



Projet National EMACOP

Energie marines, côtières et portuaires

Synthèse de la tranche 2

Juillet 2016

(version du 08/07/2016)



Convention de subvention N° 13 MGC S 006

Site internet : www.emacop.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/emacop

Président : Henri BOYE

Directeur technique : Philippe SERGENT

Directeur scientifique : Alain CLEMENT

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

Sommaire

Sommaire	2
1 Introduction	3
2 Avancement des tâches « Systèmes »	4
2.1 Systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs (S1)	4
2.2 Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens (S2)	7
2.3 Dispositifs hydroliens sur ouvrages portuaires ou côtiers (S5)	14
3 Avancement des tâches « Outils »	17
3.1 Outils d'évaluation du rendement des dispositifs houlomoteurs (O1)	17
3.2 Outils d'évaluation de la survivabilité des dispositifs houlomoteurs (O1)	19
3.3 Evaluation du potentiel houlomoteur d'un site (O2)	21
3.4 Impact hydrosédimentaire local et régional (O3)	22
3.5 Dimensionnement de l'ouvrage et étude socio-économique (O4)	23
4 Valorisation	26

1 Introduction

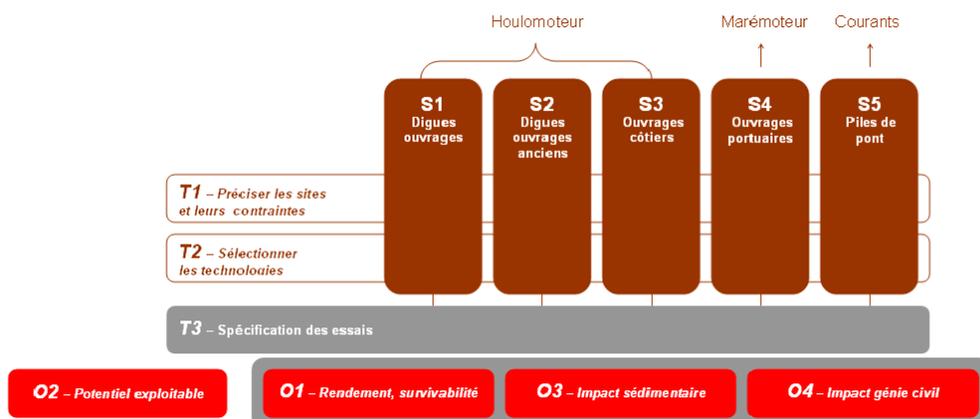
Ce rapport présente une synthèse des travaux de la deuxième tranche du projet national EMACOP (Energies marines, côtières et portuaires) qui s'est déroulée de novembre 2013 à mars 2016.

Le projet national EMACOP s'intéresse aux ouvrages maritimes et portuaires pouvant supporter un dispositif de récupération de l'énergie marine renouvelable. Il a pour objectif principal d'étudier les modalités de mutualisation de la fonction de protection des ouvrages maritimes et portuaires et celle de récupération de l'énergie marine renouvelable grâce à des technologies houlomotrices, marémotrices ou hydroliennes.

EMACOP mobilise **29 partenaires** : **ingénieries** (ARTELIA, CASAGEC Ingénierie, EGIS, Energie de la Lune, France Energies Marines, Globocean, HYDROCAP Energy, IC Ingénieurs Conseils, ISL Ingénierie, Open Ocean, Parlier Environnement), **industriels** (EMCC, BOUYGUES TP, DCNS, FNTP), **laboratoires de recherches** (ECN/LHEEA, EIGSI, LUSAC – Université de Caen, ULH – Université du Havre, UPPA – Université de Pau et des Pays de l'Adour, UTC – Université Technologie Compiègne), **établissements publics de recherche** (Ifsttar, Cerema, Ifremer), **maîtres d'ouvrage** (Communauté de Communes de la Pointe du Médoc, Conseil départemental du Finistère, Conseil départemental des Pyrénées Atlantique, Grand Port Maritime du Havre).



