



**EMACOP**

Projet National de recherche et développement  
**Energies Marines, COtières et Portuaires**

## **Synthèse de la tranche 1**

Rédigé par Philippe SERGENT

R/13/EMA/010

26/09/2013

Version 3

Site internet : [www.emacop.fr](http://www.emacop.fr)

Président : Henri BOYE

Directeur Technique : Philippe SERGENT

Directeur Scientifique : Alain CLEMENT

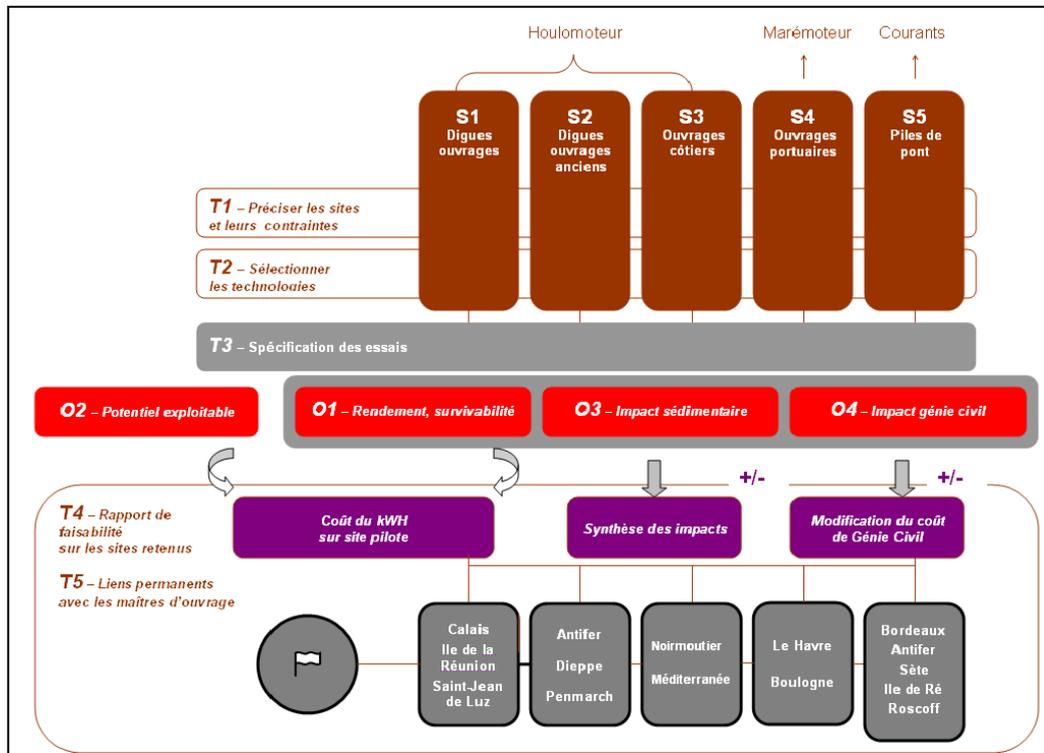
Gestion administrative et financière : IREX, 9 rue de Berri 75008 PARIS, [contact@irex.asso.fr](mailto:contact@irex.asso.fr)

# Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Sommaire</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>1 AVANCEMENT DES TACHES</b> .....   | <b>3</b>  |
| 1.1 Tâche S1 – Systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs (CASAGEC – UPPA – Egis – Artelia)      | 3         |
| 1.2 Tâche S2 – Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens (Etude CETMEF + Egis Eau) .....      | 6         |
| 1.3 Tâche S3 – Systèmes houlomoteurs sur ouvrages détachés (ISL).....                          | 7         |
| 1.4 Tâche S5 – Systèmes hydroliens (CETMEF + Bouygues).....                                    | 9         |
| 1.5 Tâche 01 – Etat de l’art – Rendement et survivabilité .....                                | 12        |
| 1.6 Tâche 01 – Développement d’un outil d’évaluation du rendement .....                        | 19        |
| 1.7 Tache 02 – Potentiel houlomoteur (EDF R&D – Open Ocean) .....                              | 24        |
| 1.8 Tache 04 – Impact sur le génie civil – Etude économique (ISL / CETE de l’Ouest / Delaby) . | 24        |
| <b>2 PARTENARIAT</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>3 COMMUNICATION</b> .....   | <b>27</b> |
| <b>4 PERSPECTIVES</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>5 PROJETS CONNEXES</b> .....  | <b>31</b> |

## 1 AVANCEMENT DES TACHES

Le projet EMACOP est structuré sur la base de deux groupes de tâches (les tâches S dites « systèmes ou ingénieur » et les tâches O dites « outils ou recherches »).



En ce qui concerne le premier groupe, les tâches S1, S2, S3 sur les systèmes houlomoteurs d'une part et S5 sur les systèmes hydroliens d'autre part ont été lancées dès la tranche 1.

En ce qui concerne le second groupe, les tâches O1, O2, O4 sur l'étude du rendement, de la survivabilité, du potentiel exploitable et de l'impact sur le génie civil respectivement ont été lancées aussi en tranche 1.

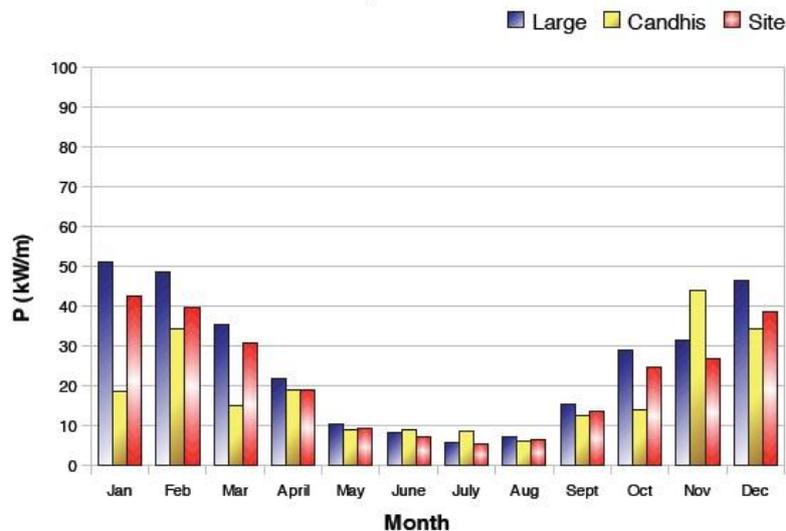
### 1.1 Tâche S1 - Systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs (CASAGEC - UPPA - Egis - Artelia)

L'axe S1 s'est limité à trois sites (route littorale de la Réunion, port de Calais, baie de Saint-Jean de-Luz). Pour les deux premiers de ces sites les approches étaient similaires à celles choisies dans le cadre de l'axe S2 (voir plus loin). Pour le site de Saint-Jean de-Luz, l'étape supplémentaire abordée lors de la tranche 1 de l'axe S1 a consisté à évaluer l'énergie des vagues recueillie par un système houlomoteur exploitant le franchissement des vagues, le système Slot Cone Generator (SSG). Nous ne reviendrons pas sur le travail sur Calais et sur la Réunion car les études ont montré que le potentiel houlomoteur y était faible.



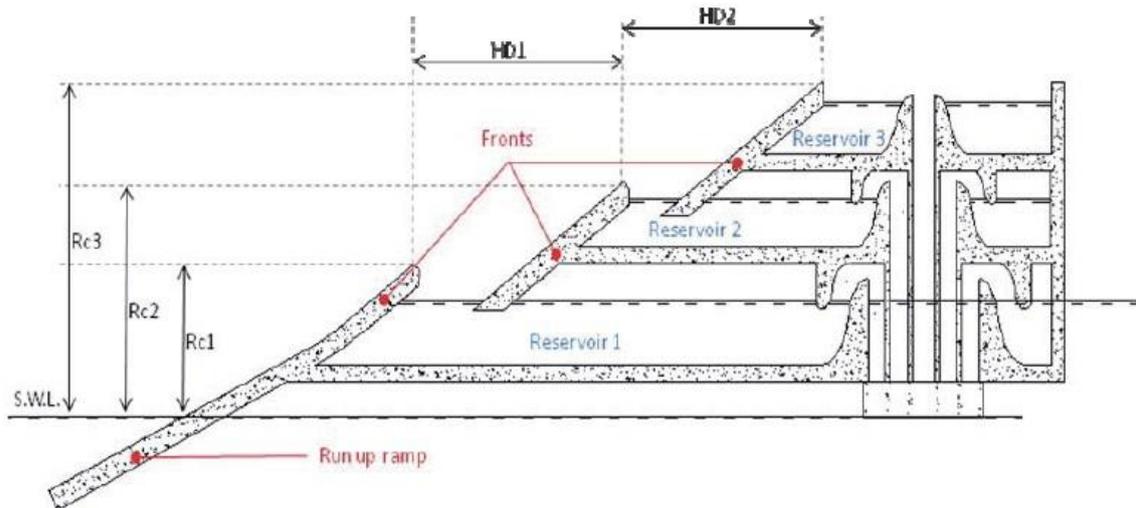
La classification des digues de protection de la baie de Saint-Jean de-Luz en « ouvrages neufs » est quelque peu artificielle, puisque de fait les digues existent mais, comme il s’agit d’un des deux sites les plus énergétiques de France et sans doute d’Europe (voir S2), les solutions de récupération impliquent des travaux importants de génie civil. C’est la raison pour laquelle le site peut être assimilé à un projet d’ouvrage neuf.

Une modélisation à l’aide du modèle de propagation de houle SWAN a été développée. Les résultats mensuels ont été comparés avec le modèle empirique de Goda utilisé par l’équipe CETMEF/Egis dans le cadre de S2 (voir figure ci-dessous).



Les probabilités d’occurrence simultanée d’une houle de hauteur significative  $H_s$  et d’une marée de hauteur  $H_{tidal}$  ont été déterminées aux différents points sur le site en utilisant les résultats du modèle SWAN.

Le schéma en coupe d’un récupérateur d’énergie de type SSG à trois réservoirs est montré ci-dessous. Les paramètres de dimensionnement principaux, qui apparaissent dans la fonction de récupération, sont les hauteurs de crêtes des trois réservoirs  $Rc_1$ ,  $Rc_2$  et  $Rc_3$ , prises à partir du niveau moyen de la mer.

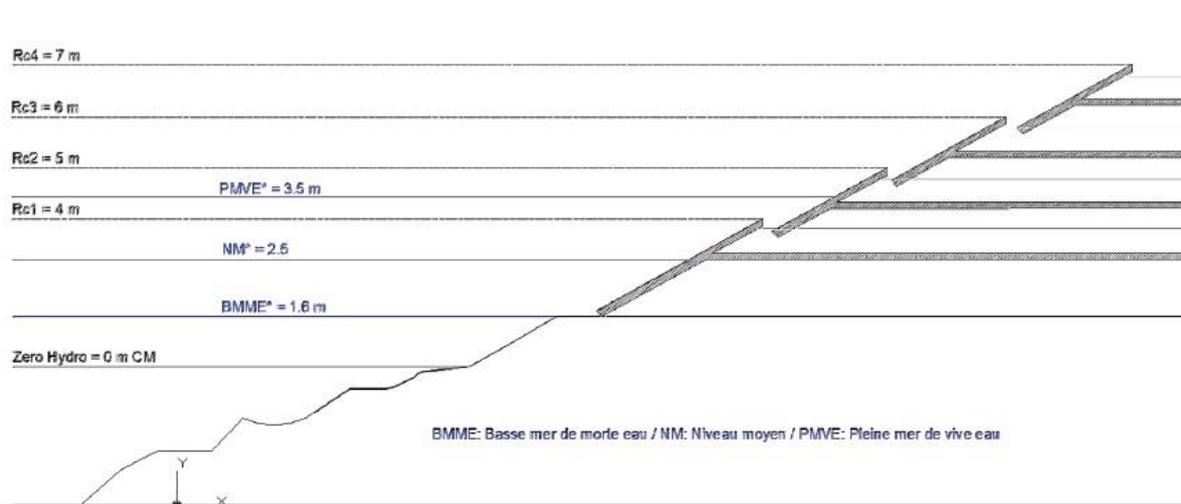


La récupération de la houle s'appuie sur la connaissance des débits de franchissement.

