à la pression atmosphérique. La condition de similitude

qui peut alors être obtenue pour le volume de la chambre est alors la suivante :

$$\frac{V_{\text{modèle}}}{V_{\text{réel}}} = \frac{k_{\text{modèle}}}{k_{\text{réel}}} \varepsilon^2 \delta^{-1}$$

où  $k$  est l'exposant polytropique défini par la relation entre la pression totale dans la chambre et la densité de l'air

$$\frac{P + P_{\text{atm}}}{\rho_{\text{ch}}^k} = \frac{P_{\text{atm}}}{\rho_{\text{atm}}^k}$$

et dépend du rendement de la turbine, et

$$\delta = \frac{\rho_m}{\rho_{\text{réel}}}$$

est le rapport des masses volumiques de l'eau au modèle et au réel. Cela conduit donc à utiliser des maquettes dont les parties immergées et aériennes doivent avoir des échelles différentes.

### Exemple d'évaluation de la matrice de puissance d'une OWC intégrée à une digue :

Dans le cadre du projet EMACOP, un outil simplifié d'évaluation du rendement des OWC intégrées à une digue a été développé sur la base d'un modèle fréquentiel avec une approche de type piston plan, s'appuyant sur le logiciel BEM 3D NEMOH pour le calcul des coefficients hydrodynamiques (efforts d'excitation, masse d'eau ajoutée et amortissement de radiation). Dans sa version actuelle, le code est inadapté aux géométries concaves caractéristiques des OWC. Cette limitation nous a conduits à traiter le cas des OWC de façon équivalente à l'approche classique, mais en considérant ici la formulation du problème hydrodynamique non pas au niveau de la surface libre interne, mais au niveau de la surface verticale virtuelle figurant l'embouchure (voir figure 3-29). La masse d'eau interne est considérée comme un solide (approche piston pesant), ce qui permet d'évaluer son déplacement vertical en résolvant l'équation du mouvement et de calculer la puissance absorbée par l'OWC. Ces limitations, ainsi que le choix de la théorie potentielle linéaire limitent l'utilisation de ce type d'outils à un stade d'avant-projet, pour identifier le contenu fréquentiel de la

réponse de l'OWC ou comparer de façon globale les performances énergétiques d'OWC de caractéristiques différentes (géométries ou paramètres de turbines), mais en aucun cas pour fournir des données précises de puissance.

Figure 3-28. Schéma en coupe de l'OWC intégrée à une digue

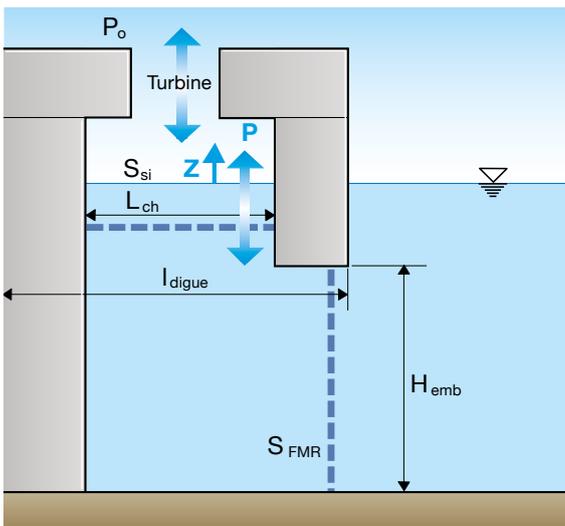
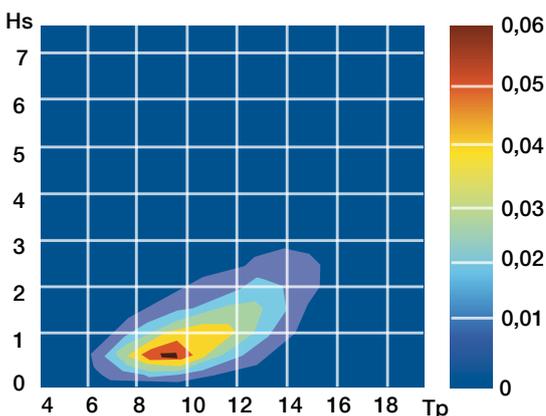


Figure 3-29. Scatter diagram du site de Saint-Jean-de-Luz (d'après étude EGIS – CETMEF)



En amont du modèle *Wave to Wire*, un module permettant de construire un modèle simplifié d'OWC, de le mailler et de lancer les calculs NEMOH a été développé.

Le modèle *Wave to Wire* fréquentiel développé permet d'évaluer les performances globales d'une OWC intégrée à une digue équipée d'une turbine de Wells supposée linéaire. Le code peut ainsi calculer les éléments suivants :

- la puissance absorbée par l'OWC pour un état de mer donné ;
- la matrice de puissance de l'OWC ;
- la puissance moyenne annuelle absorbée sur un site donné par son *scatter diagram* (probabilités d'états de mer).

Ces évaluations peuvent être effectuées en fournissant en entrée les paramètres de turbine (coefficient  $K$ , diamètre  $Dt$  et vitesse de rotation  $Nt$ ), ou en optimisant ces coefficients de turbine.

La puissance absorbée n'est pas prise en compte lorsque :

- Le déplacement calculé de la surface libre interne excède la profondeur du mur avant ;
- Le critère de Mach n'est pas respecté. Pour des raisons aérodynamiques – pour éviter les ondes de choc –, la vitesse en bout de pale de turbine doit être limitée. Le critère retenu ici est défini par Falcao *et al.* et est tel que  $Pw=0$  si  $ND_t > 380$  m/s.

L'outil de calcul développé ici évalue la puissance pneumatique de l'OWC ; dans cette approche simplifiée, ni les pertes à travers la turbine, ni le rendement du moteur électrique ne sont pris en compte dans le modèle.

#### Limitations :

Le modèle développé ici est basé sur des hypothèses simplificatrices (fortes) suivantes :

- Modèle de type piston : la surface libre interne ne se déforme pas ;
- La géométrie interne réelle de l'OWC n'est pas prise en compte, en effet, le problème hydrodynamique est ici résolu au niveau de l'embouchure : le volume fluide interne de l'OWC est traité comme un solide ;
- Les interactions houle-structure sont résolues dans le cadre de la théorie potentielle linéarisée, ce qui engendre dans le cas de dispositifs comme les OWC une surestimation de la réponse à la résonance. De plus, dans ce cadre, les pertes par effets visqueux au niveau du mur avant ne peuvent être prises en compte que de façon très simplifiée par le biais d'un amortissement visqueux.

Ces hypothèses simplificatrices permettent une résolution rapide, mais limitent son utilisation à des OWC de petites dimensions. Aussi, l'utilisation de ce type de modèle devra être limitée aux études d'avant-projets, pour comparer de façon globale les performances énergétiques d'OWC de caractéristiques différentes (géométries ou paramètres de turbines), mais ne pourra pas être utilisé pour fournir une donnée de puissance précise.

#### ■ Conditions de houle sur les sites d'étude

À titre d'exemple, le *scatter diagram* du site de Saint-Jean-de-Luz utilisé dans cette étude est issu de l'étude CETMEF-EGIS (Michard *et al.*, 2013) qui a été menée dans le cadre d'EMACOP.

Le *scatter diagram* est estimé à la côte, à partir d'un point ANEMOC au large et d'un transport à la côte par un calcul analytique de type Goda (2000). Chaque état de mer est représenté par un spectre de JONSWAP ( $\gamma=3,3$ ) ; le niveau de puissance de chaque état de mer est calculé comme suit :

$$P = \rho g \int_0^{\infty} C_g(f) S(f) df$$

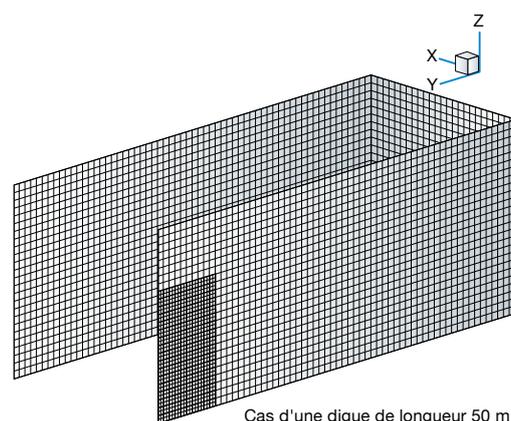
Où :  $\rho$  est la masse volumique de l'eau,  $g$  : la gravité,  $C_g(f)$  : la vitesse de groupe,  $S(f)$  : le spectre de houle.

En connaissant le niveau de puissance de chaque état de mer et le *scatter diagram*, la puissance moyenne annuelle de la houle est alors calculée sur le site de Saint-Jean-de-Luz, pour la profondeur de 10 m. Le niveau de puissance moyenne annuelle calculé est alors de 16,5 kW/m pour cette étude. Au vu de la méthodologie adoptée ici, l'évaluation de la ressource est donc effectuée de manière globale et approchée, et devra être affinée pour prendre en compte les données de ressource en pied d'ouvrage quand elles seront disponibles, en intégrant également les données de marnage. Cependant, ce résultat reste cohérent avec les évaluations de puissance effectuées dans le cadre de l'étude effectuée par Mory *et al.* (2015) dans laquelle le climat de houle en face de la digue d'Artha a été déterminé à partir de simulations numériques de propagation de vagues du large à la côte en utilisant le modèle de

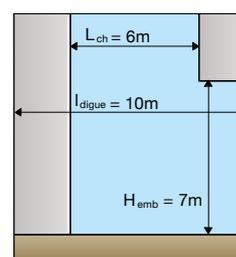
propagation SWAN. Dans cette étude, les niveaux de marée ont également été pris en compte pour aboutir à une puissance houlomotrice au point d'intérêt devant la digue d'Artha évaluée à 14,3 kW/m.

Figure 3-30. Dimensions de l'OWC intégrée à une digue

Dimensions de l'embouchure	Hauteur : 7m, Largeur : 8m
Dimensions de la chambre	Largeur : 8m, Profondeur : 6m
Hauteur de la colonne d'air	6m
Profondeur du mur avant	3m
Largeur de la digue	10m
Longueur de la digue	Variable, de 10 à 600m



Cas d'une digue de longueur 50 m.



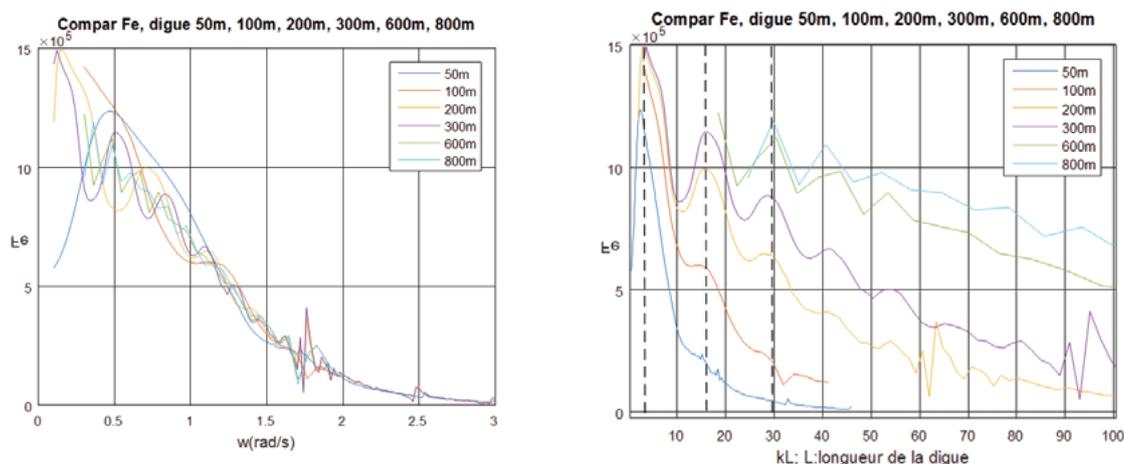
#### ■ Évaluation des efforts d'excitation et influence de la longueur de la digue

Le graphique 3-31 ci-contre illustre l'évolution de la force d'excitation au niveau de l'embouchure de l'OWC avec la fréquence pour différentes longueurs de digue et montre des oscillations marquées aux basses fréquences ( $\omega < 1,5$  rad/s) pour des longueurs de digues inférieures à 300 m. Les maxima de ces oscillations sont localisés à des valeurs fixes de  $kL$ , où  $k$  est le nombre d'onde et  $L$  la longueur de la

digue, comme le montre la figure ci-dessous, à droite. Ces maxima correspondent à des modes propres et sont localisés à des valeurs  $kL=\pi;5\pi$  et  $10\pi$ . On remarque également des oscillations impor-

tantes de la force d'excitation entre 1,6 et 1,9 rad/s, et ce pour toutes les longueurs de digues – à l'exception de la digue de 50 m ; ces oscillations sont vraisemblablement dues à un problème numérique.

Figure 3-31. Efforts d'excitation et influence de la longueur de la digue



### ■ Évaluation de la puissance absorbée par l'OWC

Le tableau ci-dessous illustre quelques résultats de puissance absorbée par l'OWC obtenus pour différentes conditions de houle, régulière ou irrégulière, et ce pour différentes longueurs de digue.

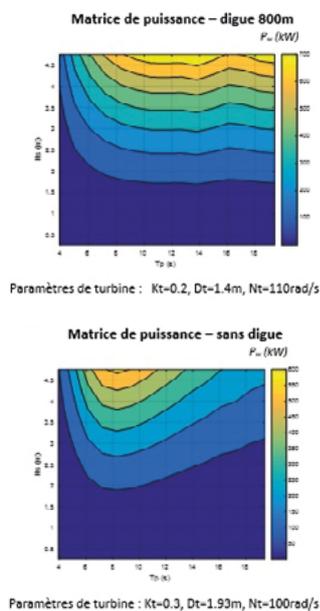
Figure 3-32. Résultats de puissance absorbée par l'OWC

Caractéristiques Houle	Digue 300 m	Digue 600 m	Digue 800 m	Sans digue
Houle régulière	Pw en kW			
T=10s, H=1m	120	128	122	51
Paramètres de turbine : Kt, Dt(m) et Nt(rad/s)	Optim : Kt=0,2, Dt=1,4, Nt=30rad/s	Fixes, Kt=0,2, Dt=1,4, Nt=30rad/s	Fixes, Kt=0,2, Dt=1,4, Nt=30rad/s	Fixes, Kt=0,2, Dt=1,4, Nt=30rad/s
Houle irrégulière				
Houle 1 : Tp=9s, Hs=2m	212	226	230	129
	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Optim, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110
Houle 2 : Tp=12s, Hs=2,5m	328	299	305	136
	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110	Fixe, Kt=0,6, Dt=2,06 et Nt=110
Scatter Diagram				
Saint-Jean-de-Luz 1	86	85,9	84,2	55,5
	Optim, Kt=0,375, Dt=1,26 et Nt=180	Optim, Kt=0,3, Dt=1,53et Nt=180	Optim, Kt=0,2, Dt=1,4 et Nt=110	Optim, Kt=0,3, Dt=1,93, Nt=100
Saint-Jean-de-Luz 2	86	81,9	83,3	45
	Fixe, Kt=0,375, Dt=1,26 et Nt=180	Fixe, Kt=0,375, Dt=1,26 et Nt=180	Fixe, Kt=0,375, Dt=1,26 et Nt=180	Fixe, Kt=0,375, Dt=1,26 et Nt=180

L'analyse de ces résultats permet de montrer qu'au-delà d'une longueur de digue de 300 m, pour les dimensions d'OWC choisies, l'augmentation de la longueur de la digue à une incidence relativement faible sur l'évaluation de la puissance (variation inférieure à 9% entre 300 et 800 m).

L'évaluation de la puissance moyenne annuelle absorbée sur le site de Saint-Jean-de-Luz montre un accroissement de 51 % de la puissance en présence de la digue par rapport à une configuration d'OWC isolée grâce à la réflexion de la houle incidente sur la digue. Ce résultat est cohérent avec les résultats issus du modèle analytique développé par Martin-Rivas et Mei Chiang (2009).

Figure 3-33. Matrice de puissance avec et sans digue



### ■ Évaluation de la puissance moyenne annuelle

La puissance moyenne annuelle évaluée pour le site de Saint-Jean-de-Luz, après optimisation des paramètres de turbine est de 84 kW, pour une puissance houlomotrice moyenne annuelle de 16,5 kW/m sur le site, soit un rendement de 0,63 %. Cette puissance a été évaluée en excluant les configurations dans lesquelles le déplacement calculé de la surface libre interne excède la profondeur du mur avant

(voir figure 3-33), ou pour lesquelles le critère de Mach n'est pas respecté. Les paramètres de turbine optimisés pour ce site et cette configuration de récupérateur sont les suivants :  $K_t=0,2$ ,  $D_t=1,4$  m,  $N_t=110$  rad/s

## 2.7 Étude d'implantation de WEC et optimisation de puissance sur un site donné

### ■ Introduction

Les méthodologies présentées ci-avant sont illustrées ici à travers un cas d'étude effectué dans le cadre du projet sur le site de Saint-Jean-de-Luz. Ce site a été choisi en regard de son potentiel houlomoteur important, montré par l'étude préliminaire du potentiel houlomoteur sur 22 sites français, et en considération des connaissances acquises sur le site par certains partenaires du projet.

Les trois systèmes houlomoteurs étudiés sont : (1) un système houlomoteur à franchissement de type SSG (*Slot Cone Generator*), (2) un système houlomoteur à volet oscillant et (3) un système houlomoteur à flotteur pilonnant.

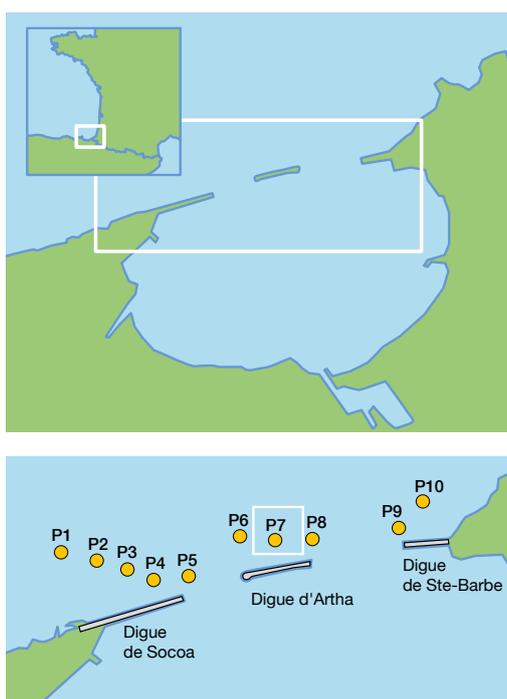
La comparaison des performances énergétiques des trois types de dispositifs est effectuée comme suit :

- (1) Détermination des conditions de houle et de marée sur le site ;
- (2) Estimation de l'énergie récupérée par chaque type de dispositif ;
- (3) Proposition d'un schéma d'implantation des trois systèmes devant la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz. La comparaison des trois systèmes houlomoteurs est effectuée en regard de ces schémas d'implantation.

### ■ Site de Saint-Jean-de-Luz : Potentiel houlomoteur et implantation envisagée

Située au fond du Golfe de Gascogne, à 20 Km à l'est de la frontière espagnole, la baie de Saint-Jean-de-Luz est partiellement fermée par trois digues de protection, nommées d'ouest en est : Socoa, Artha et Sainte-Barbe (figure 3-34). Au cours de la tranche 1 du projet EMACOP (Mory *et al.*, 2013), le potentiel houlomoteur disponible a été calculé en plusieurs points de la baie, indiqués par les plots jaunes sur la figure 3-34, devant les trois digues de protection. Le point P7, situé devant la digue de l'Artha, possède un des meilleurs potentiels énergétiques de la baie. Il a été choisi comme position d'implantation des trois systèmes houlomoteurs. L'étude comparative de la récupération de l'énergie par les trois systèmes houlomoteurs a donc été effectuée pour les mêmes conditions de houle et de marée déterminées en ce point P7. En P7, les profondeurs varient de 8 m pour la PBMA (niveau de Plus Basses Mers Astronomiques) à 13 m pour la PHMA (niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques).

Figure 3-34. Secteur d'étude de Saint-Jean-de-Luz et position d'implantation du système houlomoteur



### Détermination des statistiques annuelles de houle et de marée à la position d'implantation du système houlomoteur

Les statistiques annuelles des houles au pied des ouvrages de Saint-Jean-de-Luz ont été déterminées en simulant la propagation de la houle avec le modèle 2DH SWAN (Simulated WAve Nearshore – Delft University of Technology), du large vers la côte, partant des données de houle au large issues de la base de données ANEMOC. Ce travail fournit la base statistique de données hydrodynamiques au pied des ouvrages qui prend en compte :

- (1) la propagation de chaque houle ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dirp et étalement directionnel) ;
- (2) la modification des houles à l'approche des eaux peu profondes (réfraction, déferlement, réflexion, frottement) ;
- (3) la variation des niveaux d'eau (marée astronomique).

Pour le cas présent, la propagation de la houle est simulée dans le domaine représenté sur la figure 3-35, avec le forçage des conditions aux limites de la base ANEMOC aux points Ocean 1563, Ocean 1566 et Ocean 1569 à la frontière Nord du domaine. SWAN est un modèle de houle spectrale de 3<sup>e</sup> génération qui simule la propagation des états de mer (mers de vent et houles océaniques) dans le domaine côtier. Il prend en compte les effets de réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie, la diffraction par les obstacles, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle par moutonnement, le déferlement bathymétrique ainsi que par frottement sur le fond. Il modélise également la surcote produite par la dissipation des vagues. La résolution par la méthode des volumes finis utilise un maillage cartésien régulier. Les résultats sont raffinés près des côtes et dans la baie de Saint-Jean-de-Luz (située à l'intérieur du carré bleu sur la figure 3-35) par un système d'emboîtement de domaines. Les domaines entourés par les rectangles en rouge et bleu indiquent les deux boîtes de raffinement successives utilisées pour aboutir aux caractéristiques de la houle dans la baie de Saint-Jean-de-Luz. La taille des mailles dans le domaine de grande emprise est d'environ 800 m.

Elle est d'environ 200 m dans le domaine intermédiaire (rectangle rouge) et d'environ 20 m dans le domaine ultime (rectangle bleu).

La variation du niveau d'eau sur une année est

Figure 3-35. Domaine de simulation de la propagation de houle par le modèle SWAN, forcée par les données de la base ANEMOC aux points OCEAN 1563, 1566 et 1569

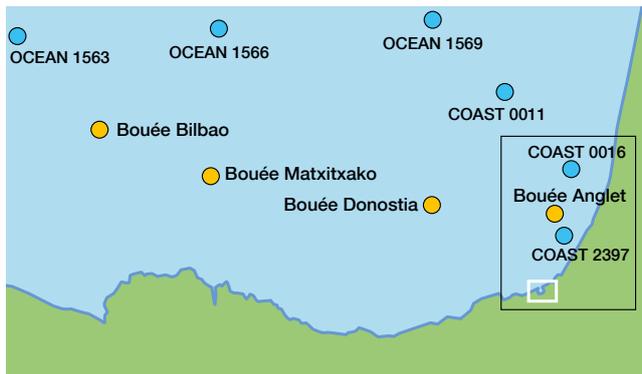
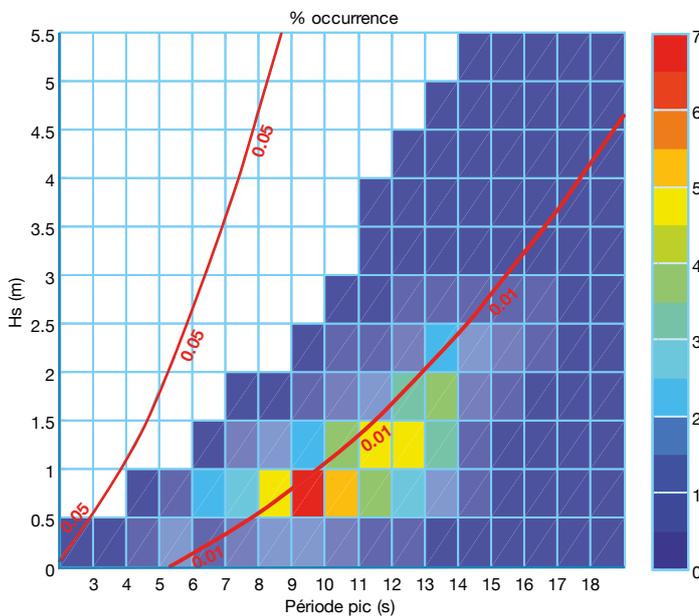


Figure 3-36. Corrélogramme  $H_s - T_p$  au point P7 et cambrures « types » des houles (courbes rouge)



calculée avec les constituants harmoniques de la marée en utilisant le logiciel FES2004.

Le calcul des houles (par le modèle SWAN) et des hauteurs d'eau (par le modèle FES2004) sur les 23,5 ans couverts par la base ANEMOC reconstitue la statistique annuelle moyenne sous la forme d'une loi de probabilité  $f(h, H_s, T_p)$ , qui est la probabilité de disposer au cours d'une année de conditions hydrodynamiques au point P7.

La loi de probabilité est en pratique discrétisée en des classes  $f(h_i, H_{s,j}, T_{p,k})$  pour représenter les conditions à Saint-Jean-de-Luz :

- (1) la hauteur d'eau  $h$  varie entre 8 m et 13 m, discrétisée en 10 classes de pas 0,5 m (indice  $i$ ) ;
- (2) la hauteur significative de vague  $H_s$  varie entre 0 et 6 m, discrétisée en 12 classes de pas 0,5 m (indice  $j$ ) ;
- (3) la période de vague  $T_p$  varie entre 3 et 20 s, discrétisée en 18 classes de pas 1 s (indice  $k$ ).

La figure 3.36 - montre les pourcentages d'occurrence par classes au point P7 d'une houle de hauteur significative  $H_s$  et de période  $T_p$ . Chaque pavé donne la probabilité sommée sur toutes les profondeurs  $h_i$ .

L'estimation de l'énergie récupérée dépend d'un calcul fiable de la houle et de la marée à la position où le système houlomoteur est implanté. Le lecteur trouvera dans les résultats des tests de validation du calcul de la houle dans le golfe de Gascogne effectués avec le code SWAN.

La puissance moyenne récupérée par un système houlomoteur doit être mise en regard de la puis-

sance de vague disponible au même endroit. La puissance moyenne annuelle par unité de largeur de crête de vague est calculée par moyenne sur tous les états de vagues et de marée, en considérant que les vagues se propagent en eau peu profonde au voisinage du rivage.

$$P_{\text{incid, moy}} = \sum_{i,j} \frac{1}{32} \rho g \sqrt{gh_i} H_{s,j}^2$$

Au point p7, la puissance moyenne annuelle incidente par unité de largeur de crête de vague vaut 14,3 kW/m.

### ■ Caractéristiques des trois dispositifs houlomoteurs

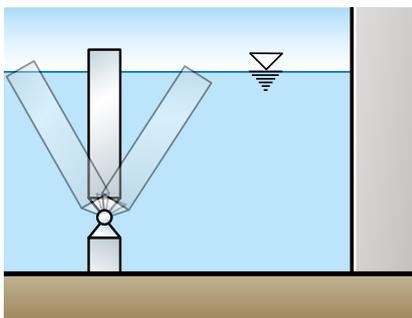
Les caractéristiques géométriques des trois dispositifs houlomoteurs envisagés pour ce cas d'étude sont données ci-dessous :

#### ■ Dispositif à franchissement

Une coupe du dispositif à franchissement considéré dans ce cas d'étude est donnée sur la figure 3-37.

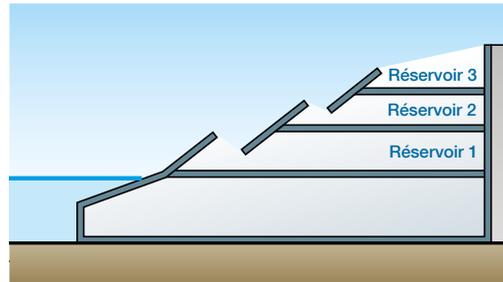
Figure 3-37. Caractéristiques principales des 3 types de dispositifs houlomoteurs envisagés

#### Batteur inversé



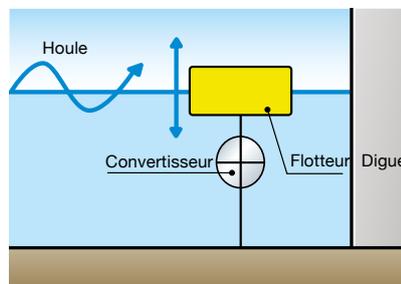
Profondeur h  
 Largeur (m) 20  
 Hauteur partie émergée flap (m) 3  
 Hauteur flap (m) 11  
 Epaisseur (m) 1,5  
 Hauteur base (m) 2  
 Epaisseur acier (mm) 15  
 CG (z-coord) (m) vs fond 7,33  
 Axe de pivot (z-coord) (m) vs fond 2  
 Volume immergé (m<sup>3</sup>) 225  
 Masse d'acier (tonnes) 60

#### Dispositif à franchissement



$$\alpha_R = \theta_i = 35^\circ$$

#### Bouée pilonnante



Rayon 5m  
 Volume immergé 195 m<sup>3</sup>  
 Tirant d'eau 2,5 m

Les débits de franchissement sont évalués à partir de la formulation donnée par Kofoed. Les facteurs correctifs  $\lambda_j$  sont ici inutiles car la géométrie étudiée est identique à celle des essais pour lesquels les valeurs des coefficients A, B et C ont été évaluées par Kofoed. Ils sont : A = 0,197, B = -1,753 et C = -0,408. Mory *et al.* (2015) ont effectué une étude paramétrique pour évaluer l'effet du nombre de réservoir, de leur espacement et de la hauteur des crêtes sur la puissance absorbée par le dispositif. Cependant, l'augmentation du nombre de réservoirs va de pair avec un degré croissant de complexité de l'ouvrage et de son coût de construction. Seuls les résultats de production des dispositifs à 3, 4 et 5 réservoirs sont donc présentés ici.

Pour la configuration SSG#1 à trois réservoirs, l'analyse de la puissance récupérée par chaque réservoir en fonction de la hauteur significative de vague et en fonction de la profondeur d'eau montre que le

Tableau 3-3. Configurations optimales de SSG pour 3, 4 et 5 réservoirs et rendements hydrauliques

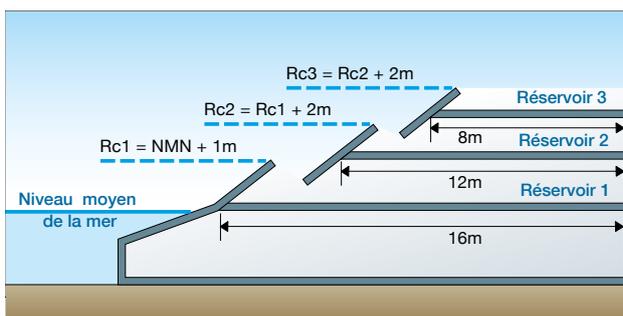
# SSG	Nb réservoirs	$R_{c1}$ (m)	$R_{c2}$ (m)	$R_{c3}$ (m)	$R_{c4}$ (m)	$R_{c5}$ (m)	$P_{moy}$ (kW/m)	Rendement hydro
1	3	3	4,5	6,75	-	-	2,5	17,5 %
2	4	2,5	4	5	8	-	2,96	20,1 %
3	5	2,5	3,5	4,5	5,5	8	3,27	22,9 %

réservoir intermédiaire récupère 46 % de l'énergie totale, tandis que les réservoirs inférieur et supérieur en récupèrent 28 % et 26 %, respectivement. L'essentiel de l'énergie récupérée est celle des vagues dont la hauteur significative se situe entre 1 m et 3 m. Les plus fortes vagues ont un faible apport d'énergie du fait de leur rareté. Peu d'énergie est récupérée lors des plus basses et hautes marées, encore une fois parce qu'elles sont rares. À marée très haute le réservoir inférieur ne fonctionne pas car il est submergé.

Parallèlement à cette étude, des estimations de production d'un système à franchissement doté de 3 réservoirs (figure 3-38) ont été effectuées par Jellouli (2014, 2015) à l'aide du logiciel WOPSim. Les trois réservoirs ont des profondeurs respectives de 8, 12 et 16 m. Cette géométrie est proche de celle du système SSG #1. Chaque réservoir est doté d'une turbine pour récupérer l'énergie potentielle. Le rendement des turbines est fixé à 75%.

Les données de houle au niveau du système houlo-moteur sont déterminées par Jellouli (2014, 2015) par un calcul analytique utilisant la formule de Goda (2000) depuis un point au large où la donnée

Figure 3-38. Schéma du dispositif SSG à 3 réservoirs étudié par Jellouli (2014, 2015)



de la base ANEMOC fournit le forçage. À la différence de l'étude réalisée par l'UPPA, l'ECN et Casagec Ingénierie, les états de mer et de marée sont décorrélés, et les estimations de production ont été faites pour le coefficient de marée le plus fréquent (coefficient 70).

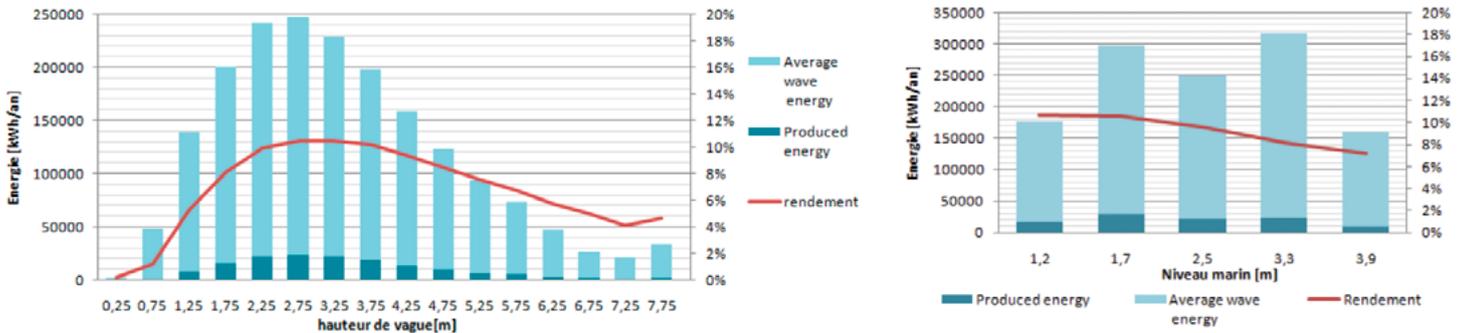
Les estimations de productions obtenues par ISL avec le logiciel WOPSim et celles obtenues par l'UPPA, l'ECN et Casagec Ingénierie pour le système SSG # 1 (tableau 3-3) sont comparées dans le tableau 3-4. L'estimation de production par le logiciel WOPSim est inférieure, mais le tableau montre que l'écart se réduit bien quand un rendement de 75% des pompes est appliqué aux résultats UPPA-ECN-CI pour le système SSG #1.

Tableau 3-4. Comparaison des estimations de production par un système SSG à trois réservoirs

Système SSG	$P_{moy,R1}$ (kW/m)	$P_{moy,R2}$ (kW/m)	$P_{moy,R3}$ (kW/m)	$P_{recov}$ (kW/m)
SSG #1 UPPA-ECN-CI	0,71	1,19	0,67	2,58
SSG #1 UPPA-ECN-CI avec rend. Pompes	0,53	0,89	0,50	1,93
SSG ISL	0,38	0,75	0,56	1,69

ISL a complété son étude en analysant la sensibilité de la production vis-à-vis de la marée. La figure 3-39a montre la répartition de l'énergie annuelle récupérée selon la hauteur significative des vagues  $H_s$ . Ces données mettent en évidence les mêmes tendances que celles tirées de l'étude effectuée par l'UPPA et CASAGEC, notamment le fait que l'essentiel de l'énergie captée est celle des vagues de hauteur de houle comprises entre 2 m et 4 m. La figure 3-39b montre la répartition de l'énergie annuelle récupérée en fonction de la marée qui se compare aussi aux résultats du tableau 3-4. Le fait que l'énergie récupérée soit plus importante pour

Figure 3-39. (a) : Répartition de la production en fonction de la hauteur de vague  $H_s$   
 (b) : Répartition de la production en fonction du niveau de mer.  
 La courbe en rouge donne la valeur du rendement



les bas niveaux de mer s'explique par l'indisponibilité du réservoir bas à marée haute.

#### ■ Production par un système houlomoteur à volet oscillant

Le modèle numérique utilisé ici fait l'hypothèse d'un volet oscillant placé à 15 m devant une digue verticale totalement réfléchissante avec une direction de houle incidente normale à la digue. Les autres hypothèses et limitations du modèle utilisé sont rappelées dans la section précédente de ce chapitre.