Le projet EMACOP est structuré autour de deux thèmes principaux, le thème S « systèmes ou ingénieur » et le thème O « outils ou recherches ». **Les résultats de tranche 2 de ces deux thèmes sont synthétisés dans le présent document.**



Les sous-tâches S3 (dispositifs marémoteurs sur ouvrages détachés) et S4 (dispositifs marémoteurs) du thème S n'ont pas été traitées dans le cadre de la tranche 2. Ce choix résulte de contraintes budgétaires fortes liées à la baisse de la subvention de la Direction de la recherche et de l'innovation du MEEM¹, qui ont conduit les partenaires du projet à hiérarchiser et prioriser les actions de recherche.

¹ Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Les actions de valorisation en lien avec les résultats établis dans le cadre du projet national EMACOP figurent également dans cette synthèse.

2 Avancement des tâches « Systèmes »

2.1 Systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs (S1)

Trois sites susceptibles d'accueillir des systèmes houlomoteurs sur ouvrages neufs ont été étudiés en tranche 1 : la route littorale de la Réunion, le port de Calais et la baie de Saint-Jean-de-Luz. Compte tenu des potentiels récupérables calculés, seul le site de Saint-Jean-de-Luz a fait l'objet d'études complémentaires, permettant ainsi de déterminer, par exemple, l'énergie moyenne annuelle potentiellement récupérée par un système houlomoteur à franchissement de type Slot-Cone Generator (SSG). Les ouvrages de Saint-Jean-de-Luz n'entrent pas à strictement parler dans la catégorie d'un ouvrage neuf. La baie est protégée par trois digues efficaces, entretenues annuellement par le dépôt de nouveaux blocs qui renforcent sa structure. Certaines fragilités des digues ont été mises en évidence (comme des cavités dans la digue de l'Artha), mais le Conseil Département des Pyrénées Atlantiques (CD64) n'envisage la reconstruction de l'une ou l'autre des digues que comme une possibilité à long terme.

Le travail de tranche 2 a consisté à :

- ▶ optimiser la géométrie d'un système houlomoteur à franchissement de type SSG par une étude paramétrique par laquelle le nombre de réservoirs et leurs hauteurs de crêtes ont été variés ;
- ▶ déterminer l'énergie moyenne potentiellement récupérée par un système houlomoteur de type volet oscillant placé au même endroit dans la baie.



Le travail réalisé en tranche 2 est un travail collaboratif entre trois partenaires : CASAGEC ingénierie, l'Université de Pau et des Pays de l'Adour et l'ECN (Ecole Centrale de Nantes). Outre les rapports rendus au projet EMACOP une communication commune a été présentée au congrès EWTEC2015 (<http://www.ewtec.org/>) à Nantes.

Un travail de dimensionnement d'un système SSG a été réalisé en parallèle par ISL, assorti d'une évaluation économique. Ce travail, réalisé dans l'axe O4, se doit d'être mentionné en regard de la proximité de cette étude avec celle résumée dans cette section.

2.1.1 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

Cette étude a permis de réaliser un état de l'art complet sur l'optimisation d'un récupérateur de houle de type SSG puis d'appliquer les recommandations issues des différentes recherches afin d'avoir une **première optimisation, une puissance moyenne annuelle et un rendement type**. Cette optimisation a permis de réaliser des plans d'implantation sur la topographie réelle afin d'appréhender la taille qu'aurait un tel ouvrage et son intégration dans le paysage de la baie de Saint-Jean-de-Luz.

Le résultat principal de cette étude est le rendement que l'on peut obtenir avec un tel système. Le rendement hydraulique serait au maximum de 3.89 kW/ml soit environ 27 % de l'énergie disponible

au pied de l'ouvrage. Il est cependant obtenu pour un système à 10 réservoirs. Ce nombre important de réservoirs induirait probablement des coûts de fabrication et d'entretien élevés. Cependant, un système à 5 réservoirs pourrait atteindre un rendement hydraulique de 23 % (3.27 kW/m). Ce dernier ne tient pas compte de plusieurs paramètres qui pourraient être des facteurs de réduction énergétique (angle d'attaque des vagues, étalement directionnel de l'état de mer, ouverture des réservoirs). De plus, d'autres pertes seront engendrées avec la chute du volume d'eau dans le réservoir (~25 %), la perte d'énergie par la turbine hydraulique (10 %), le rendement du générateur et des câbles (5%).