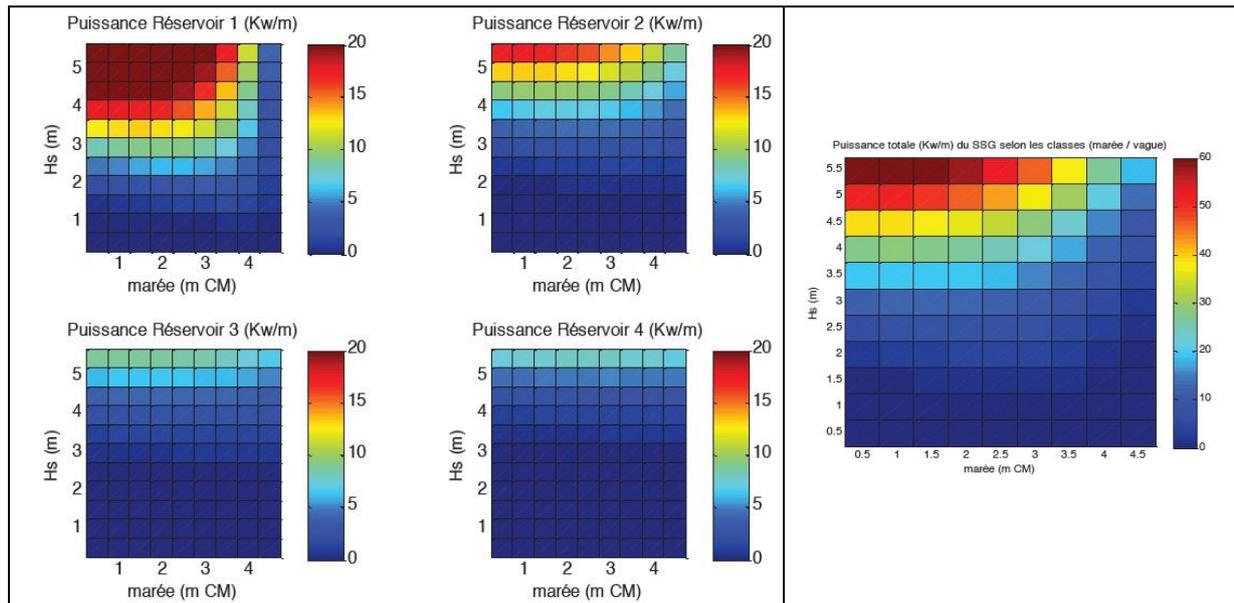
Le dimensionnement d'un système SSG s'effectue en fixant les valeurs des hauteurs de crêtes  $R_{cj}$  en regard de la hauteur significative des vagues  $H_s$ . Lorsque le niveau moyen de la mer ne varie pas (absence de marée) et que la hauteur des vagues est stable, les systèmes à franchissement SSG à plusieurs réservoirs superposés ne présentent guère d'intérêt. Un calcul montre que l'énergie maximale récupérée par un système SSG à trois réservoirs n'est supérieure que de 10% à l'énergie récupérée par un système SSG à un unique réservoir. Considérer un Système SSG à multiples réservoirs ne se justifie que dans deux cas :

- Pour permettre la récupération de l'énergie dans une situation où le niveau moyen de la mer varie sous l'effet de la marée ;
- Pour récupérer l'énergie des vagues quand la climatologie de la houle présente une forte variabilité avec de grandes hauteurs de vagues.

C'est le cas sur le site de Saint-Jean-de-Luz. La figure ci-dessous schématise la géométrie du système SSG choisi.



La figure ci-dessous représente le flux d'énergie des vagues recueilli pour chaque classe ( $H_s$ , marée), chacun des quatre diagrammes correspondant à l'un des réservoirs. Les classes de hauteurs de vagues sont rangées selon l'axe des ordonnées et les classes de marées sont rangées selon l'axe des abscisses. Ces quatre diagrammes sont ensuite sommés pour chaque classe ( $H_s$ , marée) pour fournir la puissance totale recueillie par le système SSG. Le résultat est présenté ci-dessous à droite.



On remarque que l'essentiel de la puissance est récupéré par le réservoir 1 et le réservoir 2. La récupération est plus importante à marée basse qu'à marée haute. Lors de grandes marées, le réservoir 1 est sous l'eau à marée haute. Il ne récupère donc pas d'énergie, tandis que le réservoir 2 n'en récupère que très peu. La majeure partie de l'énergie récupérée par les réservoirs 3 et 4 est celle des fortes houles ( $H_s > 3$  m).

## 1.2 Tâche S2 - Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens (Etude CETMEF + Egis Eau)

Une formule simplifiée approximative, la méthode analytique de Goda a été employée pour propager la houle du large à la côte et caractériser le potentiel énergétique sur 22 sites. Cette méthode présente certaines limites pour représenter les processus de réfraction, de réflexion et de diffraction de la houle. 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 pas intégrée à la méthode.

La classification est établie à partir de l'analyse des résultats d'étude présentés dans les tableaux de résultats et dans les fiches de sites détaillées. Rappelons que les critères de bathymétrie, de puissance de houle annuelle et hivernale et de longueur de digue pouvant être équipée d'un système houlomoteur ont été particulièrement examinés pour classer les 22 sites suivant leur niveau de potentiel énergétique.

Les **22 sites d'étude** se répartissent donc en trois niveaux suivants de potentiel houlomoteur :

### un niveau faible pour 8 sites d'étude :

Molène (29) ;  
 Groix, Belle-Ile (56) ;  
 Le Croisic (44) ;  
 L'Herbaudière, Port de Morin, Port-Joinville (85) ;  
 La Cotinière (17).

### un niveau moyen pour 5 sites d'étude :

Boulogne-sur-Mer (62) ;  
 Roscoff, Lesconil (29) ;  
 Quiberon (56) ;

Les Sables d'Olonne (85).

**un niveau fort pour 9 sites d'étude :**

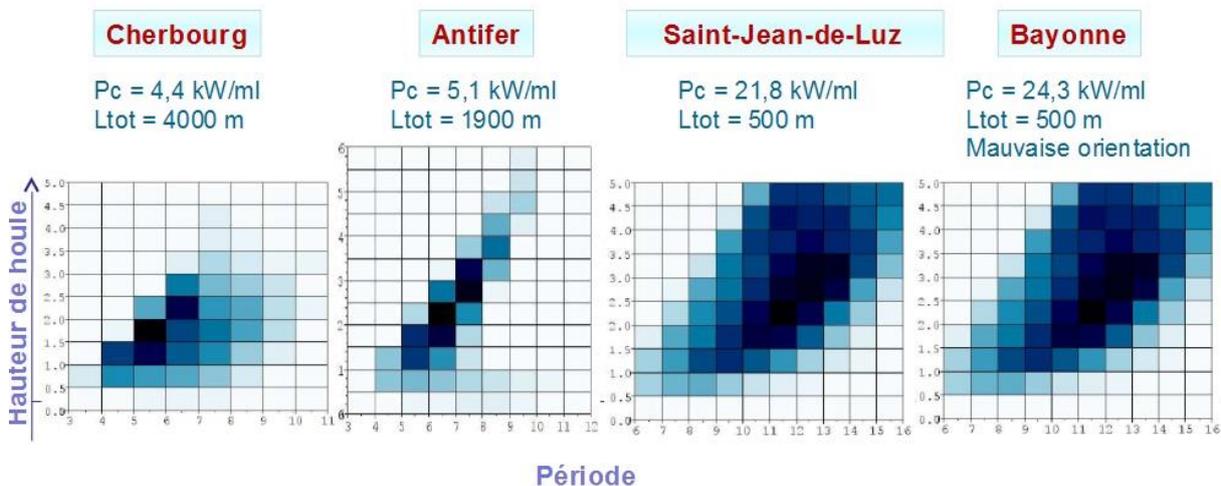
Antifer (76) ;  
Cherbourg, Flamanville (50) ;  
Le Conquet, Esquibien, Saint-Guénolé (29) ;  
Saint-Gilles-Croix-de-Vie (85) ;  
Bayonne, Saint-Jean-de-Luz (64).

En conclusion, l'évaluation préliminaire a permis de sélectionner 9 sites d'études de fort potentiel, répartis sur les façades maritimes de la Manche pour 3 d'entre eux et de l'Atlantique pour les 6 autres. Il faut souligner que les sites présentant les niveaux de puissance de houle les plus forts (de 25 à 50 kW/m calculés au large et de 20 à 25 kW/m sur les sites), se situent à la pointe de la Bretagne et dans le Pays Basque, comme l'indiquent d'ailleurs les résultats de niveaux de puissance de houle au large issus de la base de données (Mattarolo, 2009). Le transfert d'énergie du large à la côte est fortement atténué pour les sites Bretons, avec une perte d'énergie d'un facteur  $\frac{1}{2}$  passant de 44,3 kW/m au large à 21,1 kW/m sur le site de Saint-Guénolé et d'un facteur  $\frac{1}{6}$  avec 6,9 kW/m sur le site d'Esquibien.

Par contre, le transfert d'énergie est très important pour les sites Basques, avec une perte d'énergie faible passant de 25,8 kW/m au large 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 (ou fosse) du Cap breton dans les Landes qui favorise leur transfert.

Des exemples de « scatter diagram » (distribution de probabilité houle – période ou houle – période – niveau) de quelques sites sont présentés ci-dessous. L'énergie produite par le récupérateur est obtenue en multipliant ce « scatter diagram » avec la matrice de puissance du système houlomoteur.



### 1.3 Tâche S3 – Systèmes houlomoteurs sur ouvrages détachés (ISL)

En théorie, des ouvrages d'avant côtes peuvent casser l'énergie des houles et ainsi protéger les protections existantes (cordons dunaires, digues de front de mer, ...). Ils sont placés parallèlement à la côte en avant ou dans la zone de déferlement. Le brise lame a pour fonction de casser la houle en l'obligeant à déferler avant arrivée au droit de la digue. Il limite les mouvements de sédiments dans le profil. Il engendre des zones de calmes favorables à l'accumulation de sédiments. La progression du sable peut conduire à un tombolo.

Signalons que l'épi long peut également être rangé dans la gamme des brises lames car il atteint la ligne des barres de déferlement à toute marée et protège en son arrière la zone par diffraction des houles.

Ces ouvrages sont généralement construits en enrochements. Leur cote d'arase est variable mais pour des questions d'efficacité, cette cote dépasse le niveau des pleines mers.

Ces ouvrages sont peu rencontrés sur les sites à fort marnage et présentant une dérive littorale significative (sur le littoral Atlantique et Manche). Sur ce littoral plusieurs raisons à cela : impact visuel important à marée basse, impact pour la navigation de plaisance, augmentation de l'érosion en aval dérive. Sur le littoral Méditerranéen, ils ont largement été choisis comme solution aux problèmes d'érosion durant la période 1960-1980.

Un inventaire a été réalisé sur la base de la bibliographie existante : études réalisées dans le cadre d'observatoires (Aquitaine, Cotentin), inventaires anciens (catalogue sédimentologique des côtes françaises) ou plus récents (inventaire des ouvrages côtiers du Finistère), recherche par mots clés sur internet. Par ailleurs, les brises lames sont généralement visibles sur vues aériennes de type Google Earth.

Sur les côtes de la Manche et Atlantique, deux sites ont été identifiés :

- la plage de Malo-les-Bains (Dunkerke) ;
- le site de Châtelailon (Charente-Maritime).

Ces sites sont peu propices à l'aménagement de systèmes houlomoteurs du fait du climat de houle peu favorable.

Les brise-lames sont, en tant qu'ouvrages de lutte contre le recul du trait de côte, adaptés aux mers à faible marnage. On en dénombre donc un grand nombre sur le littoral Méditerranéen français (une centaine) dont les plages sont fortement anthropisées. L'étude sur le site de Valras montre que la ressource houlomotrice est plutôt faible avec une puissance moyenne annuelle inférieure à 1 kW/m.