La production dépend des paramètres  $B_{PTO}$ ,  $M_{PTO}$  et  $K_{PTO}$  du  $P_{TO}$  qui doivent être choisis pour maximiser la puissance récupérée et qui servent aussi à maintenir le mouvement oscillatoire dans des marges acceptables. Le PTO exerce un couple résistant sur le volet oscillant par lequel il contrôle son mouvement et récupère une partie de son énergie cinétique.

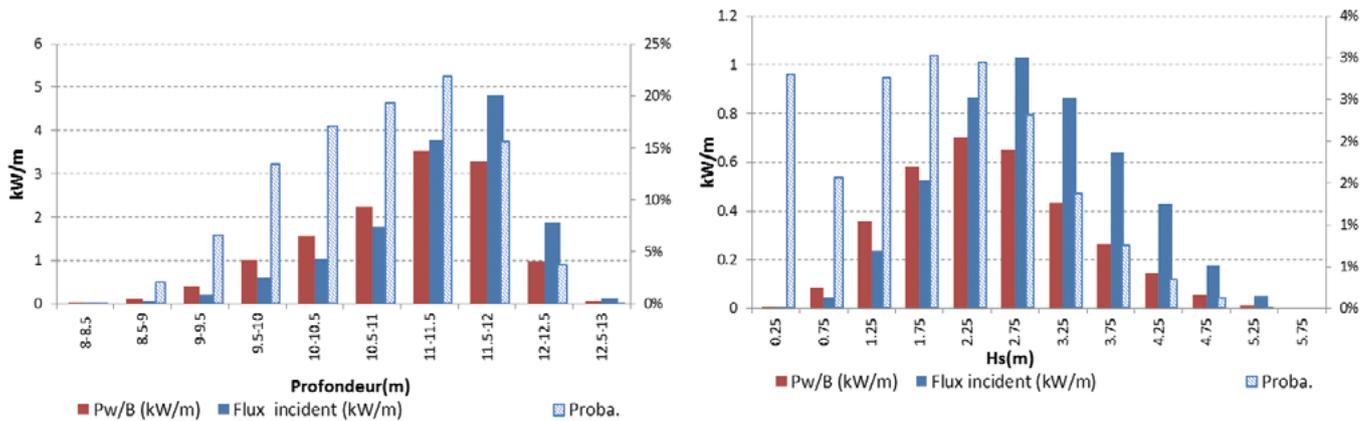
Le paramètre  $M_{PTO}$  n'a pas été optimisé au cours de l'étude, et l'on considérera ici  $M_{PTO}=0$ .

La répartition de puissance moyenne annuelle (divisée par la largeur  $B$  du volet) récupérée par le volet oscillant en optimisant les paramètres PTO pour chaque condition de houle et de marée en fonction de la profondeur d'eau est illustrée figure 3-40.

Les conclusions suivantes peuvent être formulées :

- Le volet oscillant récupère une puissance importante en regard du flux d'énergie incident lorsque les paramètres PTO sont optimisés. Pour une amplitude maximale d'oscillation  $\alpha_{max}=40^\circ$  la puissance moyenne annuelle récupérée rapportée à la largeur du volet (13,2 kW/m) est légèrement inférieure au flux incident moyen (14,3 kW/m).
- L'essentiel de l'énergie récupérée par le volet oscillant l'est pour des hauteurs de marée intermédiaires ( $9,5\text{ m} < h < 12\text{ m}$ ). Les faibles hauteurs ne permettent pas de récupérer une énergie significative parce que les hauteurs de houles sont faibles au point P7 pendant les conditions de basse marée. Bien que des houles de grande hauteur soient observées au point P7 pendant les conditions de haute marée, elles ne conduisent pas non plus à une récupération importante d'énergie car ces conditions sont trop rares.

Figure 3-40. Puissance récupérée par unité de largeur du volet oscillant en fonction de la profondeur pour une amplitude maximale d'oscillation inférieure à  $\alpha_{max} = 40^\circ$ , (à gauche), en fonction de  $H_s$  pour une profondeur de 11,75m (à droite).  $B_{pto}$  optimisé,  $K_{pto}=107\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$



La quantification des pertes par effets visqueux est un point important qui reste délicat, et source d'incertitudes dans l'estimation de la production d'un WEC. La méthodologie employée de façon courante pour les WEC, qui consiste à ajouter un terme de traînée visqueuse issu de l'équation de Morison a été utilisée en première approche. Toutefois, des études récentes ont montré que l'utilisation de ce type d'approche n'était pas toujours appropriée, notamment lorsque les effets de diffraction sont prépondérants dans les efforts d'excitation.

En première approche, une estimation globale et approchée des pertes par effet visqueux a été effectuée en utilisant un modèle de Morison avec un coefficient de traînée issu de la littérature. Des simulations ont été effectuées sur un nombre restreint d'états de mer significatifs pour quantifier les effets. À partir de ces simulations, la réduction de puissance liée aux pertes par effets visqueux a été évaluée à 30 à 40 %, et reste cohérente avec les résultats obtenus par Babarit *et al.* (2012) pour un flap isolé.

### ■ Bouée pilonnante

Les performances énergétiques de la bouée pilonnante sont évaluées à l'aide du modèle *Wave To Wire* ; ce modèle numérique fait l'hypothèse d'une bouée pilonnante placée à 10 m devant une digue verticale totalement réfléchissante avec une direction de houle incidente normale à la digue.

Les autres hypothèses et limitations du modèle utilisé sont également rappelées dans cette même section.

Comme pour le volet oscillant, les paramètres de PTO sont optimisés pour chaque condition de houle et de marée afin de maximiser la puissance récupérée tout en maintenant le déplacement vertical du flotteur dans la limite de 90 % de son tirant d'eau. Comme pour le volet oscillant, c'est l'optimisation du coefficient  $B_{pto}$  qui permet de maximiser la puissance récupérée par le flotteur pilonnant tout en contrôlant l'amplitude de son mouvement vertical ; l'optimisation conjointe de  $B_{pto}$  et  $K_{pto}$  n'apporte qu'un gain marginal. La figure 3-41 montre la matrice de puissance du dispositif houlomoteur, ainsi que la matrice des  $B_{pto}$  optimisés correspondante. La figure 3-42 (gauche) détaille les variations de la puissance récupérée rapportée à la largeur de la bouée, en fonction de la profondeur d'eau. La figure 3-42 (droite) détaille les variations de la puissance récupérée rapportée à la largeur de la bouée, en fonction de la hauteur significative de la houle pour une profondeur d'eau de 11 m 75 (condition de profondeur rencontrée 15,6 % de l'année).

Figure 3-41. Puissance récupérée et valeurs optimisées de  $B_{PTO}$  pour les différentes classes de houle étudiées pour une profondeur  $h=11,25m$  lorsque seul  $B_{PTO}$  est optimisé

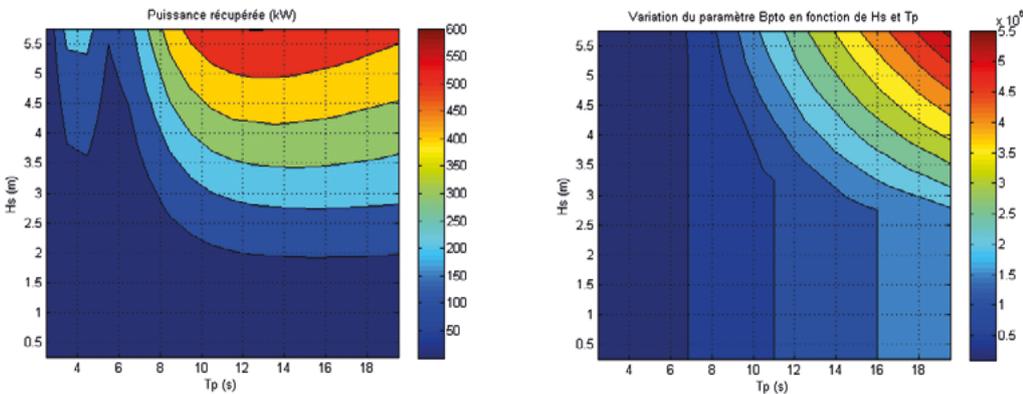
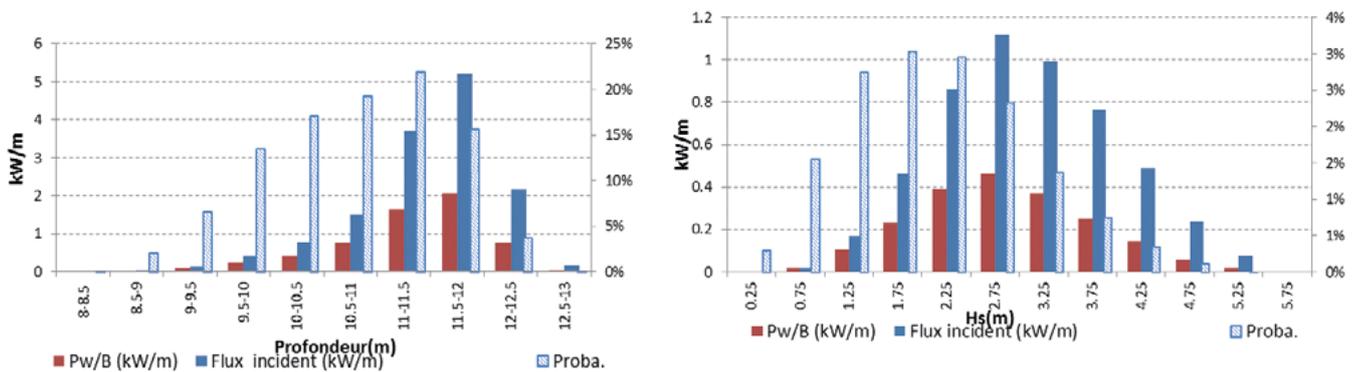


Figure 3-42. Puissance récupérée (à gauche) par unité de largeur de flotteur en fonction de la profondeur, en fonction de Hs pour une profondeur de 11,75m (à droite).  $B_{PTO}$  optimisé



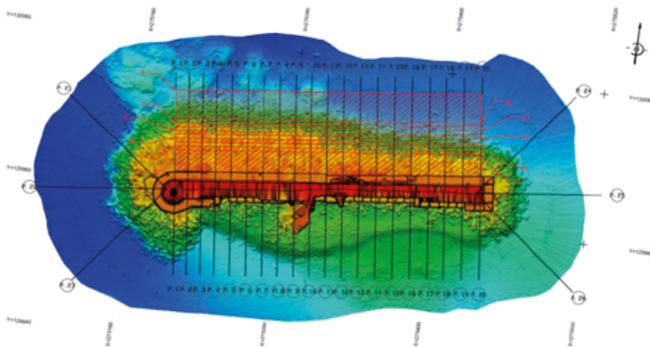
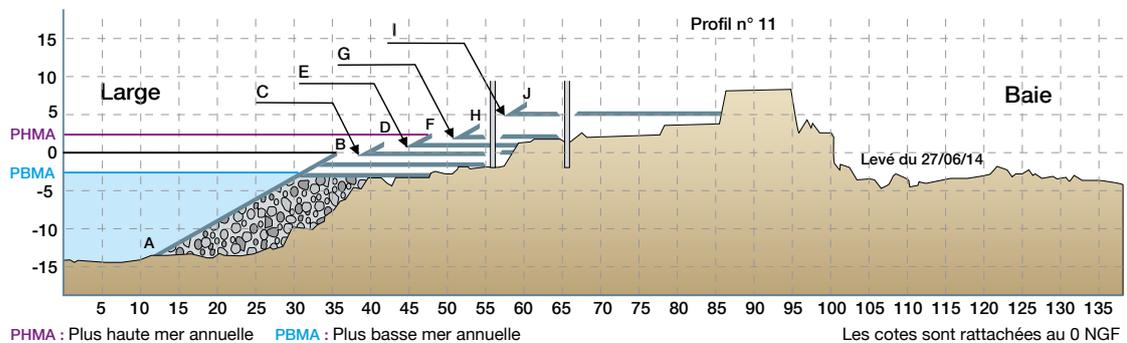
### Comparaison de l'énergie récupérée par les trois systèmes houlomoteurs

Les méthodes d'évaluation des performances énergétiques des WEC décrites dans les trois parties précédentes pour un système à franchissement de type SSG, pour un volet oscillant et pour un flotteur pilonnant sont mises en œuvre ici pour sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

La comparaison de ces dispositifs nécessite également d'établir un schéma d'implantation de ces systèmes houlomoteurs devant la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz, ou pour envisager une combinaison de ces systèmes.

Pour le système houlomoteur à franchissement de type SSG, on envisage naturellement d'implanter un tel ouvrage sur toute la longueur de la digue. De ce fait les puissances récupérées données par unité de largeur dans le tableau 3-5 pour différentes géométries font sens. Pour calculer la puissance totale récupérée, il suffit de multiplier par la longueur de la digue (250 m pour la longueur de la digue de l'Artha). La puissance totale récupérée par un système SSG#3 à cinq réservoirs serait alors de l'ordre de 820 kW. La figure 3-43 présente le schéma d'implantation d'un système SSG à cinq réservoirs sur la digue de l'Artha (Dugor *et al.*, 2015) (Mory *et al.*, 2015) permettant d'appréhender l'ampleur des travaux de génie civil requis.

Figure 3-43. Schéma d'implantation en coupe de profil et en plan horizontal d'un système SSG à 5 réservoirs sur la digue de l'Artha

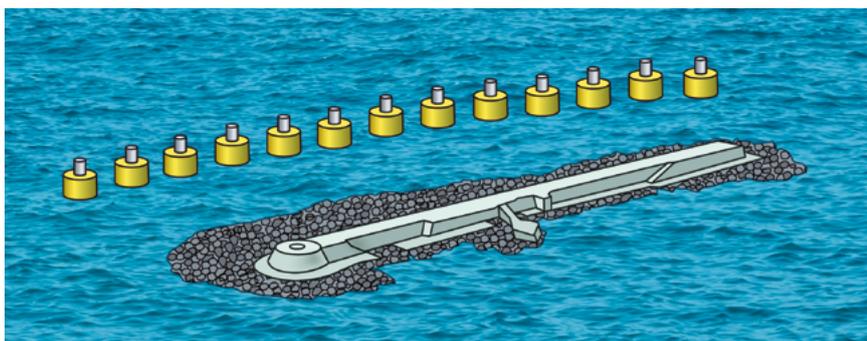


Les systèmes houlomoteurs que sont le volet oscillant et le flotteur pilonnant relèvent d'une autre catégorie. La puissance récupérée par ces dispositifs est calculée pour des dimensions données de chacun des appareils (longueur  $W = 20$  m pour le volet oscillant, longueur  $W = 10$  m pour le flotteur pilonnant). Les puissances récupérées par les deux appareils n'ont été divisées par la longueur, dans les parties précédentes, que pour permettre la comparaison avec le flux d'énergie de la houle par unité de largeur de crête.

L'implantation de flotteurs pilonnants ou de volets oscillants devant la digue de l'Artha se conçoit avec

un espacement entre chaque appareil. Le dispositif houlomoteur à mettre en regard du système à franchissement équipant la totalité de la digue de l'Artha consiste en un ensemble de  $N$  appareils. Un tel schéma est présenté sur la figure 3-44 qui montre 13 flotteurs pilonnant espacés d'une distance bord à bord égale à leur longueur ( $W = 10$  m). Un schéma équivalent peut être fait pour un système à 7 volets oscillants ( $W = 20$  m) avec la même distance d'espacement. Ces deux arrangements couvrent la largeur de la digue et la comparaison des puissances moyennes récupérées par les trois ensembles peut alors être faite.

Figure 3-44. Schéma d'implantation d'un ensemble de flotteurs pilonnants devant la digue de l'Artha, dans l'hypothèse où la largeur de la bouée est égale à la distance entre chaque bouée



L'estimation de l'énergie récupérée par les 7 volets oscillants est faite en reprenant l'estimation de la puissance récupérée par unité de largeur d'un volet (13,2 kW/m tableau 3 -5), multipliée par le nombre de volets (Van der Meer et Jansen, 2002), leur largeur ( $W=20$  m) et le coefficient de réduction dus aux effets visqueux (0,74). On aboutit alors à une puissance récupérée moyenne de 1370 kW.

Le calcul analogue pour les 13 flotteurs pilonnants ( $W=10$ m) donne une puissance récupérée moyenne de 780 kW. La puissance moyenne récupérée par unité de largeur d'une bouée pilonnante est

6,0 kW/m (tableau 3-5) et la réduction due aux effets visqueux peut être négligée.

Le tableau 3 -5 (Baills *et al.*, 2017) compare sur le plan énergétique les trois systèmes, pour un arrangement qui est spécifique à chacun d'entre eux, mais qui tous équipent la digue de l'Artha sur sa longueur (250 m). Le rendement global est estimé comme le rapport de la puissance totale récupérée à la puissance houlomotrice incidente sur la longueur de la digue.

**Tableau 3-5. Comparaison de l'intégration des systèmes sur le linéaire de la digue en termes d'énergie récupérée et synthèse de leurs avantages et inconvénients**

Systèmes	Largeur unitaire W	Nombre d'appareils	Espacement	$P_{\text{rec,appareil}}/W$	Effets visqueux	$P_{\text{rec, Totale}}$	Rendement global
SSG#1	250 m	1	-	2,5 kW/m	-	625 kW	17,5 %
SSG#3	250 m	1	-	3,27 kW/m	-	820 kW	23 %
Volet oscillant	20 m	7	20 m	13,2 kW/m	coef. réd. 0,74	1370 kW	38 %
Flotteur pilonnant	10 m	13	10 m	6,03 kW/m	négligeable	780 kW	22 %

Deux principales observations sont faites à la lecture des résultats :

- (1) Les deux systèmes SSG (voir tableau 3-5) retenus dans la comparaison et le dispositif à flotteurs pilonnant récupèrent des niveaux d'énergie similaires de la puissance incidente reçue sur la longueur de la digue. Le fait que le flotteur pilonnant soit un système actif ne semble pas constituer un avantage par rapport au système passif qu'est le système à franchissement. Toutefois, le système SSG#3 choisi pour la comparaison, avec ses cinq réservoirs, est de géométrie complexe. La puissance totale récupérée par le système SSG#1 (625 kW) est moindre, mais la simplification de l'ouvrage constitue un avantage certain en termes de coût.
- (2) Le système houlomoteur à volet oscillant récupère une quantité d'énergie notablement supérieure à celles captées par les deux autres systèmes.

## Conclusion partielle

Ce cas d'étude mené sur le site de Saint-Jean-de-Luz, montre que le lien entre le site et les technologies est incontournable dans le choix, le dimensionnement et l'évaluation des performances d'un système houlomoteur. Dans cette optique il paraissait pertinent de comparer les puissances récupérables par différents types de WEC sur un site réel, au-delà d'une étude académique sur un site générique.

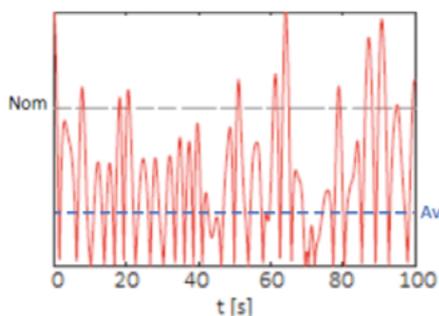
Néanmoins, ce qui est présenté dans ce chapitre doit être considéré comme un schéma méthodologique d'évaluation des performances des systèmes houlomoteurs sur un site donné, et les estimations chiffrées qui y sont données doivent être considérées avec prudence, en regard des hypothèses sur lesquelles sont basés les modèles utilisés, et des incertitudes associées. Enfin, à travers cette étude comparative des technologies de WECs, il ressort que l'exploitation d'un site pour récupérer l'énergie des vagues repose sur un schéma d'implantation des systèmes houlomoteurs individuels sur ce site.

## 3. Dimensionnement des WEC : éléments de méthodologie et exemples d'application

### 3.1 Éléments de choix du PTO<sup>2</sup> et spécificités d'une installation côtière

L'intégration au réseau d'électricité provenant des énergies renouvelables est un challenge, notamment du fait de la variabilité de ces sources d'énergie. À ce titre, l'énergie des vagues est encore plus irrégulière que les autres sources d'énergie renouvelables (éolien, solaire, courants marins) : la forte variabilité de la puissance instantanée et le rapport élevé puissance crête / puissance moyenne sont caractéristiques de la dynamique spécifique de l'énergie des vagues (voir figure 3-45). C'est ce rapport puissance crête / puissance moyenne qui conditionnera le choix de la puissance nominale du PTO (voir graphique ci-dessous) et qui définira le dimensionnement du PTO d'un dispositif houlomoteur. Pour l'énergie houlomotrice, ce rapport est typiquement de l'ordre de 1/10.

Figure 3-45. Extrait de Penalba et Ringwood (2016) : Dispositif houlomoteur standard, Puissance instantanée, moyenne et nominale



La variabilité de la ressource houlomotrice selon plusieurs échelles de temps (saison, journalière, horaire, instantanée (période des vagues), marée(6h)) et les contraintes d'intégration au réseau montrent qu'il est nécessaire d'adapter les machines (le plus souvent le PTO) pour pouvoir les piloter et tirer profit au mieux de cette variabilité.

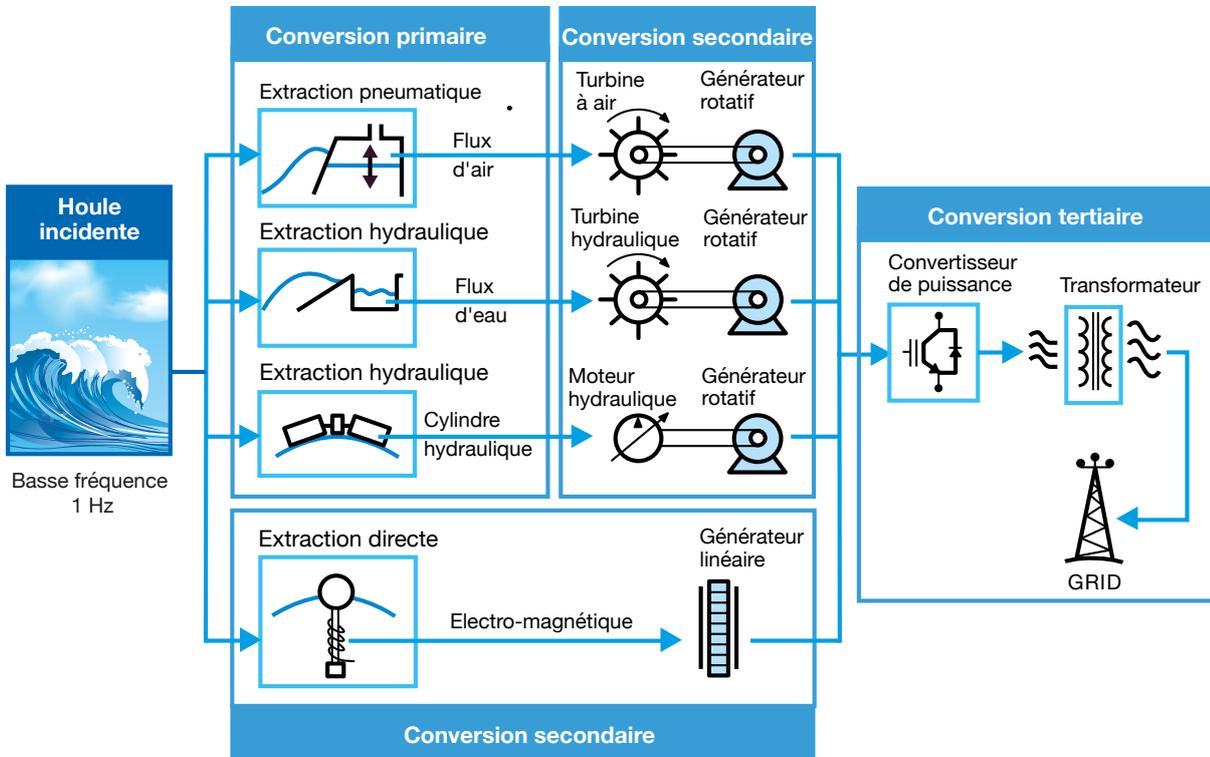
Les dispositifs de PTO n'ayant pas fait l'objet d'études spécifiques dans le cadre d'EMACOP, ce paragraphe se limitera à la présentation de quelques éléments de choix d'un PTO en fonction de la technologie du dispositif houlomoteur.

Le type de PTO dépend principalement du concept de WEC envisagé, et également de la configuration de l'installation (installation côtière : maintenance facilitée) et des grandeurs dimensionnantes du système. Dans le cas des systèmes houlomoteurs à corps oscillants et de façon générale pour les applications EMR, le dispositif de PTO devra être capable de fonctionner à basse vitesse, avec de forts couples ou efforts mis en jeu, la puissance étant le produit de ces deux grandeurs. Face à ces deux contraintes physiques, les dispositifs hydrauliques de puissance semblent être le choix le plus naturel pour les dispositifs oscillants, mais les besoins de maintenances fréquentes et les pertes par friction restent des inconvénients majeurs de cette catégorie de PTO. Ceci disqualifie rapidement les PTO hydrauliques pour les houlomoteurs *offshore* car l'accès fréquent aux systèmes en pleine mer viendrait ruiner le modèle économique. Toutefois, dans le cadre d'une installation côtière sur une jetée ou une digue d'accès facile, les coûts de maintenance peuvent être considérablement réduits, et la solution hydraulique devra donc être évaluée.

Un point important à considérer pour le choix des éléments de PTO d'un dispositif est que, quel que soit le type de PTO retenu, tous les éléments le constituant devront être marinisés.

La figure 3-46, issue d'une étude de Lopez *et al.* (2013) illustre les grandes catégories de chaînes de conversion de l'énergie en fonction du type de dispositif houlomoteur.

<sup>2</sup> PTO pour « Power Take Off » en anglais désigne le sous-ensemble du système transformant l'énergie mécanique primaire en électricité.

Figure 3-46. Catégories de PTO pour les dispositifs houlomoteurs, extrait de Lopez *et al.*

On trouvera ainsi principalement les types de convertisseurs suivants en fonction du principe de fonctionnement du WEC :

**(3) Pour les dispositifs à franchissements** : des turbines hydrauliques basse chute comme on en utilise pour la génération fluviale dite « au fil de l'eau » (Kaplan, Francis,...). Ces turbines doivent être marinisées et dimensionnées en fonction de la hauteur de chute et du débit. Un exemple de dimensionnement hydroélectrique d'un dispositif à franchissement à trois réservoirs a été effectué par ISL dans la cadre d'EMACOP.

**(4) Dispositifs oscillants : PTO hydrauliques ou électriques. PTO hydrauliques** :

Parmi les PTO hydrauliques, deux approches ont été envisagées dans le domaine des EMR :

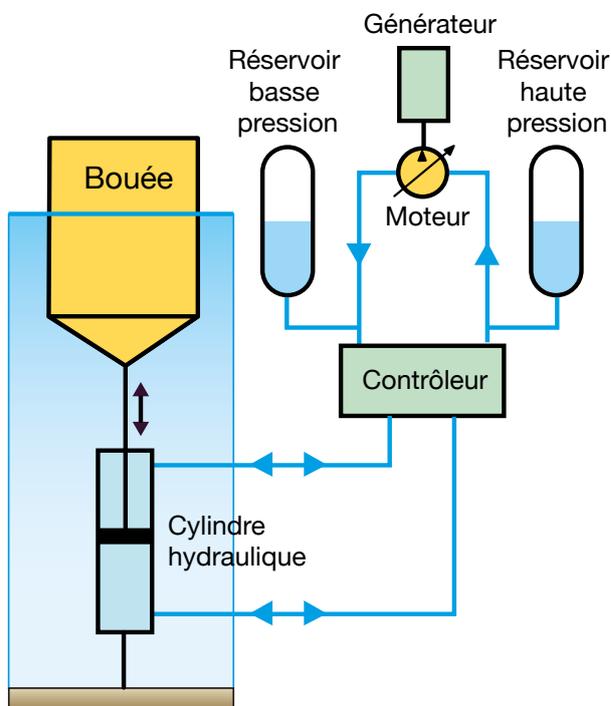
**(5) Pour entraîner la génératrice électrique**, l'utilisation de turbines Pelton a été envisagée comme alternative aux moteurs hydrauliques. L'eau de mer est parfois proposée comme fluide hydraulique, ce qui présente l'avantage d'avoir un

fluide hydraulique non polluant et « gratuit », mais cette solution peut finalement s'avérer réductrice du fait des problèmes de filtration et de corrosion liés à l'utilisation de l'eau de mer comme fluide de travail.

**(6) L'utilisation de systèmes hydrauliques haute pression** travaillant avec un fluide hydraulique standard comme on en trouve sur les engins de terrassement par exemple est particulièrement adapté aux dispositifs houlomoteurs (forts couples ou efforts, mouvements lents). Dans ce cas le circuit hydraulique sera un circuit fermé, le houlomoteur agissant comme une pompe faisant passer ce fluide d'un réservoir basse pression à un réservoir haute pression. Le mouvement du dispositif houlomoteur est ainsi converti en énergie hydraulique par le biais d'un vérin hydraulique ; un moteur hydraulique entraîne ensuite un générateur électrique. Le circuit hydraulique standard de ce type de PTO est présenté sur le schéma page suivante, avec l'exemple d'une bouée pilonnante.

Ce type de PTO comprend toujours un accumulateur capable de stocker l'énergie sur quelques périodes, ce qui permet de faire un premier lissage de la puissance absorbée. Une des difficultés importante inhérente à la conversion d'énergie houlomotrice est en effet la forte variabilité de la puissance instantanée comme on l'a dit plus haut.

Figure 3-47. Extrait de Falcao (2010) : Représentation schématique d'un PTO hydraulique dans le cas d'une bouée pilonnante



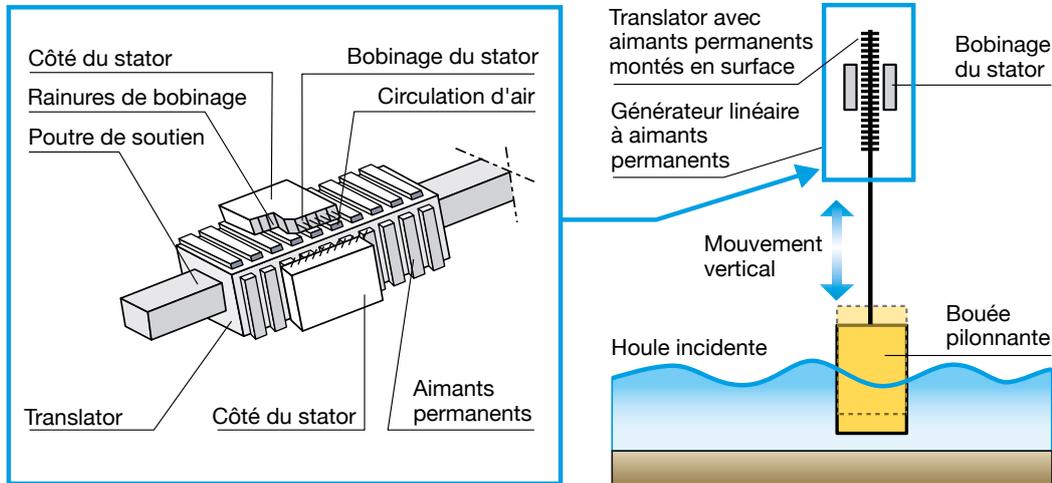
Il est à noter que dans le cadre d'une installation côtière, le recours à des moteurs hydrauliques qui requièrent une maintenance fréquente peut être envisagé plus facilement que pour des dispositifs houlomoteurs *offshore*. De plus dans le cas le plus fréquent d'un ensemble de flotteurs formant une ferme houlomotrice, les accumulateurs et capacités hydrauliques pourront être mutualisés, ce qui viendra encore favoriser cette solution dans le cadre d'installations côtières.

Citons quelques exemples de dispositifs houlomoteurs utilisant des PTO hydrauliques : Pelamis, Oyster, WaveBob, PowerBuoy.

#### PTO électrique direct :

Il s'agit d'exploiter directement le mouvement relatif (translation ou rotation) de deux éléments mécaniques dont l'un est animé par les vagues. Le mouvement du système entraîne la partie rotor (ou dispositif linéaire à aimants permanents) d'un générateur électrique. On trouve ce type de système désormais dans certaines éoliennes dites « à entraînement direct » ou on a supprimé l'étage de multiplication de vitesse. Le prix à payer est de concevoir des génératrices électriques travaillant à des vitesses lentes, voire super lentes. Comme le mouvement du capteur primaire est irrégulier, le flux d'énergie électrique primaire devra être lissé et redressé par convertisseurs et électronique de puissance avant d'être injecté au réseau.

Les PTO électriques directs utilisés pour les EMR étaient initialement majoritairement rotatifs ; les PTO linéaires se sont développés plus récemment (*Archimede Wave Swing*, 2004, et divers projets de bouées pilonnantes par exemple). Un exemple de schéma de PTO linéaire est donné page suivante. Le développement de générateurs linéaires reste cependant compliqué du fait de contraintes physiques importantes: Le générateur doit en effet pouvoir effectuer des déplacements alternatifs importants (similaires aux mouvements de la machine), à de faibles vitesses, ce qui signifie que le dispositif doit supporter des efforts très élevés, et que le dispositif de PTO est nécessairement grand.

Figure 3-48. Extrait de Lopez *et al.* (2010) : Schéma de PTO électrique direct, linéaire, à aimants permanents

De plus les systèmes linéaires ont, par principe, une course limitée qu'il faudra optimiser et doter de butées de fin de course, alors que les génératrices rotatives ont par principe une « course infinie ». Un système de démultiplication de la vitesse (réducteur si rotation, système pignon-crémaillère si translation) peut être utilisé. Le plus souvent, on a intérêt à utiliser des génératrices disponibles de type synchrone à aimant permanent, ou un système à bobinages classique, envisageable ici du fait de l'implantation du dispositif en zone côtière.

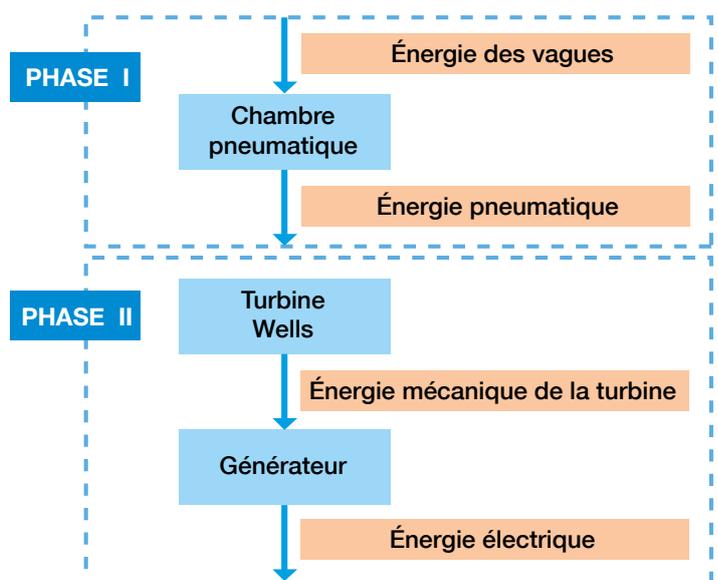
#### *PTO hydraulique vs PTO électrique*

Comparativement à un PTO hydraulique, un PTO électrique direct aura un meilleur rendement, et nécessitera moins d'opérations de maintenance. En revanche, des composants additionnels de type volants d'inertie, batteries ou supercondensateurs sont nécessaires pour lisser la puissance.

#### ■ OWC ; Turbine à air de type Wells, Dennis-Auld ou Impulse turbine

Dans le cas des OWC, c'est l'écoulement alternatif de l'air qui est turbiné ; on a donc un intermédiaire pneumatique dans la chaîne de conversion d'énergie qui peut être schématisée comme suit :

Figure 3-49. Extrait de Brito-Melo (2000) : Schéma de principe de la chaîne de conversion énergétique d'une OWC



La spécificité des OWC est que le flux d'air est alternatif ; l'utilisation de turbines à air conventionnelles est donc inappropriée. Historiquement, les premiers modèles d'OWC ont été envisagés avec des turbines à air conventionnelles, et un système de vannes permettait de redresser le flux. Actuellement, les turbines envisagées pour les projets d'OWC sont bidirectionnelles, c'est-à-dire qu'elles ont la particularité de pouvoir tourner toujours dans le même sens en écoulement oscillant et les types de turbines utilisés sont principalement :

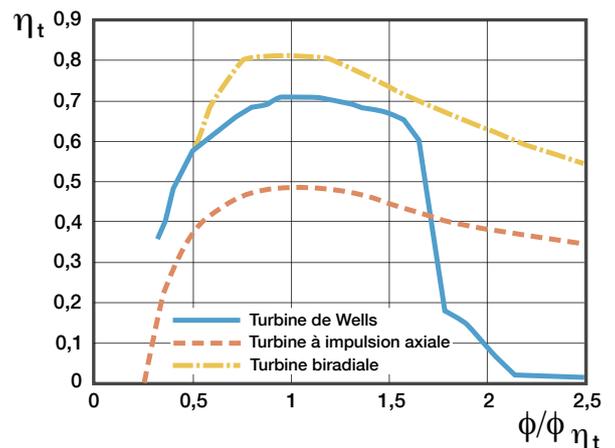
- La turbine WELLS ;
- La turbine Dennis-Auld ;
- L'Impulse turbine ;
- La turbine bi-radiale.