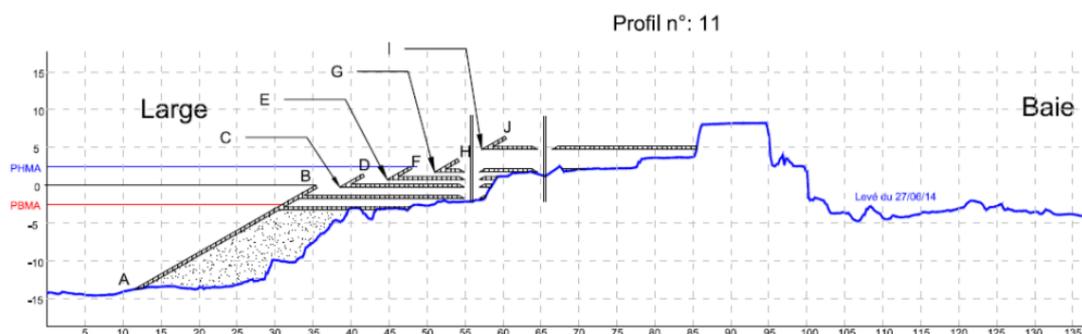


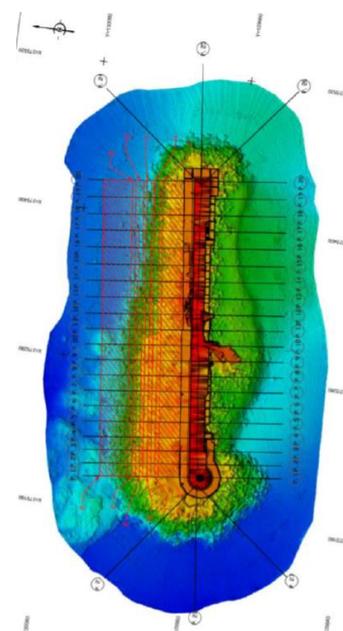
Figure 1. Plan préliminaire d'un récupérateur de houle SSG à 5 réservoirs sur la digue de l'Artha

Au final, si l'on considère le système SSG à 5 réservoirs (3.27 kW/m) et que l'on prend en compte les différentes pertes décrites ci-dessus en référence à l'état de l'art, le rendement énergétique total (de la vague au réseau EDF) serait de **14.85 % pour une puissance moyenne annuelle de 2.08 kW/m linéaire**. L'ouvrage faisant 250 m, la puissance serait donc de **520 kW**, sans compter les pertes liées aux incertitudes du calcul de prédiction. L'énergie produite serait donc de **4558 megaWatt.heure par an**, soit 670 foyers alimentés, en considérant que la consommation annuelle par foyer est de 6762 kWh/an.

A ces observations, il faut ajouter que la puissance varie en fonction des saisons. En hiver, elle sera plus importante qu'en été avec un facteur 5 au maximum selon les statistiques de la tranche 1.

Au niveau de l'intégration de l'ouvrage sur la digue de l'Artha, la bathymétrie montre que le talus situé devant l'ouvrage est relativement large. Il serait probablement préconisé d'implanter l'ouvrage devant les blocs. Le talus n'est pas homogène sur tout le linéaire de la digue. Il sera donc nécessaire de remanier une partie des blocs ainsi que de réaliser une structure d'appui. Le réservoir le plus haut est situé à 8 m CM, ce qui est plus bas que la maçonnerie de la digue. De plus, seulement trois réservoirs (pour la configuration #3, à 5 réservoirs) sont visibles à marée haute. L'ouvrage sera donc peu visible depuis la baie de Saint-Jean-de-Luz. Cependant, le SSG sera très visible depuis la mer et à marée basse.

Dans les perspectives de travail, des expérimentations supplémentaires sur modèles physiques pourraient apporter de la précision dans les calculs de prédiction du rendement énergétique. Les premiers travaux réalisés dans cette phase d'étude permettraient de réaliser une estimation du coût global de revient de l'ouvrage ainsi que de l'entretien nécessaire. Ces coûts permettraient d'établir un prix de revient du kW.h afin de voir si un tel investissement serait rentable. La faisabilité technique et économique d'implantation d'un tel ouvrage devra également être évaluée.