Le site le plus intéressant se situe finalement à la Pointe des Baleines, sur le littoral de la commune de Saint Clément des Baleines. Il ne s'agit pas d'un brise-lames mais de l'ancienne jetée de la Conche qui a été érigée pour la construction du phare des baleines à 4 kilomètres de la côte (acheminement des matériaux). La jetée de la Conche prit le nom de « la digue brise-lame de la Conche » lorsque les habitants s'aperçurent que l'érosion de la plage de la Conche avait disparu (« la Conche des Baleines, un avenir incertain, une inquiétude justifiée », Mairie de Saint Clément les Baleines). Si une corrélation entre la destruction de la jetée et l'érosion de la plage est évoquée par les habitants, aucune étude sédimentologique ne permet actuellement de corroborer les observations. Aujourd'hui, devant les problèmes vifs d'érosion de cette partie du littoral des projets sont à l'étude (Conseil Général de Charente Maritime). La partie actuellement à l'étude au niveau Avant Projet est le ré-ensablement (120 000 m<sup>3</sup>) et l'entretien (15 à 20 000 m<sup>3</sup> de rechargement/an).

Les résultats extraits de quatre points du modèle Swan sont présentés ci-dessous. La carte ci-dessous illustre la localisation de ces quatre points.



Les résultats ci-dessous (en kW/m) de la modélisation montrent la progression de l'énergie avec l'éloignement à la côte.

| Point de sortie | Profondeur des points du modèle |                             |                                |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                 | Marée basse<br>(Z = -1,65 mNGF) | Mi-marée<br>(Z = 0,32 mNGF) | Marée haute<br>(Z = 2,00 mNGF) |
| 1               | 0                               | 0                           | 0,95                           |
| 2               | 0                               | 1,46                        | 3,14                           |
| 3               | 0,2                             | 2,17                        | 3,85                           |
| 4               | 1,77                            | 3,74                        | 5,42                           |

L'analyse plus approfondie du site de l'île de Ré présente trois composantes : la technologie de récupération de l'énergie et le rendement, l'efficacité vis à vis des problèmes d'érosion rencontrés, l'impact environnemental et social d'un tel projet.

### 1.4 Tâche S5 – Systèmes hydroliens (CETMEF + Bouygues)

Le port d'Antifer est un terminal pétrolier situé à une vingtaine de kilomètres au nord du Havre. Le potentiel de ce site pour l'extraction de l'énergie des courants est évalué. Le port d'Antifer initialement prévu pour accueillir des pétroliers, a été proposé comme site pilote pour ce projet compte tenu du marnage présent sur sa côte ainsi que la vitesse du courant traversier.

Cette évaluation consiste à :

- Etudier la vitesse du courant dû au marnage ;
- Identifier les zones à fortes intensités ;
- Evaluer le potentiel des différents types d'hydroliennes placées dans ces zones.



Afin d'évaluer les puissances des hydroliennes du port, il faut connaître les caractéristiques de ces dernières. Plusieurs types d'hydroliennes sont proposés :

| Noms d'hydroliennes            | Tocado T500 |        | Tocado T200 |        | Hydro-Gen |
|--------------------------------|-------------|--------|-------------|--------|-----------|
|                                | Type 1      | Type 2 | Type 1      | Type 2 | Type 1    |
| Vitesses d'eau optimales (m/s) | 2,00        | 4,00   | 2,00        | 4,00   | 3,50      |
| Rayon des pales (m)            | 7,10        | 3,55   | 4,50        | 2,25   | 3,00      |
| Puissance (kW)                 | 232         | 520    | 87          | 200    | 200       |
| Cp                             | 0,36        | 0,40   | 0,33        | 0,38   | 0,32      |

**Note :** Ces hydroliennes fonctionnent à partir d'un courant de vitesse 0,5 m/s.

Théoriquement, la puissance produite par l'hydrolienne, est la quantité d'énergie qui fait tourner ses pales par unité du temps.

Cette puissance est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \text{ avec } S \text{ la section de l'hydrolienne et } V \text{ la vitesse des courants.}$$

Or vu que le rendement de l'hydrolienne n'est pas de 100 % la puissance devient égale à :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \text{ avec } C_p \text{ le rendement de l'hydrolienne pris égal à } 16/27 \text{ en se basant sur la loi de Betz.}$$

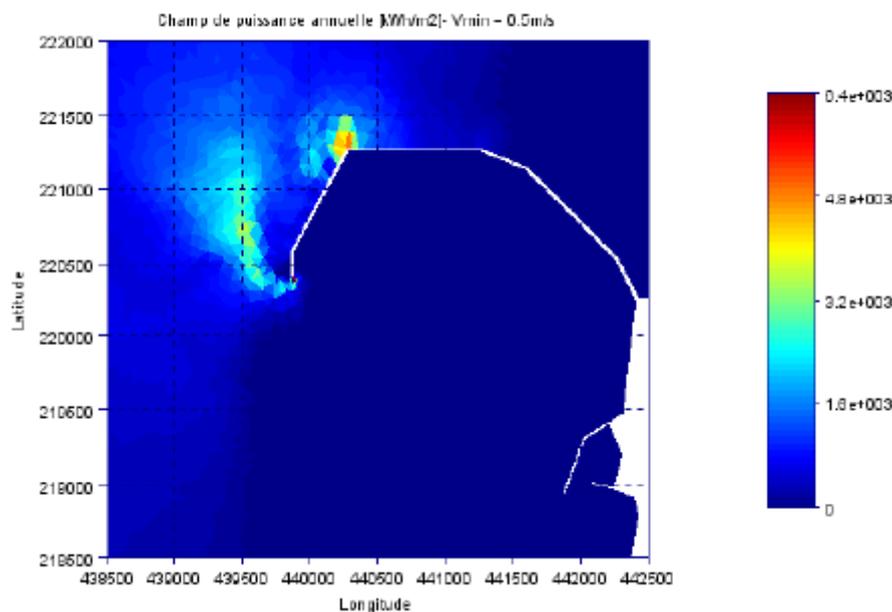
Les hydroliennes commencent à fonctionner au-delà d'une vitesse de courant égale à 0,5 m/s. Pour les valeurs inférieures l'hydrolienne est arrêtée et aucune puissance n'est produite.

Les puissances produites par les hydroliennes dépendent de l'orientation de l'hydrolienne par rapport au courant. La puissance maximale sera produite pour un courant perpendiculaire à la section de l'hydrolienne.

La variation de la vitesse en fonction du temps est calculée pour trois coefficients de marée pour un point donné du maillage.

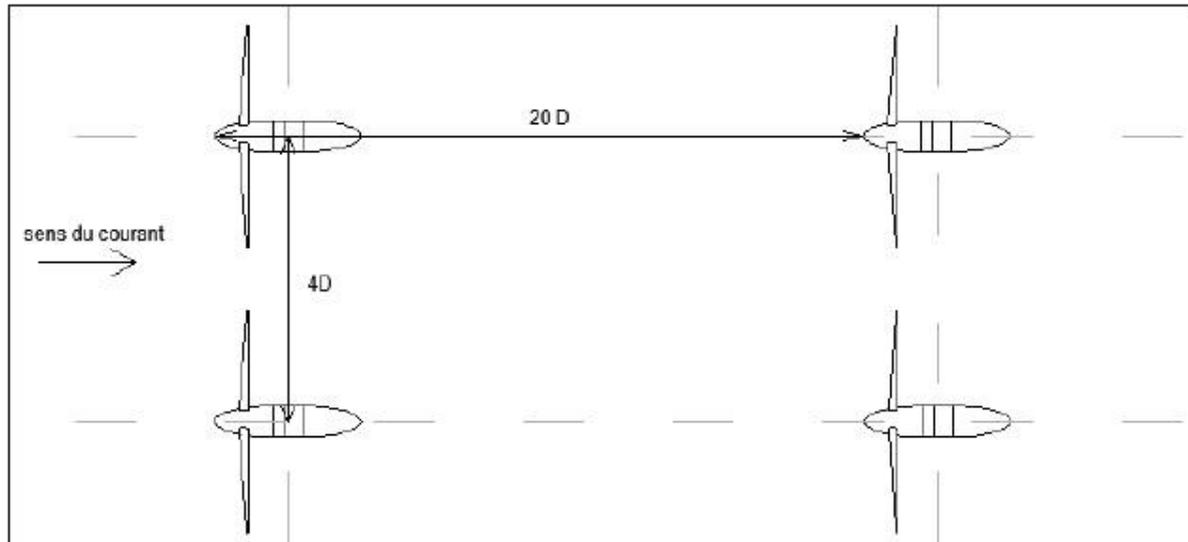
La puissance cumulée au cours d'une marée est égale à l'intégrale des puissances instantanées sur la durée totale de la marée. Cette intégrale est calculée en négligeant les vitesses inférieures à 0,5m/s comme expliqué dans le paragraphe précédent. L'orientation de l'hydrolienne est optimisée en chaque point afin d'avoir une puissance cumulée maximale. Sachant qu'à chaque point l'hydrolienne doit conserver la même orientation, le choix de l'orientation dépend principalement de celle du courant qui la traverse.

La puissance annuelle cumulée est présentée dans la figure ci dessous.



Les zones intéressantes pour l'implantation d'hydroliennes sont celles qui présentent une puissance cumulée remarquable.

Afin de minimiser l'effet de sillage, les espacements suivants ont été choisis avec  $D$  le diamètre de l'hydrolienne.

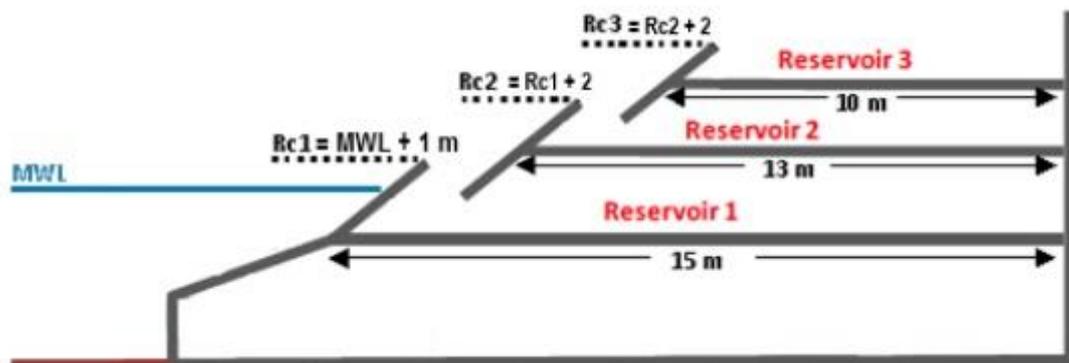


Ayant identifié les implantations possible d'hydroliennes, nous avons estimé que 23 hydroliennes Tocardo T200 de puissance nominale 87 kW pourraient être installées avec un facteur de charge d'environ 15 %. Nous n'avons pas examiné cependant si ces hydroliennes étaient susceptibles de résister aux forçages de la houle.

## 1.5 Tâche 01 - Etat de l'art - Rendement et survivabilité

Les quatre familles de système houlomoteur sont classées par ordre d'avancement des outils d'étude du rendement et de survivabilité.

### D1 - Systèmes à franchissements (Etude ISL)



Le logiciel WOPSim a été développé spécifiquement pour l'étude du rendement et de la production annuelle de systèmes de conversion d'énergie des vagues par franchissement, qu'ils soient fixes (dans une digue) ou mobile (wave dragon) et équipés de plusieurs réservoirs. Le modèle de débit de franchissement est basé principalement sur les formules de Kofoed (2002) provenant des formules de Van de Meer et Jansen (1995). 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 franchissements à plusieurs réservoirs. Les paramètres d'entrée du modèle hydrodynamique sont de types climat de vagues et géométrie du système :

Climat de vague : hauteur de houle significative, période de pointe, probabilité d'occurrence, nombre de vagues générées dans la simulation.

Géométrie du système : section de l'ouvrage (hauteur, longueur, pente), largeur de risberme, nombre de réservoirs.

Les données de sortie en termes de production de débits sont : le débit de franchissement, le débit retournant à la mer à cause du réservoir plein, le débit turbine, la variation de débit moyen total dans le réservoir.

De ces résultats de production de débit, WOPSim calcule le rendement du système.