L'immense majorité des projets d'OWC fixes ont jusqu'alors utilisé des turbines WELLS (voir chapitre « Les différents concepts »), à l'exception de quelques projets (OceanLinx, OWC de Yongsoo - Impulse turbine).

Les caractéristiques et performances de ces différents types de turbines sont détaillées dans l'article de Falcao et Henriques (2016) , et quelques éléments de comparaison des turbines à air les plus répandues dans les projets développés à ce jour (*Wells and Axial flow Impulse turbine*) sont données dans le tableau ci-dessus. Un modèle d'impulse turbine bi-radiale a été récemment développé par Falcao *et al.*, et les premières simulations montrent des résultats de rendement très encourageants par rapport aux turbines WELLS et Axial Impulse Turbine plus anciennes.

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<b>Turbine WELLS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vitesse élevée, y compris si vitesse d'air faible (=&gt; générateur moins cher, stockage)</li> <li>Rendement max élevé (0,7-0,8)</li> <li>Coût</li> <li>WELLS pales variables : amélioration des performances (largeur de bande)</li> <li>Si WELLS pales fixes : intérêt des vannes de décharge (by-pass ou throttle), particulièrement efficace pour les petites turbines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plage de débits assez étroite</li> <li>Caractéristiques au démarrage</li> <li>Décrochage aux forts débits (peut être limité en utilisant des vannes de décharge)</li> <li>Bruit aérodynamique</li> <li>Diamètre relativement élevé vs puissance</li> <li>Attention à la validité de la comparaison WELLS / impulse (rendement des WELLS beaucoup plus sensible aux variations de nombre de Reynolds que les Impulse)</li> </ul>
<b>Impulse Turbine</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vitesse de rotation moins élevée que les WELLS</li> <li>Meilleures performances que les WELLS en houle très énergétique</li> <li>Meilleures performances que les WELLS en houle irrégulière (+ large bande)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Générateur associé plus cher</li> <li>Pertes aérodynamiques importantes dues à un angle d'incidence trop élevé à l'entrée de la seconde rangée d'aubes directrices</li> <li>Rendement max relativement faible (~50%, 60% si aubes directrices)</li> </ul>

Figure 3-51. Extrait de Penalba M., Ringwood (2016) : Rendement comparé des turbines de WELLS, axial impulse turbine et bi-radial impulse turbine en fonction du coefficient de flux  $\Phi/\Phi_{nt}$  où  $\Phi_{nt}$  correspond aux conditions de rendement maximal



### Contrôle des WEC : Quelques éléments bibliographiques

Du fait de la forte variabilité de la ressource houlomotrice selon plusieurs échelles de temps (saison, journalière [quelques heures], instantanée [vague après vague], marée [6h]), il apparaît nécessaire d'adapter les machines (le plus souvent au niveau du PTO), de pouvoir les piloter pour prendre en compte et tirer profit de cette variabilité. Plusieurs types de contrôle peuvent être envisagés pour faciliter la mise en sécurité des WEC ou améliorer leurs performances en conditions de production :

- (7) Contrôle pour la mise en sécurité** du dispositif houlomoteur (typiquement système avec fin de course). Un contrôle du dispositif peut également permettre d'anticiper/de faciliter le passage en condition de survie du dispositif, et ainsi accroître la durée de vie du système ;
- (8) Contrôle adaptatif vis-à-vis des changements d'état de mer**: il s'agit ici d'optimiser les paramètres du système (PTO, ballastage) pour maximiser la puissance absorbée selon que l'état de mer est calme, modéré ou au contraire agité. Des exemples de ce type de contrôle sur des dispositifs de type flap oscillant ou bouée pilonnante sont donnés dans le paragraphe sur le dimensionnement ;
- (9) Contrôle en temps réel** : il s'agit dans ce type de contrôle de piloter en continu les efforts résistants au mouvement exercés par le PTO pour amplifier le mouvement du capteur, et donc l'énergie récupérée (Ringwood *et al.*, 2014) (Folley *et al.*, 2016).

Le contrôle adaptatif ou le contrôle en temps réel peuvent permettre un doublement potentiel en moyenne annuelle de l'énergie récupérée (montré en simulation mais pas encore en situation réelle). Pour chaque type de contrôle, le lecteur pourra se référer aux articles / ouvrages cités.

## 3.2 Dimensionnement structurel

La structure et les composants d'un dispositif houlomoteur doivent être dimensionnés pour résister à toutes les conditions environnementales qu'ils rencontreront au cours de leur cycle de vie en conditions opérationnelles et en condition de survie. Le dimensionnement d'un WEC requiert donc dans un premier temps de recenser tous les types de chargements auxquels le WEC sera soumis, puis d'évaluer les efforts auxquels la structure sera soumise sur un ensemble de configurations de chargements aussi exhaustif que possible avant d'effectuer le dimensionnement effectif de la structure.

L'évaluation des efforts extrêmes sur la structure du WEC est un élément clé dans le processus de dimensionnement du WEC, car il est souvent déterminant dans la détermination du coût des WEC. Par ailleurs, certains éléments de la structure et des composants du WEC seront également sensibles à la fatigue liée à certains types de chargements cycliques. L'analyse en conditions extrêmes et l'analyse en fatigue sont deux points spécifiques essentiels au dimensionnement du WEC qui nécessitent le développement de méthodologies et d'outils adaptés.

Après un recensement des différents types de chargements auxquels sont soumis les WEC, le chapitre traitera essentiellement de l'évaluation des efforts extrêmes sur la structure des WEC, et fournira quelques éléments bibliographiques pour l'analyse en fatigue.

### Sources de chargement et états limites

Au cours de son cycle de vie, un dispositif houlomoteur sera soumis à différents type de chargements que l'on peut classer comme suit :

- a.** Chargements permanents : masse de la structure, ballast, efforts hydrostatiques
- b.** Chargement dus à l'environnement : vagues, vent, courants
- c.** Chargements variables, en mode opérationnel : PTO
- d.** Chargements anormaux (associés aux modes de défaillance)
- e.** Chargements accidentels : collisions, envahissement de compartiment, rupture de liaison avec la structure porteuse ou rupture d'ancrage

L'amplitude et les caractéristiques de ces chargements dépendent de la configuration du WEC (opération / installation / maintenance) et de l'état limite auquel elles sont associées.

Les états limites peuvent être classés en plusieurs catégories :

- a. État limite de chargement en conditions normales de fonctionnement ;
- b. État limite de chargement en configuration de survie ;
- c. État limite en configuration de chargement anormal (mode de défaillance) : l'état limite est alors défini en fonction du mode de défaillance ;
- d. Les limites en fatigue qui correspondent à une défaillance due à l'effet d'un chargement cyclique ;
- e. Les états limites accidentels, qui correspondent à des conditions de survie survenant dans le cas où le WEC est déjà endommagé.

Pour dimensionner tous les composants d'un WEC, un grand nombre de cas de chargement environnementaux (vagues, vents, courants) doit être considéré. Cet ensemble de situations devra être aussi exhaustif que possible, et devra inclure, par exemple, les situations de :

- a. Production (avec et sans situation de défaillance, telle qu'un défaut partiel de PTO, par exemple) ;
- b. Démarrage et arrêt du WEC, incluant les conditions d'arrêt d'urgence ;
- c. Mode survie ;
- d. Transport, maintenance, assemblage, réparations.

La norme (DNV GL, 2014) fournit des éléments importants sur la prise en compte de deux types de chargements combinés.

Les dispositifs houlomoteurs sont conçus pour résister à toutes les conditions de chargement auxquels ils sont soumis au cours de leur cycle de vie en condition opérationnelle ou en condition de survie lorsqu'ils sont soumis à des houles extrêmes. L'évaluation de ces efforts extrêmes sur les WEC est un point déterminant pour le dimensionnement des WEC, et sont ainsi souvent un facteur clé dans l'évaluation du coût des WEC.

Dans ce chapitre, sont présentés quelques éléments de méthodologie permettant d'évaluer les efforts extrêmes sur des WEC issus du projet EMACOP.

## Évaluation des efforts extrêmes et stratégies de mise en sécurité

### ■ Méthodologie

#### a. Détermination des cas de chargements extrêmes

Le dimensionnement d'un ouvrage exposé à la houle nécessite d'avoir une estimation de la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes. Dans l'industrie *offshore*, la pratique courante est d'utiliser une période de retour de 100 ans, mais des périodes de retour de 50 ans peuvent également être envisagées pour les WEC (Folley *et al.*, 2016).

Les modèles de distribution des probabilités applicables en eau profondes pour la détermination des hauteurs de houle extrêmes ne sont pas nécessairement applicables en eau peu profonde. La procédure consistera alors à déterminer le climat de houle extrême au large du site envisagé, puis à le transférer à la côte.

#### Détermination des caractéristiques de houle extrême en eau profonde (hauteur significative et périodes associées)

Il faut a minima disposer de cinq années de données de hauteur de houle pour effectuer une analyse des valeurs extrêmes.

En eau profonde, la procédure consiste à utiliser des modèles théoriques de distribution des probabilités des valeurs extrêmes pour ajuster les distributions à long terme des hauteurs de houle. La distribution de probabilité communément utilisée en *offshore* est la loi de Weibull, mais des lois de type Gumbel, Log-Normale ou Exponentielle peuvent également être envisagées (Cerema, 2014). La procédure à suivre pour évaluer une hauteur de houle extrême à partir de la loi de distribution de Weibull est décrite dans le guide en Enrochements (Cerema, 2014) (chapitre 4.2.4.9) ou dans l'ouvrage de B.Molin (2002).

Une fois déterminée les hauteurs significatives de houle associées à plusieurs périodes de retour (1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans), il est nécessaire de leur associer une période moyenne. Pour cela, on peut utiliser le *scatter diagram* du site, effectuer une analyse conditionnelle de la probabilité  $P(T_m|H_s)$ , et l'extrapoler. L'analyse de la cambrure moyenne de la houle peut permettre d'établir un intervalle dans lequel se situe la période moyenne associée au  $H_s$  extrême. Il peut alors être envisagé d'effectuer des simulations sur cet intervalle de périodes et de retenir finalement la valeur de période associée au résultat le plus pénalisant pour le calcul effectué.

### Évaluation de la houle extrême en eau peu profonde

Après avoir évalué le climat de houle extrême en eau profonde, la procédure consiste à transférer ce climat de houle du large à l'ouvrage côtier pour obtenir les conditions de dimensionnement de l'ouvrage. La diminution de la profondeur et la configuration de la côte (forme de la côte, présence d'îles, ...) entraînent une transformation des caractéristiques de houle du large à la côte du fait des phénomènes de diffraction, réfraction, shoaling ou déferlement.

Pour effectuer une description spatiale complète de la houle en pied d'ouvrage, il est nécessaire d'utiliser un modèle numérique de propagation de houle (modèle à phases moyennées de type SWAN WAVEWATCH ou TOMAWAC ou modèle à résolution de phases).

Au stade d'avant-projet, il est envisageable d'utiliser des modèles simplifiés permettant de décrire la transformation de la houle du large à la côte par le biais de formules et diagrammes proposés par Goda (2000). Ce modèle prend en compte les principaux processus de transformation de la houle : réfraction sur les fonds, diffraction, shoaling, et déferlement. Les modifications des caractéristiques de la houle associées à ces processus sont décrites dans le rapport EMACOP élaboré par le Cerema et Egis (Michard B. *et al.*, 2013), et dans le guide Enrochements (Cerema, 2014), chapitre 4.2.4.7.

À partir des données de houle transférées au niveau de l'ouvrage, le calcul de la hauteur de la houle dépassée par 2% des vagues peut être effectué selon la méthode de Battjes et Groenendijk décrite dans le Guide Enrochement (Cerema, 2014). Des relations proposées par Stive (1985) données dans le Guide Enrochement (Cerema, 2014) peuvent également être utilisées pour établir le  $H_{1\%}$  ou  $H_{0,1\%}$  en fonction de la hauteur d'eau.

### b. Évaluation des efforts extrêmes sur les WEC

L'évaluation de l'ordre de grandeur des efforts extrêmes sur un WEC peut se faire soit par le biais d'essais physiques en bassin, soit en utilisant des outils numériques de type SPH ou CFD standard. Deux méthodologies d'évaluation des efforts extrêmes sur les WEC développées dans le cadre d'EMACOP sont illustrées ici :

- a. une méthode de type SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) a été utilisée par Marrone et Le Touzé (2014) pour évaluer les efforts extrêmes sur des dispositifs de type batteur inversé ;
- b. une approche CFD utilisant une discrétisation des équations de Navier-Stokes de type volumes finis, et une méthode de type VOF pour le suivi de l'interface a été utilisée par Abadie (2015) pour évaluer les efforts extrêmes sur des dispositifs de type batteurs inversés et des colonnes d'eau oscillantes.

À travers la présentation de ces méthodologies, nous verrons qu'une des difficultés majeures dans l'évaluation des efforts extrêmes sur les WEC réside dans la détermination du cas de chargement extrême puis dans la capacité de l'outil numérique choisi à simuler de façon satisfaisante cet évènement.

### ■ Exemples

Les exemples présentés dans ce chapitre ont essentiellement pour objectif de **présenter des méthodologies d'évaluation des efforts extrêmes** qui sont ici illustrées pour des dispositifs houlomoteurs sur le site de Bayonne. Les exemples fournis ici utilisent des géométries simplifiées des dispositifs houlomoteurs, et les caractéristiques des vagues extrêmes en pied d'ouvrage ont été établies

à partir de l'approche semi-empirique de Goda. Étant données les approximations faites sur les caractéristiques de houle extrêmes, les résultats d'efforts extrêmes présentés ici ne donnent en aucun cas une évaluation quantitative des efforts extrêmes sur la structure du WEC, mais bien plutôt un ordre de grandeur.

### a. Évaluation des efforts extrêmes sur un batteur inversé par la Méthode SPH

#### La méthode SPH

La méthode SPH est une méthode numérique lagrangienne, particulière, particulièrement adaptée à description de phénomènes violents à surface libre (impacts, phénomènes de *sloshing*, déferlement) et capable de représenter le fractionnement de la masse fluide au cours de la simulation (formation de jets, éjection de gouttes, de spray, etc.). Dans le cadre de notre problématique, les effets visqueux sont considérés comme négligeables (nombre de Reynolds élevé), une formulation faiblement compressible est utilisée (équation de continuité pour les fluides compressibles, et équation d'Euler et Le Touzé, 2014), et seule la phase fluide est modélisée, essentiellement pour réduire les coûts de calcul. Le logiciel « SPH-Flow » développé à l'ECN en collaboration avec l'entreprise HydrOcean, et déjà validé sur des applications de type évaluations de chargements sur une structure suite à un impact de vagues (Oger *et al.*, 2010) (Guilcher *et al.*, 2010, 2013, 2014) est utilisé ici. Afin d'étudier le problème de l'impact 3D d'une vague sur un dispositif de type batteur inversé, les fonctionnalités suivantes implémentées dans le logiciel ont été mises en œuvre :

- a. modèle 2D et 3D ;
- b. parallélisation ;
- c. formulation de conditions aux parois adaptées aux surfaces solides 3D complexes ;
- d. couplage fluide-structure (même si on ne prend pas en compte les effets d'hydroélasticité).

La formulation SPH utilisée ici est une formulation compressible, adaptée aux fluides faiblement compressibles. L'équation de continuité et l'équation d'Euler sont alors utilisés ;

$$\begin{aligned} \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} &= -\nabla p + \rho \mathbf{g} \\ \frac{D\mathbf{r}}{Dt} &= \mathbf{u} \end{aligned}$$

Où  $D/Dt$  est la dérivée particulière,  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $p$  et  $\gamma$  sont respectivement la position d'un point matériel, sa vitesse, la pression et la masse volumique ;  $\mathbf{g}$  l'accélération de la pesanteur. Le fluide est supposé barotrope, et sous cette hypothèse, on a :

$$p(\rho) = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] + p_0$$

Où  $\rho_0$  et  $p_0$  sont constants,  $c_0$  est la vitesse du son, et  $\gamma$  est un paramètre adimensionnel supérieur à 1 (ici  $\gamma=7$ ). Le système d'équation est écrit sous une forme lagrangienne, ce qui est l'un des intérêts de cette méthode particulière. La vitesse du son est choisie la plus petite possible pour s'assurer que le critère  $Ma < 0,1$  est bien respecté.

Le modèle SPH est basé sur l'interpolation d'un champ d'écoulement générique  $f$  par le biais d'une intégrale de convolution avec une fonction noyau  $W$  sur un support compact  $\Omega$  :

$$\langle f \rangle(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{r}') W(\mathbf{r}' - \mathbf{r}; h) dV'$$

Le domaine fluide est discrétisé en un nombre fini de particules représentant les particules fluides élémentaires, chacune ayant sa propre masse et propriétés physiques. La forme discrétisée de l'équation ci-dessus permet d'interpoler une fonction ou son gradient en l'absence de connectivités.

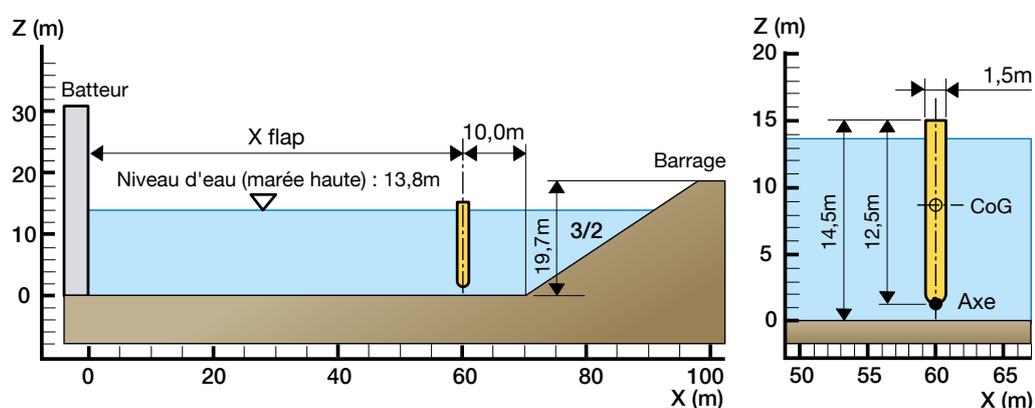
Pour améliorer la stabilité et la robustesse du schéma SPH, un modèle Riemann-SPH décrit dans le rapport de Le Touzé, 2014) est adopté. Le modèle numérique utilisé est également décrit par Oger *et al.* (2010).

Un modèle monophasique a été utilisé pour l'étude de l'impact d'une vague extrême sur un flap oscillant, essentiellement pour des raisons de coût de calcul.

### La configuration étudiée

La configuration envisagée à titre d'exemple est un batteur inversé placé devant la digue de Tarnos, à Bayonne, comme précisé sur la figure ci-dessous. La houle extrême sur ce site a été évaluée par une approche simplifiée exposée ci-après.

Figure 3-52. Batteur inversé devant la digue de Tarnos à Bayonne – Configuration du modèle 2D



### Détermination du cas de chargement extrême

Concernant la méthodologie utilisée pour l'évaluation des chargements extrêmes sur la structure du flap, la littérature sur le sujet montre que les efforts dus à l'impact des vagues sont fortement influencés par la forme de la vague à l'instant même de l'impact. Par conséquent, la prédiction de l'évolution de la houle lors de la propagation du large jusqu'à la structure côtière devient fondamentale. En outre, dans ce contexte une évaluation des efforts ne devrait pas se baser sur la simulation d'un seul événement (de type onde solitaire) mais doit plutôt prendre en compte une simulation temporelle suffisamment longue pour reproduire l'évolution d'un train de vagues. Ce point est fondamental.

Les données de houle disponibles dans le cadre du projet EMACOP ne sont pas assez précises pour reproduire de façon satisfaisante l'évolution d'un train de vagues en pied de dispositifs houlomoteur ;

l'étude présentée ici l'est donc à titre démonstratif. Il serait en effet nécessaire de disposer de données de houles plus précises en pied d'ouvrage pour effectuer des simulations plus réalistes des efforts extrêmes sur le dispositif houlomoteur. En conséquence, les résultats présentés dans ce chapitre sont donnés à titre d'exemple, mais ne peuvent fournir qu'un ordre de grandeur des efforts extrêmes sur le flap considéré.

En première approximation, les caractéristiques de la vague dimensionnante proche de la côte ont été calculées par le biais de formules semi-empiriques de Goda. Puis une vague avec ces caractéristiques a été générée dans un bassin numérique avec un générateur de houle virtuel. En suivant cette procédure la forme de la vague au moment de l'impact est complètement artificielle et n'est pas forcément représentative de la réalité. Afin d'estimer les conditions les plus critiques, et les chargements induits sur la structure, une matrice de simulation

a été envisagée en changeant certains paramètres du domaine pour pouvoir estimer les conditions les plus sévères.

Les paramètres étudiés dans les simulations 2D sont alors :

- a. la position du batteur par rapport au déferlement de la vague ;
- b. le niveau de marée (niveau de marnage correspondant aux plus fortes marées de vives eaux pour un coefficient de marée de 115) ;
- c. les degrés de liberté du batteur (rotation libre ou flap bloqué).

#### Matrice de tests

La matrice de tests envisagée pour les simulations effectuées en 2D est présentée dans le tableau ci-dessous.

**Figure 3-53. Matrice de tests pour les simulations 2D. Les configurations HT, MT, et BT correspondent respectivement aux profondeurs à marée haute, à l'étale et à marée basse, 60 80 et 100 sont les distances (en m) du flap au batteur de houle**

Configuration	Profondeur(m)	xflap (m)	Flap bloqué
HT50	13,8	50	non
HT60	13,8	60	non
HT80	13,8	80	non
HT100	13,8	100	non
HT60_BI	13,8	60	oui
MT50	11,3	50	non
MT60	11,3	60	non
MT80	11,3	80	non
MT100	11,3	100	non
BT50	8,8	50	non
BT60	8,8	60	non
BT80	8,8	80	non
BT100	8,8	100	non
BT60_BI	8,8	60	oui

#### Simulations 2D

Sur cette matrice de tests, des dynamiques d'impact assez différentes ont été obtenues, dépendamment de la forme de la vague au moment de l'impact. Les figures page suivante montrent les efforts globaux évalués sur le flap (efforts horizontaux, et moments) pour trois profondeurs d'eau différentes (13,8 m, 11,3 m et 8,8 m). Dans la majorité des configurations, les valeurs maximales des efforts et moments sont respectivement d'environ 0,5 MN et 1 MN.m. Lorsque l'impact avec le flap se produit avant le déferlement, l'effort résultant est relativement faible ; c'est le cas dans la majorité des configurations étudiées. Cependant, des valeurs significativement plus élevées ont été observées dans les cas MT100, BT80 et BT100 avec des valeurs maximales d'efforts  $F_x$  de l'ordre de 3,5 MN pour le flap dans la configuration BT100. Dans ces trois configurations, la dynamique de l'impact est différente : l'impact a lieu juste avant le début du déferlement ou lorsque le déferlement se produit. Le front incident est alors quasiment vertical au moment de l'impact : l'impact est de type '*Flip Through*'.

Figure 3-54. Chargements globaux en termes de force horizontale (gauche) et moments (droite) en fonction de la distance du dispositif au générateur de houle. En haut : profondeur d'eau : 13,8 m, au milieu : 11,3 m, en bas : 8,8 m

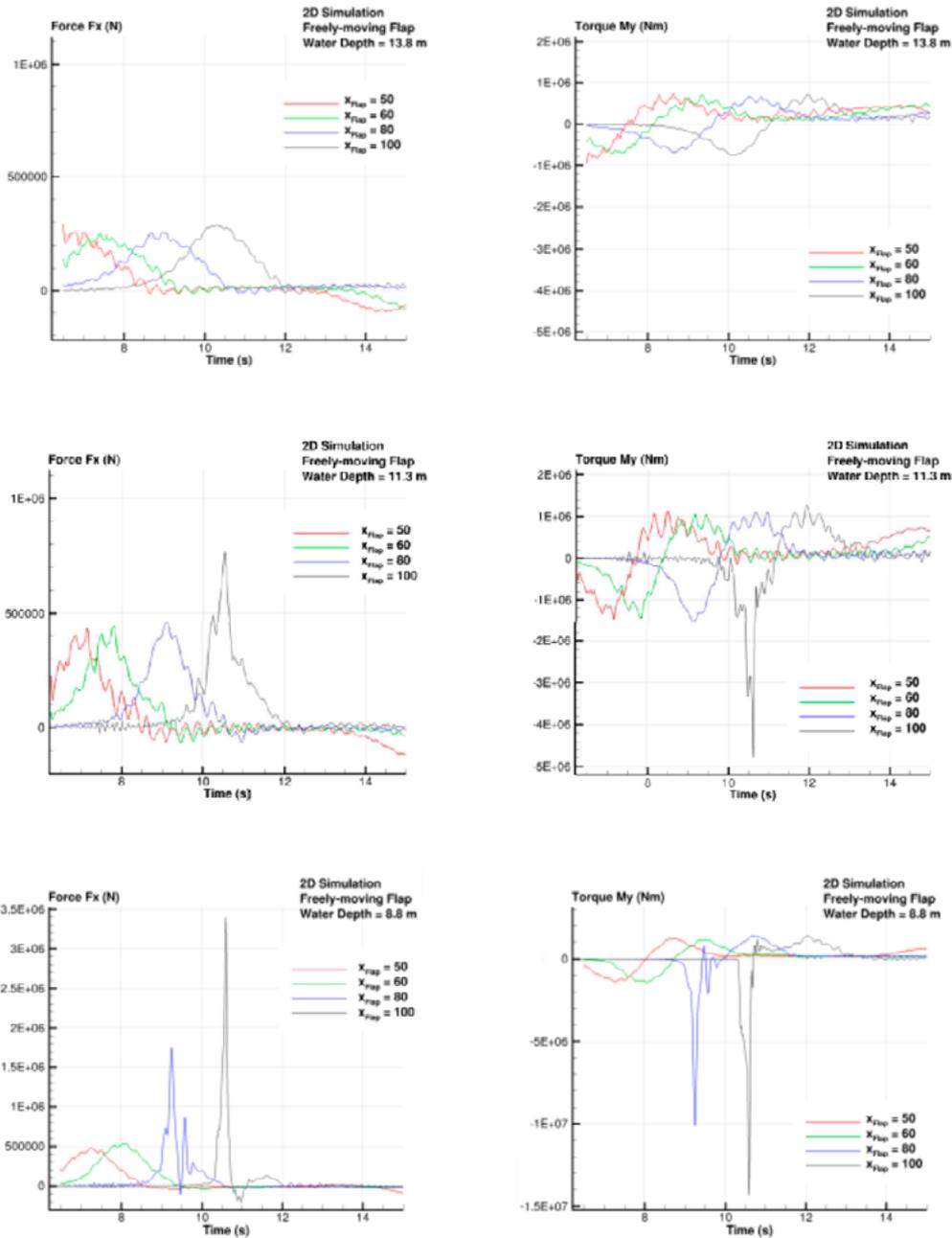
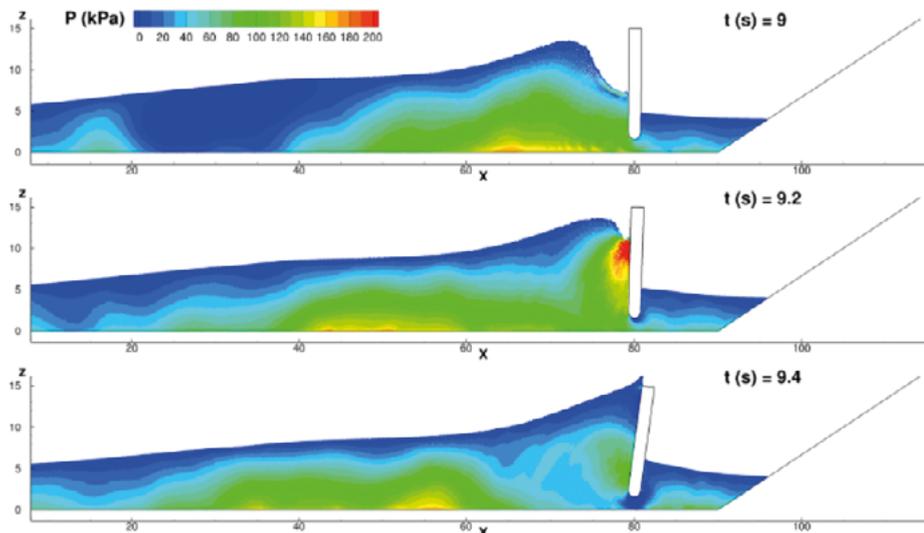


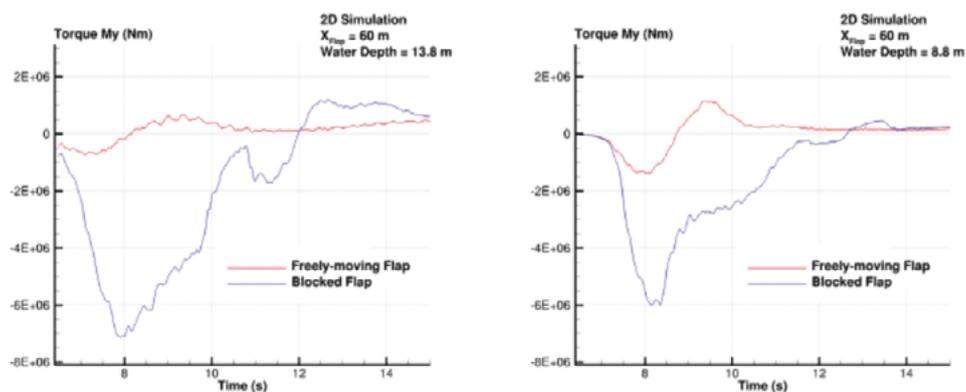
Figure 3-55. Évolution des champs de pression au moment de l'impact pour le cas BT80 (Depth= 8,8 m et  $x_{\text{flap}}= 80$ ). L'impact est de type *flip through*.



Un paramètre important qui peut fortement influencer l'intensité de l'effort sur le flap est la possibilité pour le flap d'être libre en rotation, ou bloqué. Des simulations ont donc également été effectuées en bloquant la rotation du flap, et comme on pouvait s'y attendre, cette configuration conduit à des efforts plus élevés sur le flap.

Les figures ci-dessous illustrent deux exemples de comparaison des moments calculés dans les configurations HT60 et BT60 avec le flap libre ou bloqué. Dans le cas BT60, le moment sur le flap est environ 10 fois plus élevé dans la configuration de flap bloqué par rapport au flap libre.

Figure 3-56. Comparaisons des moments calculés – configuration flap libre ou flap bloqué dans les cas HT60 (à gauche), ou BT60 (à droite).



### Simulations 3D

Les cas MT100 et BT80 présentés ci-dessus ont également été étudiés en 3D. La procédure utilisée est la même que dans les cas 2D : la vague est dans un premier temps générée dans un bassin vide, puis le flap et la digue sont ajoutés. Pour réduire les coûts CPU, un modèle utilisant des tailles de particules variables a été utilisé. Les particules les plus petites ( $\Delta x=0,1\text{m}$ ) sont uniquement utilisées au voisinage du flap ; puis la taille des particules est augmentée graduellement, comme le montre la figure ci-dessous. Les profils de vague générés en 2D et 3D sont également comparés, et montrent que les deux solutions sont quasiment superposées. Les simulations 3D ont été effectuées avec environ 10 millions de particules, et ont duré 48 heures (simulations réalisées sur 200 cœurs).

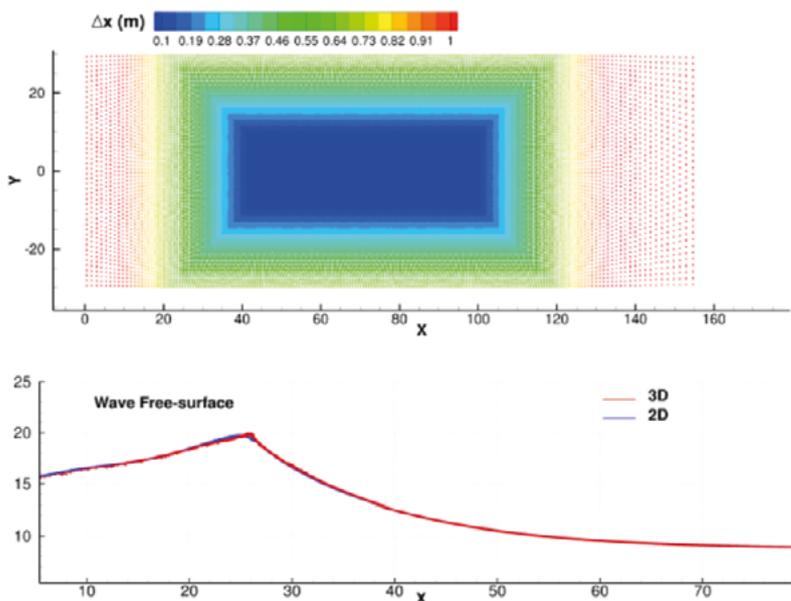
Contrairement aux simulations effectuées en 2D, le déferlement commence ici avant l'impact. Cependant, la vague impacte le flap avec une cambrure importante, ce qui génère des splashes, avec émission de jets et fragmentations. En comparaison avec le cas 2D,

- Le champ est moins régulier à cause du front de vague fragmenté. Le pic de pression est proche de celui du cas 2D, bien qu'il soit plus étalé en espace et en temps pendant l'impact.

- Dans le cas 2D, le moment sur le flap est surestimé d'un facteur 2 par rapport au cas 3D. Ceci peut être justifié par les deux raisons suivantes :
  - dans le cas 3D, l'impact est plus long à cause de la non-uniformité du front incident.
  - Le flap est quasiment rectangulaire, les effets 3D sur l'écoulement peuvent être non-négligeables.

Une analyse des efforts extrêmes s'appliquant sur un dispositif houlomoteur de type flap oscillant partiellement immergé a été effectuée en utilisant une méthode SPH 2D et 3D. Des analyses paramétriques ont permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur les efforts d'impact (profondeur d'eau, flap bloqué ou libre, initiation du déferlement par rapport à la position du flap). Il résulte de ces analyses que la génération de la vague extrême est l'un des points les plus critiques. En effet, les simulations ont montré une forte dépendance des efforts à la forme de la vague lors de l'impact, ce qui montre qu'une évaluation déterministe des efforts extrêmes sur le flap nécessite de pouvoir simuler de façon satisfaisante une vague extrême réaliste au niveau du dispositif houlomoteur.

Figure 3-57. En haut : Configuration initiale des particules : La résolution la plus fine ( $\Delta x=0,1\text{ m}$ ) est utilisée au voisinage du flap. En bas : Comparaison des profils de vagues générés par les modèles 2D et 3D.



### Stratégie de mise en sécurité du flap

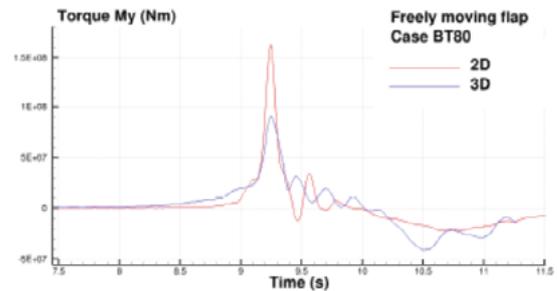
Afin de limiter les efforts extrêmes sur le flap, une configuration de survie pourrait consister à positionner le flap dans une configuration bloquée parallèlement au sol. Il serait souhaitable d'évaluer les efforts extrêmes sur le flap dans cette configuration, mais on peut penser que les efforts seraient dans ce cas moins importants que dans le cas du flap vertical à l'impact, cas qui restera dimensionnant.

En conclusion, l'étude présentée ici illustre une méthodologie d'évaluation des efforts extrêmes sur les dispositifs houlomoteurs, et également l'intérêt de produire des études paramétriques pour ce type de problématique. En revanche, les caractéristiques de houle extrêmes étant issues d'un modèle semi-empirique de type Goda (2004), et le modèle étant monophasique, les résultats d'évaluation d'efforts extrêmes données ici ne constituent en rien une évaluation quantitative précise des efforts extrêmes sur le WEC.