2.1.2 Evaluation de l'énergie récupérée devant les ouvrages de protection de Saint-Jean-de-Luz par un système houlomoteur de type volet oscillant

Pour les conditions de houle et de marée sur le site de Saint-Jean-de-Luz, l'étude fournit une évaluation à **264kW en moyenne annuelle** l'énergie récupérée par un volet oscillant de 20m de largeur placé à une profondeur de 8m (CM) devant la digue de l'Artha. C'est un niveau de récupération de l'énergie de la houle très significatif puisque la puissance moyenne rapportée à une unité de largeur du volet ($W=20m$) est de 13,2kW/m. Cette valeur est proche de la puissance incidente des vagues (14,3 kW/m).

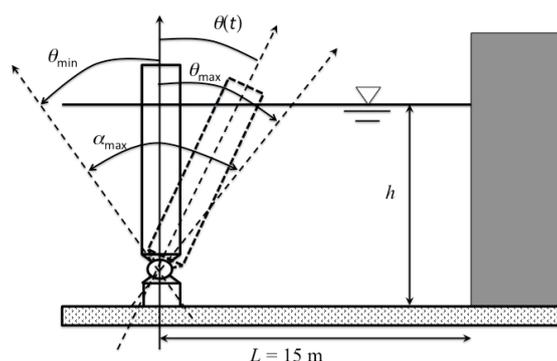


Figure 2. Géométrie du volet oscillant placé à distance $L=15m$ d'une digue mur

Pour atteindre ce niveau de récupération, les valeurs des paramètres PTO ont été ajustées pour les différentes conditions de houle afin de maximiser la puissance récupérée et de maintenir l'angle d'oscillation du volet en deçà de $\alpha_{max}=40^\circ$ (soit $-20^\circ < \theta(t) < 20^\circ$).

L'étude précise par ailleurs l'énergie récupérée pour les différentes conditions de houle et de marée et quantifie comment les paramètres PTO doivent être choisis pour chacune d'entre elles. L'évaluation de l'énergie récupérée ne tient pas compte des effets visqueux. Des calculs complémentaires indiquent une réduction de l'ordre de 30% de la puissance récupérée lorsque les effets visqueux sont pris en compte. L'étude montre enfin que la réduction de la puissance récupérée augmente de façon très importante si les paramètres PTO permettent un angle d'oscillation du volet important. Le choix de l'angle $\alpha_{max}=40^\circ$ semble être un bon compromis. La poursuite de cette étude devrait analyser de façon plus systématique la contribution des effets visqueux.

2.1.3 Comparaison de l'énergie récupérée par un volet oscillant et un système houlomoteur à franchissement de type SSG

L'analyse comparative a été réalisée à la même position que celle considérée pour le volet oscillant et pour les mêmes conditions de houle et de marée.

L'étude paramétrique, qui considère des systèmes SSG de 3 à 30 réservoirs dont les hauteurs de crêtes ont été optimisées, donne une puissance récupérée de l'ordre de **3 kW/m**, par unité de longueur pour un système SSG à 3 réservoirs. Si l'on s'en tient à la seule puissance récupérée, il n'y a pas de gain significatif à multiplier le nombre de réservoirs. Les coûts supplémentaires de génie civil pour un système SSG doté de multiples réservoirs disqualifient certainement sur le plan économique un système SSG constitué de réservoirs trop nombreux. L'écart, d'un facteur supérieur à 4, entre la quantité d'énergie récupérée par un volet oscillant et par un système à franchissement de type SSG est important.

Les évaluations énergétiques restent préliminaires. La quantité d'énergie effectivement récupérée par les deux systèmes sera diminuée quand seront prises en compte les différentes pertes négligées dans la présente étude :