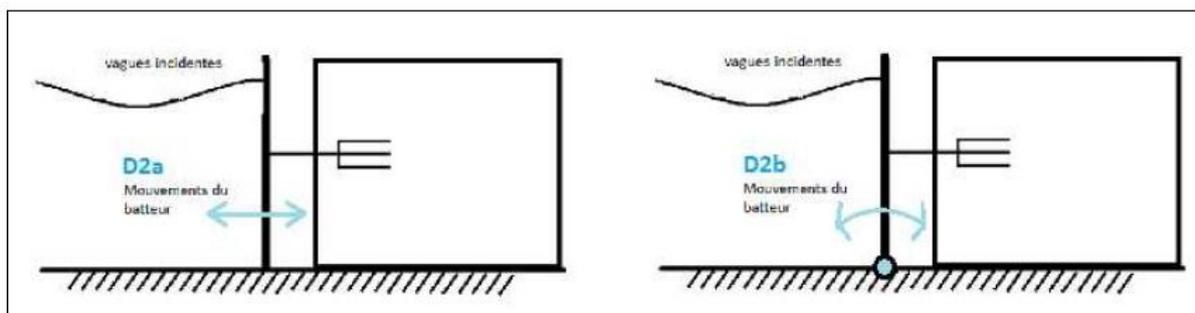
Les paramètres d'entrée concernent la stratégie de la turbine : nombre de turbines, caractéristiques de la turbine définies par deux courbes dépendantes de la charge : le débit dans la turbine et l'efficacité ; un niveau bas dans le réservoir en dessous duquel la turbine s'arrête ; un niveau haut dans le réservoir au dessus duquel la turbine est mise en fonctionnement ; temps de démarrage et d'arrêt de la turbine dépendants de l'inertie du générateur.

Les données de sortie calculées par le programme sont les estimations de la production d'énergie mécanique annuelle et de la puissance moyenne. Ces productions d'énergie sont calculées à trois étapes de la procédure de conversion d'énergie : l'énergie potentielle franchissant la rampe ; l'énergie potentielle stockée dans le réservoir ; l'énergie transformée en énergie mécanique par les turbines, en considérant les arrêts et redémarrage de la turbine et son efficacité propre.

WOPSim est issue d'une dizaine d'années de recherche de l'Université D'Aalborg au Danemark. Les recherches ont porté spécifiquement sur les systèmes à franchissements aussi bien fixes que flottants. De plus les équations appliquées ont été adaptées aux spécificités de ces systèmes de conversion d'énergie et notamment aux systèmes à plusieurs niveaux de réservoir. Kofoed a en effet étudié la répartition verticale des débits de franchissement et en a adapté les équations de Van der Meer. Dans la présente version du logiciel, il est possible de prendre en compte l'effet de la marée en connaissant la probabilité combinée des hauteurs de vagues et de niveau de l'eau. Les variations de ce niveau de la mer sont modélisées en faisant varier le niveau de la crête du réservoir.

L'élément mécanique convertissant l'énergie dans le système D1 est à première vue, assez peu sensible aux contraintes des vagues. En effet, contrairement aux autres systèmes D2 et D3, il ne récupère pas l'énergie dynamique des vagues mais l'énergie potentielle de volumes d'eau statiques provenant du Run-up. Le système D1 est exposé à l'effort des vagues principalement au niveau de son parement. La stabilité générale de l'ouvrage contenant le système est également concernée par la survivabilité. Les méthodes de calcul des contraintes des vagues sur le parement d'ouvrage de défense contre la mer et de leur stabilité sont assez bien connues puisqu'elles sont largement utilisées pour le dimensionnement de ces ouvrages.

## D2 – Système de type batteur inversé (Etude CETMEF - EDF)



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 batteur de vagues si utilisé comme tel (« a

good wave absorber must be a good wavemaker »), et 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 cavement ou de tangage avec le mouvement d'un piston ou d'un volet. Ce mouvement est ensuite converti en énergie électrique avec un système PTO (Power Take Off) à la ligne. Ces systèmes houlomoteurs sont classifiés comme des absorbeurs ponctuels (« points absorbers ») et selon la théorie linéaire, la puissance absorbée d'un système qui est basé sur le cavement est théoriquement deux fois plus efficace qu'un système basé sur le pilonnement (Henry et al., 2010). Il existe plusieurs systèmes différents de type batteurs inversés, incluant le WaveRoller, Oyster, BLOWAVE, EB Frond et WRASPA, qui sont à des stades de développement divers, du concept aux premières installations en mer. En comparaison avec d'autres SREVs (systèmes de récupération d'énergie des vagues), qui sont adaptés à un fonctionnement au large, ces dispositifs sont typiquement développés pour des faibles profondeurs, de 10 à 50 m maximum. Dans cet environnement, l'énergie des vagues disponible est réduite à cause du frottement au fond et éventuellement du déferlement des vagues. En revanche, du fait des effets de réfraction et de déferlement, les événements extrêmes et l'étalement spectral sont aussi réduits, ce qui pourrait augmenter l'efficacité de ces dispositifs (Folley et al., 2007). De plus, dans une comparaison de l'énergie des vagues disponible au large et à la cote, Folley et Whittaker (2009) ont estimé une réduction d'énergie totale d'environ 10% pour un site typique. Ces types de SREVs sont adaptés à un fonctionnement en eau peu profonde et à une intégration dans des ouvrages côtiers.

Le mouvement du dispositif peut être modélisé avec un modèle nommé « Wave-to-Wire » (W2W), qui intègre l'équation de mouvement suivante dans le domaine temporel:

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

où,

- $M$  = masse du dispositif
- $\mu_{\infty}$  = masse d'eau ajoutée
- $\dot{X}$ ,  $\ddot{X}$  = vitesse et accélération du dispositif
- $F_{ex}$  = efforts d'excitation (efforts exercés par les vagues incidentes sur le corps lorsque celui-ci est supposé fixe)
- $K(t)$  = fonction de mémoire des efforts de radiation
- $F_H$  = effort hydrostatique (de gravité et de flottabilité)
- $F_{PTO}$  = effort appliqué par le PTO
- $F_V$  = effort d'amortissement due aux effets visqueux
- $F_{es}$  = effets du contrôle de mouvement du dispositif (« end stops »)
- $F_m$  = effort d'ancrage (« mooring »)
- $F_{Coriolis}$  = termes non-linéaires des équations de mouvement

Trois types d'outils différents sont présents dans la littérature en ordre de complexité croissante pour évaluer le rendement d'un système de batteur inversé. En faisant une bibliographie des différents modèles utilisés pour évaluer le rendement des systèmes houlomoteurs (de tous types), Maguire (2011) a aussi résumé les avantages et inconvénients des modèles linéaires, de type Boussinesq, de type potentiel ou des équations de Navier-Stokes (CFD). Il a constaté que, jusqu'à récemment, l'industrie des SREVs a utilisé principalement des modèles linéaires (comme le modèle W2W), qui sont limités aux mouvements d'une petite amplitude et qui ne peuvent pas modéliser le déferlement des vagues. L'étape suivante, en complexité croissante, est l'utilisation des modèles de type Boussinesq, mais ils ne sont pas très adaptés pour l'estimation des efforts sur un corps. Une autre famille de modèles est celle des modèles potentiels non-linéaires, qui permet la prise en compte des efforts sur des corps, ainsi que la diffraction des vagues. Avec des méthodes d'éléments de frontières, les BIE (Boundary Integral Equations) sont efficaces au niveau du temps de calcul. La dernière catégorie des outils est basée sur la modélisation avec les équations de Navier-Stokes. Ces modèles, comme Flow-3D, sont des outils puissants qui

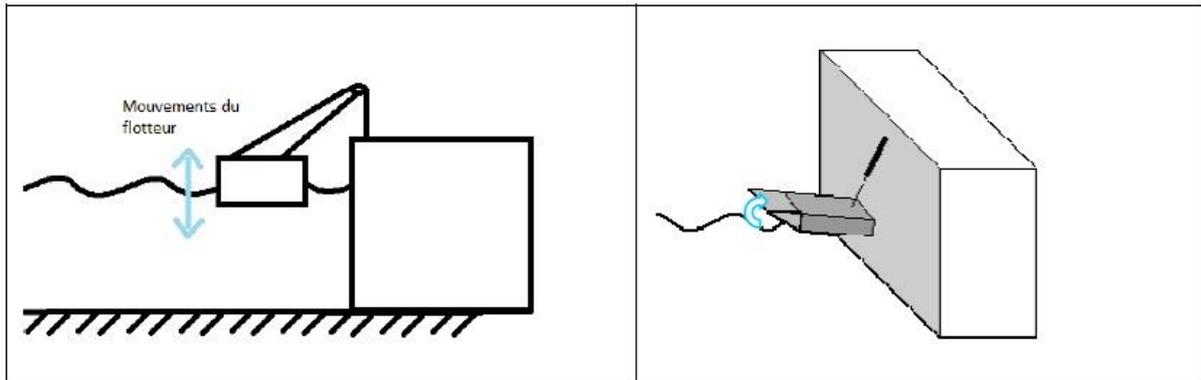
prennent en compte la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie en résolvant finement les processus hydrodynamiques. Le principal inconvénient est le temps de calcul, qui est limitant pour faire des études détaillées de la réponse d'un dispositif dans des conditions différentes. Li et Yu (2012) ont résumé les avantages et inconvénients de ces familles de modèles, et ils ont conclu que les modèles de type BIE sont bien adaptés pour des études d'optimisation des dispositifs, ainsi que pour des études plus détaillées du rendement, car ils réalisent un compromis entre la prise en compte de tous les processus importants et le temps de calcul. Pour développer un outil qui aura la capacité d'évaluer le rendement d'un dispositif de type batteur inversé placé dans la zone côtière, il est nécessaire de prendre en compte :

- la variabilité temporelle des états de mer,
- les non-linéarités des vagues dues aux interactions entre les vagues, à la localisation dans la zone littorale, et aussi aux interactions entre les vagues et la bathymétrie,
- la grande amplitude de mouvement du dispositif,
- les effets du système de PTO (Power Take Off), du réglage du mouvement du dispositif, etc. sur le rendement
- la capacité de tester plusieurs configurations (longueur, hauteur, etc.) du dispositif pour maximiser son efficacité

Pour atteindre ces objectifs, il nous paraît optimal de travailler avec deux modèles pour créer et vérifier un outil applicable aux échelles réelles pour modéliser l'hydrodynamique d'un batteur inversé. Dans un premier temps, l'utilisation d'un modèle 3D potentiel linéaire permet de prendre en compte les effets 3D, de tester la variabilité temporelle des états de mer et d'évaluer le rendement pour une variété de configurations différentes d'un ou plusieurs dispositifs.

Alors que des modèles linéaires ont montré leur capacité de bien reproduire des expériences de SREV's pour des états de mer de faible cambrure (Pizer, 1994 ; Payne et al., 2008 ; Barbarit et al., 2012), ceux-ci ne sont pas aussi performants pour des états de mer plus cambrés. Ces différences sont importantes pour des études de la fatigue et la survivabilité des SREV's, mais aussi pour le rendement, et Folley et al. (2007b) indiquent que les modèles linéaires ne sont pas forcément adaptés pour évaluer le rendement des dispositifs, en particulier de type batteur inversé. Trois facteurs importants limitent l'utilisation des modèles linéaires pour évaluer le rendement des dispositifs de type batteur inversé : (i) la prise en compte des impacts des vagues non-linéaires sur les accélérations et les efforts horizontaux sur le dispositif (en particulier dans l'eau peu profonde), (ii) des mouvements de grande amplitude des dispositifs et (iii) le déphasage entre les vagues et le mouvement du dispositif. Par exemple, Payne et al. (2008) suggèrent que les résultats des simulations linéaires d'un dispositif à une pente, soumises aux mouvements de pilonnement et de cavalement, divergent des expériences du fait de la dérive (« drift ») qui impacte le cavalement, ainsi que des mouvements non-linéaires du dispositif pour les vagues les plus longues. En plus, un modèle potentiel linéaire n'est pas capable de simuler les effets visqueux, qui sont paramétrisés comme un effort empirique dans le modèle mathématique du mouvement du dispositif. En utilisant un modèle 3D potentiel linéaire (AQUAPLUS), Barbarit et al. (2012) ont conclu que les effets visqueux sont la plus grande source d'incertitudes (de l'ordre de 0 à 30%) dans l'estimation du rendement d'un système de type batteur inversé détaché de la côte. L'utilisation d'un modèle 3D CFD n'est pas pratique pour faire des tests d'optimisation et de rendement d'un dispositif du fait de son coût économique et en temps de calcul. Néanmoins, ce type de modèle (e.g. OpenFOAM) pourrait être utilisé pour étudier les effets visqueux sur quelques cas, et calibrer le terme empirique ajouté dans le modèle potentiel pour représenter ces effets visqueux. Avant d'utiliser cette combinaison de modèles pour évaluer le rendement d'un dispositif, il est nécessaire d'adapter le modèle 3D BEM linéaire pour prendre en compte la présence d'une digue derrière le dispositif (imperméable ou perméable), ainsi que la bathymétrie locale. Le marnage sera également pris en compte dans le calcul du rendement.