#### b. Evaluation des efforts extrêmes sur une OWC

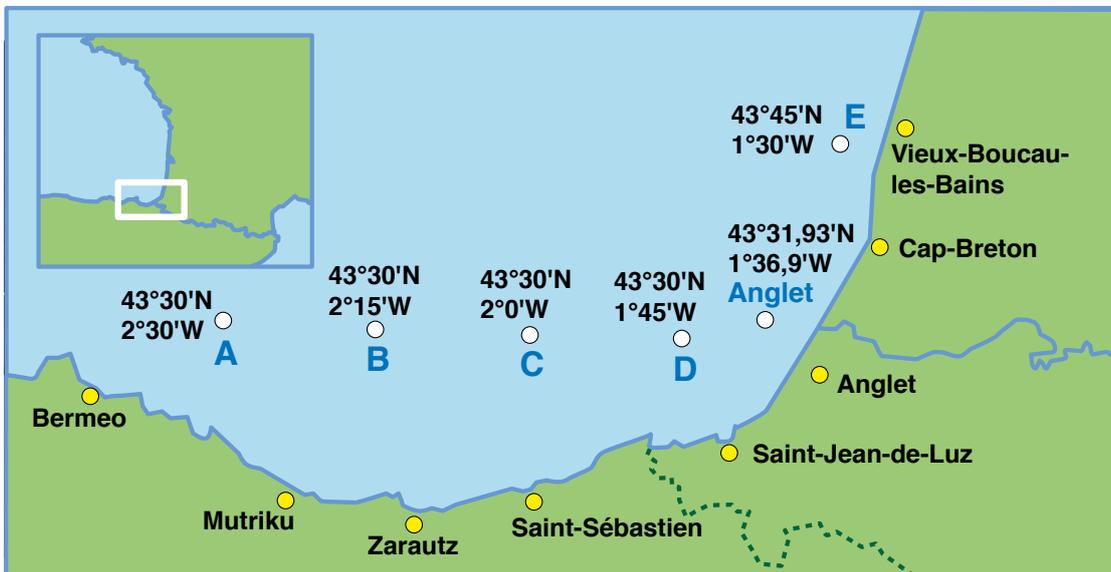
La méthode développée à l'UPPA par Abadie *et al.* est décrite dans le rapport EMACOP (Abadie, 2015) permet également de simuler l'interaction d'un corps mobile rigide avec un écoulement à surface libre. Les équations de Navier Stokes sont discrétisées sur une grille cartésienne fixe en utilisant une formulation de type volume finis. Une méthode de type Marker and Cells (MAC) (Harlow et Welch, 1965) est utilisée pour la résolution des équations. L'originalité de la méthode développée ici est l'utilisation d'une technique de pénalisation de la viscosité dans les équations de Navier-Stokes pour modéliser un solide au sein du fluide. Elle consiste à attribuer une valeur très élevée de la viscosité dans la région solide de telle sorte que le fluide s'y comporte comme un solide. Le suivi d'interface est effectué en utilisant une approche de type *Volume of Fluid* (VOF).

Figure 3-60. Cas BT80 – Moment autour de l'axe de rotation – Comparaison modèle 2D – modèle 3D



L'évaluation des efforts extrêmes sur des dispositifs de type batteur inversé et OWC sont effectués ici en utilisant comme site de référence l'extrémité de la digue du port de Bayonne. Les modèles développés démontrent à nouveau, comme dans le cas de l'étude SPH et Le Touzé (2015), la difficulté de simuler des impacts impulsifs extrêmes, et également de connaître les caractéristiques de la houle extrême en pied d'ouvrage.

Figure 3-61. Carte de la région de Bayonne, position des données hindcast (A, B, C et D), et bouée d'Anglet (Abadie, 2015)



### Méthodologie d'évaluation des conditions de houle extrême

Dans la présente étude, on a supposé que les conditions de houles les plus sévères pour les dispositifs houlomoteurs étaient des impacts de type « *Flip Through* », pour lesquels la vague impacte la structure avec un profil vertical.

Les données de houle *offshore* sont constituées de :

1. Données de houles hindcast (reconstruites à partir de simulations rétrospectives) fournies par les ports espagnols (<http://www.puertos.es/>). Les simulations ont été effectuées avec un modèle WAM à partir des données hindcast SIMAR44 (hindcast 1958 à 2001) et WANA(2001-2009)
2. Mesures de houle effectuées par l'UPPA et le CEREMA au large de la digue de Bayonne, par une profondeur de 50m

La profondeur en bout de digue a été évaluée à 13,8 m. Dans cette étude, l'hypothèse est faite que les cas de houle les plus sévères sur le site se produisent au niveau d'eau le plus haut. En effet, c'est dans cette configuration de profondeur que les vagues déferlantes les plus fortes sont susceptibles d'arriver jusqu'à la structure. En appliquant le rapport hauteur de houle / profondeur maximale ( $H/h=0,78$ ), on aboutit à des hauteurs de houle de l'ordre de 10-11m. Les données de houle montrent que ces houles ont des périodes comprises entre 15 et 19 s, avec une direction de 300°.

Une autre technique consiste à utiliser une approche de type Goda pour déterminer les hauteurs de houle en pied d'ouvrage. Dans cette étude, l'indice de déferlement proposé par Goda est le suivant :

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.17 \frac{L_0}{h_b} (1 - \exp(-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15m^{4/3})))$$

Où : H est la hauteur de la houle, h la profondeur,  $L_0$  la longueur d'onde en eau profonde,  $m=\tan \theta$  est la pente des fonds. Cette formule de Goda appliquée à des houles de périodes 15 à 19 s, fournit des paramètres de houle présentés dans le tableau ci-après.

T (s)	$L_0$ (m)	$h_b$ (m)	$\gamma_b$	$H_b$ (m)	$L_b$ (m)	$c_b$ (m/s)
15	351	13,8	0,75	10,39	173	11,51
16	399	13,8	0,75	10,50	188	11,76
17	451	13,8	0,77	10,60	204	11,99
18	505	13,8	0,77	10,69	220	12,20
19	563	13,8	0,78	10,76	236	12,40

Une fois déterminées les caractéristiques principales des vagues potentiellement les plus extrêmes sur l'ouvrage, ces cinq vagues ont été simulées à l'aide du code Thetis afin de sélectionner la (les) vague(s) dont la dynamique est susceptible de générer les efforts les plus extrêmes sur la structure du dispositif houlomoteur.

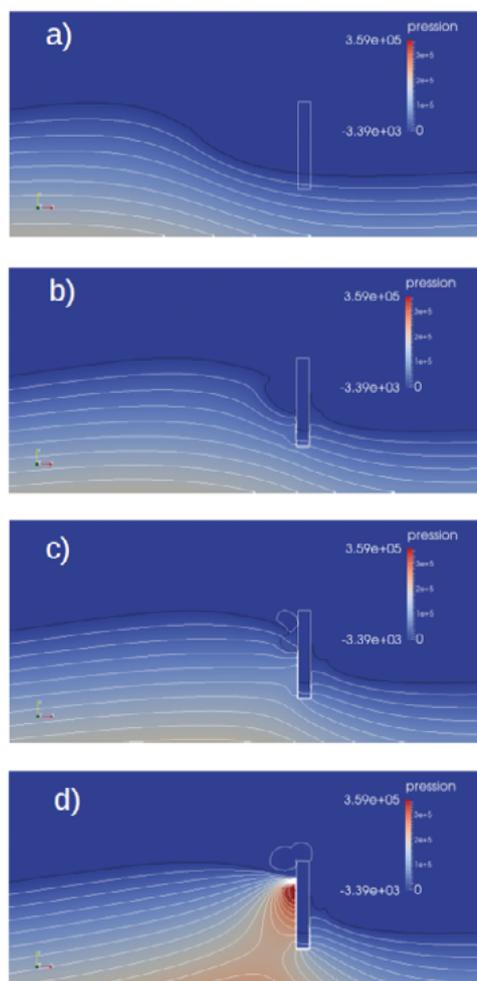
L'analyse de ces simulations a montré que :

- a. la vague de plus petite période ( $T=15$  s) génère le profil le plus vertical (impact de type « *flip-through* »)
- b. la vague la plus rapide est la vague la plus longue ( $T=19$  s), générant ainsi l'impact le plus rapide sur la structure.

Pour voir parmi ces deux vagues quelle est la plus critique en termes d'impact sur la structure ; des simulations ont été effectuées pour évaluer la pression générée sur un mur vertical. Pour cela, un calcul préliminaire est effectué sans l'obstacle, pour obtenir la condition initiale satisfaisante pour étudier le processus d'impact. À partir de cet état initial, l'obstacle est placé à différentes distances de la crête déferlante pour trouver la condition d'impact de type *flip-through*. Le maximum de pression (359b kPa) est généré pour une vague de période  $T = 15$  s, lorsque l'obstacle est placé à  $X/L_b = 0,595$ . Globalement, les pressions générées par les vagues de période  $T = 15$  s sont plus élevées que celles générées par les vagues de période  $T = 19$  s ; l'angle d'impact de la vague sur l'ouvrage semble donc être un paramètre plus important que sa vitesse d'incidence. Ce cas de vague de période

$T = 15$  s et  $X/L_b = 0,595$  est donc identifié comme étant le plus pénalisant pour l'ouvrage et est donc retenu pour l'étude de la survivabilité. Ce choix doit toutefois être pris avec précaution, car cette pression est très localisée, et intervient sur un intervalle de temps très court.

Tableau 3-62. Impact de type *Flip-through*, cas  $T=15$ s, obstacle à  $X=103$ m, Pression calculée, temps (relativement à T) : a) 0,297, b) 0,367, c) 0,381, d) 0,385



### Évaluation des efforts extrêmes sur une OWC

La configuration d'OWC étudiée par Delauré et Lewis (2003) est proposée ici, et a été adaptée aux spécificités du site de Bayonne. Le modèle présenté ici est 2D. Les dimensions principales de l'OWC sont les suivantes :

Épaisseur du mur avant (m)	1,84
Longueur de la chambre (m)	9
Profondeur d'eau (m)	13,8
Hauteur de la structure (m)	20

La turbine est modélisée par un trou au niveau du mur arrière.

La figure 3-64 ci-contre illustre la distribution de pression et la forme de la surface libre autour de l'impact. Au moment de l'impact de type « *Flip-through* » sur le mur avant, le maximum de pression sur le mur avant est de l'ordre de 300 kPa. Après ce premier impact, la pression décroît sur le mur avant, mais la surface libre interne se déforme très fortement, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'orifice représentant la turbine. L'air ne pouvant alors plus être expulsé par ce trou, la pression augmente drastiquement dans la chambre. À cet instant, la pression dans la chambre atteint 5-10 bars pendant un certain temps durant lequel les chargements sur la structure sont énormes. Le caractère incompressible du code utilisé ne permet certainement pas de modéliser correctement la physique des écoulements dans la chambre. En revanche, ce type de simulation permet d'identifier des conditions de chargement potentiellement dangereuses pour la structure (fort accroissement de la pression dans la chambre). Dans la suite, on distinguera les chargements associés à l'impact « *Flip-Through* » (Type I), et les chargements associés à l'augmentation de pression dans la chambre (Type II)

Figure 3-63. Schéma de la structure de l'OWC (Lewis, 2003)

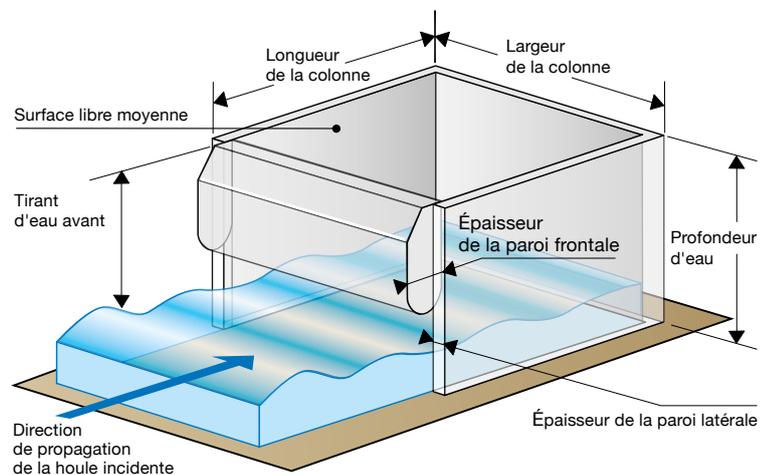
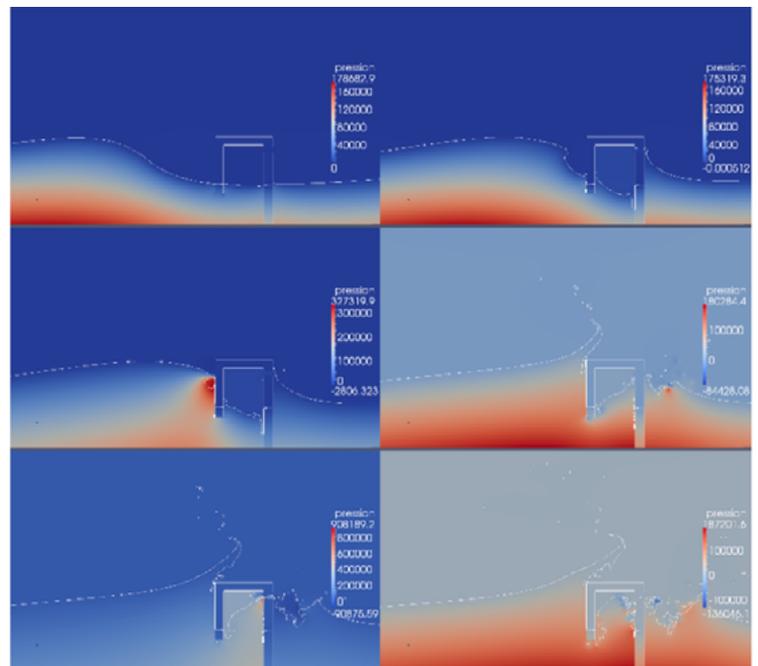


Figure 3-64. Simulation d'un impact de vague sur une OWC. Clichés de la pression et de la surface libre aux instants  $t=4,34, 5,48, 5,8, 6,71, 7,08, 7,5s$ . Les valeurs maximales de pression sont respectivement (en kPa) : 179, 175, 327, 180, 908, 187



Par intégration des pressions, les efforts horizontaux et verticaux ont été évalués sur la structure, ainsi que les moments de renversement par rapport au pied de l'ouvrage. Les chargements de type I et II peuvent alors être clairement identifiés, comme le montre la figure ci-dessous. Lorsque les efforts de type II deviennent significatifs, on observe un doublement de l'effort horizontal. Autour de 7 s, les chargements de type II sur la structure (efforts horizontaux et moments de retournement) sont énormes et non acceptables pour la structure. Il peut alors être envisagé de prévoir en configuration de survie des ouvertures au niveau du plafond de l'OWC. Une étude paramétrique a été menée en considérant un trou de surface 10 à 50 % de la surface du plafond. Cette solution a pour effet de retarder légèrement les maxima de chargement et de réduire leur durée ; mais les valeurs maximales constatées d'efforts et de moments de renversement sont supérieures à celles calculées dans la configuration précédente (i.e. sans porosité du plafond).

La présentation de ce modèle numérique, et l'illustration dans le cas d'une OWC, montrent à la fois l'intérêt et les limitations de ce type de modèle pour l'étude de la survivabilité des WEC.

En effet, les principales limitations du modèle sont les suivantes :

- a. comme mentionné dans l'étude du flap avec un modèle SPH, un point essentiel de l'étude de la survivabilité des WEC réside dans la détermination des configurations de houles extrêmes les plus pénalisantes pour la structure de l'ouvrage (en zone côtière, avec prise en compte du marnage), puis dans la modélisation numérique de ce type d'évènement ;
- b. le modèle est 2D, et incompressible, ce qui ne permet pas de prendre en compte finement la physique des écoulements dans la chambre et au niveau du mur avant.

L'utilisation de ce modèle ne peut donc être utilisée pour évaluer précisément les efforts extrêmes sur la structure d'une OWC, mais peut en revanche permettre, à un stade d'avant-projet d'effectuer des études paramétriques et de fournir un ordre de grandeur pertinent des efforts extrêmes afin d'ef-

Figure 3-65. Efforts et moments résultant sur la structure : En haut : effort horizontal (-), et (..) efforts verticaux en kN. En bas : Moment de retournement résultant en kN.m

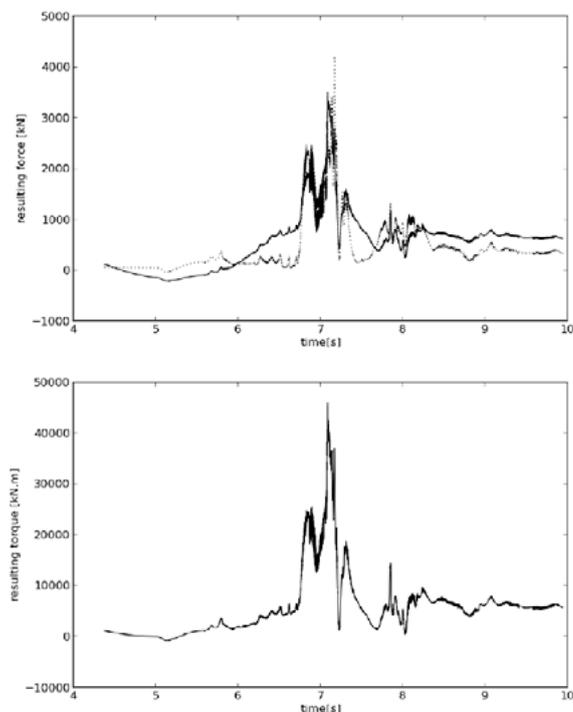
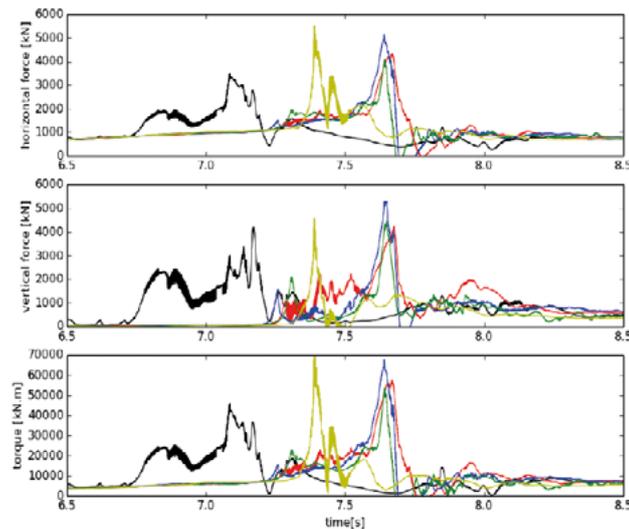


Figure 3-66. Forces résultantes et moments pour différentes porosités du plafond. En haut : effort horizontal, au milieu : effort vertical, en bas : moment de renversement. Porosité : courbe noire : 0%, courbe rouge : 10%, courbe bleue : 20%, courbe verte : 33%, courbe jaune : 50%



fectuer un pré-dimensionnement de la structure. Les travaux menés par Pinon (2015) dans le cadre du projet EMACOP ont permis de modéliser de l'impact d'une vague extrême sur une géométrie simplifiée de colonne d'eau oscillante par le biais d'une méthode SPH 2D faiblement compressible, mono-phasique (code open source JOSEPHINE développé au LOMC). Le code a été adapté pour permettre de simuler l'impact d'un soliton sur une géométrie simplifiée de colonne d'eau oscillante. La méthode SPH semble assez bien adaptée pour la simulation des cas de déferlement et d'impact sur les structures mixtes (protection-récupération d'énergie). La méthode SPH utilisée converge (en espace et en temps) sur ces cas d'impact bref et intense. Une étude paramétrique a été effectuée afin de déterminer les caractéristiques du soliton (profondeur d'eau et amplitude) qui conduiront à l'impact le plus sévère sur le mur avant de l'OWC. L'étude se limite ici à la caractérisation de l'impact d'un soliton sur le mur avant, et n'étudie pas le comportement du fluide dans la chambre de l'OWC après l'impact (voir figures ci-dessous). Les efforts sur la structure ont été déterminés dans le cas de l'impact le plus sévère qui correspond à un impact de type « flip-through » pour la configuration  $a = 4,1$  m, avec une profondeur de 5,1 m correspondant à une situation de mi-marée. Des pressions de l'ordre de 120 kPa ont été obtenues localement sur le mur avant (en  $y=12,695$  m ; i.e. environ à mi-hauteur du mur avant. Des premières validations du code ont ainsi été effectuées dans le cadre d'EMACOP, et les résultats obtenus sont encourageants pour la poursuite de développements tels que le passage au diphasique et au 3D nécessaire pour la modélisation de l'interaction fluide-structure dans la chambre de l'OWC.

Figure 3-67. Configuration d'impact d'une vague extrême sur une géométrie simplifiée d'OWC.

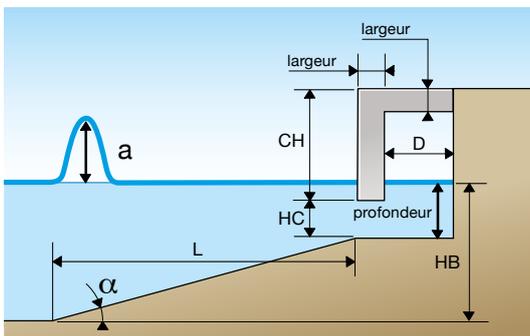


Tableau 3-9. Configurations adoptées pour la géométrie de l'ouvrage

	$D_{(m)}$	depth (m)	HC (m)	CH (m)	wth (m)	Echelle
Config. simulé	0,124	(0,136 ; 0,272)	0,132	0,516	0,066	1/25
Equiv. réel	3,1	(3,4 ; 6,80)	3,3	12,9	1,65	1
Mutriku (30)	3,1	(3,4 ; 6,80)	3,3	12,9	1,65	1
Pico (9, 24)	12	7,8	5,3	10,3*	1,0	1
Delauré <i>et al.</i> (11, 10)	9,0 6,84 5,4 12,0	8,7	6,97	1,73 1,73 1,73 1,73	1,84 6,73	1
Zhang <i>et al.</i> (31)	0,64	0,92	0,77 0,69	0,6	0,04 0,08	1/12,5

La figure 3-68 montre l'évolution des pressions sur le mur avant au cours de l'impact.

Figure 3-68. Évolution des pressions sur le mur frontal lors de l'impact, avec  $a = 4$  m et depth = 5,1 m

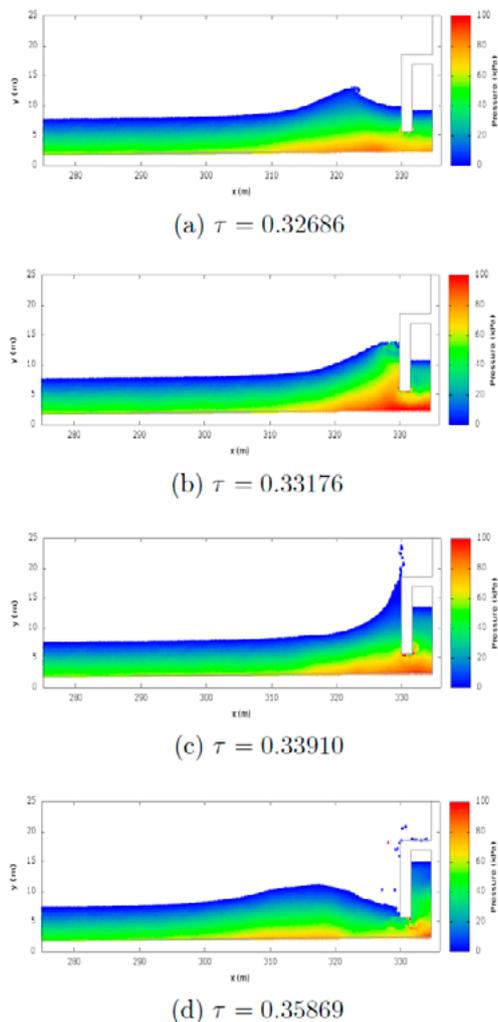
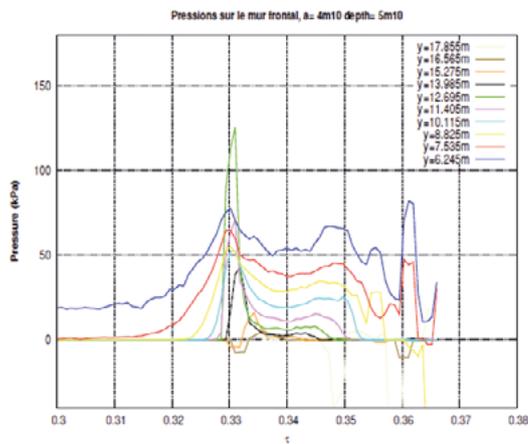


Figure 3-69. Pressions sur le mur frontal, a=4m10, depth=5,1m



(b) depth = 5.10m

### Éléments bibliographiques pour l'étude en fatigue

L'analyse en fatigue des WEC est en dehors du périmètre du projet EMACOP, mais cet aspect est un point important à considérer pour le dimensionnement des WEC. Dans le cadre de cette synthèse, quelques éléments bibliographiques de référence sont présentés.

Dans le cas de structures en mer, les ruptures liées à la fatigue sont souvent une conséquence de la corrosion au niveau des soudures ou des boulons.

L'analyse en fatigue des WEC doit prendre en compte tous les événements qui peuvent contribuer à la fatigue, en conditions opérationnelles ou non. Les principaux chargements variables pouvant induire de la fatigue au niveau de la structure et des différents composants des WEC sont les suivants : houle et/ou combinaison houle/courant, les détachements tourbillonnaires, le *slamming*.

L'estimation de la durée de vie en fatigue de la structure et également des différents composants d'un système mécanique est un problème complexe

qui nécessite de caractériser les sollicitations, les matériaux, et la structure.

De façon usuelle, la méthodologie consiste à effectuer des tests en fatigue, et à les analyser par le biais de courbes S-N (*Stress vs number of cycles*). Ces essais sont effectués à amplitude constante. Pour avoir une estimation de l'endommagement subi par le matériau au cours de son cycle de vie, on utilise ensuite la loi de Palmgren-Miner qui suppose que le dommage est cumulatif de manière linéaire. La norme DNV-RP-C203 (2014) préconise ce type d'approche. Les éléments bibliographiques ci-dessous fournissent des éléments réglementaires, méthodologiques ainsi que des exemples d'analyse en fatigue de structures en mer.

### ■ Analyse en fatigue, quelques éléments bibliographiques :

DNV – Recommended Practice DNV-RP-C203 - Fatigue Design of offshore steel structure, Det Norske Veritas: Oslo, Norway, 2014

Offshore Standard DNV-OS-C502 – Offshore Concrete Structures, Det Norske Veritas: Oslo, Norway, 2010

DNV, Recommended Practice DNV-RP-A203 'Qualification of New Technology', Det Norske Veritas: Oslo, Norway, 2011

DNV – Classification notes N°.30,7., 'Fatigue assessment of ship structures', Det Norske Veritas: Oslo, Norway, April 2014

DNV, 2014 : 'Design of offshore wind turbine structures – DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Oslo, Norway, 2014

ABS, 2014 – 'Guide for Fatigue Assessment of Offshore Structures', American Bureau of Shipping (ABS), Houston, TX

EMEC, 2009 : Guidelines for design Basis of Marine Energy Conversion Systems

Kenny C.J, Findlay D., Lazakis I., Shek J., Thies P.R., 'Lessons Learned from 3 years of failure : Validating an FMEA with historical failure Data, Proceedings of 12th EWTEC conference, 27th Aug- 1st Sept 2017, Cork, Ireland

Ambühl S., Ferri F., Kofoed J.P., Sorensen J.D., 'Fatigue Reliability and calibration of fatigue design factors of wave energy converters', International Journal of Marine Energy 10 (2015)

Coe R.G., Yu Y-H., van Rij J., 'A survey of WEC reliability, Survival and Design Practices', Energies 2018,11,4

# 4. Effets sur les ouvrages porteurs

## 4.1 Ouvrages porteurs concernés

Les systèmes de récupération de l'énergie de la houle concernent des sites à forte énergie. Les ouvrages qui les concernent sont massifs, bien protégés sur le parement côté mer et de hauteur et largeur suffisantes pour réduire les débits de franchissements de manière significative.

Parmi ces ouvrages, on discerne :

- Les digues à talus ;
- Les digues mixtes ;
- Les digues verticales ;
- Les digues brises lames.

Parmi les digues à talus, on distinguera celles qui protègent le front de mer habité avec des profondeurs d'eau entre 3 et 5 mètres de celles qui sont en position plus avancée et qui protègent des sites portuaires (profondeur : 5 à 15 mètres).

Les premières peuvent présenter un corps en remblai alors que le parement est en maçonnerie, béton ou/et enrochements.

Les secondes présentent le plus souvent une carapace en enrochements qui protège un corps fait de matériaux granulaires de plus faible dimension.

Figure 3-70. Digue à talus à carapace (photo ISL)



Les digues mixtes sont adaptées aux grandes profondeurs et aux forts marnages. Elles sont constituées d'un soubassement sous la forme d'une digue à talus surmonté d'une digue quasi verticale monolithique en caissons pour les plus récentes, en maçonneries pour les plus anciennes (muraille).

## 4.2 Processus de rupture des digues de front de mer

Le tableau ci-après présente les processus qui peuvent conduire à la rupture ou à la naissance de désordres significatifs sur les digues de front de mer.

Digues à talus : Parties d'ouvrage	Situations de dangers	Causes possibles	Conséquences
Corps de digue et talus côté protégé	Erosion interne	Erosion du talus par surverse / franchissements Infiltrations Départ de matériaux, cavités	Inondation par surverse/franchissement Ouverture d'une brèche
		Tassement des matériaux de corps de digue	Infiltration, départ de matériaux > défaut de support de la carapace
Fondation	Glissement Abaissement	Affouillement de pied Tassement	Ouverture d'une brèche par érosion côté mer Augmentation de l'aléa surverse
Carapace extérieure	Rupture, érosion, basculement	Vieillessement Action des vagues Départ de matériaux	Ouverture d'une brèche par érosion côté mer
Muret parapet	Dislocation Effondrement	Vieillessement Action des vagues	Diminution du niveau de protection > Surverse/franchissement
Points singuliers	Déferlement	Défaut de transition, affouillement local	-

## Potentiels de dangers des digues à talus

Digues mixtes et verticales

Digues à talus : Parties d'ouvrage	Situations de dangers	Causes possibles	Conséquences
Corps de digue en cas de muraille	Oscillations, vibrations	Déferlement des vagues, franchissement	Destruction du parement déformation
Pied	Affouillements, tassements différentiels	Déferlement en pied, défaut de butée de pied	Déformation désordres de la muraille > dislocation
Fondation	Instabilité géotechnique	Vagues extrêmes	Déformation > désordres de la muraille > dislocation
Couronnement	Dislocation Effondrement	Vieillesse Action des vagues, franchissements	Diminution du niveau de protection > Surverse/franchissement > attaque du corps de digue
Points singuliers	Déferlement	Défaut de transition, affouillement local	-

### Potentiels de dangers des digues mixtes et verticales

L'influence des systèmes de récupération d'énergie sera analysée par la suite en pointant les principaux processus qui peuvent être affectés par leur présence. Le dimensionnement et le design dépendent cependant de chaque configuration d'ouvrages et tous les processus doivent être revus en détails pour bien apprécier toutes les prescriptions techniques nécessaires pour garantir un même niveau de sûreté de l'ouvrage sur lequel porte le système de récupération de l'énergie des houles.

Pour les dimensionnements, on se référera aux eurocodes. On pourra également s'appuyer sur les ouvrages du CEREMA (CETMEF, 2002).

## 4.3 Effet des systèmes de récupération de l'énergie des houles sur l'ouvrage porteur

### Le système houlomoteur de récupération d'énergie par franchissement

#### ■ Processus de rupture affectés

Les études menées sur la digue de Socoa montrent qu'il n'est pas économiquement rentable de faire porter le système à franchissement sur l'ouvrage

existant. Le système à franchissement a donc par conception peu d'interaction avec l'ouvrage porteur. Il reprend par sa structure les efforts et les achemine jusqu'à ses fondations. Un remblai vient remplir les espaces entre la structure et l'ouvrage existant.

Dans le cas des études menées sur la digue de Socoa (Emacop, Jellouli, 2014) les seules interactions sont d'ordre hydrodynamique dans les secteurs de transition entre l'ouvrage sans système de récupération et la partie d'ouvrage concernée par l'ajout du système. Dans le cas du projet envisagé sur la digue brise lame d'Artha, le schéma de principe a choisi de porter l'ouvrage sur la seule face avant de la digue [Emacop, Mory, Dugor, Rihouey, 2015]. Le système renforce la protection en amont de la digue et les interactions restent faibles sauf si la capacité de dissipation du système est moindre que les enrochements existants qu'il remplace.

Les processus principaux affectés par l'ouvrage sont les suivants :

- Points singuliers : la géométrie du dispositif, s'il ne couvre pas l'ensemble du linéaire de digue occasionne des discontinuités qui engendrent de possibles concentrations des contraintes liées aux houles ;
- Ensemble de la digue : le dispositif peut être favorable du point de vue des débits de franchissement, des affouillements et des instabilités géotechniques puisqu'il vient récupérer l'énergie ; l'ampleur de cet effet dépend du nombre de réservoirs et leur altitude. Il convient cependant, en cas

de remplacement d'un talus en enrochements par un tel dispositif, de confirmer la réduction des débits de franchissements aux conditions extrêmes.

#### ■ Vérification de dimensionnement relative à l'ouvrage porteur

Les conditions de fondation de l'ouvrage porteur doivent évidemment être reconnues puisque l'ouvrage viendra s'appuyer sur ces mêmes fondations en arrière et en avant de l'ouvrage existant.

Les secteurs de transition longitudinale entre le système de récupération et l'ouvrage ancien devront faire l'objet de protections largement dimensionnées.

### Le système houlomoteur à colonnes oscillantes

#### ■ Processus de rupture affectés

Le design des colonnes oscillantes prévoit une chambre verticale ou pentée. Les sollicitations sur les structures sont importantes. On discerne les points d'impacts sur le mur de front et sur la base ouverte de la chambre.

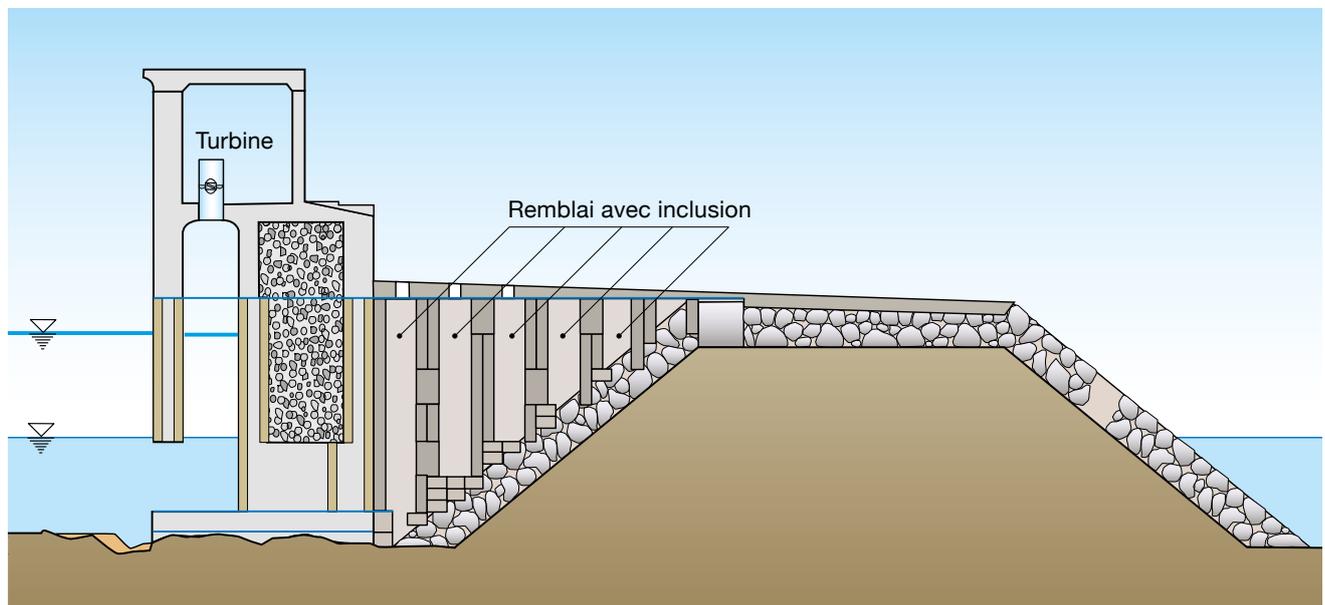
L'étude numérique réalisée dans le cadre d'Emacop (EMACOP, S Abadie *et al.*) a été l'occasion de simuler des événements extrêmes dans les conditions de mer du site de Bayonne. Les pressions résultant de la propagation sont très fortes (jusqu'à 300 kPa sur le mur de front simulé à Bayonne). Abadie met également en évidence des pressions très fortes en haut de chambre lorsque l'air y est piégé. Des analyses plus poussées seraient nécessaires pour bien apprécier les valeurs.