### D3 – Système oscillant flottant (Etude ECN)



Dans le cadre du projet EMACOP, nous incluons dans les dispositifs de type D3 des systèmes pilonnant ou fonctionnant en tangage, comme le montrent les 2 schémas ci-dessus. Conformément au programme du projet EMACOP, les dispositifs de type D3 seront étudiés dans leur version attachée - combinaison à un ouvrage portuaire de type digue - dans un premier temps, puis dans leur version détachée. L'outil d'évaluation du rendement développé devra permettre de modéliser des dispositifs similaires aux 2 dispositifs ci-dessus, dont on pourra faire varier la géométrie.

L'énergie absorbée par un SREV à un endroit donné peut être calculée en multipliant la matrice de puissance du SREV par le « scatter diagram » du site envisagé. La détermination de la puissance des SREV nécessite de modéliser leur dynamique. La dynamique des SREVs de type D3 (dans les 6 degrés de liberté) peut s'exprimer par l'équation du mouvement ci-dessous :

$$[M]\ddot{X} = F_{ex} + F_{FS} + F_{PTO}$$

avec,

- $[M]$  = matrice masse du système
- $\ddot{X}$  = accélération du dispositif
- $F_{PTO}$  = efforts du système de PTO ('Power Take Off')
- $F_{FS}$  = efforts d'interaction fluide-structure (incluant les efforts hydrostatiques et hydrodynamiques)
- $F_{ex}$  = autres efforts extérieurs (ancrages, end stops, ...)

Les grands types de modèles d'interaction fluide-structure qui peuvent être envisagés pour calculer les mouvements des SREVs de type D3 sont les suivants :

- Approche de type fluide parfait / méthodes potentielles
- Modèles analytiques
- Modèles numériques : méthodes de type éléments de frontière
- Approches de type CFD / Méthodes RANS (Reynolds Average Navier Stokes)

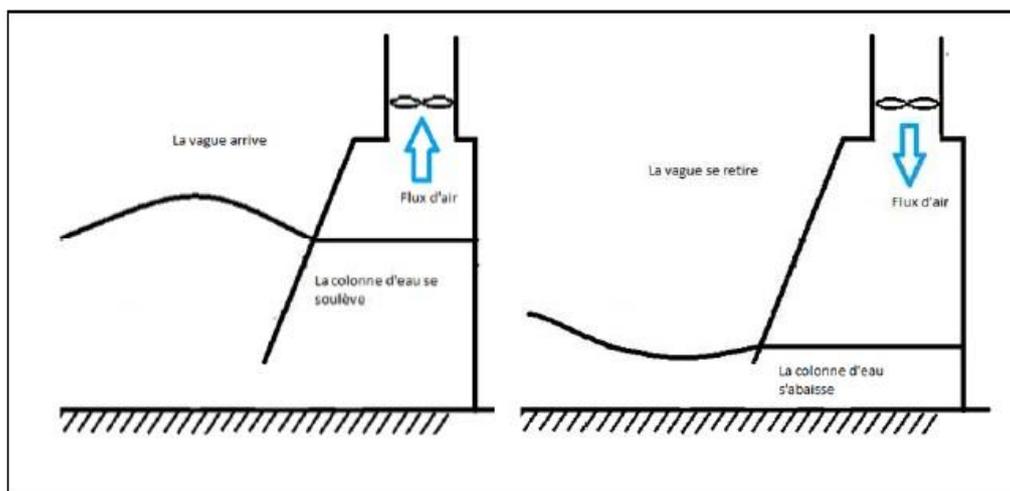
Nous avons répertorié quelques outils de l'état de l'art choisis pour présenter les principales méthodes numériques listées ci-dessus et synthétisé leurs capacités et fonctionnalités.

Conformément aux analyses de Li et Yu, les méthodes numériques de type BEM 3D utilisant une approche hydrodynamique linéaire (de type Aquaplan ou Wamit) et une résolution en temporel des équations du mouvement semblent présenter les meilleurs atouts pour l'étude du rendement des dispositifs de type D3 tant en termes de capacités que de temps de calcul. Il nous paraît

donc souhaitable, dans le cadre du projet EMACOP de développer des outils de calculs du rendement utilisant les mêmes approches hydrodynamiques que celles utilisées par Babarit et al. et d'utiliser également une méthodologie similaire pour le calcul du rendement des SREVs. Rappelons ici qu'aucun des outils ne répond à la problématique d'installation côtière du projet EMACOP. Les outils cités ci-dessus identifiés comme les plus pertinents pour l'étude du rendement des SREVs devront donc être adaptés pour répondre aux critères retenus. En complément, il sera souhaitable et pertinent de quantifier les incertitudes des calculs BEM avec des simulations de référence effectuées avec un modèle CFD (de type méthode RANS / modèle VOF) – voir Thilleul et al. Egalement, l'étude bibliographique a montré que le recours à un contrôle dynamique des mouvements des SREVs permettant d'accorder la fréquence de résonance du SREV à celle de la houle incidente permet d'augmenter significativement les performances des SREVs (cf [Babarit & al], [Falcao]). Henriques & al. et Baudry & Babarit (ref [Baudry & al.]) ont également démontré la possibilité d'implémenter un contrôle par latching sur des calculs de type rendement des SREVs.

Les articles de la littérature montrent que des codes de type CFD (modèles VOF ou SPH par exemple) peuvent être envisagés pour étudier le comportement des SREVs en condition de survie. La encore, les modèles devront être adaptés pour répondre aux spécificités du projet EMACOP et nécessairement complétés par une approche expérimentale afin d'en valider les résultats.

#### D4 – Colonnes d'Eau Oscillantes (Etude ECN)



L'oscillation d'une colonne d'eau comprime de l'air qui actionne une turbine, comme le montre le schéma ci-contre.

L'analyse de l'état de l'art montre que plusieurs outils, et notamment les outils basés sur une approche de type BEM 3D sont aptes à calculer le rendement des OWC (Oscillating Water Column en anglais). L'outil développé par A.Brito-Melo dans sa thèse de doctorat présente les avantages suivants : d'un point de vue hydrodynamique, l'utilisation d'une approche linéaire permet de conserver des calculs relativement rapides, et donc d'effectuer des calculs de puissance sur le « scatter diagram » complet d'un site afin de calculer la puissance moyenne annuelle produite par l'OWC. Le modèle hydrodynamique est actuellement disponible à l'ECN, et les principaux besoins en développement / adaptation pour le projet sont les suivantes

:

- Modifications à apporter au code Aquadyn OWC pour résoudre des problèmes numériques rencontrés sur certaines géométries d'OWC ;
- Prise en compte de la ressource au pied de l'ouvrage.

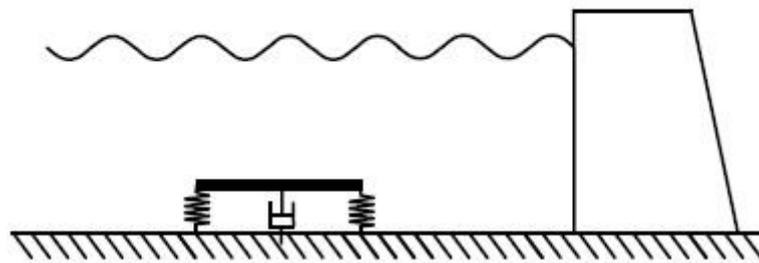
L'outil développé prend en compte la bathymétrie du site ; l'influence de ce paramètre sur le comportement et donc sur les performances des OWCs a été démontré et doit donc être pris en

compte dans notre outil de modélisation du rendement des OWCs. Du point de vue de la conversion d'énergie, le modèle est très complet et largement documenté dans la thèse d'A. Brito Melo : ce travail pourra donc être directement adapté et implémenté numériquement pour les besoins du projet EMACOP. On envisagera également des améliorations des modèles de turbines :

- Prise en compte de la dissymétrie flux entrant / flux sortant lorsqu'une turbine de WELLS est envisagée ;
- Etendre les choix de turbine aux impulse turbines.

L'outil d'A. Brito Melo nous semble donc être l'outil de l'état de l'art présentant les meilleurs atouts pour l'évaluation du rendement des OWC. Nous suggérons donc que cet outil soit retenu pour l'évaluation du rendement des dispositifs de type D4.

#### **D5 – Autre type de dispositif houlomoteur : Plaque immergée (ECN)**



L'étude bibliographique menée nous a permis d'identifier un autre concept de récupération de l'énergie des vagues, ne rentrant pas dans le cadre des classes D1 à D4, et présentant un intérêt pour le projet EMACOP. Un schéma de principe de ce dispositif est présenté ci-dessus. Le concept, breveté par P. Guevel en 2006 consiste à exploiter les variations de pression engendrées par un clapotis formé devant une digue réfléchissante pour générer un mouvement oscillant (pilonnant) d'une plaque immergée. L'énergie de translation de cette plaque peut être récupérée et transformée en énergie électrique.

Ce système exploite l'effet de microséisme étudié par Longuet-Higgins selon lequel dans un système d'ondes stationnaires (par exemple devant une digue purement réfléchissante) des pressions du second ordre, à une fréquence double de la fréquence de la houle sont générées dans la colonne d'eau.

#### **Outils numérique SPH et VOF (ULH et UPPA)**

En raison de la consommation en temps de calcul des méthodes SPH et VOF, l'usage d'un des codes n'est envisageable que pour l'étude de cas précis ou de certains aspects physiques (tels que le déferlement, le rôle de la phase air, les effets visqueux) qui ne peuvent pas être pris en compte par les autres modèles. Dans les cas où la simulation numérique directe est requise, les codes JOSEPHINE, THETIS et/ou SPHFlow peuvent être adaptés à l'étude du rendement des différents dispositifs, mais l'usage d'un code tel que SPHysics est peu recommandé en raison des méthodes employées pour le traitement des conditions aux limites).

Classiquement, on distingue deux types d'efforts d'interaction houle / ouvrage: les efforts lents générés par des surfaces libres dont l'angle d'incidence par rapport à l'obstacle est éloigné de 0 (en général donc des vagues peu cambrées ou l'arrière de la vague déferlante, etc.) les efforts percussifs (i.e., d'intensité importante mais sur un temps très court) générés par des surfaces libres attaquant l'obstacle avec un angle d'incidence faible. La violence de l'impact sera d'autant plus forte que l'incidence est faible. La présence de l'air vient compliquer ce phénomène, ce dernier pouvant être piégé sous forme d'une poche qui pourra si elle est bloquée aux limites, osciller, ou bien se mélanger sous forme de bulle à l'eau rendant cette dernière plus compressible de manière assez rapidement significative.

Les efforts lents sont généralement bien reproduits par les modèles numériques. Ils sont importants car, même si leur intensité est moins forte que les efforts percussifs, elle reste significative, les pressions plus uniformes, et leur temps d'action plus important, et en cela ils contribuent fortement à la résultante des efforts. La validation des modèles numériques pour les efforts percussifs est un problème finalement assez peu traité dans la littérature. Du point de vue expérimental, il est en revanche maintenant admis que le phénomène mesuré est instable, ce qui se traduit pratiquement par des mesures de pressions significativement différentes pour deux expériences a priori identiques d'impact de vagues.

L'étude des efforts auxquels sont soumis les différents dispositifs étudiés est un point essentiel sur lequel la méthode SPH et VOF peuvent apporter certains éléments de réponse. Un grand nombre de phénomènes physiques interviennent et la bibliographie est abondante dans ce domaine. L'air emprisonné, les effets 3D, le type de vague incidente sont autant de facteurs qui peuvent influencer significativement les pressions mesurées ou calculées sur la structure étudiée. Dans des cas de houles extrêmes, la simulation directe peut apporter un certain nombre de réponses, mais ne permettra pas de couvrir toutes les possibilités auxquelles l'ouvrage sera soumis en réalité. C'est pourquoi nous recommandons d'utiliser un code tel que JOSEPHINE, SPH-Flow ou THETIS pour la simulation de cas isolés d'impacts, afin de mettre en évidence les paramètres géométriques prépondérants et les cas où l'ouvrage subit les efforts les plus intenses. Ensuite, un code potentiel devrait permettre de prédire, en fonction de la houle, le type de vague obtenu au voisinage de l'ouvrage, avant impact. Ces résultats pourraient ensuite être combinés dans le cadre d'une approche statistique pour le calcul des efforts sur de plus longues durées.

## 1.6 Tâche 01 – Développement d'un outil d'évaluation du rendement

L'objectif est de commencer le développement d'outils d'évaluation du rendement des dispositifs D1 à D4.

### D1 - Systèmes à franchissements

Le logiciel WOPSim développé à l'Université d'Aalborg répond aux attentes.

### D2 – Système de type batteur inversé

Cette partie présente l'avancement du développement de l'outil d'évaluation du rendement des dispositifs de type D2 'Batteurs inversés' placés devant une digue verticale. Les objectifs fixés pour cette tranche sont le développement de l'outil d'évaluation du rendement du dispositif D2 ayant les fonctionnalités suivantes :

En entrée :

- Possibilité de modifier la distance entre la digue et le flotteur
- Possibilité de modifier les caractéristiques du PTO
- Possibilité de prendre en compte le marnage
- Possibilité de modifier l'incidence de la houle (0° à 20°)
- Possibilité de choisir le site (scatter diagram) pour l'évaluation de la production d'énergie

En sortie :

- Calcul de la matrice de puissance
- Calcul de l'énergie annuelle produite sur un site donné et les incertitudes associées
- Calcul du rapport de l'énergie produite sur la masse du système
- Illustration du fonctionnement de l'outil sur un cas-test

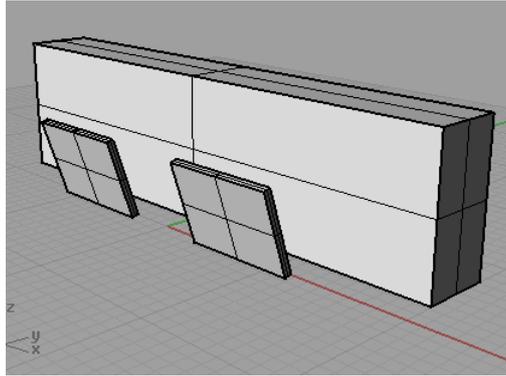


Schéma de principe : 'batteurs inversés' devant une digue verticale

L'outil d'évaluation du rendement des dispositifs D2 actuellement en cours de développement est adapté aux volets oscillants en tangage autour d'un axe fixe proche du fond et partiellement immergés, perçant la surface libre (voir schéma simplifié ci-dessus).

Le principe de fonctionnement du dispositif D2 est inspiré de l'Oyster développé par Aquamarine<sup>1</sup>. Ce dispositif a fait l'objet de nombreuses études et publications scientifiques dont les résultats sont utilisés ici. Le modèle numérique Wave-to-Wire temporel développé dans cette étude est basé sur l'intégration de l'équation du mouvement, puis sur le calcul de la matrice de puissance du dispositif. La multiplication de cette matrice de puissance par le scatter diagram d'un site permet ensuite d'estimer l'énergie absorbée par le dispositif sur un site donné.

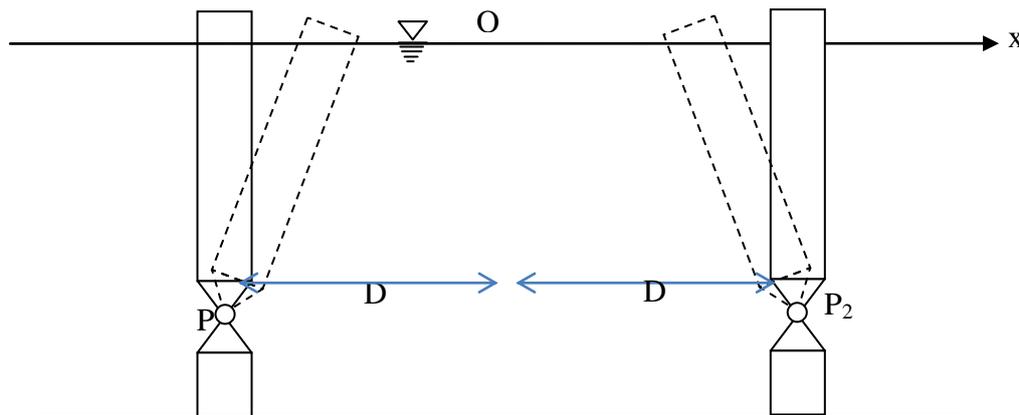
Les efforts hydrodynamiques sont ici calculés à l'aide du logiciel de tenue à la mer BEM 3D Aquaplus.

L'équation du mouvement du système contraint dans le domaine fréquentiel s'écrit alors :

$$(I_y + (M + M_{PTO})d_1^2 + CM_{11,55})\ddot{\theta} + (CA_{11,55} + B_{PTO})\dot{\theta} + (K_{55} + g(\rho V - M - M_{PTO})d_1 + K_{PTO})\theta = \tau_{ex,P}$$

$I_y$  : moment d'inertie du flap en tangage (par rapport au centre de gravité).

<sup>1</sup> [www.aquamarinepower.com](http://www.aquamarinepower.com)



Pour un volet partiellement immergé devant une digue, la digue est considérée comme totalement réfléchissante et est modélisée par le biais d'une symétrie. On introduit un 2<sup>nd</sup> flap à 2 fois la distance D à la digue et on lui impose un mouvement opposé au 1<sup>er</sup> flap (voir figure ci-dessus).

En présence de la digue, l'équation du mouvement dans le domaine fréquentiel devient donc :

$$\left( I_y + (M + M_{PTO})d_1^2 + (CM_{1155} - CM_{1255}) \right) \ddot{\theta} + \left( (CA_{1155} - CA_{1255}) + B_{PTO} \right) \dot{\theta} + (K_{55} + g(\rho V - M - M_{PTO})d_1 + K_{PTO})\theta = \tau_{ex1}^+ + \tau_{ex1}^-$$

Le code BEM 3D fréquentiel Aquaplan est ici utilisé pour calculer les efforts d'excitation et coefficients hydrodynamiques (masses d'eau ajoutées et amortissements de radiation). La convergence en maillage de notre modèle a été vérifiée en comparant les efforts d'excitation et coefficients hydrodynamiques pour deux maillages de discrétisation différente.

Les équations du mouvement présentées ci-dessus ont été implémentées en Fortran dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel. L'intérêt de cette double implémentation est de pouvoir effectuer une vérification des deux modèles en les comparant entre eux. Dans le cas de ces dispositifs D2, les pertes par effet visqueux peuvent être significatives ; l'intérêt majeur du modèle temporel est donc ici de pouvoir quantifier ces pertes par effet visqueux.

A partir de la matrice de puissance calculée, et du scatter diagram du site de Saint-Jean-de-Luz, l'énergie annuelle produite sur le site de Saint-Jean-de-Luz a été estimée, avec prise en compte du marnage. Le scatter diagram (diagramme des probabilités d'occurrence de chaque état de mer) utilisé est issu du rapport d'étude EMACOP S2 EGIS/CETMEF. Les résultats montrent des puissances moyennes absorbées de l'ordre de 54 kW pour le flap situé à 12m de la digue pour des calculs effectués avec des spectres de JONSWAP. Les résultats présentés ne prennent pas en compte le rendement du convertisseur d'énergie (PTO). Ces premiers résultats sont présentés pour illustrer les capacités de l'outil d'évaluation du rendement ; ni la géométrie du flap, ni la distance à la digue n'a été optimisée pour cette étude.

### D3 – Système oscillant flottant (Etude ECN)

Pour les dispositifs houlomoteurs de type pilonnant flottant D3, l'objectif est donc de développer un modèle 'Wave to Wire' temporel du dispositif D3 placé devant une digue pour l'évaluation du rendement : ce modèle 'Wave to Wire' constitue le noyau de l'outil d'évaluation du rendement. Dans un premier temps, le cas d'une bouée pilonnante devant une digue verticale totalement réfléchissante est envisagé. Le modèle numérique Wave to Wire fréquentiel développé dans cette étude est basé sur la résolution de l'équation du mouvement, puis sur le calcul de la matrice de puissance du dispositif. La multiplication de cette matrice de puissance par le scatter diagram d'un site permet ensuite d'estimer l'énergie absorbée par le dispositif sur un site donné.

Les caractéristiques géométriques de la bouée sont les suivantes :

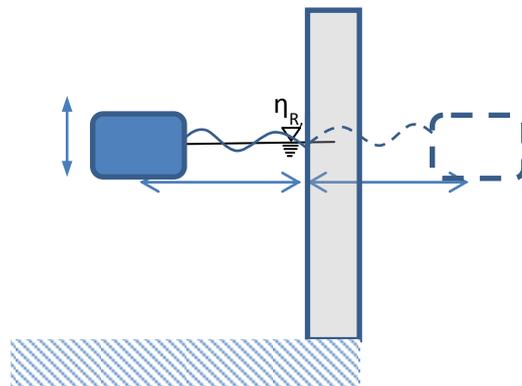
## Caractéristiques de la bouée

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| Rayon           | 5m                |
| Volume immergé  | 195m <sup>3</sup> |
| Tirant d'eau    | 2.5m              |
| Profondeur (NM) | 10m               |



Dans un premier temps, les calculs ont été effectués avec des profondeurs correspondant au site de Saint Jean de Luz qui sera donc le premier site d'illustration de cette étude. Une première estimation du potentiel houlomoteur effectuée dans le cadre de la tâche S2 par CETMEF/EGIS donne un potentiel de 21,8 kW/m sur ce site.

Seul le cas d'une digue verticale totalement réfléchissante est envisagé ici ; cette digue est modélisée pas le biais d'une symétrie. On introduit un second flotteur à 2 fois la distance à la digue et on lui impose un mouvement identique au premier flotteur.



Les efforts de PTO sont ici modélisés par un amortissement linéaire proportionnel à la vitesse de la bouée en pilonnement ;  $B_{pto}$  étant le coefficient d'amortissement.

En présence de la digue, l'équation du mouvement dans le domaine fréquentiel s'écrit donc :

$$(M + CM_{1133} + CM_{1233})\ddot{X}(\omega) + (CA_{1133} + CA_{1233} + B_{pto})\dot{X}(\omega) + (K_{H33} + K_{pto})X(\omega) = F_{ex}(\omega)$$

Le code BEM 3D fréquentiel Aquaplan est ici utilisé pour calculer les efforts d'excitation, masses d'eau ajoutées et amortissements de radiation. En l'état actuel de développement, l'outil d'évaluation du rendement des dispositifs de type D3 est un outil fréquentiel qui permet d'évaluer la matrice de puissance de bouée pilonnante devant une digue verticale totalement réfléchissante.

La fréquence propre de la bouée est donnée par :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_{H33}}{M + CM_{33}(\omega_0)}}$$

Après quelques itérations, on obtient  $\omega_0=1,4$  rad/s. La fréquence de résonance en pilonnement est élevée, en dehors des fréquences de houle du site Saint-Jean-de-Luz dont les fréquences de houle les plus probables sur ce site sont situées entre 0,4 et 0,9 rad/s (soit des périodes de 7 à 15 s).