Le dispositif ne peut être qu'ajouté côté mer de l'ouvrage en cas d'ouvrage existant. Il s'intègre directement en cas de projet neuf. En cas d'ouvrage ancien, il prend place au devant de la carapace existante. En cas de soubassement, deux possibilités sont à envisager : le remplacement d'une partie du soubassement par une fondation dédiée ou la mise en œuvre de l'installation sur le soubassement.

Les processus de rupture qui sont affectés sont principalement les suivants :

- Points singuliers : la géométrie du dispositif s'il ne couvre pas l'ensemble du linéaire de digue occasionne des discontinuités qui engendrent de possibles concentrations des contraintes liées aux houles ;
- Pied : affouillement, tassements différentiels du soubassement ou de la fondation.

Figure 3-71. Croquis de la digue de Mutriku



### ■ Vérification de dimensionnement relative à l'ouvrage porteur

Les vérifications particulières à effectuer sont identiques à celles prévalant pour les dispositifs à franchissement : conditions de fondation de l'ouvrage porteur et secteurs de transition longitudinale entre le système de récupération et l'ouvrage ancien.

Pour les parties en béton armé, le dimensionnement est à faire en tenant compte de l'aspect cyclique des sollicitations, donc en réalisant un dimensionnement « à la fatigue ».

## Le système houlomoteur à volet oscillant

### ■ Processus de rupture affectés

Les volets sont disposés en avant de l'ouvrage. En cela, il n'y a pas de relation directe entre les deux aménagements. La présence des volets affecte la dynamique en pied d'ouvrage. Pour les houles courantes, la dissipation de l'énergie est favorable du point de vue du processus d'instabilité géotechnique et des affouillements en pied. Il réduit également les débits de franchissement et protège ainsi le corps d'ouvrage.

Les seuls effets négatifs potentiels apparaîtraient en cas de suppression d'une protection en enrochements existante, suppression qui peut être justifiée par la recherche d'un plus grand rendement (réflexion des houles sur l'ouvrage « porteur »).

Cette disposition, à sécurité égale pour l'ouvrage porteur, doit s'accompagner de deux conditions :

- La dissipation apportée par le système est au moins équivalente à celle associée à la protection en enrochements ;
- La survivabilité en conditions extrêmes est acquise.

Cette dernière condition est la plus difficile à assurer et n'a pas fait l'objet d'analyse approfondie. Le parti pris est en général un arrêt de fonctionnement des dispositifs ce qui ne permet pas d'assurer la protection.

### ■ Vérification de dimensionnement relative à l'ouvrage porteur

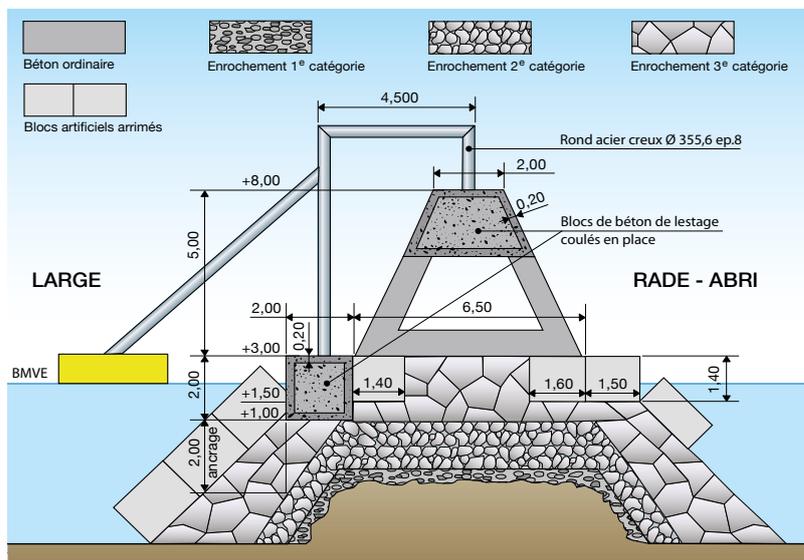
Les vérifications qu'il y a lieu de prévoir, doivent en particulier concerner la dissipation des houles extrêmes avec prise en compte du dispositif. Pour les parties en béton armé, le dimensionnement est à faire en tenant compte de l'aspect cyclique des sollicitations, donc en réalisant un dimensionnement « à la fatigue ».

## Le système houlomoteur de type flotteur pilonnant

### ■ Processus de rupture affectés

Le système implique un lien direct avec l'ouvrage. Les bras articulés relient le flotteur au corps de digue. Les efforts renvoyés à l'ouvrage imposent en général une reconstruction des parties de l'ouvrage porteur destinées à recevoir les bras. Les blocs de fondation des bras sont ancrés dans le corps de digue ou dans la fondation. Dans le cadre d'Emacop, une installation a été étudiée sur la digue d'Esquibien (Rouxel, 2014) :

Figure 3-72. Intégration d'un système houlomoteur de type flotteur pilonnant sur la digue d'Esquibien (Rouxel, 2014)



Les processus de rupture affectés négativement sont les suivants :

- Processus affectant le corps de digue : départ de matériaux,
- Processus affectant la carapace ou la muraille : mouvements différentiels, destruction.

Les processus de rupture affectés positivement concernent les contraintes sur le pied et le franchissement. Les flotteurs ont indubitablement un effet significatif en dissipant l'énergie au devant de l'ouvrage.

Des essais en bassin ont été menés pour un système bord à quai (proximité du flotteur avec la digue verticale) (Neuvéglise *et al.*, 2018, 2019). Les conditions hydrodynamiques au droit du site d'Esquibien ont été reproduites à l'échelle 1:15. La hauteur d'eau devant la digue d'Esquibien varie de 3 mètres en morte-eau à plus de 9 mètres en vive-eau. La digue a une hauteur de 10 mètres.

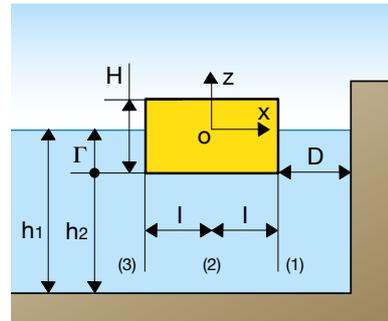
Les essais ont concerné plusieurs flotteurs.

Neuvéglise *et al.* (2018, 2019) se sont intéressés à l'impact du couple dégagement/longueur d'onde de la houle sur les franchissements (voir figure 3-78). Il a été constaté une atténuation des franchissements lorsque la période de houle  $T$  était inférieure à la période de résonance  $T_0$ . Le flotteur est alors quasiment fixe et agit comme un obstacle immobile pour les vagues. L'atténuation des franchissements peut atteindre un facteur 100. Au-delà de la période de résonance aucune atténuation n'est constatée car le flotteur est dit « suiveur ». Il suit le mouvement de la surface libre. Une augmentation des franchissements est observée lorsque le flotteur est excité à la période de résonance.

On constate enfin que lorsque le dégagement  $D$  est faible, les franchissements sont aussi fortement atténués du fait d'une perte de charge importante entre le flotteur et la digue. L'atténuation varie avec le rapport  $(R_c/D)$  avec  $R_c$  la revanche.

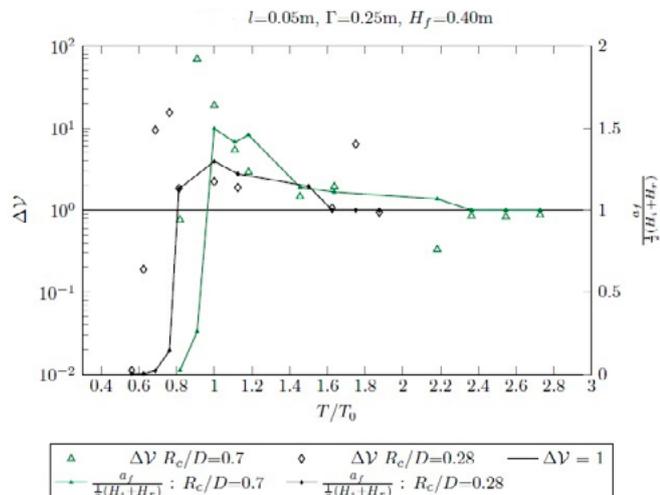
Figure 3-73. Schéma du dispositif de Neuvéglise *et al.* (2018, 2019)

Schéma du dispositif



- D : dégagement du flotteur par rapport à la digue
- 2l : largeur du flotteur : 0,1 m
- H : hauteur du flotteur : 0,2 (flotteur 1) et 0,4 m (flotteur 2)
- Γ : tirant d'eau : 0,05 m (flotteur 1), 0,25 m (flotteur 2)
- h1 : hauteur d'eau

Figure 3-74. Impact de la période de la houle sur le facteur d'atténuation (source : Neuvéglise *et al.*, 2019)



■ Vérification de dimensionnement relative à l'ouvrage porteur

Les vérifications qu'il y a lieu de prévoir doivent en particulier concerner :

- L'estimation des efforts à reprendre par la fondation ;
- Le diagnostic du corps de digue et sa capacité à reprendre une partie des efforts transmis par les massifs d'ancrage des bras articulés ;
- La technique de substitution des parties de digues appelées à constituer les massifs de fondation des bras articulés ;
- Pour les parties en béton armé et de charpente métallique, le dimensionnement est à faire en tenant compte de l'aspect cyclique des sollicitations, donc en réalisant un dimensionnement « à la fatigue ».

# 5. Impact hydrosédimentaire

## 5.1 Analyse des enjeux du site et programme d'études nécessaires au dimensionnement et au dossier réglementaire

L'installation d'une ferme houlomotrice en pied ou sur une digue/jetée préexistante va potentiellement engendrer des modifications sur son environnement proche ; et en particulier sur la composante du milieu physique.

Afin d'obtenir l'autorisation de construire la ferme, des études d'évaluation environnementales devront être réalisées pour alimenter les demandes d'autorisation réglementaires. Ces études devront au minima décrire les éléments suivants :

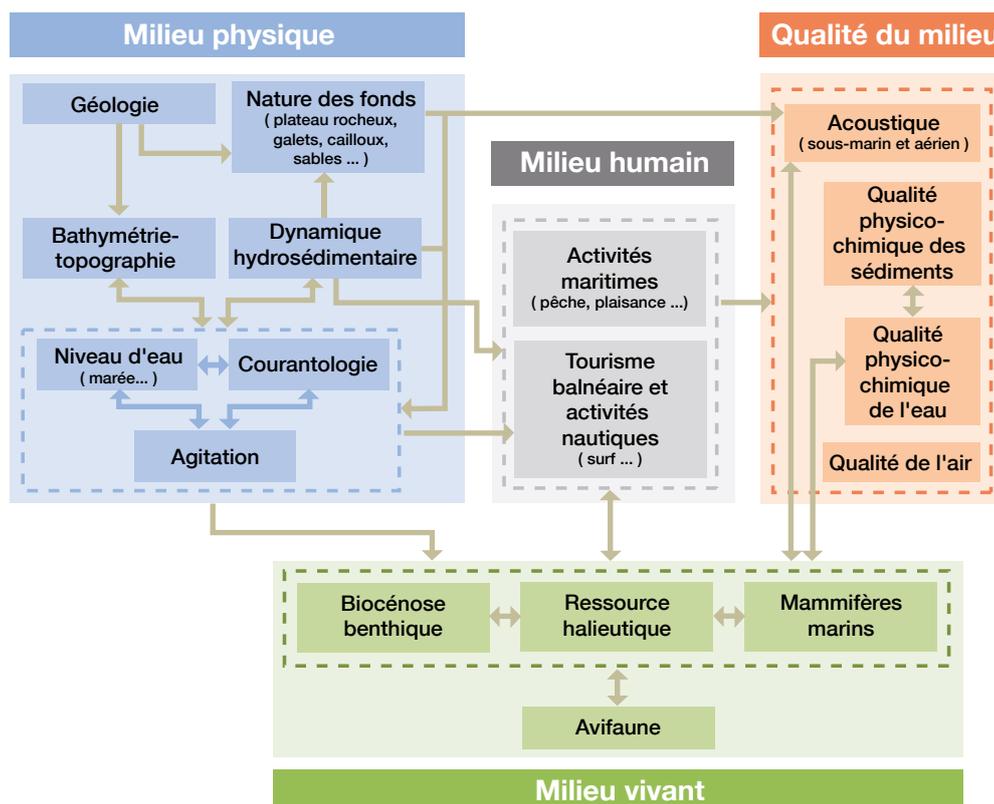
- L'état initial du milieu propre à la zone d'implantation de la ferme, caractérisé par :

- le milieu physique (hydro-météorologique, sédimentaire, morphodynamique...);
- le milieu faunistique (benthos, ressource halieutique, avifaune...);
- le milieu humain (activités commerciales, touristiques, loisirs...);
- la qualité du milieu (acoustique, physico-chimique...).

- Les effets et impacts potentiels de la ferme sur ces différentes thématiques en interaction (cf. figure 3-75) ;
- Les mesures de compensation éventuelles.

À la suite d'une analyse des enjeux du site et du projet, la définition d'un programme d'études nécessaires pour l'étude d'impact est impérative. Parmi ces études, figure notamment l'étude de l'impact hydro-sédimentaire, objet des paragraphes suivants.

Figure 3-75. Interrelations générales entre les différents milieux d'un site choisi pour recevoir la ferme d'EMR – source ARTELIA



## 5.2 Impacts attendus de la ferme sur les processus hydro-sédimentaires

Étant donné le faible degré de maturité des parcs houlomoteurs en 2017, l'appréhension des impacts hydro-sédimentaires potentiels d'une ferme de convertisseur d'énergie des vagues sur un ouvrage préexistant se fonde sur les retours d'expérience et l'état de l'art des impacts des systèmes convertisseurs d'énergie marine (EMR) en général.

### Sources des impacts sédimentologiques

Les impacts peuvent se produire lors de la phase d'installation de la ferme, de la phase d'exploitation, ou encore la phase de démantèlement. Ces trois sources d'impact sont donc à étudier.

### Origines des impacts sédimentologiques

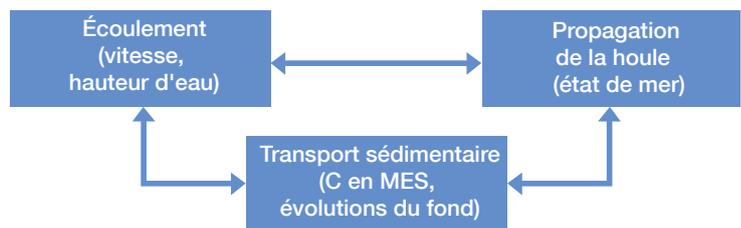
Le transport sédimentaire généré/transformaté par la ferme houlomotrice et ses conséquences en termes d'érosion et accrétion au voisinage de celle-ci, sont le **résultat de l'interaction entre les processus hydrodynamiques** (houle, ondes infra-gravitaires, marée et courants induits par le vent), la structure équipée et le **sédiment, cela à des échelles spatiales et temporelles variées.**

Les écoulements, l'action des vagues, la structure équipée et le transport sédimentaire sont très fortement liés entre eux. En effet :

- les écoulements influent sur la propagation des vagues (e.g. réfraction des vagues par les courants, propagation des vagues dépendante de la hauteur d'eau) et réciproquement (dérive littorale, wave set-up, courant sagittaux) ;
- les vagues jouent un rôle important dans le transport des sédiments (érosion, transport) et inversement la modification des fonds par érosion/dépôt modifie la propagation des vagues ;
- les écoulements gouvernent le transport sédimentaire (érosion, dépôt, transport) qui agit à son tour sur l'écoulement (modification du fond) ;

- la structure influe sur la propagation des vagues (réflexion) sur les écoulements (déviation, recirculation, accélération et ralentissement) ; inversement elle subit la modification des écoulements et vagues qui potentiellement conduisent à de l'affouillement en pied de structure, accrétion dans la zone d'ombre.

Figure 3-76. Interactions entre les familles de processus hydrosédimentaires



Pour une ferme houlomotrice installée sur une structure existante, les processus physiques mis en jeu diffèrent des hydroliennes et des éoliennes. Ils concernent uniquement la houle et l'intégration dans l'ouvrage porteur existant. L'impact de la ferme sur les courants n'est à identifier que pour les ouvrages détachés. Ces ouvrages étant destinés à des zones de forte agitation ; l'impact potentiel sur les courants de marée étant considéré comme négligeable.

## 5.3 Échelles des impacts sédimentologiques

L'état de l'art des impacts des systèmes convertisseurs d'énergie marine (EMR) apportent les enseignements suivants :

- Les impacts des systèmes EMR concernent trois processus physiques majeurs en interaction : la houle, les courants et la sédimentologie ;
- Ces impacts se manifestent différemment selon trois échelles d'espace :
  - L'échelle locale de l'ouvrage et du risque d'affouillement sur l'ouvrage porteur,
  - L'échelle intermédiaire de la ferme de convertisseur d'énergie dont les interactions entre systèmes peuvent être importantes,
  - L'échelle régionale parfois négligée mais qui peut avoir des conséquences importantes sur l'environnement côtier adjacent, notamment engendrer des modifications du transit sédimentaire à la

côte et potentiellement de l'évolution du trait de côte.

- Ces impacts se manifestent différemment selon deux échelles de temps :
  - L'échelle du risque d'affouillement est large : les processus locaux peuvent être très rapides (temps de la vague, donc quelques secondes) mais peuvent aussi prendre plusieurs années (érosion progressive du pied de talus) ;
  - L'échelle de l'impact régional est plus lente, de l'ordre du mois à plusieurs années.

## 5.4 Outils pour l'évaluation de l'impact de la ferme sur les processus hydro-sédimentaire

La multiplicité et la grande diversité des prototypes de convertisseurs de l'énergie de la houle proposés à ce jour interdit une méthodologie unique pour l'évaluation de l'impact hydrosédimentaire. Cet impact est potentiellement très différent selon les structures. Etant donnée la complexité des structures envisagées, une caractérisation de l'impact hydro-sédimentaire du champ proche est indispensable, par modélisation physique et/ou numérique. Le couplage d'échelle permet ensuite l'évaluation de l'impact à l'échelle régionale.

### Familles de modèles

Globalement, les modèles numériques dédiés à l'étude des processus côtiers peuvent être regroupés en trois familles :

- les modèles hydrodynamiques qui permettent de calculer les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau ;
- les modèles de vagues qui permettent de calculer les états de mer en simulant la propagation des vagues (réfraction, diffraction, réflexion...), leur génération (par le vent) et leur dissipation (frottement, moutonnement, déferlement...);
- les modèles de transport sédimentaire qui permettent de calculer les concentrations en MES (Matières En Suspension) et les évolutions du fond associées à l'érosion et au dépôt.

En fonction des échelles considérées et des processus

étudiés (qui dépendent des caractéristiques du site d'étude), il existe de nombreuses possibilités de couplage entre ces différents types de modèles. Chaque échelle spatiale dispose de sa propre approche de modélisation mathématique :

- Régionale : les systèmes convertisseurs d'énergie marine sont modélisés à l'intérieur de la plus grande échelle d'espace par une analyse sous-maille (paramétrique) de l'influence sur l'écoulement. Il est communément fait recours à une technique de pénalisation en termes de force de traînée et force d'inertie (courant et houle) ou à l'inverse de coefficient de transmission pour la houle.

- Locale : aucune modélisation paramétrique n'est possible. Les processus sont trop fins et complexes pour être quantifiable de cette manière. La méthode préconisée est une modélisation CFD de l'ouvrage, couplée avec une modélisation de type régionale ou médium pour les conditions externes. Il est à noter cependant que cette approche est appliquée à un ouvrage seul, considérant des conditions hydrodynamiques uniformes aux limites du modèle. Cette approche n'est pas étendue à l'étude d'un système soumis aux sillages des autres éléments d'une ferme.

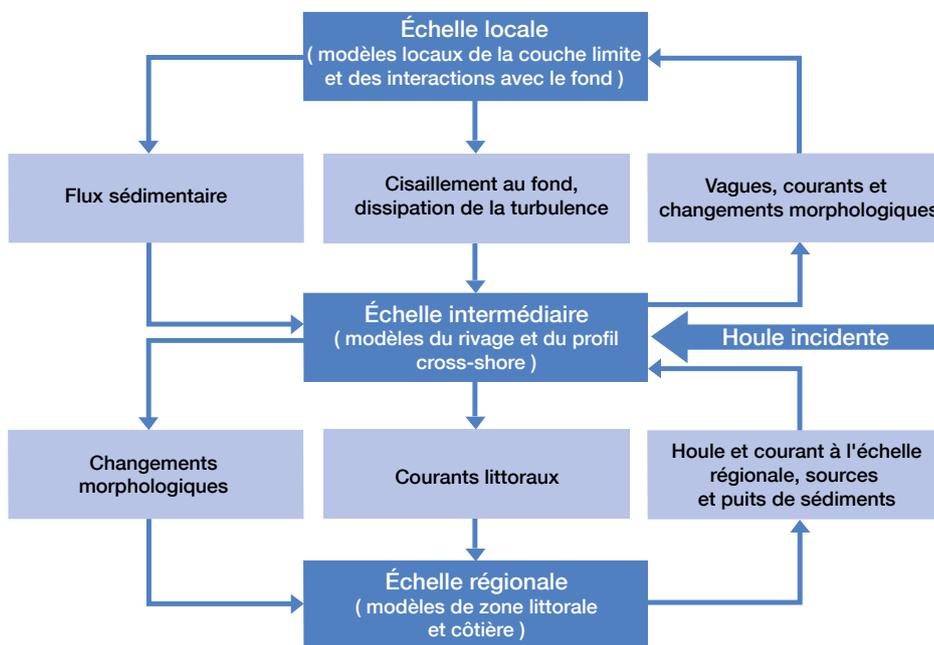
- Intermédiaire : les techniques de modélisation régionales sont utilisées mais leur adéquation avec l'étude des interactions entre ouvrages n'est pas clairement démontrée (pas de données expérimentales pour validation des modèles). L'approche consiste à fortement affiner la modélisation régionale sur le site : la taille de la maille descend à celle des systèmes houlomoteurs voire inférieure. La modélisation de ces systèmes est alors légèrement meilleure mais la schématisation des processus autour de l'ouvrage et des effets de traînée (turbulence) restent similaire et donc sommaire par rapport à l'échelle physique concernée. Sans réelle validation par des mesures, cette approche est quantitativement incertaine.

Sur le plan sédimentaire, les modélisations à l'échelle régionale et à l'échelle de la ferme sans ouvrages ont fait suffisamment de progrès ces dix dernières années pour assurer maintenant une analyse quantitative (la quantification étant liée aux données disponibles pour paramétrer les modèles).

À l'échelle locale, la modélisation du processus sédimentaire d'affouillement possède dix ans de retard sur l'échelle régionale mais est en pleine progression. Elle commence à apporter des éléments semi-quantitatifs même si en phase finale du dimensionnement la modélisation physique reste préconisée. Il est probable que ce type de modélisa-

tion suive la même progression que la modélisation régionale et, qu'à terme, elle devienne totalement opérationnelle grâce à l'évolution des moyens et méthodes de calcul.

Figure 3-77. Interactions entre l'hydrodynamique et le transport sédimentaire, et les modèles sédimentaires à des échelles variées (adapté de Thornton *et al.*, 1998)



### Modèles opérationnels pour les études d'impact hydrauliques et hydro sédimentaires des convertisseurs d'énergie de houle

Les principaux outils numériques actuellement utilisés dans le cadre d'une étude d'impact d'un futur champ houlomoteur sont des modèles de type bidimensionnel « 2DH » (variables moyennées sur la colonne d'eau), tridimensionnel « 3D », ou Computational Fluid Dynamics « CFD ».

#### ■ Modélisation de la houle en présence de convertisseurs détachés

##### Échelles régionale et intermédiaire

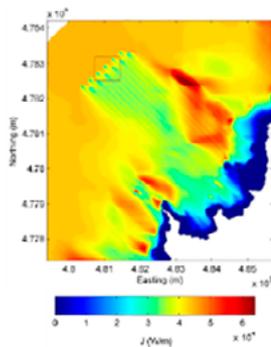
Les logiciels/chaînes de calcul existant à ce jour et plus communément utilisés pour les études d'impact d'un champ de convertisseur d'énergie marine, à grande et moyenne échelles, sur la propagation de la houle sont les méthodes spectrales 2DH implémentées dans MIKE21 SW, SWAN, STWAVE, WAM, TOMAWAC.

Carballo et Iglesias (2013) et Silverthorne and Folley (2011) utilisent ce type de modèle pour simuler l'état de mer dans et au voisinage d'un parc de houlomoteur où chaque convertisseur d'énergie de la houle est représenté. Un maillage fin est requis pour

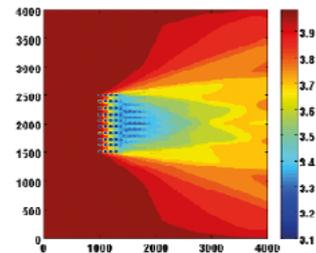
décrire en détail le parc. Le modèle SWAN est choisi par Carballo et Iglesias (2013), le modèle TELEMAC par Silverthorne and Folley (2011), dans lesquels un terme source est implémenté au niveau chaque machine pour simuler la transmission d'énergie de la machine. Le coefficient de transmission propre au dispositif modélisé est obtenu au moyen d'essais physique en bassin à houle.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus par ce type de modélisation : une cartographie du champ de hauteur de houle qui renseigne sur l'extension de la zone d'atténuation en aval de la ferme due à la présence des convertisseurs d'énergie, ainsi que de la magnitude du phénomène.

**Figure 3-78. Schéma du dispositif Wavecat et puissance des vagues dans la zone de la ferme**  
(Source : Carballo et Iglesias, 2013)

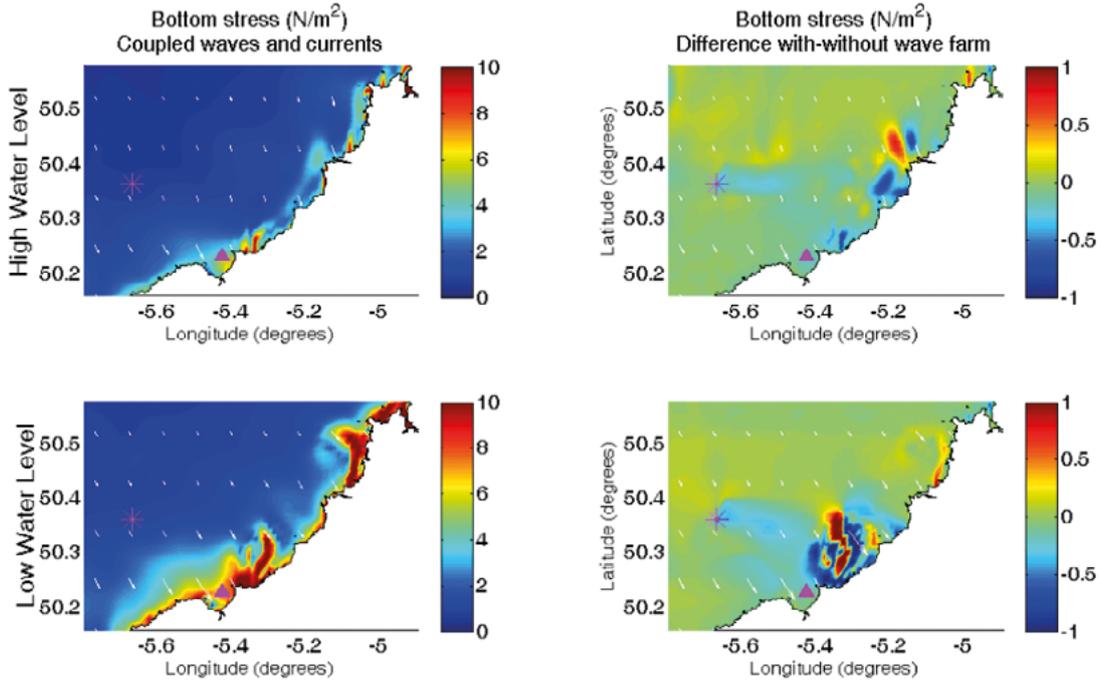


**Figure 3-79. Exemple de modélisation TELEMAC pour le calcul de la hauteur significative de vague (m) en présence d'une ferme de houlomoteurs de type Oyster**  
(Source : Silverthorne and Folley, 2011)



Afin de traduire cet impact en terme hydrodynamique et sédimentaire, ces modèles spectraux sont facilement couplés à des modèles de courantologie et/ou de transport sédimentaire 2DH ou 3D de même échelle (régionale ou intermédiaire). Des cartographies de contrainte de cisaillement sur fond comme page suivante résultent de tels couplages et renseignent de la potentialité d'arrachement ou de dépôt du sédiment, ainsi que de la modification des fonds résultante.

Figure 3-80. Exemple de modélisation couplant SWAN à un modèle hydrodynamique 2DH (ROMS), pour quantifier l'influence des WEC sur la contrainte au fond à marée haute (en haut) et à marée basse (en bas). À gauche : valeur des contraintes au fond. À droite : perturbation des contraintes induites par les WEC. (Source : González-Santamaría *et al.*, 2012)



Les modèles Boussinesq sont aussi utilisés pour cette échelle régionale si celle-ci n'est pas trop grande et ni trop complexe. C'est le choix fait par Venugopal and Smith (2007), qui ont utilisé le modèle de Boussinesq proposé dans la chaîne MIKE 21,

pour étudier une ligne de houlomoteurs sur la côte de l'île d'Orkney. Ils ont simulé l'impact des machines en intégrant différent taux de transmission au moyen d'un terme de porosité.

Figure 3-81. Exemple de modélisation de type Boussinesq (MIKE21 BW) calculant le champ de la hauteur significative de vague : sans structure (à gauche), avec une structure solide (au centre), avec une structure poreuse (0,7, à droite) (Source : Venugopal and Smith (2007))

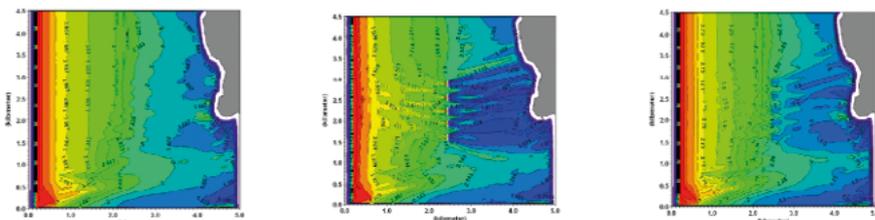
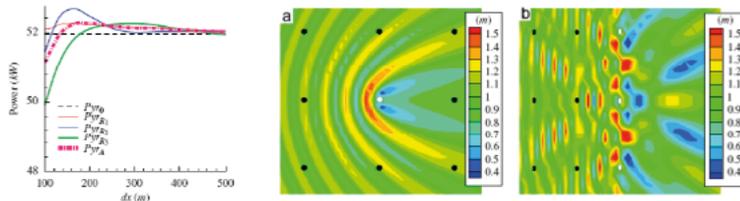
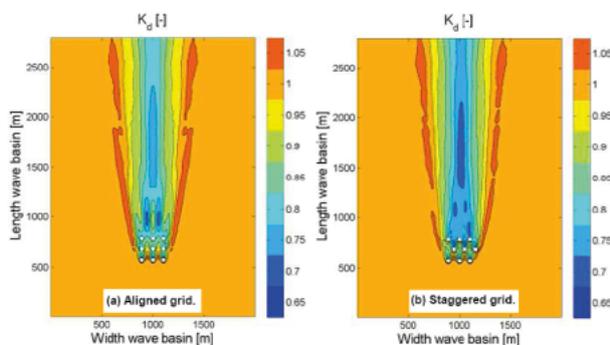


Figure 3-82. Exemple de modélisation de type Boussinesq pour approcher la puissance d'un arrangement de 9 cylindres lestés en actions pour différents espacements. Amplitude des vagues autour de cylindres lestés immobiles (en noir) et en action (en blanc) (Source : Borgarino *et al.* (2012))



On retrouve enfin un certain nombre de modèles universitaires, tels que les modèles basés sur les équations de Berkhoff ou les modèles basés sur la Méthode BEM (Boundary Element Method) permettant de prendre en compte des ouvrages en mouvement verticaux, code AQUAPLUS du LMF.

Figure 3-83. Exemple de modélisation de type Berkoff pour calculer le coefficient de perturbation  $K_d = H_d/H_{si}$  pour deux configurations d'une ferme houlomotrice (Source : Troch *et al.* (2010))



### Echelle locale

Les logiciels/chaînes de calcul existant à ce jour, adaptés à l'étude du champ de houle proche de la structure isolée sont :

- 2DH: MIKE21 BW, TRITON, BOUSS-2D ;
- 3D (type CFD) : Fluent, CFX, STAR-CCM, NS3, OPENFOAM ;
- SPH.

À l'échelle locale, les processus physiques générés par le convertisseur sont reproduits et non plus paramétrés. Étant donnée la complexité mécanique des systèmes souvent mobiles, cela requiert en

termes de modélisation des techniques toujours plus innovantes, et actuellement en cours de développement et d'amélioration.

Dans les problématiques d'interaction vagues/objet en mouvement, les modèles résolvant les équations de Navier-Stokes (CFD) doivent prendre en considération la surface libre. L'écoulement est turbulent, approché communément par les modèles de type URANS. À cette échelle, la modélisation simule le déferment et le franchissement, préférentiellement par des méthodes de traque de la surface libre, à l'interface des deux phases air et eau simulées. Les techniques de capture d'interface ont déjà été répertoriées. C'est toutefois la **méthode VOF qui est la plus utilisée pour les problèmes vague/houlomoteur** : elle est disponible dans nombre de codes commerciaux et open sources. Une revue des applications hydrodynamiques a été faite par Lin and Liu (1999). L'amortissement doit parfois être introduit artificiellement lorsque le dispositif n'est pas complètement modélisé (Lara *et al.*, 2006, Lin and Liu, 1999).

L'interaction avec des objets flottants/mobiles induit la nécessité d'avoir des **frontières mobiles** et des **maillages déformants**. Il faut retenir que du fait de la complexité et de la nouveauté des techniques numériques, **on dénombre à ce jour peu d'études d'interaction houle/système houlomoteur en champ proche**.

Citons pour indication les études à ce jour de :

- La dynamique d'une bouée et/ou d'un système de deux bouées par Agamloh *et al.* (2008), Bhinder *et al.* (2009), Yu and Li (2011) ;

- Un système à bouée lestée avec un code VOF (ICARE) et un code SPH (SPH-flow) développés par l'école centrale de Nantes et HydrOcean (figure 3-36), Thilleul *et al.* (2011) ;
- Un dispositif de remplissage/vidange d'un réservoir soumis à la houle, par Zullah and Lee (2013) (figure 3-84) ;
- Un système à colonne oscillante (figure 3 -35), par Somerville *et al.* (2001) ;
- Enfin, à noter l'utilisation de la CFD pour valider l'effort visqueux dans les méthodes BEM (Bhinder *et al.*, 2011).