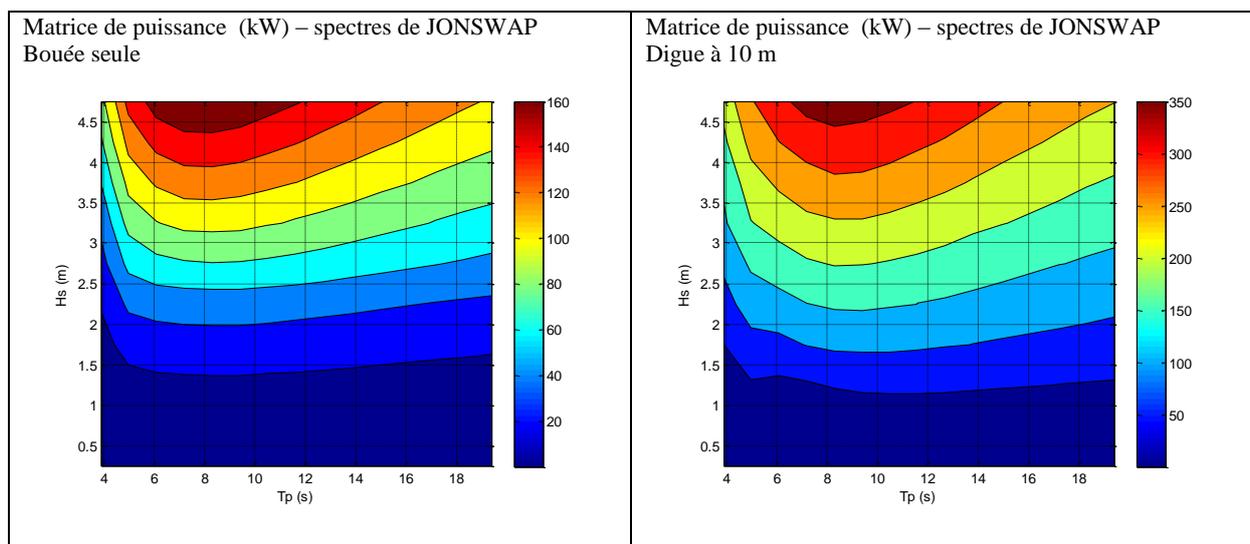
La configuration de couplage flotteur/ digue est ici très simplifiée, la géométrie du flotteur n'a pas été optimisée, et la matrice de puissance a été calculée à partir du modèle fréquentiel, linéaire.

De plus, le rendement du convertisseur d'énergie (PTO) n'est pas pris en compte. Les résultats présentés ici ont pour objet d'illustrer les capacités de l'outil développé.

La matrice de puissance de la bouée seule, calculée avec une profondeur d'eau de 10 m a été obtenue ; elle est cohérente avec la fonction puissance. Les résultats de simulation fournissent, sur le site de Saint-Jean-de-Luz, une puissance moyenne annuelle de 29 kW. Le capture width ratio sur ce site s'élève alors à 16%, ce qui correspond aux ordres de grandeur de capture width ratio pour ce type de dispositif.

Pour de très petites distances à la digue (10 m par exemple), la bouée est quasiment située au ventre de l'onde stationnaire développée devant la digue pour plus de 75% des houles existant sur le site de Saint-Jean-de-Luz (houle de période supérieure ou égale à 9 s) : **Cette situation est très favorable à l'installation de dispositif pilonnant devant une digue**, comme le montre les RAO ainsi que les puissances absorbées calculées. La puissance récupérée devant une digue est double de celle récupérée par une bouée seule, ce que l'on attendait.

Les résultats présentés ne prennent pas en compte le rendement du convertisseur d'énergie (PTO). Ces premiers résultats sont présentés pour illustrer les capacités de l'outil d'évaluation du rendement ; la géométrie du flotteur n'a pas été optimisée, et la configuration de couplage bouée-digue est ici une configuration très simplifiée. Il sera souhaitable, en tranche 2 du projet, d'envisager d'autres configurations (de type Wavestar par exemple).



#### D4 – Colonnes d'Eau Oscillantes

Cette partie présente l'avancement du développement de l'outil d'évaluation du rendement des dispositifs de type D4 'Colonnes d'eau oscillantes'.

Pour les dispositifs D4, les étapes de développement de l'outil sont envisagées comme suit :

- Recensement des capacités du code AQUADYN OWC et identification des éventuels problèmes et besoin de modifications/ développement ;
- Développement du modèle Wave to Wire à partir des éléments décrits dans la littérature, et principalement dans la thèse de A.Brito-Melo afin de calculer la puissance moyenne absorbée par une OWC sur un site donné.

Dans cette première tranche du projet EMACOP, du fait du peu de temps dont nous disposons pour commencer les développements concernant l'outil d'évaluation du rendement des OWCs, seul le recensement des capacités du code AQUADYN-OWC a pu être abordé.

Pour la tranche 1 du projet EMACOP, l'avancement est donc le suivant :

- Compilation des routines constituant le code Aquadyn-OWC ;
- Premiers tests de vérification du fonctionnement du code sur une géométrie-test, analyse en cours des fichiers entrées /sorties du code ;
- Identification d'une routine manquante.

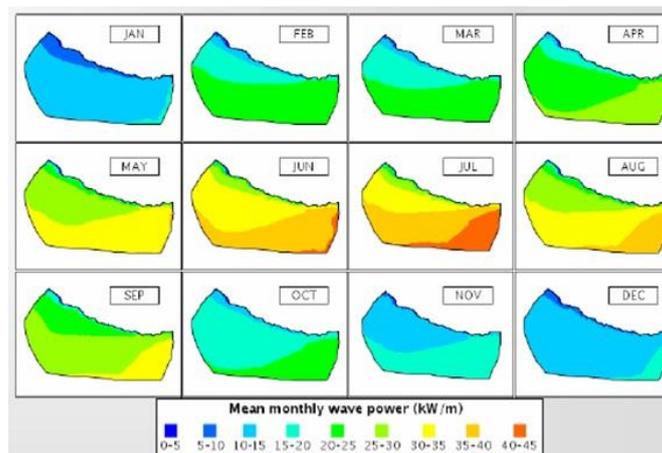
## 1.7 Tache 02 – Potentiel houlomoteur (EDF R&D – Open Ocean)

Les bases de données d'état de mer ANEMOC ont été améliorées en utilisant une période temporelle plus conséquente (plusieurs décennies), avec une résolution spatio-temporelle plus fine, et un niveau d'information plus détaillé.

De plus les effets de faible profondeur d'eau, l'interaction avec la marée et la diffraction en présence d'obstacles (îles, pointes, ...) ont été intégrés dans la modélisation.

Cela permet d'envisager de produire en tranche 2 des cartes de potentiel houlomoteur jusqu'à 1 km des côtes.

Une caractérisation plus fine des états de mer est obtenue (en fonction de la direction, de la période) mais aussi des saisons (cf. ci-dessous la ressource houlomotrice mensuelle moyenne sur le modèle local de la Réunion).

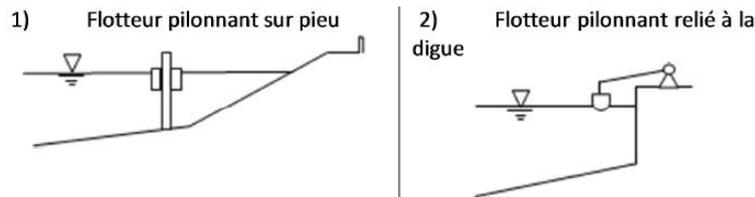


## 1.8 Tache 04 – Impact sur le génie civil – Etude économique (ISL / CETE de l'Ouest / Delaby)

Une première étape des travaux consiste à répertorier les configurations de systèmes houlomoteurs ayant un impact sur le génie civil.

Outre les systèmes à franchissements et à colonne d'eau oscillante, qui ont tous les deux un fort impact en matière de génie civil, deux autres configurations illustrées ci-dessous sont à étudier :

- 1) les systèmes sur pieu ou sur ponton ;
- 2) les bras articulés reliant le flotteur à la digue.

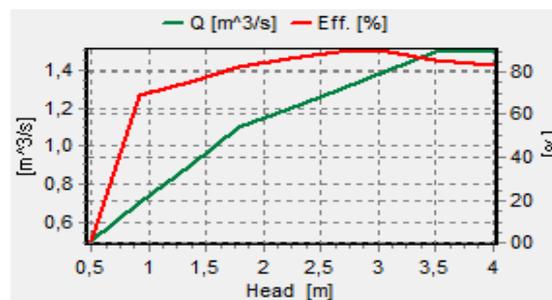


A l'aide du logiciel WOPSIM, ISL a étudié les interactions entre géométrie et turbines en matière de dimensionnement d'un système à franchissements.

La longueur de digue simulée est de 10 m. Pour cette longueur, une seule turbine est retenue par réservoir. Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques des turbines choisies :

|                                    | Turbine<br>Réservoir 1 | Turbine<br>Réservoir 2 | Turbine<br>Réservoir 3 |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Chute max. [m]                     | 2,35                   | 4,35                   | 5,85                   |
| Débit nominal [m <sup>3</sup> /s]  | 2                      | 1,5                    | 1,5                    |
| Diamètre indicatif [m]             | 1,45                   | 1,3                    | 1,1                    |
| Puissance installée théorique [kW] | 40                     | 55                     | 78                     |

Les débits sont choisis afin d'optimiser la valorisation des volumes de franchissement.



Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour l'installation simulée. Les résultats sont ramenés à une longueur de 1 m pour comparaison.

|                                 | Saint-Jean       | Cherbourg |
|---------------------------------|------------------|-----------|
|                                 | / mètre linéaire |           |
| Puissance installée (Pi)        | 17,3 kW/m **     | 15 kW/m   |
| Puissance moyenne produite (Pm) | 1,8 kW/m         | 0,4 kW/m  |
| Rendement (Pm/Pi)               | 10,4%            | 3%        |
| Puissance moyenne des vagues    | 21,8 kW/m        | 3,4       |
| Energie produite                | 16,2 MWh/m       | 3,4       |
| Energie des vagues              | 257 MWh/m        | 30        |
| Rendement de l'installation     | 6,3 %            | 11%       |

On constate que le rendement par rapport à la puissance installée (ou facteur de charge) est meilleur sur Saint-Jean-de-Luz qu'à Cherbourg (10 % au lieu de 3 %). En revanche le rendement

de l'installation par rapport à la puissance moyenne des vagues est meilleur à Cherbourg qu'à Saint-Jean-de-Luz (11 % au lieu de 6 %).

## 2 PARTENARIAT

Nous présentons ci-dessous la liste des partenaires ayant signé la charte du projet EMACOP au 1<sup>er</sup> Septembre 2013.

### 1 Entreprises de construction

BOUYGUES TP

EMCC Entreprise EMCC (groupe VINCI)

FNTF Fédération Nationale des Travaux Publics

Total : 3

### 2 Industriels

HYDROCAP ENERGY

Total : 1

### 3 Ingénieries / Bureaux d'Etudes

ARTELIA

CASAGEC Ingénierie

EGIS

Energie de la Lune

GLOBOCEAN

IC Ingénieurs Conseils

ISL Ingénierie

OPEN OCEAN

PARLIER Environnement

Total : 9

### 4 Institutions de recherche (publiques)

CETE OUEST Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement Région Ouest

CETMEF Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales

IFREMER Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IFSTTAR Institut Français des Sciences et Technologies du Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

Total : 4

### 5 Laboratoires (universités / écoles d'ingénieur)

CENTRALE INNOVATION Ecole Centrale de Nantes

EIGSI La Rochelle

LUSAC Université de Caen Basse Normandie

ULH Université du Havre

UPPA Université des Pau et des Pays de l'Adour

UTC Université de Technologie de Compiègne

Total : 6

### 6 Maîtres d'Ouvrages publics

CDC Pointe du Médoc Communauté de Communes de la Pointe du Médoc

Conseil Général du Finistère  
Grand Port Maritime du Havre  
Total : 3

### 3 COMMUNICATION

Présentation du projet EMACOP à Plozévet (le 22 Mai 2013) dans le cadre du colloque « Quelles énergies pour la Cornouaille ? » et aux assises du port du futur à Marseille (le 24 Mai 2013). Participation prévue aux assises du port de pêche du futur à Boulogne sur Mer (le 29 Novembre 2013).

Baie d'Audierne. La présentation à Plozévet a donné lieu à de nombreux articles dans les journaux locaux (voir ci-dessous), dans les bulletins municipaux et même une présentation le week-end dans le cadre d'une association locale. L'accueil en Baie d'Audierne est très bon et les attentes sont fortes. Les espoirs apparaissent même exagérés par rapport au potentiel de production attendu. Le projet EMACOP est soutenu par le Conseil Général du Finistère.

Bayonne. Il se trouve qu'un projet est en discussion entre DCNS et la région Aquitaine sur la digue de Bayonne. Il s'agit d'un projet d'une certaine ampleur impliquant des travaux significatifs de génie civil. Ce projet est pleinement sur le champ du projet EMACOP. Des discussions sont en cours avec DCNS pour faire entrer l'industriel dans le consortium EMACOP. Le projet est soutenu par le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques (charte en cours de signature après accord des élus).

Boulogne sur mer. L'agglomération a lancé une étude (en lien avec EMACOP) pour étudier le potentiel en énergies marines du port. Le Président du projet EMACOP Henri BOYE a accompagné le Ministre Frédéric CUVILLIER lors d'une visite à Boulogne sur mer sur les énergies marines.

En Septembre 2012, Philippe SERGENT (CETMEF) a exposé à Delft (Pays-Bas) les principes généraux du projet EMACOP dans le cadre des journées Européennes sur le Coastal Wiki.

[http://www.vliz.be/wiki/Wave\\_energy\\_converters\\_in\\_coastal\\_structures](http://www.vliz.be/wiki/Wave_energy_converters_in_coastal_structures)

Les 2 – 5 Septembre 2013, Virginie BAUDRY, Aurélien BABARIT et Alain CLEMENT (Ecole Centrale de Nantes) ont présenté un article à European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013 – Aalborg – Danemark) : « an overview of analytical, numerical and experimental methods for modelling oscillating water columns ».

Les 18 – 20 Septembre 2013, pour Egis Eau Gaëtan DUFOUR et Eric FERNAGU, et pour le CETMEF Bertrand MICHARD et Emmanuel COSQUER ont présenté un article à Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013 (ICE 2013 – Edinbourg – Royaume – Uni) intitulé « EMACOP Project: Assessment of wave energy resources along France's coastlines ».

## Penmarch

# Les digues, futures usines électriques ?

**Les ports les plus exposés à la houle pourraient être équipés de systèmes de production d'énergie. En Finistère, quatre sites sont à l'étude.**

Dernière mise à jour : 12/07/2013 à 09:50



Saint-Guénolé est l'un des ports finistériens les plus exposés à la houle. Sa digue pourrait être équipée d'un système houlomoteur.

*Par Adèle Morlet*

La France compte 173 km de digues portuaires. Un linéaire qu'observent de très près des scientifiques réunis au sein du projet Emacop (Energies marines côtières et portuaires). Quelques-uns de ces ouvrages pourraient en effet être adaptés pour récupérer l'énergie de la houle. La plupart de ces digues nécessitent des aménagements voire d'être reconstruits. **« Elles sont vieillissantes et ne sont plus adaptées à l'évolution du trafic moderne, à la taille des nouveaux navires. Le changement climatique nécessite aussi des aménagements »**, décrit Bertrand Michard, ingénieur au Cetmef (Centre d'études techniques maritimes et fluviales).

### Protection contre l'érosion côtière

Des dizaines de partenaires sont impliquées dans ce projet national. Le Cetmef participe à l'évaluation du potentiel des digues. 22 sites ont été étudiés sur la façade atlantique et sur la Manche.

**« Neuf sont retenus car ils présentent un bon potentiel houlomoteur et une longueur de digue importante »**, poursuit Bertrand Michard.

Parmi ces sites figurent Esquibien, Le Conquet et Saint-Guénolé. Ces deux derniers ports présentent les meilleurs résultats : la puissance de houle annuelle atteint 21,1 kW/m. **« Mais ces données nécessitent d'être peaufinées. Ce sera l'objectif 2013. Nous allons aussi poser des bouées directionnelles et des capteurs de pression. »** Ce travail sera aussi réalisé sur Molène dont la digue devrait être reconstruite.

Parallèlement, les technologies sont étudiées. **« Si l'éolien offshore posé ou flottant est relativement au point, ce n'est pas le cas des énergies houlomotrices. Il existe très peu de démonstrateurs en fonctionnement. Cependant, les systèmes oscillants semblent les plus pertinents »**, estime Bertrand Michard. Un démonstrateur pourrait être installé en 2020. Parallèlement, des études sont menées sur d'autres types d'ouvrage : les piliers des ponts (énergie des courants) et les écluses portuaires (énergie marémotrice).

Les partenaires impliqués dans Emacop cherchent aussi à évaluer le coût du kWh. Tout comme les incidences de ces nouvelles technologies sur la sédimentation. Ces systèmes pourraient en effet permettre de lutter contre l'érosion côtière et donc protéger les côtes.

\*Les autres sites retenus sont Antifer, Cherbourg, Flamanville, Saint-Gilles Croix-de-Vie, Bayonne et Saint-Jean-de-Luz.

» Penmarch, France

## QUIMPER VILLE

### Énergies marines. La Cornouaille à la pointe

23 mai 2013



Les énergies marines renouvelables sont au cœur des enjeux énergétiques. La Bretagne, et notamment la Cornouaille, a des atouts indéniables. Houlomoteur ou hydrolien, des projets innovants se préparent en baie d'Audierne comme à Saint-Guénoles.

Les potentiels sont là, la Cornouaille semble vouloir saisir cette carte, d'autant que se dessinent des perspectives de retombées industrielles.

#### De l'énergie grâce aux digues

Un projet innovant existe sur Saint-Guénoles, porté par le Centre d'études techniques maritimes et fluviales (Cetmef), dans le cadre d'un projet national de recherche Emacop. Il s'agit, au moment du renouvellement de ces digues, d'y intégrer des systèmes hydroliens et houlomoteurs, grâce à un système de batteur-flotteur. Six sites ont été étudiés sur le Finistère dont Saint-Guénoles qui a beaucoup de potentiel avec une houle forte et constante. Esquibien a également été retenu pour la phase test. Ces deux sites seront sites pilotes instrumentalisés d'abord avec des bouées, puis avec un système batteur-flotteur. Philippe Sergent, directeur scientifique de Cetmef l'annonce clairement : « Les démonstrateurs seront placés là, le but est de faire des ports des usines électriques, ce qui apportera des ports à zéro émission, du tourisme industriel, l'utilisation de cette énergie par le port et les navires ».

#### Phase terrain en juin

Quant à la ferme houlomotrice de la baie d'Audierne, dans un secteur allant de Pouldreuzic à Plouzévet (Le Télégramme du 19 mai), maintenant que les accords entre DCNS et Fortum sont conclus, la phase d'étude sur le terrain démarrera dès juin pour déterminer son implantation. Ce projet est porté par DCNS et Fortum, un prototype fonctionne déjà au Portugal, leur ambition est affichée : « Aller vers une ferme commerciale au plus vite (première production en 2016) et développer en parallèle dans les deux ans une filière industrielle - c'est vu avec Fortum -, la Bretagne et la Cornouaille sont des sites de choix ». Le projet de la baie d'Audierne comportera trois à cinq panneaux pour une production attendue jusqu'à 4 millions de kWh/an. Luc Martin, de la DCNS, précise que « ce sera une phase pilote, on utilisera ensuite peut-être ce même site pour construire la ferme commerciale ; dans les deux ans, le site définitif sera arrêté pour développer une industrie ».

■ Laurence Prime

## Énergies marines : un pari sur la baie d'Audierne

Le Sud-Finistère va être l'emplacement d'une ferme-pilote utilisant l'énergie des vagues en 2017. Le projet est porté par le constructeur DCNS.

Le constructeur naval français DCNS s'est allié avec deux partenaires finlandais, l'énergéticien Fortum et la start-up AW-Energy, pour construire une ferme-pilote captant l'énergie des vagues. Celle-ci pourrait être installée près de Plouzévet, dans le Sud-Finistère. Le projet est financièrement soutenu par la région Bretagne. La construction, prévue à un

endroit encore non déterminé de la baie d'Audierne, devrait démarrer en 2016. Des études techniques, actuellement en cours, permettront de désigner le lieu exact.

#### Énergie du large

La mise en service du dispositif, qui fonctionnera à l'énergie houlomotrice, est prévue en 2017. La

technologie Waveroller, imaginée par AW-Energy, sera utilisée. Cette dernière est déjà testée au Portugal, grâce à un prototype placé à Peniche. Il s'agit d'un grand battant sous-marin qui repose sur le fond de la mer, placé entre 300 mètres et 2 kilomètres du rivage. Le mouvement de la houle pourra ainsi être transformé en électricité. La ferme-pilote est

destinée à produire une puissance de 1,5 MW.

Ce projet s'ajoute à un second, non soutenu par DCNS, qui va peut-être voir le jour à Audierne. L'idée est cette fois de capter l'énergie des vagues grâce à un système disposé sur la digue du port de Sainte-Évette.

Kévin BERNARD.

## 4 PERSPECTIVES

L'adhésion de EDF, DCNS et de l'agglomération de Boulogne sur Mer est attendue avant la fin 2013.

Le projet s'articule en quatre tranches avec une définition désormais plus précise du planning selon les grands objectifs exposés ci-dessous.

Tranche 1 : démarrage, mise en place des outils, mise en place des contacts locaux

Tranche 2 : sélection des technologies et des sites avec des données de coûts

Tranche 3 : essais en laboratoire des technologies retenues

Tranche 4 : démonstration en mer à échelle réduite

En tranche 2, les développements suivants sont prévus :

Tâche O1 – En ce qui concerne le rendement, à ce jour, seules les matrices de puissance du système D1 sont vraiment disponibles. Les matrices de puissance des systèmes D2, D3 (en Juin 2014) et D4 (fin 2014) seront validées et diffusées aux partenaires notamment pour l'avancement des tâches S1, S2 et S3 notamment. Des premiers résultats sur la survivabilité des systèmes seront obtenus.

Tâche O2 – La cartographie du potentiel houlomoteur exploitable jusqu'à 1 km de la côte sera calculée sur un historique de 30 ans. Des calculs seront aussi menés intégrant la composante de mer de vent et des états de mer complexes. Enfin un modèle de vagues à la côte déterministe sera développé et disponible à compter de Septembre 2014.

Tâche O3 – Une modélisation de l'impact hydrosédimentaire d'un système houlomoteur est prévue sur un cas schématique en canal. Une attention particulière sera portée sur le passage petite échelle - grande échelle en lien avec la tâche O1.

Tâche O4 – Une étude des coûts est prévue pour les systèmes à franchissements avec des applications à Saint Jean de Luz, Bayonne, Cherbourg et Antifer. De même une étude des coûts pour fournir une estimation du kWh produit sera menée sur Esquibien pour un système à flotteur pilonnant. Les efforts sur les colonnes d'eau oscillante seront estimés pour dimensionner la structure. Enfin une synthèse des autorisations nécessaires pour mettre en place un système houlomoteur dans un port devra être établie.

Tâche S1 – Seront étudiés principalement les développements possibles des systèmes houlomoteurs D1 - D2 - D3 sur Saint-Jean de Luz avec leurs coûts respectifs en lien avec la tâche O4.

Tâche S2 – Cette tâche, après la première estimation fournie en tranche 1 du potentiel exploitable sur 22 sites sur le littoral Français, fournira une meilleure estimation sur les 10 sites les plus prometteurs. Une campagne expérimentale est également programmée sur le site d'Esquibien afin de valider le calcul.

Tâche S3 – Le site de la pointe des Baleines (île de Ré) sera étudié afin de fournir des informations (en fonction du type de système choisi et de son positionnement) sur la production énergétique attendue, sur l'efficacité contre l'érosion, sur les aspects paysagers et sur les coûts.

Tâche S4 – La programmation sur la tâche S4 est en attente de l'action que souhaite mener EDF CIH sur le site de Boulogne sur mer.

Tâche S5 – Les travaux concernent principalement l'implantation d'une hydrolienne près d'une digue à la pointe de Graves (report de la Tranche 1) et l'étude sur la zone des trois ponts en Gironde.

## **5 PROJETS CONNEXES**

Outre le projet DCNS à Bayonne, le consortium EMACOP a pour membre Hydrocap Energy qui devrait répondre fin Octobre à l'AMI de l'ADEME sur les démonstrateurs houlomoteurs.

Un contact est également pris pour une réponse dans le cadre de l'appel à projets Interreg deux mers sur le développement des énergies renouvelables dans les petits ports de pêche (comme celui qui nous intéresse par exemple à Saint-Guénolé – Finistère).

Le CETMEF et l'UTC sont enfin en contact avec le Port de Dunkerque pour monter un projet plus général sur la gestion de l'énergie dans les ports, projet soutenu par le Pôle de Compétitivité I- Trans de la région Nord Pas de Calais – Picardie.