Figure 3-84. Utilisation de CFX (VOF) pour simuler la rotation d'une turbine de type Savonius à l'entrée d'un réservoir soumis à la houle (Source : Zullah and Lee, 2013)

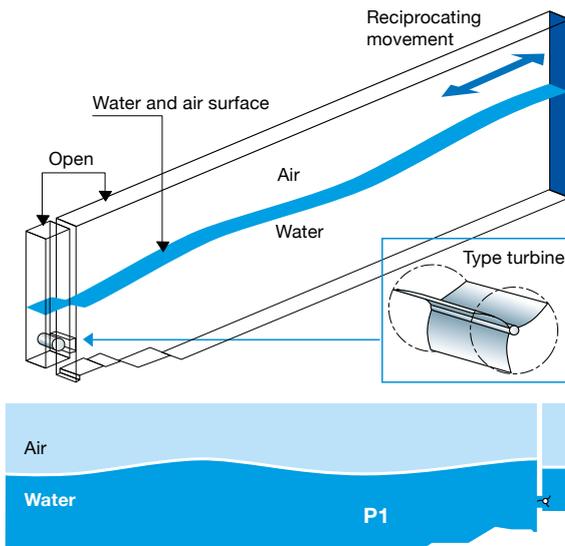
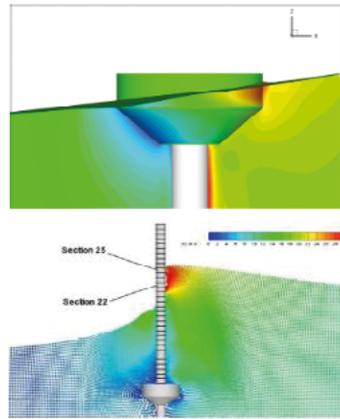


Figure 3-85. Simulation d'une colonne oscillante avec OPENFOAM (VOF) (Source : Somerville *et al.*, 2011)



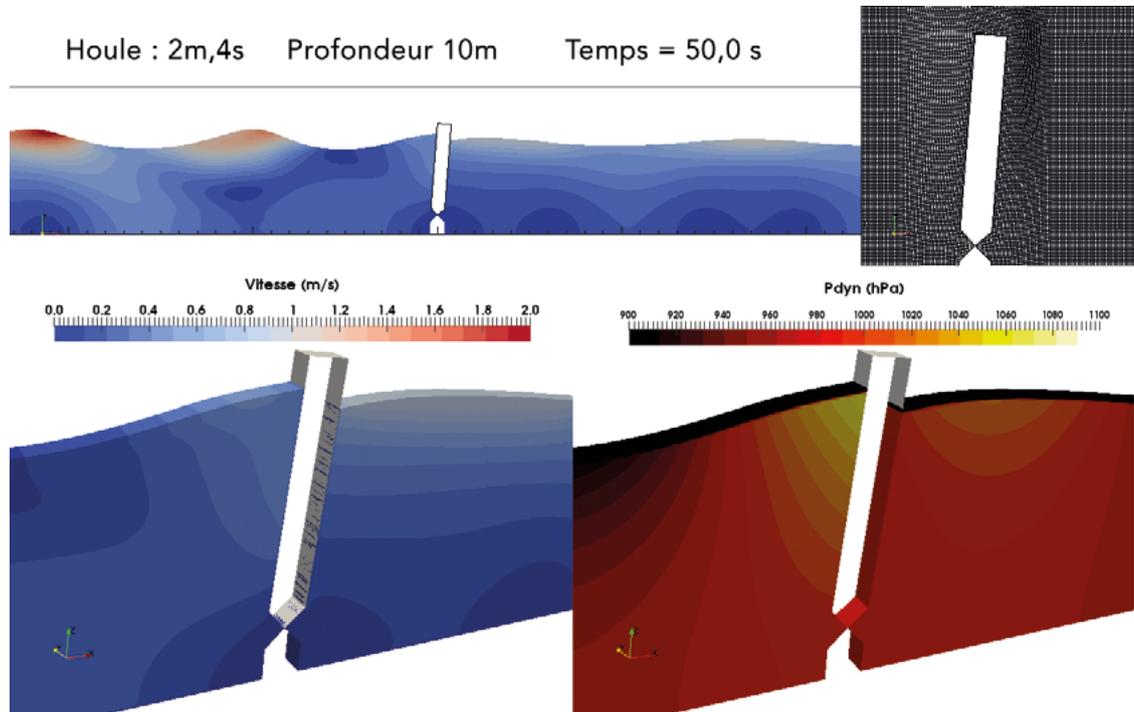
Figure 3-36. Simulation d'une bouée lestée avec ICARE (VOF) et SPH-Flow (SPH) (Source : Thilleul *et al.*, 2011)



Dans le cadre du projet EMACOP, deux modélisations ont été entreprises simulant un convertisseur (volet oscillant et bouée) soumis à la houle.

Pour la modélisation du dispositif FLAP (volet oscillant) par exemple, le recours à un maillage dynamique au moyen du logiciel OpenFoam a mis en lumière la persistance d'un verrou à l'opérationnalité des modèles, notamment lié à la méthode dite du « morphing », dans laquelle le maillage dans le voisinage de l'objet en mouvement se déforme. Cette méthode semble à l'heure actuelle, la mieux adaptée à ce type de mouvement et est implémentée dans le logiciel OpenFOAM. Cependant, il apparaît lors du cas-test du FLAP qu'elle contraint fortement le mouvement du volet à de petites oscillations angulaires. Si le déplacement du volet dépasse un certain angle, le maillage se déforme au-delà des critères acceptables, et le calcul s'arrête. Il ressort du test du FLAP que cette technique n'est pas encore opérationnelle à ce jour et nécessite une amélioration du mode de « morphing » du maillage, afin que celui-ci se déforme sur une plus grande emprise, tout en limitant la déformation au niveau des zones fixes (base et sol).

Figure 3-86. Illustration des champs de vitesse et de pression autour du volet soumis à une houle normale, obtenus par modélisation CFD (OpenFoam)

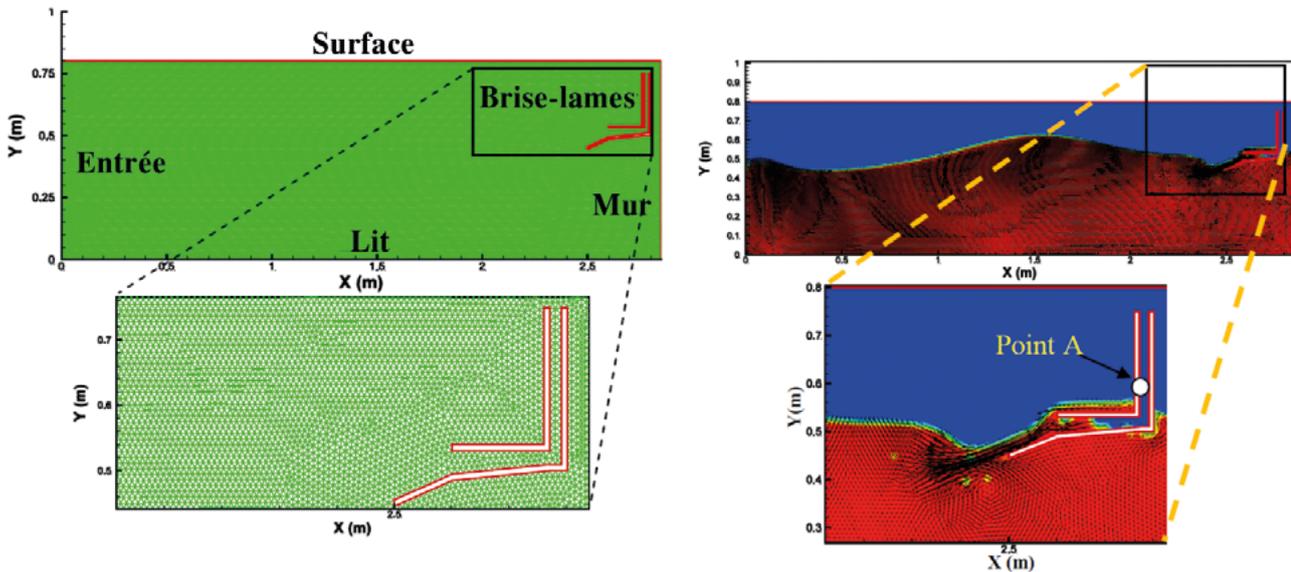


#### ■ Modélisation de la houle en présence de houlomoteurs combinés à un ouvrage

Concernant la modélisation d'ouvrage combiné à des houlomoteurs, seul le travail de Hillmann *et al.* (2011) a été répertorié, simulant un système novateur de type digue flottante.

Le modèle numérique mis en œuvre est 3D de type RANS et basé sur le code FLUENT 6.2, avec implémentation d'une approche VOF pour simuler la propagation des vagues à la surface et leur interaction avec les ouvrages. Les résultats de ces simulations sont voués à être comparés à des expériences en laboratoire. Ces résultats indiquent que la production d'énergie potentielle est sensible aux différentes conditions de vagues et à l'interaction entre l'écoulement et la structure. Toutefois, d'autres tests dans des conditions beaucoup plus complexes, tels que les vagues aléatoires, restent à faire pour vérifier ces résultats.

Figure 3-87. Domaine de calcul et maillage, détail du maillage non-structuré triangulaire (gauche) ; Champ de vitesses instantané et détail autour de l'ouvrage (droite) : l'air est représenté en bleu et l'eau en rouge



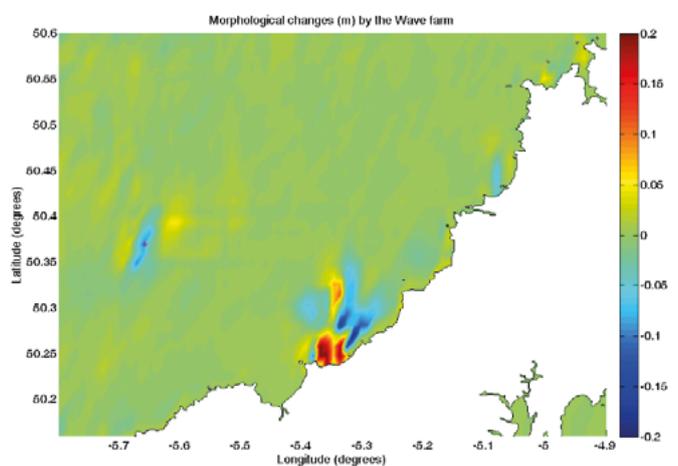
#### ■ Modélisations hydro-sédimentaires en présence des convertisseurs d'énergie de houle

Comme énoncé précédemment, les modélisations du transport sédimentaire et de la morphodynamique, à l'échelle régionale et à l'échelle de la ferme sans ouvrages sont désormais opérationnelles. Les difficultés d'application de la modélisation des impacts des systèmes houlomoteurs concernent essentiellement la maîtrise des conditions hydrauliques courant et houle (voir partie précédente).

À l'échelle locale en revanche, la modélisation morphodynamique numérique, capable de reproduire fidèlement l'affouillement en pied de digue équipée de la ferme par exemple, **est en cours de développement**.

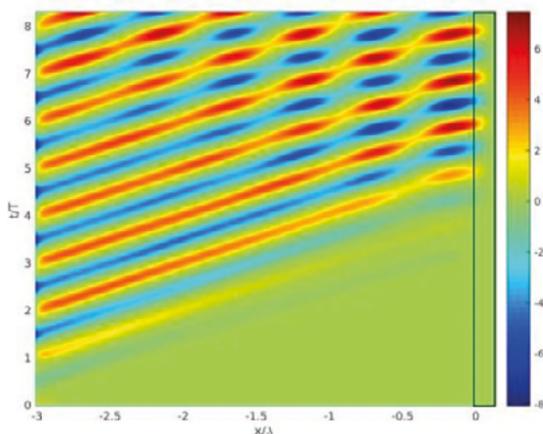
Par exemple, une modélisation numérique 2D en champ proche (quelques longueurs d'onde) d'un système houlomoteur à colonne d'eau oscillante (OWC) a été mise en œuvre à partir d'un code numérique résolvant les équations de Navier-Stokes (Rameliarison *et al.*, 2015). Outre la simulation des écoulements au sein du système houlomoteur et le calcul de son rendement, ces travaux réalisés à l'échelle de laboratoire visent à mettre en évidence les modifications du transport sédimentaire induites par le fonctionnement de l'OWC dans son proche

Figure 3-88. Influence des WEC sur les évolutions du fond calculées sur une période de 16 jours. (Source : González-Santamaría *et al.*, 2012)



voisinage. À ce jour, la modélisation de l'excès de cisaillement sur le fond réalisée sur des cas schématiques semble mettre en avant une évolution de la mise en mouvement du sédiment en champ proche de l'OWC qui soit dépendante du régime de fonctionnement de l'OWC (i.e. de la fréquence incidente donnant un rendement plus ou moins grand), de l'amortissement caractéristique de la turbine et du régime hydraulique au sein de la couche limite de fond (Rameliarison *et al.*, 2015).

Figure 3-89. Dépassement du seuil critique de mise en mouvement en présence d'une OWC (emprise délimitée en noir)



Cependant, à ce jour, le degré de maturité de ces modélisations ne permet pas la réalisation d'étude des impacts hydro-sédimentaires d'une ferme houlomotrice par la modélisation numérique uniquement: la modélisation physique, en modèle réduit à fond mobile, reste préconisée aujourd'hui comme outil principal et ensuite en appui à la modélisation numérique.

### Adaptations à réaliser/perspectives de développement

L'étude de l'impact hydro-sédimentaire d'une ferme houlomotrice requiert à ce jour l'adaptation et/ou le développement d'outils numériques préexistants pour une meilleure qualification et quantification des impacts environnementaux potentiels liés au déploiement de tels systèmes. Ces améliorations doivent porter sur :

- **Les processus** : la paramétrisation des processus hydrauliques relatifs au courant et à la houle dans les modélisations régionale et intermédiaire représente un enjeu majeur. Elle représente le verrou principal à lever pour ces échelles. La prise en compte de l'effet de diffraction de la houle en présence de la ferme est un enjeu secondaire encore plus méconnu ;

- **Les systèmes** : tous les systèmes sont différents et aucune généralisation paramétrique ne peut être apportée ;
- **La validation** : le manque de support de validation expérimentale ou *in situ* représente un enjeu majeur notamment en hydraulique à l'échelle médium. Ceci est d'autant plus critique connaissant la variété de systèmes à étudier ;
- **L'échelle intermédiaire** : l'interaction entre les convertisseurs et la houle/les courants est mal appréciée et sans validation ;
- **Le passage d'échelle locale à échelle intermédiaire** : l'imbrication des modèles CFD/modèles plus larges doit être améliorée et optimisée (couplage faible et fort) dans le but de quantifier les impacts locaux sur les fermes houlomotrices et l'interaction avec l'ouvrage porteur.
- **L'échelle locale** : la modélisation numérique en champ proche du risque affouillement est en cours de développement. Des recherches actives sont en cours à ce jour.

### Stratégie de modélisation

L'analyse de ces verrous permet d'identifier une approche méthodologique adaptée à l'état d'avancement des techniques disponible à ce jour.

Au vu de l'état de l'art de la modélisation et de la diversité des systèmes houlomoteurs, la méthodologie de modélisation numérique suivante se dessine :

- l'étude des impacts des champs proche se fait par modélisation CFD ou physique uniquement ;
- l'étude des impacts aux échelles intermédiaire et régionale se fait par modélisation régionale affinée ou pas, intégrant une paramétrisation des processus à déterminer au préalable ;
- cette paramétrisation est propre au type de système considéré. En conséquence, elle doit être définie par le constructeur et fournie à l'étude d'impact proprement dite.

L'approche générale se base donc sur trois étapes :

#### **Premièrement, l'approche locale**

L'objet de cette approche est de définir les caractéristiques du système pour les besoins de l'étude d'impact. Dans ce sens, elle peut être envisagée couplée avec l'étude du productible car ce sont les mêmes outils qui sont employés.

La modélisation CFD ou physique est nécessaire pour cette tâche. Chaque système requiert sa propre modélisation. Elle doit permettre de quantifier :

- Le comportement hydraulique et sédimentaire en pied de l'ouvrage ;
- La paramétrisation nécessaire à l'étude à plus large grande échelle.

L'approche numérique est préconisée pour permettre un couplage avec l'échelle intermédiaire.

Il est à noter que l'approche numérique hydro-sédimentaire du risque d'affouillement est du domaine de la recherche actuellement mais doit être investiguée par EMACOP au vu des enjeux concernés.

#### **En deuxième étape, l'approche intermédiaire**

Elle prend en compte la paramétrisation définie par un modèle CFD ou modèle physique pour quantifier les interactions entre convertisseurs à l'échelle du parc, ainsi que l'interaction du parc avec l'ouvrage.

#### **En troisième étape, l'approche régionale**

Quand l'ensemble des paramétrisations est maîtrisée à l'échelle locale et intermédiaire, elle est intégrée dans l'échelle régionale pour quantifier l'impact hydro-sédimentaire régional.

## 6. Références bibliographiques

- Abadie S., Mokrani C., 2013. Étude numérique du système à franchissement, rapport de recherche EMACOP .
- Abadie S., 2015. Étude numérique des systèmes D2 et D4, Rapport EMACOP R15EMA032, Novembre 2015.
- Agamloh E., Wallace A., Jouanne A.V., 2008. Application of fluid-structure interaction simulation of an ocean wave energy extraction device, *Renewable Energy*, 33(4), 748-757.
- Aggidis G.A., Mingham C., 2009. WRASPA 2009. A joint Numerical and experimental Study of Surging Point Absorbing wave Energy Converter (WRASPA), Joule Centre Research Grant Joint Final Report (Lancaster University and Manchester Metropolitan University).
- Babarit A., Hals J., Muliawan M., Kurniawan A., Moan T., Krokstad J., 2012. Numerical Benchmarking study of a selection of wave energy converters, *Renew. Energy* 41, 44-63.
- Babarit A., Delhommeau G., 2015. Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH', , EWTEC conf. 2015, 6-11 sept 2015, Nantes, France.
- Baills J., Dugor J., Mory M., Baudry V., 2017. «Évaluation de l'énergie récupérée devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz par un système houlomoteur de type flotteur pilonnant et comparaison avec un système SSG et un flap oscillant», UPPA, Casagec Ingénierie et ECN, Rapport de la tranche 3 de la tâche S1 du projet EMACOP (R/17/EMA/042).
- Baills J., Dugor J., Mory M., Baudry V., 2017. «Study of the energy collected by a heaving buoy in front of the Artha Breakwater and comparison with a SSG system and on oscillating flap», Proceedings du congrès EWTEC2017, Cork (Ireland), septembre 2017.
- Baudry V., Babarit A., Clément A.H. 2013. An overview of analytical, numerical and experimental methods for modelling oscillating water column', Proceeding of EWTEC 2013 conference, Aalborg, Denmark, Sept. 2013.
- Baudry V., Babarit A., Clément A.H., 2015. Développement d'un outil d'évaluation du rendement des dispositifs D2 de type batteur inversé, Rapport de recherche EMACOP.
- Baudry V., Babarit A., Clément A.H., 2015. Développement d'un outil d'évaluation du rendement des dispositifs D3 de type flotteur pilonnant, Rapport de recherche EMACOP.
- Baudry V., Marrone S., Babarit A., Le Touzé D., Clément A.H., 2015. 'Power matrix assessment and extreme loads estimation on a flap-type wave energy converter in front of a dike', Proceedings of EWTEC, Nantes, France.
- Baudry V., Clément A.H., 2017. Développement d'un outil d'évaluation de la matrice de puissance d'une OWC (dispositifs D4) intégrée à une digue, Rapport de recherche EMACOP.
- Bhinder M., Mingham C., Causon D., Rahmati M., Aggidis G., Chaplin R., 2009. A joint numerical and experimental study of a surging point absorbing wave energy converter (WRASPA). In: Proceedings of 28th int. conf. on ocean, offshore and arctic eng.
- Bhinder M., Mingham C., Causon D., Rahmati M., Aggidis G., Chaplin R., 2009. Numerical and experimental study of a surging point absorber wave energy converter, In: Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference.
- Bhinder M., Babarit A., Gentaz L., Ferrant P., 2011. Assessment of Viscous Damping via 3D-CFD Modelling of a Floating Wave Energy Device, In: EWTEC.

- Boccotti P., 2007. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC', *Ocean Engineering* 34.
- 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, 79-88.
- Brito-Melo A., 2000. Modélisation de la Centrale Européenne a énergie des vagues sur l'île de Pico, Açores, Thèse de doctorat IST / ECN.
- Carballo R., G. Iglesias, 2013. Wave farm impact based on realistic wave-WEC interaction, *Energy*.
- Carbon Trust. 2005. Marine Energy Challenge – Oscillating Water Column Wave Energy Converter Report.
- Cerema, 2014. Guide Enrochement, traduction française du Rock Manual – 2e édition – Manual for the use of rock in hydraulic engineering or Rock Manual.
- Chaplin R.V., Aggidis G.A., 2007. An Investigation into Power from Pitch-Surge Point-Absorber Wave Energy Converters. Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy, 520-525.
- Clément A.H., 2002. Wave Energy in Europe : Current status and perspectives', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6.
- Contestabile P., Ferrante V., Di Lauro E., Vicinanza D., 2016. Prototype Overtopping breakwater for wave energy conversion at port of Naples- Proceeding of ISOPE conference, Rhodes, Greece, June 26th, July 1st, 2016.
- Cummins W.E., 1962. The impulse response function and ship motions. *Schiffstechnik* 9 (1961), 101-109.
- Cummins C.P., Dias F., 2017. A new model of viscous dissipation for an oscillating wave surge converter', *J.Eng.Math* 103 : 195-216.
- De Bonviller A., Jellouli M., Pepin N., Shaiek S., 2017. « Dimensionnement du génie civil d'un ouvrage à franchissement vis-à-vis des évènements extrêmes », Rapport de recherche EMACOP.
- Delauré Y.M.C, Lewis A., 2001. A 3D Parametric Study of a rectangular Bottom-Mounted OWC power plant, Proceedings of 11th ISOPE conference, Stavanger, Norway, June 17-22.
- Delauré Y., Lewis A., 2003. 3D hydrodynamics modelling of a fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element method, *Ocean Engineering* 30 pp 309-330.
- Delhommeau G., 1993. Seakeeping codes Aquadyn and Aquaplus, 19th WEGEMT School, Numerical Simulation of Hydrodynamics : Ships and Offshore Structures, Nantes 20-24 September 1993.
- DNV-OS-J101, 2014. Design of Offshore wind Turbine Structures', Det Norske Veritas, Oslo, Norway.
- Dugor J., Rihouey D., Mory M., 2015. Optimisation d'un récupérateur de houle à franchissement de type SSG et évaluation de son potentiel énergétique sur le site de Saint-Jean-de-Luz. Rapport de recherche EMACOP.
- Estefen S.F., Garcia-Rosa P.B., 2012. Wave energy hyperbaric converter: small scale models prototype and control strategies, Proceedings of OMAE 2012.
- Evans D.V., 1982. Wave power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions. *J.Fluid Mech.* 114, 481-499.
- Evans D.V., 1978. The oscillating water column wave energy device. *J.Inst.Maths Applics*, 22, 423-33.
- Falcao A.F.O., Rodrigues R.J.A, 2002. Stochastic modelling of OWC wave power plant performance, *Applied Ocean research* 24, 59-71.
- Falcao A.F.O., 2010. Wave Energy Utilization : A review of the technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.
- Falcao A.F.O, Henriques J.C.C, 2014. Model-prototype similarity of oscillating water column wave energy converters, *Int. J. Marine Energy* 6, 18-34.

- Falcao A.F.O, Henriques J.C.C, 2016. Oscillating water column wave energy converters and air turbines : A review, *Renewable Energy* 85.
- Falnes, J., Budal, K., 1978. Wave-power conversion by point absorbers. *Norw Marit Res.* 6. 2-11.
- Folley M., Whittaker T.J.T., Henry A., 2007. The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter. *Ocean Eng.*, 34, 1265-1274.
- Folley M., 2016. Numerical modelling of wave energy converters, Ed Matt Folley.
- Harlow F.H., Welch J.E., 1965. 'Numerical calculation of time-dependency viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Physics of Fluids* 8 (12) 2182.
- Goda Y, 1970. A synthesis of breaker indices, *transactions of the Japan Society of Civil engineers*, 2(2): 227-230.
- Goda Y., 2000. Random Seas and design of Maritime Structures. Advanced series on Ocean Engineering Vol.15, World Scientific, Singapore.
- González-Santamaría R, Zou Q., Pan S., 2012. Modelling of the impact of wave farm on nearshore sediment transport. *Coastal Engineering proceedings* .
- Guilcher P.M., Oger G., Brosset L., Jacquin E., Grenier N., Le Touzé D., 2010. 'Simulation of liquid impacts with a two-phase parallel SPH model', *Proceedings of 20th ISOPE Conference, Beijing, China.*
- Guilcher P.M., Candelier J., Béguin L., Ducrozet G., Le Touzé D., 2013. Simulation of extreme waves impacts on a FLNG, In 8th International SPHERIC SPH Workshop, June 2013.
- Guilcher P.M., Jus Y., Couty N., Brosset L., Scolas Y.M., Le Touzé D., 2014. 2D simulations of breaking wave impacts on a flat rigid wall – Part1: Influence of the Wave Shape. In Proc. 24th ISOPE conference, Busan.
- Henry, A., Doherty K., Cameron L., Whittaker T., Doherty R., 2010. *Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter*, RINA Marine & Offshore Renewable Energy, London, UK.
- Hillmann M., Li M., Quayle S., 2011. Numerical Investigation of a Novel Breakwater Combining Coastal Defence and Energy Generation in the Near Shore Environment. In *Ewtec*.
- Hu K, Bingham C.G., Causon D.M., 2000. Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non linear shallow water equations', *Coastal Engineering Vol 41* pp 433-465.
- Itturioz A., Guanche R., Armesto J.A., Alves M.A., Vidal C., Losada I.J., 2014. Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device, *Ocean Engineering* 76, 65-74
- Jellouli M., 2014. Expertise d'un ouvrage ancien et dimensionnement, rapport de recherche EMACOP.
- Jellouli M., 2015. Optimisation d'un dispositif à franchissement sur le site de Saint-Jean-de-Luz, rapport de recherche EMACOP.
- Karmath A., Bihs H., Arntsen O.A., 2015. Numerical modeling of power take off damping in an oscillating water column device, *Int. J. Mar. Energy* 10. 1-16.
- Kobayashi N., Wujanto A., 1989. Wave overtopping on coastal structures' *J.Wateray, Port. Coastal Eng. ASCE* 115, 235-251.
- Kofoed J.P., 2000. Vertical distribution of wave overtopping for design of multi level overtopping based wave energy converters – Report.
- Kofoed J.P., 2002. Wave overtopping of marine structures – Utilization of wave energy', PhD thesis, Aalborg University. ISSN 0909-4296.
- Lara J., Garcia N., Losada I., 2006. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, *Coastal Engineering*, 53(5-6), 395-417.

- Lee C.H., Nielsen F.G., 1996. Analysis of oscillating water column using a panel method : In : International Workshop of Water Waves and Floating Bodies (IWWWFB), 17-20 March 1996, Hamburg, Germany.
- Lin P., Liu PL-F., 1999. Free surface tracking methods and their applications to wave hydrodynamics, *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 5, 213-240.
- Lin P., Liu PL-F., 1999. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125:207.
- Locuratolo P., Larivain A., 2011. Complementary use of a linear potential code, a RANS and a SPH solver for the optimisation of a Wave Energy Converter, In: EWTEC.
- Lopez I., Andreu J., Ceballos S., Martinez de Alegria I., Kortobarria I., 2013. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27.
- Luppa C., Contestabile P., Cavallaro L., Foti E., Vicinanza D. 2016. Hydraulic Performance of an Innovative Breakwater for Overtopping Wave Energy Conversion, *Sustainability* 2016.
- Malara G., Arena F., 2013. Analytical modelling of an U-Oscillating Water Column and performance in random waves' *Renewable Energy* 60.
- Marrone S., Le Touzé D., 2014. 'Evaluation des charge-ments extrêmes sur le dispositif D2 dans plusieurs configurations', Rapport EMACOP, 01 – Tranche 2.
- Michard B., Dufour G., Cosquer E., 2013. Évaluation préliminaire du potentiel houlomoteur de 22 sites français en Manche et Atlantique, rapport de recherche EMACOP.
- Martin-Rivas H., Mei Chiang C. 2009. Wave power extraction from oscillating water column along a straight coast, *Ocean Engineering* 36.
- Meinert P., Gilling L., Kofoed J.P., 2006. "User manual for SSG power simulation 2", Internal report, Aalborg University, June 2006.
- Molin B., 2002. Hydrodynamique des structures offshore, guide pratique sur les ouvrages en mer CLAROM, Editions Technip.
- Mory M., Dugor J., Rihouey D., 2013. Évaluation du potentiel énergétique de la houle devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz et de l'énergie récupérée par un système houlomoteur SSG, rapport de recherche EMACOP.
- Mory M., Baudry V., Babarit A., Dugor J., 2015. Évaluation de l'énergie récupérée devant les ouvrages de Saint-Jean-de-Luz par un système houlomoteur de type volet oscillant, Rapport de recherche EMACOP.
- Mory M., Dugor J., Rihouey D., 2015. Optimisation d'un récupérateur de houle à franchissement de type SSG et évaluation de son potentiel énergétique sur le site de Saint-Jean-de-Luz, rapport de recherche EMACOP.
- Mory M., Dugor J., Baudry V., Babarit A., Clément A.H., 2015. A comparative study of the wave energy collected at Saint-Jean-de-Luz (France) by an over-topping converter and a flap activated converter », *Proceedings du congrès EWTEC, Nantes (France)*, septembre 2015.
- Neuvéglise S., Perret G., Smaoui H., Marin F., Sergent P., 2018. Impact of a Quayside Wave Converter on Overtopping, *Conférence ICOE – 12-14 juin 2018, Cherbourg*.
- Neuvéglise S., Perret G., Smaoui H., Marin F., Sergent P., 2019. Impact of a Quayside Floating System on Overtopping, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*.
- Oger G., Guilcher P.M., Jacquin E., Brosset L., Deuff JB., Le Touzé D., 2010. Simulations of hydro-elastic impacts using a parallel SPH model, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 20(3) :181-189.

- Pecher A., Le Crom I., Kofoed J.P., Neumann F., de Brito Azevedo E., 2011. Performance assessment of the Pico OWC power plant following the EquiMar methodology, Proceedings of ISOPE conference 2011.
- Penalba M., Ringwood J.V., 2016. A review of Wave to Wire Models for Wave Energy Converters', *Energies* 2016, 9
- Pinon G., 2015. Impact d'une vague extrême sur une géométrie simplifiée de récupérateur de type colonne d'eau oscillante', Rapport de recherche, projet EMACOP, R15EMA033.
- Ringwood J.V., Bacelli G., Fusco F., 2014. Energy Maximizing control of Wave Energy converters', *IEEE control systems magazine*.
- Rameliarison V., Astruc D., Chapalain G., 2015. Assessment of Navier-Stokes modelling of an Oscillating Water Column wave energy converter. In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference, Nantes 2015.
- Rouxel N., 2014. Expertise d'un ouvrage ancien, rapport EMACOP, janvier 2014.
- Rouxel N., 2015. Étude de prix du dispositif proposé par ISL pour la digue de SOCOA », Rapport de la tranche 4 de la tâche O4 du projet EMACOP (R/15/EMA/034).
- Sarkar D., Renzi E., Dias F., 2013. Wave Power Absorption from a Flap-type Wave Energy Converter near a Straight Coast, EWTEC, Sept. 2013, Aalborg, Denmark.
- Sarmiento A.J.N.A, Falcao A.F.O., 1985. Wave generation by an oscillating surface pressure and its application in wave energy extraction. *J. Fluid Mech.* 150, 467-485.
- Silverthorne K.E. and M. Folley, 2011. A New Numerical Representation of Wave Energy Converters in a Spectral Wave Model, In: EWTEC 2011.
- Somerville T.A., D. Greaves, A. Raby, J. Zang, 2011. A Numerical Investigation into the Tuning of an Oscillating Water Column, In: EWTEC.
- Thilleul O., V. Baudry, P-M. Guilcher, Y-M Scolan, E. Jacquin, A. Babarit, P., 2011. Complementary use of a linear potential code, a RANS and a SPH solver for the optimisation of a Wave Energy Converter? In *Ewtec*. Southampton, UK.
- Thornton E., Dalrymple T., Drake T., Gallagher E., Guza B., Hay A., Holman R., Kaihatu J., Lippmann T., Ozkan-Haller T., 1998. State of Nearshore Processes Research: II, Report based on the Nearshore Research Workshop, St. Petersburg, Florida, Technical Report NPS-OC-00-001, 29pp.
- Torre-Enciso Y., Ortubia I., Lopez de Aguilera L.I., Marques J., 2009. Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. Proceedings of EWTEC 2009.
- Troch P., Beels C., De Visch K., Kofoed J.P., De Backer G., 2010. Wake effects behind a farm of wave energy converters for irregular long-crested and short-crested waves, *Coastal Engineering*.
- Van der Meer J.W, Jansen JFPM, 2002. Wave Run-up and Wave overtopping at dikes, Technical report, Task Committee Reports ASCE.
- Venugopal V. and G.H. Smith, 2007. Wave climate investigation for an array of wave power devices, In: EWTEC.
- Vicinanza D., Margheritini L., Kofoed J.P., Buccino M., 2012. The SSG wave energy converter : Performance, status and recent developments, *Energies* 2012, 5, 193-226.
- Whittaker T., Folley M., 2012. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster, *Phil.Trans. R. Soc. A.* 370, 345-364.

Yu Y-H, Li Y., 2011. A RANS simulation for the heave response of a two-body floating point wave absorber, In: Proceedings of the 21st international offshore (ocean) and polar engineering conference.

Zhang Y., Zou Q.P., Greaves D., 2012. Air-Water two phase modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device. *Renew. Energy* 41, 159-170.

Zullah M.A., Lee Y.-H., 2013. Performance evaluation of a direct drive wave energy converter using CFD, In: *Renewable Energy*, Volume 49, Pages 237-241

**Anemoc :**

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

**Legos :**

<http://www.legos.obs-mip.fr/produits-publications/donnees-dobservation/niveau-de-la-mer-maree/modele-global-de-maree-fes>

**Swan :**

<http://www.swan.tudelft.nl/>

Q U A T R I È M E   C H A P I T R E

# Évaluation coût-bénéfice

---

Coordination :  
Arnaud De Bonviller (ISL)

Contributeur :  
Bertrand Michard (Cerema)  
Moez Jellouli (ISL)

# 1. Choix et optimisation du dispositif de récupération de l'énergie de la houle

## 1.1 Critères de choix

### ■ L'efficacité du dispositif

L'objectif principal du dispositif de récupération de l'énergie de la houle localisé en front de mer, ou en proche côtier, est de fournir de l'énergie et le critère d'efficacité par rapport à cet objectif passe par l'estimation du coût du KWh produit. Il intègre ainsi les coûts d'investissement et d'exploitation. Les travaux réalisés dans le cadre d'EMACOP n'ont pas permis d'estimer pour tous les systèmes, et en un site donné, un coût du KWh. Dans ce contexte, on retiendra également comme critère la puissance récupérée par mètre linéaire.

L'objectif secondaire est de profiter de ce dispositif pour protéger les côtes contre les risques d'érosion et de submersion marine dans les secteurs à enjeux en dissipant localement l'énergie. Le critère d'efficacité par rapport à cet objectif doit considérer les événements de référence pour lesquels une dissipation est recherchée et les enjeux concernés par la protection.

### Les contraintes d'usage

Le concept même des systèmes de récupération de l'énergie attaché à des ouvrages anciens et neufs réduit les contraintes aux usages. Le système en lui-même peut cependant ajouter des contraintes à l'ouvrage en place ou en projet :

- impact sur les accès terrestres ;
- nuisances sonores ;
- impact sur les accès nautiques ;
- impact sur le paysage.

### ■ Les contraintes de dimensionnement et de mise en œuvre

Parmi les contraintes de mise en œuvre, on distinguera les contraintes générales de dimensionnement et les contraintes constructives.

Les contraintes de dimensionnement posent la question de l'état de l'art et de l'incertitude quant à l'efficacité du dispositif. Les critères peuvent être les suivants :

- existence d'outils de modélisation robustes ;
- impact de l'incertitude relative aux états de mer sur l'efficacité du dispositif ;
- retours d'expérience.

Les contraintes constructives dépendent largement des sites. Elles s'évaluent à partir de la capacité des dispositifs à s'adapter sans surcoût significatif aux conditions géotechniques, sédimentaires et d'états de mer.

### ■ Les contraintes d'exploitation

Les contraintes d'exploitation recouvrent deux aspects :

- la fatigue des équipements et les travaux de maintenance engendrés ;
- les contraintes vis-à-vis des événements extrêmes.

Ces dernières passent par l'évaluation des contraintes maximales et des mesures de gestion en cas d'événements dépassant les événements de projet.

## 1.2 Optimisation du système

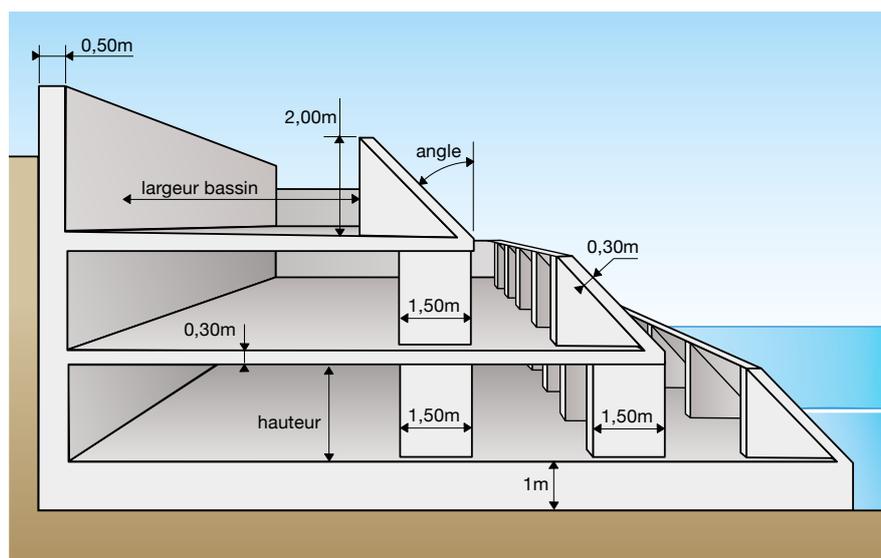
Le comparatif des systèmes doit s'établir à partir des dispositifs optimisés. C'est pourquoi nous exposons dans un premier temps les méthodes d'optimisation de chacun des systèmes.

### ■ Le système houlomoteur de récupération d'énergie par franchissement

Le programme EMACOP a été l'occasion de tester des configurations de système houlomoteur à franchissement sur le site de Saint-Jean-de-Luz sur les digues de Socoa et d'Artha.

Les optimisations ont concerné le nombre de réservoirs, leur largeur, leur hauteur, l'angle des rampes et la capacité des turbines.

Figure 4-1. Dimensions du système SSG – digue de Socoa



Deux contributions principales traitent de ce sujet : « optimisation d'un récupérateur de houle à franchissement de type SSG et évaluation de son potentiel énergétique sur le site de Saint-Jean-de-Luz »<sup>1</sup> et « optimisation d'un dispositif à franchissement sur le site de Saint-Jean-de-Luz ». Ces contributions se complètent, la deuxième permettant de comparer des solutions sur la base du coût du kWh produit tandis que la première teste de nombreuses variantes et s'intéresse au seul kWh produit, en dehors de toute considération de coût.

Les résultats sont les suivants :

- Le nombre de bassins a une influence significative sur l'efficacité du système. Globalement, plus les réservoirs sont nombreux, plus l'énergie produite est forte. L'optimum économique sur Saint-Jean-de-Luz est obtenu pour 4 à 5 réservoirs. Le coût du kWh produit est réduit de 10% par rapport à un système à 3 réservoirs,
- Une adaptation de la capacité des turbines est à rechercher comme pour les systèmes hydro électriques classiques. L'influence sur le coût du kWh produit est significative. Une réduction de 30% du débit d'équipement conduit à Saint-Jean-de-Luz à une augmentation de 12% du prix du kWh produit,

- L'angle optimal de la rampe est de 30° environ. La perte d'efficacité est faible pour des rampes d'angles compris entre 25 et 35° et devient significative lorsqu'on s'écarte de cette fourchette.
- La largeur des bassins est adaptée au volume d'eau issu des vagues produisant la plus grande partie de la puissance (en dehors des extrêmes). Une variation de 10 à 20 % autour de cette valeur a peu d'influence sur le coût du kWh produit.

#### ■ Le système houlomoteur à colonnes oscillantes

Le dimensionnement d'un système à colonnes oscillantes fait intervenir un coefficient produit du nombre d'onde et de la hauteur d'eau devant l'ouverture. Le rendement pneumatique est une fonction dont le maximum proche de 1 coïncide avec une plage de ce coefficient comprise entre 1,2 et 1,5.

La puissance absorbée par le système dépend principalement du mouvement de la colonne d'eau et de la pression d'air à l'intérieur de la chambre si la largeur de la chambre est très inférieure à la longueur d'ondes des houles incidentes.

L'optimisation du système consiste à identifier la gamme des houles les plus énergétiques et caler la géométrie du système pour se situer dans la fourchette des KWh la plus favorable. Les travaux de Zhang *et al.* (2012) et l'exemple de la colonne d'eau de Mutriku permettent une première approche des dimensions à adopter.

#### ■ Le système houlomoteur à volet oscillant

Comme les deux précédents systèmes, le principe du volet oscillant a été analysé en l'appliquant au cas des ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz, en l'occurrence sur la digue brise lame d'Artha (« évaluation de l'énergie récupérée devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz par un système houlomoteur de type volet oscillant »).

Les optimisations mises en évidence concernent la distance du dispositif par rapport à l'ouvrage de protection existant, la flottabilité et les deux paramètres entrant en jeu dans le couple résistant du convertisseur d'énergie.

Les résultats sont les suivants :

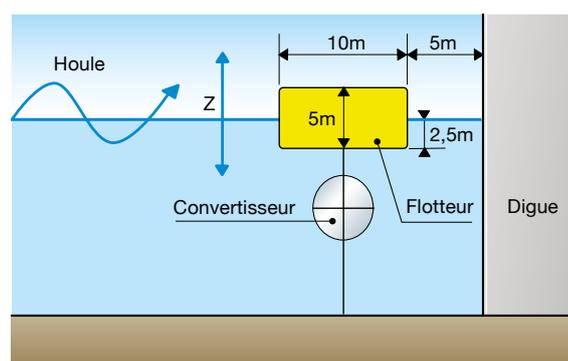
- Les valeurs des paramètres PTO (*Power Take Off*) en fonction du climat de vagues et du phénomène de marée doivent permettre de maîtriser l'amplitude d'oscillation du volet car au-delà d'un angle de 40° (plus ou moins 20° par rapport à la verticale), les effets visqueux réduisent significativement l'énergie récupérée ;
- l'augmentation de l'énergie récupérée en optimisant les paramètres PTO est de l'ordre de 5% ;
- le volet oscillant devra être idéalement positionné au droit des nœuds des ondes stationnaires les plus courantes rencontrées. C'est ainsi que le volet oscillant peut en théorie pour des périodes de houle données et en cas de digue totalement réfléchissante atteindre des rendements proches de 1.

#### ■ Le système houlomoteur de type flotteur pilonnant

Le système houlomoteur a fait l'objet d'analyse pour une application sur deux sites aux caractéristiques différentes : Saint-Jean-de-Luz (profondeur 10 mètres, Hs de l'ordre de 3 mètres, période de 8 à 12 secondes), et Esquibien (profondeur 3 mètres, Hs de l'ordre de 1 mètre, mers de vent). Dans les deux cas, les recherches d'optimisation conduisent à localiser le système au droit des ventres des ondes stationnaires. En pratique, les flotteurs sont localisés à proximité de la digue. Par ailleurs, l'optimisation cherche à rapprocher la fréquence de résonance du système avec celle des houles les plus énergétiques.

L'étude relative à l'évaluation de l'énergie récupérée par un système de type flotteur pilonnant placé devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz s'est intéressée à l'optimisation de la chaîne de conversion de l'énergie en fonction du climat de houle et des marées.

Figure 4-2. Principe du flotteur pilonnant [Casagec, UPPA, ECN, 2017]



## 1.3 Choix du système

### Efficacité du dispositif

#### ■ La récupération de l'énergie disponible

A. Babarit et J. Hals [Babarit et Hals, 2011] ont proposé des ordres de grandeurs de performance hydrodynamique moyenne par type de système houlomoteur. La performance hydrodynamique dont il s'agit correspond au taux d'absorption d'énergie des vagues par mètre de système. L'ordre de grandeur annoncé est compris entre 20 et 30% avec de meilleures performances pour les systèmes de type volet oscillant et colonnes oscillantes et des moindres rendements pour les systèmes à franchissement ou à flotteur pilonnant.

Deux paramètres peuvent être retenus pour comparer les dispositifs entre eux :

- le rendement au mètre linéaire ;
- le rendement pour l'équipement d'un linéaire donné de digue.

Les systèmes à colonnes oscillantes et franchissement sont disposés sur l'ensemble du linéaire de l'ouvrage de protection tandis que les systèmes à flotteurs constituent des aménagements isolés, séparés les uns des autres. Pour estimer le second paramètre, on peut dans une première approche faire l'hypothèse d'une distance de séparation entre dispositif égale à la largeur de chacune des unités, distance évitant les interactions nuisibles entre les différentes unités [Ricci, Saulnier, Falcao, 2007].

Les analyses faites sur le site de Saint-Jean-de-Luz (puissance incidente : 14 kW/m) conduisent aux résultats suivants :

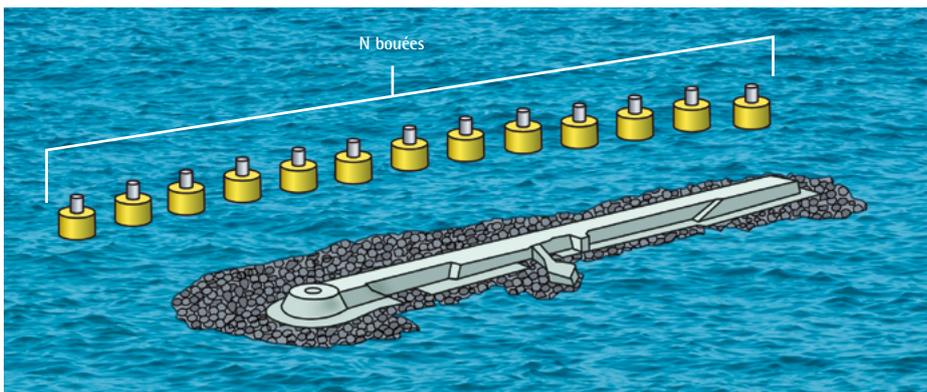
Tableau 4-1. Rendement hydrodynamique des systèmes houlomoteurs – comparatif de projets sur le site de Saint-Jean-de-Luz

	Puissance absorbée (kW/m)	Rendement %	Commentaires
Franchissement (SSG)	2-3,3	15	-
Colonnes oscillantes	2,8	20	-
Volet oscillant	13,2	94	Hypothèse : Digue réfléchissante, non prise en compte des effets visqueux
Bouée pilonnante	6	43	Hypothèse : Digue réfléchissante

#### ■ Le rendement global

En ce qui concerne les systèmes à volet oscillant et à bouée pilonnante, le rendement global n'a pas été estimé. Babarit et Mouslim [Babarit, Mouslim, 2015] indiquent que les pertes induites par la chaîne de conversion électrique sont couramment évaluées à 30 à 50% de la production d'énergie primaire. Pour les systèmes à colonnes oscillantes et à franchissement, des rendements globaux ont été estimés sur les projets analysés sur Saint-Jean-de-Luz et Cherbourg.

Figure 4-3. Système de flotteurs pilonnants devant la digue de l'Artha [Casagec, UPPA, ECN, 2017]



Le tableau ci-après présente le rendement global des 4 systèmes sur le site de Saint-Jean-de-Luz. Le rendement global est défini comme le rapport de la puissance totale convertie en électricité à la puissance incidente sur la largeur de la digue. Pour les systèmes actifs, il est fait les hypothèses suivantes :

- distance de séparation entre les dispositifs actifs égale à la largeur de chacune des unités ;
- réduction de 30 à 50% lors de la conversion en électricité ;
- pour le système à volets oscillants, un coefficient réducteur de 0,74 pour prendre en compte les effets visqueux ;
- la réflexion totale sur la digue.

**Tableau 4-2. Rendement global des systèmes houlomoteurs – comparatif de projets sur le site de Saint-Jean-de-Luz**

	Puissance absorbée (kW/m)	Puissance moyenne produite (kW/m)	Rendement global (%)
Franchissement (SSG)	2-3,3	1,2	8,5
Colonnes oscillantes	2,8	0,8	6-6,5
Volet oscillant	13,2	2,5-3,5	17-25
Bouée pilonnante	6	1,5-2,1	11-15

Pour indication, à partir de la documentation concernant le projet Wavestar, le rendement global de ce projet de mise en œuvre de flotteurs pilonnants serait compris entre 10 et 25% [Wavestar Prototype at Roshage: Performance Data for ForskVE Project No 2009-1-10305].

#### Commentaires

Contrairement aux trois autres systèmes, le système à franchissement permet un stockage à court terme de l'énergie (lissage de la production).

Les systèmes actifs de type volet oscillant et bouée pilonnante présentent les meilleurs rendements théoriques par mètre linéaire. Il y a lieu cependant de nuancer le propos en considérant que la réflexion des houles joue un rôle significatif dans le rendement. Les rendements annoncés par le projet Wavestar confortent cependant les résultats concernant les bouées pilonnantes.

Les systèmes actifs ont des rendements qui devraient être proportionnellement plus grands pour des houles moins énergétiques et des marnages importants. Cela reste à confirmer.

#### ■ Coût du KWh

Les coûts des différents systèmes n'ont pas été évalués avec précision dans le cadre du programme EMACOP. Le système SSG sur le site de Saint-Jean-de-Luz a cependant fait l'objet d'une étude plus détaillée. Le système à colonnes oscillantes peut être estimé par référence au projet de Mutriku. Concernant les volets oscillants, une estimation sommaire a été proposée.

Concernant les coûts des systèmes pilonnants, la documentation sur le système Wavestar montre qu'à puissance disponible équivalente, le coût du kWh est nettement plus élevé que celui estimé pour les ouvrages passifs [Biyela and Cronje 2016]. Cependant, les estimations pour la mise en œuvre du système sur la digue d'Esquibien conduisent à des coûts de génie civil très compétitifs.

La littérature fournit quelques ordres de grandeur de kWh produit mais la définition exacte de cet indicateur économique n'est pas précisée et peut varier. Le chapitre 4.3 détaille ces questions.

L'estimation des coûts des quatre systèmes montre que les systèmes à volets oscillants et à flotteurs présentent le rapport coût/bénéfice le plus intéressant. Vient ensuite le système à franchissement puis les colonnes oscillantes. L'application à Saint-Jean-de-Luz montre que les coûts de production de ces deux systèmes sont très élevés.

#### ■ La protection des côtes contre la submersion et l'érosion

L'intérêt des systèmes houlomoteurs côtiers réside en partie dans la double vocation qu'il est possible d'envisager à ces aménagements : production d'électricité et lutte contre les submersions et érosions marines.

De ce point de vue, les systèmes de type colonnes oscillantes et à franchissement remplacent totalement les aménagements de protection à mettre en place.

Le rôle joué par les systèmes de type bouées pilonnantes est difficile à mesurer. Il est par ailleurs nécessaire d'évaluer si l'impact sédimentaire et la possible concentration d'énergie en des points particuliers de la protection ne peuvent venir amplifier les contraintes. Cependant dans le cadre d'un projet de recherche sur la modélisation numérique et physique d'un système de récupération d'énergie de la houle par un dispositif bord à quai, des mesures de franchissements de digue ont été réalisées. Un site d'application a été défini pour ce projet. Le site d'Esquibien (Finistère) a été choisi pour sa large exposition aux houles d'Atlantique, ainsi que pour sa longue digue de 300 m. Au-dessus de la fréquence de résonance du flotteur, il a été observé que l'atténuation des franchissements peut dépasser un facteur 100 car le flotteur agit alors comme un obstacle fixe avec des similarités avec le principe de la plaque fixe immergée. En-dessous de la fréquence de résonance, le flotteur suit en revanche les mouvements de la surface libre et une augmentation des franchissements est relevée. Une réduction des franchissements est cependant possible si la distance entre le flotteur et la digue est très faible [Neuvéglise *et al.*, 2018, 2019].

Les mesures de sauvegarde du système pourraient être nécessaires en cas de conditions extrêmes ce qui viendrait réduire l'intérêt de tels dispositifs lors de tels événements.

Le rôle du volet oscillant reste à préciser. Son intérêt dans le cadre de protections des côtes contre l'érosion est à étudier. Les dispositifs pourraient alors rendre des services comparables aux brises lames détachés de la côte.

Pour quantifier les services rendus par l'ouvrage de récupération de l'énergie, il est possible de se baser sur le coût d'une protection équivalente.

Pour un ouvrage neuf du type de la digue de Socoa à Saint-Jean-de-Luz, le coût du service rendu peut être estimé à partir du coût au mètre linéaire d'ouvrage. Le service rendu se monte alors à 93 000 euros/ml.

On constate ici que l'intégration d'un ouvrage de récupération d'énergie à un aménagement neuf peut réduire significativement le coût d'investissement lié à la seule production d'énergie.

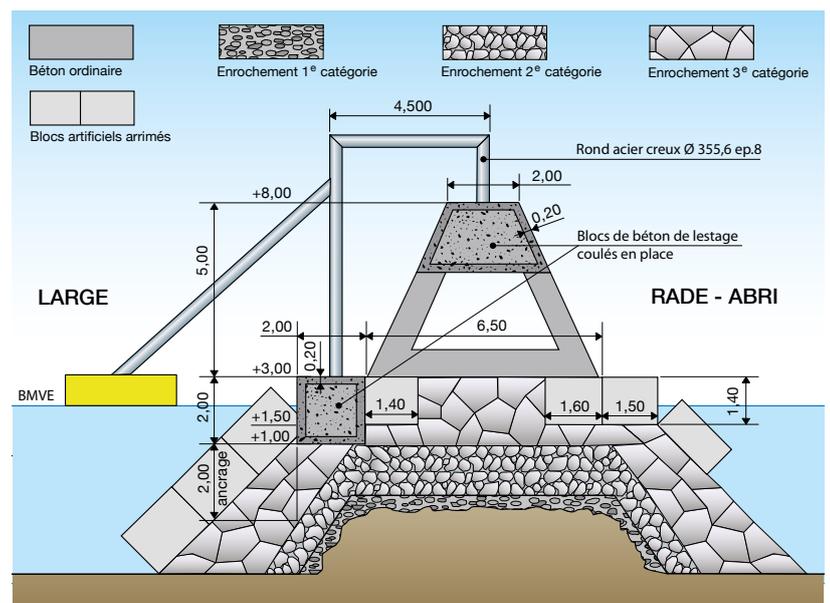
Pour un ouvrage existant tel que celui d'Artha, ce sont les frais de maintenance qu'il y a lieu de considérer. Un projet de volet oscillant réduirait les frais d'exploitation aujourd'hui estimés à 125 000 euros/an. Il est cependant impossible dans l'état des connaissances de fournir des estimations précises concernant le bilan économique de l'opération.

## Contraintes sur les usages

### ■ Impact sur les accès terrestres

L'exemple des colonnes oscillantes de Mutriku montre que l'accès peut ne pas être perturbé par l'ajout de dispositifs de récupération d'énergie. L'esquisse du projet d'installation d'un système à bouées pilonnantes sur la digue d'Esquibien montre que les accès peuvent être limités par l'implantation.

Figure 4-4. Mise en œuvre d'un flotteur pilonnant – emprise sur la digue – illustration sur la digue d'Esquibien [IC Ingénieurs Conseils et Cerema]



### ■ Nuisances sonores

L'exemple de Mutriku montre que des mesures doivent être prises pour réduire les nuisances sonores dans le cas de colonnes oscillantes. On peut penser qu'il en est de même pour un système à franchissement. Le système à volets oscillants est de ce point de vue le moins impactant.

### ■ Impact sur les accès nautiques

La réflexion des houles sur les ouvrages à franchissement ou à colonnes oscillantes peut rendre les accès plus difficiles. Dans le cas de Mutriku, des solutions ont été écartées de ce fait. Les systèmes actifs peuvent être moins impactants mais des travaux complémentaires seraient nécessaires pour bien apprécier l'effet des ouvrages sur l'agitation locale.

### ■ Impact sur le paysage

En cas de fort marnage, les systèmes actifs peuvent avoir un impact fort sur le paysage alors que les systèmes à colonnes oscillantes ou à franchissement s'intègrent à des ouvrages déjà massifs.

## Contraintes de dimensionnement et de mise en œuvre

### ■ Effet du marnage et profondeur d'eau

Les comparatifs réalisés l'ont été sur le site de Saint-Jean-de-Luz qui dispose d'une configuration adaptée à tous les systèmes de récupération d'énergie : profondeur de l'ordre de 10 mètres, marnage limité.

En cas de fort marnage, le système à franchissement devra multiplier le nombre de bassins et le coût du kWh augmentera. Ce n'est pas le cas du système à colonnes oscillantes dès lors que la base est constamment immergée et que la digue est assez haute pour laisser les turbines hors d'eau. Les systèmes actifs quant à eux, dès lors que la profondeur d'eau est significative s'adaptent au niveau.

La profondeur d'eau a un lien direct avec la puissance disponible en pied d'ouvrage. Faisons l'hypothèse que cette puissance reste suffisante (ce qui

suggère des hauteurs d'eau minimales supérieures à 3 mètres), le système à bouées pilonnantes peut être affecté car le tirant d'eau des bouées est alors de l'ordre de grandeur des profondeurs minimales. Associé à un fort marnage, le fonctionnement des volets oscillants peut également être problématique.

### ■ Existence d'outils de modélisation robustes

Les systèmes SSG et à colonnes oscillantes sont des dispositifs linéaires pour lesquels il est nécessaire de bien apprécier la dissipation d'énergie locale au voisinage de structures linéaires. On peut s'appuyer sur des travaux relatifs au dimensionnement des ouvrages de front de mer notamment concernant les débits de franchissement. Les processus qui interviennent dans la conversion d'énergie sont plus complexes pour le système à colonne oscillante du fait de la transformation du mouvement de la surface libre à l'intérieur de la chambre en écoulement d'air dans une turbine.

Concernant les systèmes SSG, l'université d'Aalborg a développé un outil spécifiquement dédié à l'estimation de leurs rendements. Dans le cadre du programme EMACOP, une comparaison avec d'autres méthodes a été menée. Il apparaît que les débits calculés par Wopsim sont inférieurs à ceux donnés par d'autres formulations avec un ratio qui varie de 1 à 10. Le calcul de l'énergie produite à partir d'un débit de franchissement donné est cohérent avec les calculs théoriques. On a vérifié que le calcul Wopsim aboutissait à un productible du même ordre de grandeur que celui calculé sommairement en tenant compte des débits et niveaux de charge moyens.

Concernant les systèmes à volet oscillant et à bouées pilonnantes, le programme EMACOP a été l'occasion de développer des outils de dimensionnement. Les mouvements à simuler sont beaucoup plus complexes.

Il a été développé un outil d'évaluation du rendement des dispositifs faisant intervenir des volets oscillants en tangage, autour d'un axe fixe proche du fond et partiellement immergés, perçant la surface libre. L'évaluation de l'énergie récupérée ne tient pas compte des effets visqueux. Or les calculs

complémentaires indiquent une réduction de l'ordre de 30 % de la puissance récupérée lorsque les effets visqueux sont pris en compte. Par ailleurs, les calculs font l'hypothèse d'une réflexion totale de la houle sur l'ouvrage ce qui engendre une surestimation de l'énergie récupérée de l'ordre de 60 à 80% si on applique ce calcul à une digue à talus en enrochements.

Concernant les bouées pilonnantes, cette même hypothèse est faite. La non prise en compte des effets visqueux quant à elle influence peu le résultat en général. Neuvéglise *et al.* (2017) ont cependant montré que les effets visqueux doivent être pris en compte lorsque le rapport entre le tirant d'eau et la profondeur est important.

#### ■ Impact de l'incertitude relative aux états de mer sur l'efficacité du dispositif

La connaissance des états de mer au droit de l'ouvrage de récupération d'énergie est bien sûr essentielle. L'incertitude joue différemment sur l'énergie récupérée par chacun des systèmes.

Concernant le système SSG, l'oblicité des vagues peut être prise en compte par un coefficient correcteur. Pour un aménagement à plusieurs bassins, l'incertitude relative aux niveaux reste modérée.

Concernant les systèmes à volets oscillants ou à bouées pilonnantes, l'oblicité des houles intervient indirectement dans le coefficient de réflexion. Les interactions entre chaque unité disposée en ligne sont encore mal estimées et dépendent des conditions de mer.

#### ■ Retours d'expérience

Le dispositif SSG ne peut compter sur aucun retour d'expérience probant. Le dispositif Tapchan installé en 1985 dans un site naturel a été détruit lors d'une tempête en 1991. Les systèmes à volets oscillant et colonnes oscillantes ont été testés : Oyster en Écosse, exemple de volet oscillant sous 10 à 15 mètres de fond, Mutriku en Espagne, exemple de colonne oscillante associée à une digue portuaire. Il n'existe pas à notre connaissance d'exemple de volet oscillant à proximité d'une digue qui puisse renseigner sur l'interaction système-ouvrage de front de mer.

Concernant les bouées pilonnantes, le système a été testé au Brésil (Pecem), en Israël et à Gibraltar. La plateforme Wavestar au Danemark se rapproche également de la configuration envisagée.

#### Les contraintes d'exploitation

Les charges d'exploitation peuvent représenter un pourcentage significatif du coût d'investissement. La littérature indique une valeur de 5 à 6%.

Le système à colonnes oscillantes a l'avantage d'être conçu avec des turbines hors d'eau. Le vieillissement des turbines sur un système SSG serait à étudier avec attention.

Pour les systèmes à bouées pilonnantes, le système de conversion en électricité peut être ramené sur la digue et protégé des sollicitations naturelles. Pour le volet oscillant, l'amenée par câble est nécessaire. La maintenance est plus délicate.

Concernant le fonctionnement en conditions extrêmes, les systèmes à franchissement et à colonnes oscillantes sont des ouvrages massifs qui dès lors que les matériaux utilisés sont adaptés aux fortes pressions (la centaine de kPa) peuvent supporter des conditions extrêmes. Le retour d'expérience de la digue de Mutriku montre que des désordres de structure peuvent résulter des sollicitations. On doit également garantir pour ces systèmes le maintien hors d'eau des turbines.

Les systèmes actifs présentent davantage d'incertitude sur leur capacité à supporter des conditions extrêmes. Le relèvement des bouées pilonnantes peut constituer une solution. Concernant les volets oscillants, on peut penser que l'immersion totale permettrait également de garantir la survivabilité du système. Contrairement aux systèmes passifs, la survivabilité dépend d'une gestion adaptée en conditions extrêmes ce qui comporte davantage de risques. L'exemple de Wave star a montré que les dispositifs de repliement étaient possibles. Le système a vécu un nombre significatif de tempêtes sans dommages.

## Synthèse du comparatif

Le tableau ci-après présente une synthèse du comparatif des quatre systèmes de récupération de l'énergie des vagues en proche côtier. Il se base sur les quatre groupes de critères choisis et résulte de l'actuel état de l'art tel qu'il a été apprécié dans le cadre du programme EMACOP. Les conclusions sont tirées en particulier des dimensionnements réalisés sur le site de Saint-Jean-de-Luz. L'approche méthodologique peut guider le lecteur mais l'appréciation des critères pourrait évoluer d'un site à un autre. Des travaux spécifiques sont nécessaires pour proposer une analyse précise de chacun des critères et conforter le jugement.

**Tableau 4-3. Synthèse de l'analyse comparative des systèmes de récupération d'énergie de la houle en front de mer ou en proche côtier**

		Franchissement	Colonne oscillante	Volets oscillants	Bouées pilonnantes
Efficacité	énergie produite	5-10%	5-10%	20-30%	10-15%
	coût au kWh	1 à 1,5 €/kWh	1,5 à 2 €/KWh	0,3-0,5 €/KWh	0,3 à 0,4 €/KWh
	protection des côtes	très favorable	très favorable	lutte contre l'érosion	effet sur submersion
Contraintes d'usages	accès terrestres	aucun impact	aucun impact	aucun impact	impact modéré
	nuisances sonores	atténuations nécessaires	atténuations nécessaires	peu d'impact	impact modéré
	accès nautiques	réflexion des houles	réflexion des houles	obstacles	impact faible (?)
	paysage	impact modéré	impact modéré	en cas de marnage	en cas de marnage
Dimensionnement et mise en œuvre	outils disponibles	robuste	robuste	en développement	en développement
	impact des incertitudes	faible	faible	moyen	moyen
	retours d'expérience	aucun	retours disponibles	retours transposables	retours disponibles
Contraintes d'exploitation	fatigue des équipements	contraintes : turbines	peu de contraintes	importante	importante
	événements extrêmes	maîtrisé	turbines hors d'eau	gestion active	gestion active

# 2. Coûts de construction

## 2.1 Typologie d'ouvrages

### Ouvrages rencontrés

Les coûts de construction dépendent du type d'ouvrage associé au système de récupération d'énergie.

Un ouvrage neuf intégrera plus facilement le système récupérateur d'énergie puisque les solutions constructives et dimensionnements seront dès la phase de conception pris en compte.

Un ouvrage ancien devra faire l'objet d'une adaptation de sa géométrie et de ses caractéristiques mécaniques pour héberger de manière satisfaisante le système.

Les ouvrages qu'ils soient neufs ou anciens peuvent également se différencier d'un point de vue de leur nature qui dépend en général de leur utilisation :

- Ouvrages portuaires de protection de type quai/jetée :
  - caisson en béton perforé ou non avec protection en enrochements ou non,
  - digue verticale à muraille en béton ou en maçonnerie avec ou sans protection en enrochement,
  - digue mixte : digue verticale sur soubassement en enrochements,
  - digues à talus en enrochements.
- Ouvrage détaché de la côte de type brise lame en enrochements.
- Ouvrages de protection de front de mer de type digue en remblai avec :
  - perré béton,
  - perré maçonné.

### Investigations préalables

Quel que soit le type d'ouvrage, sa description préalable est essentielle : géométrie, nature des matériaux de fondation, matériaux de structures, traitement de la fondation, désordres observés et historique des travaux. Les points de vigilance

concerneront les secteurs qui deviendront singuliers lorsque le système de récupération d'énergie sera intégré : jonctions entre ancienne et nouvelle structure, fondation de pied au droit du système à mettre en place, points d'ancrage des éléments. On se reportera au chapitre consacré aux contraintes géotechniques (chapitre 2).

## 2.2 Modalités constructives et coûts

### Préambule

Les modalités constructives dépendent du système de récupération de l'énergie des vagues.

Les systèmes à franchissement et à colonnes oscillantes ont peu d'interaction avec l'ouvrage porteur. Ils reprennent par leur propre structure les efforts. Les seules interactions sont d'ordre hydrodynamique dans les secteurs de transition entre l'ouvrage sans système de récupération et la partie d'ouvrage concernée par l'ajout du système. Une part importante du prix est liée au génie civil.

Les systèmes à volets oscillants n'ont pas d'interaction directe avec l'ouvrage. Une interaction d'ordre hydrodynamique apparaît avec une désorganisation du plan de vague au contact des volets et des champs de vagues chaotiques entre les volets et l'ouvrage. Les volets peuvent également générer une modification de la nature des fonds au voisinage de l'ouvrage. Globalement, les volets ont un effet de dissipation de l'énergie au voisinage de l'ouvrage. Il y a lieu cependant de bien apprécier l'effet sur la digue du passage des houles entre les différents volets. Une part importante du prix est liée à l'électromécanique.

Le système à flotteur est celui qui génère les interactions les plus importantes avec l'ouvrage porteur excepté dans le cas où un ouvrage dédié est prévu

(exemple du projet Wavestar avec des bras de bouées repris par une structure dédiée sur piles).

Les coûts unitaires 2017 suivants ont servi aux évaluations dans le cadre d'EMACOP :

Tableau 4-4. Prix unitaires utilisés

	Unité	Prix unitaire
<b>Excavations</b>		
Excavation	m <sup>3</sup>	50 €
Évacuation	m <sup>3</sup>	40 €
Enrochements	m <sup>3</sup>	70 €
<b>Béton</b>		
Béton de propreté	m <sup>2</sup>	100 €
Béton	m <sup>3</sup>	250 €
Béton préfabriqué	m <sup>3</sup>	1 500 €
Armatures	kg	3 €
Coffrages horizontaux	m <sup>2</sup>	250 €
Coffrages verticaux	m <sup>2</sup>	150 €
<b>Batardage et fondations</b>		
Fourniture palplanches	kg	1,5 €
Mise en fiche de palplanches	ml	350 €
Battage de palplanches	m <sup>2</sup>	40 €
Recépage de palplanches et évacuation	ml	250 €
Épuisement	ft	100 000 €
<b>Dépose et repose enrochements</b>		
Dépose	t	6 €
repose	t	10 €
<b>ancrage</b>		
Tirants BA préfabriqués	m <sup>3</sup>	900 €
<b>Bras flotteur</b>		
Tubes en acier	t	1 400 €
<b>Équipements</b>		
Groupes	kW	1600 €

L'hypothèse prise pour l'évaluation des coûts d'opération et de maintenance est 5% du montant total des coûts fixes d'installation (CAPEX).

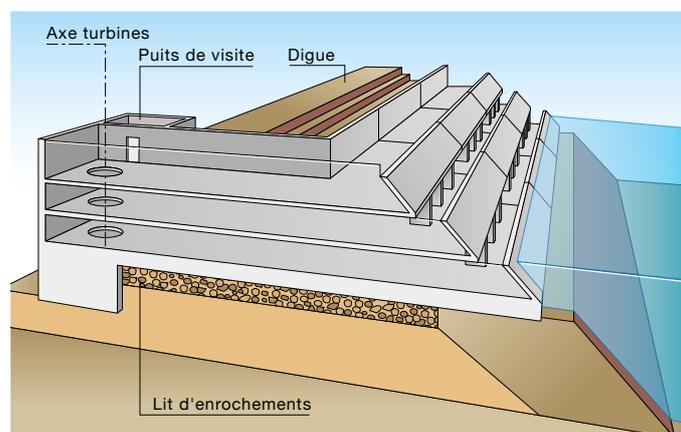
## Ouvrages de franchissement

### ■ Solutions constructives

Le système à franchissement vient recouvrir l'ouvrage ancien ou bien remplace l'ouvrage de protection en cas d'ouvrage neuf.

Il s'agit d'un ouvrage massif dont la fondation est dédiée :

Figure 4-5. Principe d'un système à franchissement – cas de figure de la digue de Socoa, Saint-Jean-de-Luz



L'ouvrage de franchissement comme les colonnes oscillantes est soumis à des sollicitations importantes ; le dimensionnement des bétons est réalisé pour des sollicitations correspondant à la houle millénaire.

Un ouvrage de franchissement est donc constitué de :

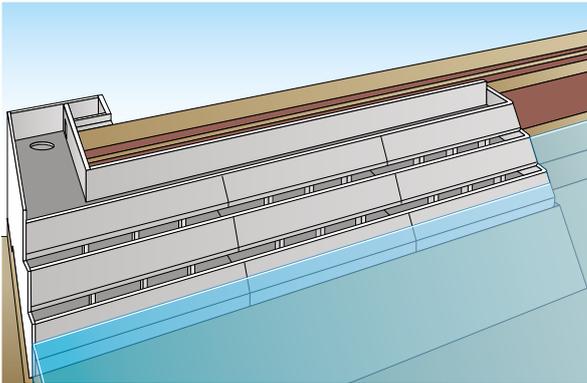
- une fondation ancrée dans le rocher ou bien rapportée (massif en enrochements) ;
- des piliers transversaux ;
- des contreforts pour soutenir les déversoirs ;
- des dalles et voiles béton ;
- un remblai de structure.

### Exemple du projet étudié sur Saint-Jean-de-Luz (digue de Socoa)

Les solutions constructives sont les suivantes :

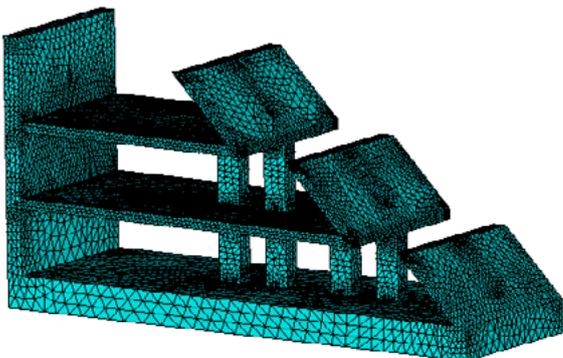
- une fondation en béton de 1 m d'épaisseur ancrée dans le rocher ;
- des piliers transversaux de largeur 1,5 m et d'épaisseur 0,5 m espacés de 4,5 m ;
- des contreforts d'épaisseur 0,5 m pour soutenir les déversoirs ;
- des dalles et voiles d'épaisseur 30 cm pour l'ouvrage.

Figure 4-6. Système rapporté sur l'ouvrage existant



Un modèle aux éléments finis a été mis en place afin de calculer les efforts dans les différents éléments de l'ouvrage. Une vue du modèle est présentée dans la figure suivante.

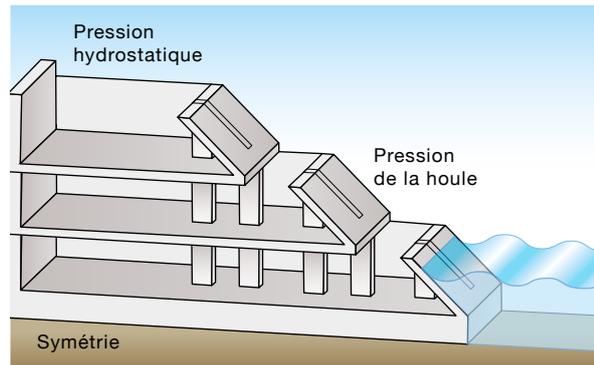
Figure 4-7. Modèle aux éléments finis – calcul des efforts



Sur une longueur de 60 m, l'ouvrage est constitué d'une répétition d'une section de 5 m reposant au centre sur les piliers transversaux et les contreforts.

Il est par conséquent justifié de ne modéliser que cette section en appliquant une condition de symétrie dans la direction transversale comme indiqué dans la figure ci-dessous.

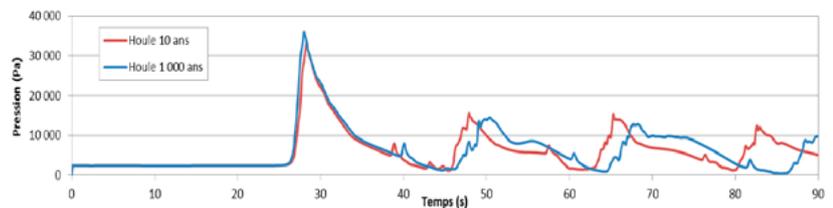
La face inférieure du radier est fixée en déplacement.



Un modèle numérique 2D a été mis en place afin de simuler la propagation de la houle et de déterminer la pression engendrée par son impact sur l'ouvrage de franchissement [de Bonviller, Jellouli, Pépin, Shaiek, EMACOP, 2015].

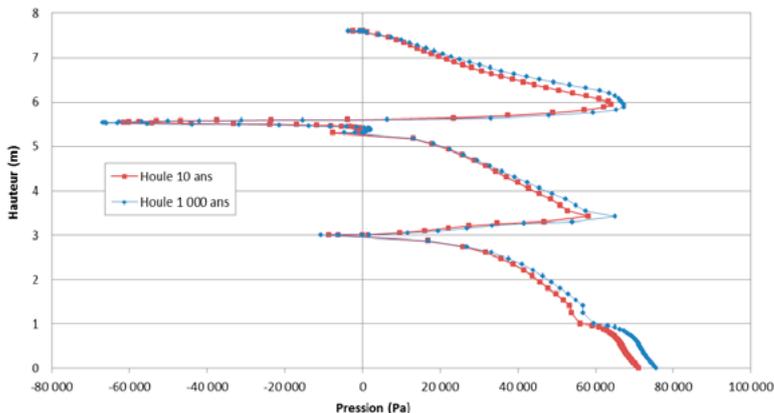
Le graphique suivant montre la variation temporelle de la pression moyenne sur les voiles de l'ouvrage de franchissement. Sur 90 s, l'impact le plus important est enregistré pour la première vague.

Figure 4-8. Pression moyenne sur les voiles béton en fonction du temps



Il convient de bien dimensionner l'ensemble des voiles pour reprendre les contraintes des houles extrêmes :

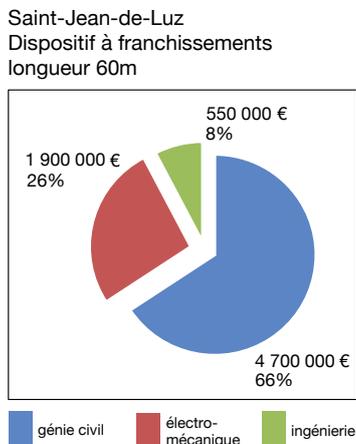
Figure 4-9. Répartition de la pression sur les voiles au moment de l'impact de la première vague



Les coûts estimés sont basés sur le dimensionnement ainsi réalisé des différents éléments de la structure.

L'estimation des coûts pour un ouvrage de franchissement à Saint-Jean-de-Luz a conduit à la répartition suivante :

Figure 4-10. Coûts de construction de l'ouvrage à franchissement pour le cas d'étude de Saint-Jean-de-Luz



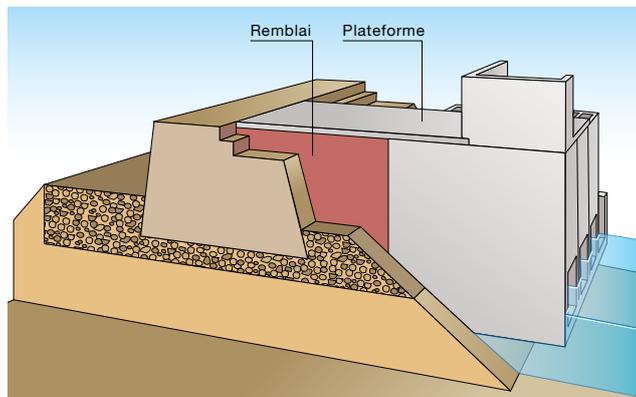
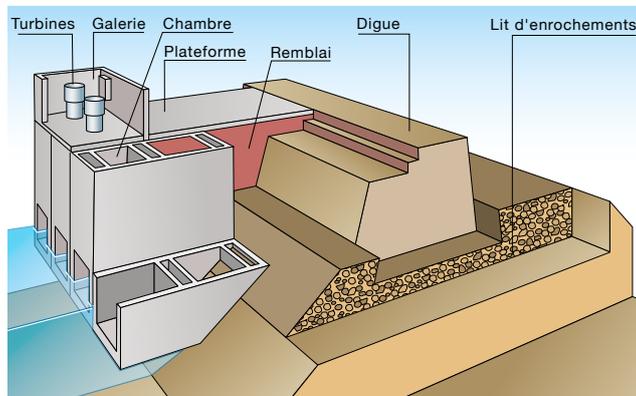
## Colonnes oscillantes

### Solutions constructives

Le design des colonnes oscillantes prévoit une chambre verticale ou pentée.

La colonne oscillante de Mutriku est un bon exemple de construction associée à un ouvrage portuaire. Les ouvrages de génie civil prévus dans le cadre du projet de Saint-Jean-de-Luz étudiés dans le cadre d'EMACOP s'inspirent de ceux déjà réalisés sur le site de Mutriku. Il s'agit de :

- une fondation en béton de 1 m d'épaisseur ancrée dans le rocher à l'aide de barres de diamètre 32 mm ;
- éléments préfabriqués en béton armé de hauteur 80 cm (4 éléments bas ouverts sur le front de mer, 9 éléments fermés) ;
- voiles d'épaisseur 30 cm pour la galerie des turbines.



1. Fondation en béton d'épaisseur environ 1 m ancrée dans le rocher à l'aide de barres Ø32



2. Éléments préfabriqués en béton. 4 éléments bas (ouverts). Hauteur d'élément : 80 cm



3. Mise en place des éléments préfabriqués par grue. 12 éléments par chambre.



4. Mise en place des éléments préfabriqués par grue. 12 éléments par chambre.



5. Scellement des éléments préfabriqués et construction de la galerie des turbines. Comblement des zones entre la centrale et le corps de digue.



Les sollicitations sur les structures sont importantes. On discerne les points d'impacts sur le mur de front et sur la base ouverte de la chambre.

L'étude numérique des systèmes D2 et D4 réalisée a permis de simuler des événements extrêmes dans les conditions de mer du site de Bayonne [Abadie 2015]. Les pressions résultant de la propagation sont très fortes (jusqu'à 300 kPa sur le mur de front simulé à Bayonne). Abadie met également en évidence des pressions très fortes en haut de chambre lorsque l'air y est piégé. Des analyses plus poussées seraient nécessaires pour bien apprécier les valeurs :

Figure 4-11. Pression sur le mur de front – exemple de la simulation de la propagation d'un événement extrême sur le site de Bayonne, Abadie, EMACOP [Abadie 2015]

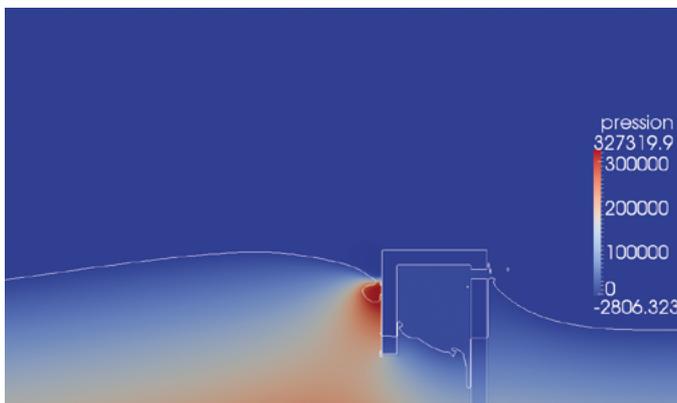
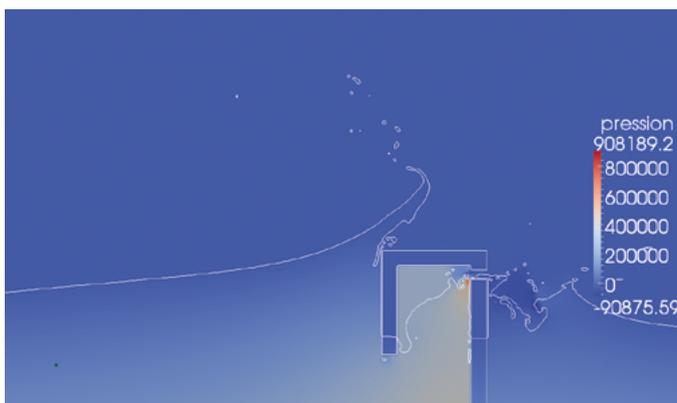


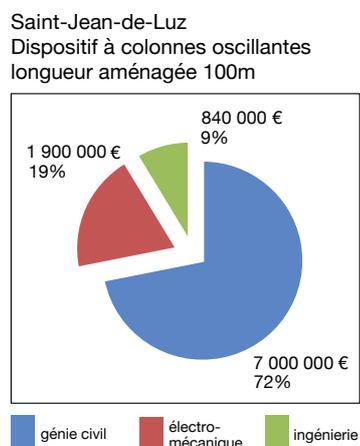
Figure 4-12. Pressions dans la chambre, événement extrême Bayonne, Abadie, EMACOP ([Abadie 2015])



#### ■ Exemple du projet étudié sur Saint-Jean-de-Luz (digue de Socoa)

L'estimation des coûts pour un ouvrage à colonne oscillante à Saint-Jean-de-Luz a conduit à la répartition suivante :

Figure 4-13. Coûts de construction de l'ouvrage à colonnes oscillantes pour le cas d'étude de Saint-Jean-de-Luz

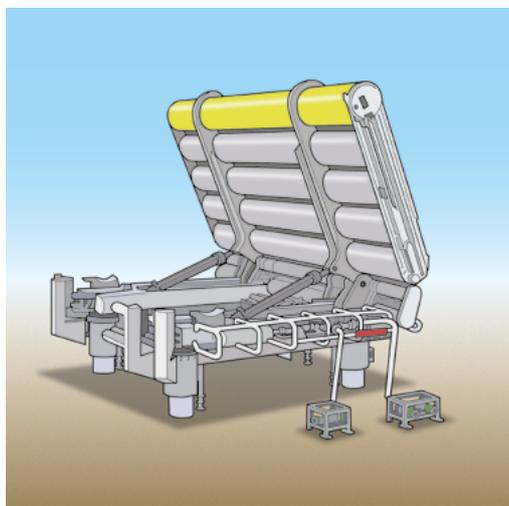


## Volet oscillant

### Solutions constructives

Le volet oscillant se compose d'un volet en acier se mouvant selon un degré de liberté par rapport à un axe ancré au fond. Le volet vertical en situation initiale se déplace d'avant en arrière, tout en actionnant passivement deux pistons. Un système PTO hydraulique ou électrique convertit l'énergie de cavalement/tangage en électricité.

Figure 4-14. Schéma du volet oscillant (projet Oyster)



Il existe assez peu d'informations dans la littérature concernant les coûts de ces installations. Les incertitudes concernent la chaîne de conversion électrique.

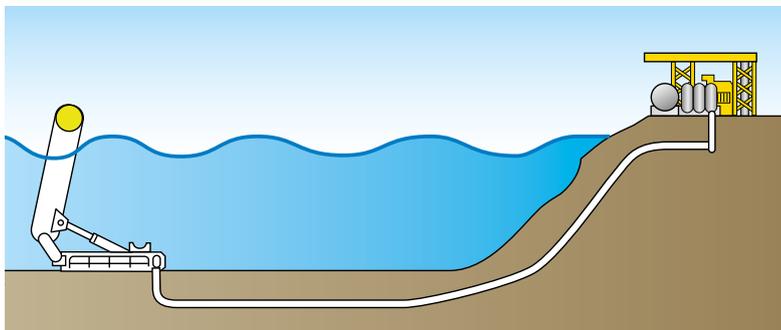
#### 1. Exemple du projet étudié sur Saint-Jean-de-Luz (digue de l'Artha)

L'ouvrage de volet oscillant étudié est similaire à celui réalisé dans le cadre du projet de recherche OYSTER développé par l'entreprise Aquamarine Power Ltd.

Les dimensions du volet étudié sont les suivantes :

- 11 m de hauteur ;
- 64 tonnes d'acier ;
- Profondeur de mise en place 10 m ;
- 4 pieux de 1 m de diamètre de fondation (profondeur envisagée 15 m).

Figure 4-15. Exemple de convertisseur hydraulique

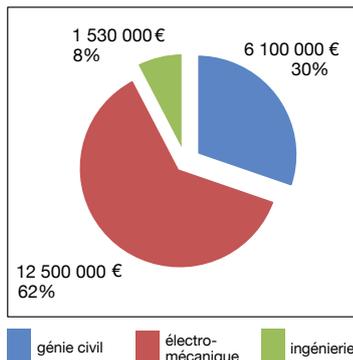


L'étude de ce type de système a été réalisée sur le site de la digue d'Artha (Saint-Jean-de-Luz). L'ensemble du dispositif se compose de 7 volets oscillants espacé de 20 m.

L'estimation des coûts pour un ouvrage de type volet oscillant à Saint-Jean-de-Luz a conduit à la répartition suivante :

Figure 4-16. Coûts d'investissement d'un ouvrage avec volets oscillants pour l'équipement d'un linéaire de 250 mètres

Saint-Jean-de-Luz  
Volets oscillants  
longueur aménagée 250m



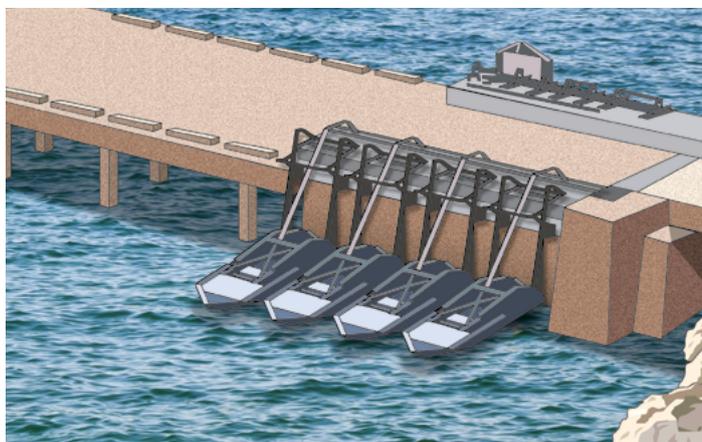
Le coût des fondations représente 15% du coût total.

## Système à flotteur

### ■ Solutions constructives

Le système comporte un flotteur relié à la terre par des bras articulés. Le flotteur subit les mouvements de pilonnement. La conversion peut être hydraulique ou électrique comme pour le système à volets oscillants.

Figure 4-17. Exemple de flotteurs pilonnants – jetée de Gibraltar (Eco Wave Power 2016)



### 2. Exemple du projet étudié sur Saint-Jean-de-Luz (digue de l'Artha)

Le système à flotteur proposé se compose d'une bouée de 10 m de diamètre avec un tirant d'eau de 2,5 m.

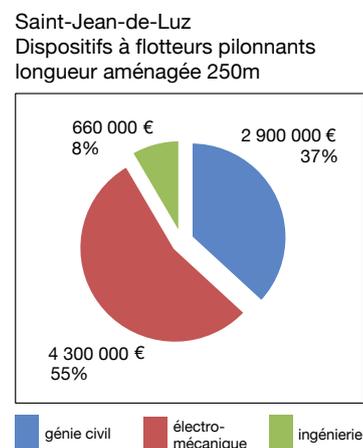
Dans la configuration de Saint-Jean-de-Luz, le dispositif se compose de 13 bouées espacées de 10 m sur la digue d'Artha. Les dimensions du système étudié sont similaires à celles présentées dans l'étude du Cerema (digue d'Esquibien).

Le bras oscillant de la bouée est fixé sur un massif béton réalisé sur la digue existante. Afin de palier au problème de portance de l'ouvrage existant, le présent chiffrage prend en compte la réalisation de micro pieux sous le massif support de béton armé.

L'estimation de ce système reste à préciser et il y a divergence entre des estimations théoriques et les coûts des systèmes mis effectivement en œuvre. Le coût des systèmes actuellement en fonctionnement est très supérieur aux estimations.

L'estimation des coûts pour un ouvrage de type flotteurs pilonnants à Saint-Jean-de-Luz a conduit à la répartition suivante :

Figure 4-18. Coûts d'investissement d'un ouvrage avec flotteurs pilonnants pour l'équipement d'un linéaire de 250 mètres



## 2.3 Synthèse

Le tableau suivant reprend la répartition de chaque poste dans le coût du système ainsi que le coût au mètre linéaire pour le site de Saint-Jean-de-Luz :

Tableau 4-5. Répartition et coût des dispositifs au mètre linéaire de digue aménagée

	Franchissement	Colonnes	Volets	Flotteurs
Génie civil	66%	72%	30%	37%
Électro mécanique	26%	19%	62%	55%
Ingénierie	8%	8%	8%	8%
Coût au ml	119 100 €	100 000 €	80 000 €	35 000 €

Pour comparaison, Le NREL (National Renewable Energy Laboratory - USA) propose les répartitions suivantes pour les coûts du houlomoteur :

- Absorbeur hydrodynamique : 34%
- Convertisseurs : 28%
- Fondation/ancrage : 10%
- Ingénierie : 10%

## 2.4 Aléas à considérer

Le coût de l'ouvrage pourra varier sensiblement avec :

- les conditions géotechniques : le type de fondation à retenir dépend notamment des conditions géologiques et géotechniques du site considéré.
- les éventuelles mesures de sauvegarde en cas de conditions extrêmes,
- la technologie de conversion.

## 3. Coûts de production

### 3.1 Résultats de la littérature concernant les coûts de production des dispositifs houlomoteurs

L'étude de la filière des énergies marines reprend les chiffres de la commission sénatoriale d'outre-mer. Il s'agit de projections de coûts d'investissement et d'exploitation 2013. Les coûts de production total pour un taux d'actualisation de 5,1% sont estimés entre 212 et 260 €/MWh. La mission considère cependant que ces chiffres sont un peu optimistes.

Il existe peu d'analyse économique relative aux dispositifs houlomoteurs actuellement en fonctionnement en proche côtier. Biyela et Cronje [Biyela and Cronje 2016] ont comparé deux systèmes houlomoteurs : Pelamis et Wavestar. Les coûts du kWh produit sont très importants (LCOE entre 3 et 6 \$/kWh). Le *Levelised Cost of Energy* (LCoE) ou coût de l'énergie de fermes pilotes de production d'énergie houlomotrice dans les îles du pacifique Sud, évoqué par Babarit (2016), s'élève à 0,5 euro/kWh. Le même auteur cite un coût de 0,42 euro/kWh pour le système houlomoteur SEAREV. Par ailleurs, l'AIER [International Renewable Energy Agency (IRENA) 2014] décrit des LCoE de 0,407 à 0,52 euro/kWh pour la première vague d'installations houlomotrices, suivis par des LCoE de 0,32 à 0,37 lors d'une seconde vague.

### 3.2 Méthode d'estimation du coût du kWh produit

#### Revenus issus de la production

On peut catégoriser les revenus issus de la production de deux manières différentes. On peut considérer la production d'énergie en elle-même : c'est ce qui sera utilisé dans les calculs de coût de l'énergie (*Cost of Energy* CoE, ou *Levelised Cost of Energy* LCoE).

Ensuite, on peut considérer la valorisation de cette énergie sur le marché : le flux financier généré chaque année par l'investissement dans un système houlomoteur dépend alors du prix de l'énergie revendue sur le marché.

Le coût de marché de l'énergie revient, selon les pays, de 0,08 euro/kWh à 0,40 euro/kWh [Babarit 2016]. En France, les tarifs d'EDF en heures pleines sont d'environ 0,14 euro/kWh, soit 140 euro/MWh.

À des fins de comparaison entre systèmes houlomoteurs pour un même site, les estimations par le COE ou le LCOE peuvent être indifféremment utilisées. Le COE est le rapport entre la somme des coûts actualisés et la production électrique produite. Le LCOE correspond au ratio entre la somme des coûts actualisés et la somme de la production électrique actualisée.

L'analyse économique de la production d'énergie sur le site d'Esquibien [Michard *et al.*, 2017] fait cet exercice à partir du COE.

À des fins de comparaison avec d'autres sources d'énergie renouvelable, on préférera utiliser le LCOE méthode la plus couramment rencontrée : rapports de l'Ademe, de la commission de régulation de l'énergie [Commission de Régulation de l'Énergie, 2014], de l'International Renewable Energy Agency, informations issues des analyses des dispositifs Wavestar, Pelamis (travaux des universités de Santiago et de Plymouth [Astariz *et al.*, 2015]).

Notons que certains chiffres fournis dans la littérature ne sont pas accompagnés de l'information sur la méthode utilisée pour y parvenir.

#### Coût de l'énergie (LCoE)

La notion de *Levelised Cost of Energy* rapporte les coûts générés par l'installation à l'énergie produite tout au long de son cycle de vie. Le LCoE exprime le coût de l'énergie en euro/kWh. Pour tenir compte

des décalages dans le temps des différents flux, qu'il s'agisse de coûts financiers ou d'énergie produite, on raisonne en valeur actuelle. Le calcul se fait donc de la façon suivante :

$$LCoE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Avec :

$CAPEX_t$ , les coûts fixes d'investissement (installation et démantèlement) pour l'année  $t$  ; en pratique, ils se limitent à un flux d'investissement en année 0, et à un flux de démantèlement en année 30 ;

$OPEX_t$ , les coûts variables annuels de maintenance et de fonctionnement ;

$r$  le taux d'actualisation considéré ;

$t=0, 1, \dots, n$  les années de fonctionnement.

L'Agence Internationale des Énergies Renouvelables considère dans ses calculs un coût moyen pondéré du capital (CMPC) de 7,5% pour les pays de l'OCDE. Compte tenu du caractère innovant des technologies portant sur les systèmes houlomoteurs, il paraît raisonnable de considérer un taux d'actualisation plus élevé, de l'ordre de 10%. C'est l'hypothèse qui a été choisie dans le cadre de l'analyse économique de la production d'énergie renouvelable de systèmes houlomoteurs sur le site Esquibien [Michard *et al.* 2017]. L'organisation *Carbon Trust* propose de prendre des taux d'actualisation compris entre 8 et 15% [Carbon Trust, 2006].

Par ailleurs, on considère une durée de fonctionnement de 30 ans, soit  $n=30$ , et des frais de fonctionnement et de maintenance égaux à 5% des frais d'investissement présentés plus tôt dans ce rapport. Un taux de 10% est souvent retenu pour les systèmes houlomoteurs off-shore. La proximité de la côte peut justifier un moindre coût de maintenance.

### 3.3 Comparatif sur le site de Saint-Jean-de-Luz

#### Avertissement

Les estimations qui suivent sont fournies à titre indicatif. Elles ne reposent pas sur des aménagements

étudiés au stade du projet ni même de l'avant-projet. L'exercice permet néanmoins de dérouler la méthode et fournir des ordres de grandeur et une première estimation de l'intérêt économique comparé des dispositifs.

#### CAPEX

Le tableau suivant présente les coûts fixes d'installation (CAPEX) des différents systèmes houlomoteurs présentés et leurs caractéristiques principales pour 60 mètres de linéaire installé :

Tableau 4-6. CAPEX des dispositifs – longueur aménagée de 60 mètres

Système	Puissance (kW/m)	Localisation de l'ouvrage	Description	Coût de l'ouvrage (€)
Franchissement	1,2-1,7	Socoa	60 m d'ouvrage	7 150 000
Colonne oscillante	0,8-1	Socoa	60 m d'ouvrage	5 850 000
Volet oscillant	3-3,5	Artha	2 volets de 20 m de largeur	4 800 000
Système à Flotteurs	1,5-2,1	Artha	3 bouées de 5 m de rayon	1 880 000

Le tableau suivant résume la valorisation de l'énergie produite si elle est revendue au prix de marché :

Tableau 4-7. Production d'énergie et valorisation tirées des 4 dispositifs (longueur aménagée : 60 m)

Système houlomoteur	Production d'énergie annuelle (kWh) (min/max)	Flux financier généré par la revente de l'énergie (prix : 0,14 euro/kWh)
Franchissement	630 720/893 520	88 300/125 000
Colonne oscillante	420 480/525 600	58 870/73 500
Volet oscillant	1 576 800/1 839 600	220 750/257 000
Système à Flotteurs	788 400/1 103 760	110 370/154 000

#### Coût de l'énergie

Le tableau suivant présente les LCoE pour des systèmes à colonne oscillante, à volets oscillants et à flotteurs, pour deux valeurs de taux d'actualisation :

Tableau 4-8. LCOE des 4 dispositifs étudiés sur le site de Saint-Jean-de-Luz

Système houlomoteur	Levelised Cost of Energy (euro/kWh); $r=10\%$	Levelised Cost of Energy (euro/kWh); $r=7,5\%$
Franchissement	1,77 – 1,25	1,52 – 1,05
Colonne oscillante	2,17 – 1,73	1,87 – 1,50
Volet oscillant	0,47 – 0,40	0,41 – 0,35
Système à Flotteurs	0,37 – 0,27	0,32 – 0,23

Ce coût tient compte de l'investissement initial, des coûts annuels de fonctionnement et de maintenance (5% de l'investissement initial) ainsi que de l'énergie annuelle produite. Il ne tient pas compte des frais éventuels de démantèlement. Tous les flux sont convertis en valeur actuelle selon un taux d'actualisation de 10%, puis de 7,5% afin de pouvoir garantir la comparaison avec les données de l'AIER.

Afin de faciliter l'interprétation de ces LCoE, le tableau suivant présente les LCoE calculés par l'Agence Internationale des Énergies Renouvelables pour différentes énergies renouvelables en 2016. Les LCoE calculés dans notre analyse sont ajoutés à la fin. Dans la mesure où nous n'avons pas assez d'observations pour fournir une moyenne fiable, la case correspondante n'est pas remplie :

**Tableau 4-9. Comparative International Levelised Cost of Electricity (2016), in euro/kWh**

Source d'énergie	Levelised CoE – Min	Levelised CoE – Max	Levelised CoE – Moyenne
Biomasse	0,053	0,147	0,07
Géothermique	0,037	0,097	0,055
Hydroélectricité	0,016	0,212	0,044
Solaire – photovoltaïque	0,046	0,241	0,113
Solaire – thermique	0,157	0,269	0,209
Eolienne – Inshore	0,021	0,122	0,048
Eolienne – Offshore	0,083	0,179	0,106
Energie houlomotrice (r = 7,5%)	0,2-1,5-	0,3-1,8	-

Source : 15 000 projets dans le monde, *International Renewable Energy Agency*  
Converti en euros avec un taux de change de 1,16 USD/EUR

Note : pour l'éolien, les auteurs utilisent le Fossil fuel power cost range.

Note : le taux d'actualisation utilisé est de 7,5% pour les pays de l'OCDE, et de 10% pour la Chine

Les résultats obtenus varient beaucoup en fonction du système considéré. Avec des LCoE supérieurs à 1 euro/kWh, les systèmes à franchissement et à colonnes oscillantes sont très peu compétitifs vis-à-vis d'autres énergies renouvelables. Les systèmes à volets oscillants et à flotteurs s'en rapprochent et ces résultats semblent cohérents vis-à-vis de la littérature.

### 3.4 Interprétations et limites

Ces résultats doivent être analysés au prisme de l'énergie renouvelable générée, mais également des autres impacts attendus et du futur de la filière.

La suite de cette section a pour but de présenter quelques-uns de ces aspects.

#### La protection des côtes contre l'érosion : des bénéfices non inclus dans l'analyse

L'intérêt des systèmes houlomoteurs côtiers réside en partie dans la double vocation qu'il est possible d'envisager à ces aménagements : production d'électricité et lutte contre les submersions et érosions marines. Le choix résulte alors d'une analyse multi critères dont le coût de production est l'un des paramètres.

#### Courbe d'apprentissage et diminution des coûts

Le principe d'une courbe d'apprentissage implique que le coût d'un produit diminue à mesure que le nombre d'unités produites augmente. Un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIER, 2011) décrit ainsi une division par 5 du coût de production d'un module photovoltaïque entre 1976 et 1992. L'Agence estime que la cause principale en est le déploiement accru de ces technologies (AIER, 2011, p. 14). Ce principe, déjà constaté dans le domaine des énergies renouvelables, s'applique également aux énergies marines : le *Carbon Trust* au Royaume-Uni recommande ainsi de tabler sur un taux d'apprentissage de 15% pour ces énergies au Royaume-Uni [Babarit 2016]. Babarit simule ainsi un effet d'apprentissage en se basant sur un taux de 15% : le CoE de l'énergie houlomotrice devient compétitif par rapport au prix de marché à partir de 10 GW installés.

#### Mise en garde

Nous mettons en garde le lecteur sur ces résultats qui demandent à être consolidés. Plusieurs incertitudes existent sur la chaîne de calculs. Ne sont pas pris en compte les arrêts pour maintenance et les aspects liés au financement du projet.

## 4. Références bibliographiques

- Abadie, S. 2015. Etude numérique des systèmes D2 et D4 (rapport EMACOP R/15/EMA/032).
- AIER. 2014. "Ocean Energy: Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook." Paris: Agence Internationale des Energies Renouvelables.
- Astariz, Vazquez, Iglesias, 2015. Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind energy.
- Babarit A., Hals J., 2011. On the maximum and actual capture width ratio of wave energy converters. In Proc. Of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK, 5-9 sept 2011.
- Babarit, A. 2016. Contribution à la récupération de l'énergie des vagues. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01443290>.
- Biyela, Cronje. 2016. Techno-Economic Analysis Framework for Wave Energy Conversion Schemes under South African Conditions: Modeling and Simulations.
- Carbon Trust, 2006 : Cost estimation methodology.
- Casagec, UPPA, ECN, 2017 : évaluation de l'énergie récupérée devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz par un système houlomoteur pilonnant et comparaison avec un système SSG et un flap oscillant.
- Commission de Régulation de l'Energie, 2014. Coût et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine, éolien terrestre, biomasse, solaire photovoltaïque.
- De Bonviller, Jellouli, Pépin, Shaiek, EMACOP, 2015. Dimensionnement du génie civil d'un ouvrage à franchissement vis-à-vis des événements extrêmes.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). 2014. Ocean Energy: Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook.
- Michard, B., Bouland, S., and Sergent, P. 2017. Analyse économique de la production d'énergie renouvelable des systèmes houlomoteurs sur le site d'Esquibien (rapport EMACOP R/17/EMA/046).
- Neuvéglise S., Smaoui H., Sergent P., Perret G., Marin, F. Numerical and physical modeling of a quayside wave energy recovery system." 27Août – 1er Sept 2017. 12th EWTEC, Cork (Irlande).
- Neuvéglise S., Perret G., Smaoui H., Marin F., Sergent P., 2018. Impact of a Quayside Wave Converter on Overtopping, Conférence ICOE – 12-14 juin 2018, Cherbourg.
- Neuvéglise S., Perret G., Smaoui H., Marin F., Sergent P., 2019. Impact of a Quayside Floating System on Overtopping, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- Ricci, Saulnier, Falcao, 2007 : Point-absorber arrays : a configuration study off the Portuguese West-Coast <http://www.ecowavepower.com/>
- Siyanda S. Biyela, Willie A. Cronje, 2016. Techno-Economic Analysis Framework for Wave Energy Conversion Schemes under South African Conditions : Modeling and Simulations.
- Wavestar Prototype at Roshage: Performance Data for ForskVE Project No 2009-1-10305 Phase 1 & 2 | Tethys. <https://tethys.pnnl.gov/publications/wavestar-prototype-roshage-performance-data-forskve-project-no-2009-1-10305-phase-1-2>.
- Zhang, Y., Zou, Q.-P., and Greaves, D. 2012. Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device. Renewable Energy 41, 159–170.

## Conclusion

---

Les systèmes houlomoteurs bord à quai même s'ils sont relativement anciens ne se sont pas encore beaucoup développés dans le monde. Ils représentent cependant un intérêt fort pour les aménageurs aussi bien en termes de production d'énergie électrique que de lutte contre les submersions. L'alimentation des navires bord à quai pour réduire les émissions polluantes et la remontée du niveau marin avec le réchauffement climatique ont renforcé cet intérêt.

L'énergie des vagues est une énergie fortement saisonnière avec des puissances récupérables presque dix fois plus importantes l'hiver par rapport à l'été. La puissance s'exprime en kW/m linéaire. L'énergie récupérée va donc dépendre de la longueur de la digue équipée. La digue ne peut pas en général être équipée sur toute sa longueur du fait de multiples contraintes notamment de bathymétrie. Notre évaluation a permis de sélectionner 9 sites d'étude présentant de forts niveaux de potentiel houlomoteur. Les estimations de niveaux de puissance de houle annuelle varient de 4 kW/m à Cherbourg jusqu'à 24 kW/m à Bayonne et les longueurs de digues utiles varient de 140 m au Conquet, 500 m à Saint-Jean-de-Luz et jusqu'à 4 000 m à Cherbourg. Une campagne de mesure *in-situ* a montré qu'il existe une forte incertitude sur la puissance récupérable du fait des difficultés à la fois de modélisation et de mesure dans des zones avec parfois des profondeurs réduites et des bathymétries chahutées. Au niveau opérationnel, il faudra prendre en compte des contraintes réglementaires, environnementales ainsi que techniques en matière d'analyse des sols, de raccordement électrique ou de stockage d'énergie selon le mode d'utilisation de la production d'énergie retenue.

Parmi l'ensemble des systèmes houlomoteurs bord à quai, quatre familles se dégagent : les systèmes à flotteurs, les volets oscillants, la colonne d'eau oscillante et les systèmes à franchissements. L'estimation du rendement montre que la réflexion des vagues sur la digue est un avantage en termes de production d'énergie. Parmi les quatre familles, nous retrouvons que les volets oscillants constituent les systèmes avec les meilleurs rendements. Le dimensionnement des systèmes demande d'abord de choisir le convertisseur souvent appelé PTO comme Power Take Off en anglais et de le dimensionner. Les systèmes peuvent aussi être contrôlés en temps réel afin de piloter en continu les efforts résistants au mouvement exercés par le PTO et donc d'augmenter l'énergie récupérée. Le dimensionnement structurel consiste ensuite à évaluer les efforts extrêmes, à évaluer la survivabilité du système et à définir les stratégies de mise en sécurité. Une particularité bord à quai est l'analyse des efforts sur l'ouvrage porteur et l'impact hydrosédimentaire potentiel.

Nous avons enfin introduit la notion de Levelised Cost of Energy (LCoE) qui rapporte les coûts générés par l'installation à l'énergie produite tout au long de son cycle de vie. Le LCoE exprime le coût de l'énergie en euro/kWh. Cette analyse effectuée pour les quatre familles de systèmes houlomoteurs a montré que les systèmes à flotteurs avaient le LCoE le plus faible (environ 0,3 euro/kWh) suivis de près par les volets oscillants. Comme on pouvait s'y attendre, les colonnes d'eau oscillantes et les systèmes à franchissements présentent des LCoE près de 5 fois supérieurs. Les systèmes à flotteurs et à volets oscillants se rapprochent ainsi des autres énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Nous pouvons nous attendre à ce que le

coût des systèmes houlomoteurs bord à quai diminue à mesure que le nombre d'unités produites augmentera. De plus il peut être envisagé de concentrer la houle devant ces systèmes afin d'augmenter la production électrique et de réduire encore le LCoE.

L'analyse économique ne doit pas faire oublier la double vocation que nous envisageons pour ces aménagements : production d'électricité et lutte contre les submersions. Les systèmes houlomoteurs bord à quai participent ainsi aux deux stratégies pour répondre au changement climatique : la première est l'atténuation en contribuant à la production d'énergie renouvelable et la seconde est l'adaptation en réduisant les conséquences de la remontée du niveau marin.

© 2020 – Cerema

**Le cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.**

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Coordination : Service éditions, Cerema Eau, mer et fleuves

Conception, Mise en page : Laurent Mathieu - laurentmathieu.fr

Impression : Imprimerie Jouve (01 44 76 54 40)

Dépôt légal : février 2020

ISBN : 978-2-37180-427-2

Crédit photographie de couverture : Laurent Mathieu

**Éditions du Cerema**

Cité des mobilités,  
25 avenue François Mitterrand  
CS 92803  
69674 Bron Cedex

Cerema, Eau, mer et fleuves  
Bureau édition  
134 rue de Beauvais  
CS 60039  
60280 Margny-lès-Compiègne

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

## La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir ou approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

### Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet

Ce guide présente les enjeux et intérêts des dispositifs pour les aménageurs. Il décrit d'abord les quatre familles de dispositifs (système à franchissement, colonne d'eau oscillante, batteur oscillant, flotteur pilonnant). Il dresse ensuite une liste de sites potentiels en France métropolitaine avec leurs caractéristiques, en approfondissant l'analyse pour quelques sites. Pour chaque famille de dispositif, une estimation de la production est donnée, le dimensionnement du convertisseur et de la structure est produit à travers notamment une analyse de la survivabilité. Une évaluation coût-bénéfice permet enfin de déterminer le coût de l'énergie pour les quatre familles sur le site particulier de Saint-Jean-de-Luz. La filière des génératrices houlomotrices étant encore aujourd'hui au stade de développement avec seulement quelques prototypes en fonctionnement en conditions réelles, les méthodes utilisées dans tous les compartiments de l'étude sont issues de la recherche et sont elles-mêmes en constante évolution ; elles peuvent donc à ce stade comporter des incertitudes importantes. Il conviendra donc d'en tenir compte et de réserver l'usage de ce guide au stade de l'avant-projet ou de l'étude de faisabilité.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix 50 €

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-427-2



9 782370 000002