- ▶ Pour le système SSG, les pertes hydrauliques dues à la chute d'eau et aux turbines, ainsi que les pertes dans les convertisseurs électriques. Des éléments d'évaluation de ces pertes sont disponibles. Il est à noter que l'étude réalisée dans le cadre de l'axe O4 du projet EMACOP, estime la récupération de l'énergie par un système SSG (60m de longueur, 3 réservoirs de niveaux séparés de 2m) à 1,69kW/m. Cette évaluation, faite en utilisant le logiciel WOPSIM de l'Université d'Allborg, inclut ces différents niveaux de perte.
- ▶ Pour le volet oscillant, la non prise en compte des effets visqueux fait probablement surestimer d'environ 30% l'énergie mécanique récupérée par le système. Il faudrait enfin évaluer les pertes liées au convertisseur électrique et au dispositif de commande du PTO. Pour notre étude comparative entre le système à franchissement SSG et le volet oscillant, il n'a pas été possible de pousser plus loin l'étude du volet oscillant dans le temps imparti. Les pertes additionnelles du système SSG ont été ignorées, car la comparaison aurait été faussée. Toutes les pertes pour ce système avaient été en effet retenues tandis que toutes les autres auraient été négligées pour le volet oscillant. La comparaison sur le seul niveau de la conversion de l'énergie de la houle en énergie mécanique a donc été retenue.

2.2 Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens (S2)

Un travail d'identification et d'évaluation du potentiel énergétique a été réalisé dans la tranche 1 du projet EMACOP (Michard et al., 2013). Une méthode de calcul analytique employée pour propager la houle du large à la côte selon Goda, a permis de caractériser le potentiel houlomoteur de vingt-deux sites à partir de l'analyse statistique de données de houle ANEMOC.

Bien que la méthode présente certaines limites (formulation de calcul simplifiée, diffraction, réflexion et zones de concentration d'énergies non représentées, surestimation du potentiel pour les sites de configuration complexe), elle a permis de retenir dans cette phase d'évaluation préliminaire neuf sites de fort potentiel sur les façades Manche et Atlantique, avec des niveaux de puissance de houle les plus forts de 20 à 25 kW/m sur les sites de la pointe Bretagne et du Pays Basque.

Pour approfondir le potentiel estimé comme prometteur sur ces neuf sites, il a été décidé d'avoir recours à la **modélisation numérique** des vagues en tranche 2. Deux types de modélisation numérique ont été mis en œuvre pour étudier les sites, qui ont été répartis au sein de l'équipe projet S2 constituée des partenaires LUSAC, ARTELIA, CASAGEC et CEREMA.

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 par les partenaires suivants :

- ▶ le CASAGEC (utilisation des codes SWAN et TOMAWAC pour les sites de Bayonne et de Saint-Jean-de-Luz),
- ▶ ARTELIA (exploitation des données Homère issues de WaveWatch III pour les sites de Molène et du Conquet),
- ▶ le LUSAC (utilisation du code TOMAWAC pour les sites de Cherbourg, Flamanville et Antifer).

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 :

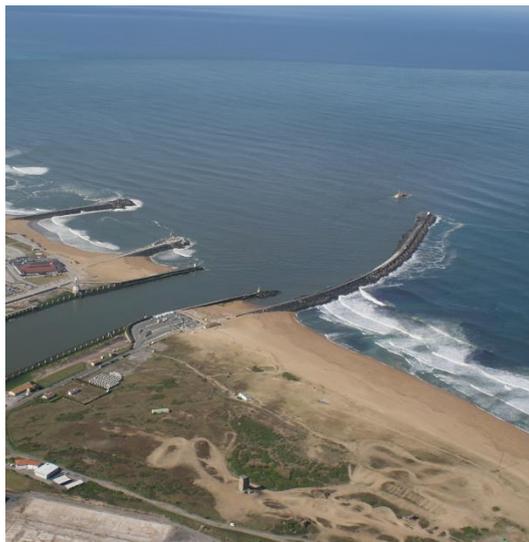
- ▶ le CEREMA (utilisation du code SWASH pour les sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé).

2.2.1 Evaluation du potentiel houlomoteur sur le site de Bayonne

Deux simulations numériques ont été mise en place dans le fond 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 rejou (hindcast) globale. Les deux bases de données utilisées sont les suivantes :

- ▶ ANEMOC (EDF – LNHE – CETMEF) : 01/01/1979 – 31/08/2002 (23,5 ans),
- ▶ HOMERE (IFREMER) : 01/01/1994 – 31/12/2012 (18 ans).

Ces bases de données permettent de connaître le climat de houle sur de nombreux points de sorties, cependant ces points de maillage situés au large ne correspondent pas forcément aux sites à étudier puisque nous travaillons sur des ouvrages côtiers. Les simulations mises en œuvre dans cette étude permettent de calculer la propagation des vagues avec un modèle numérique de terrain raffinée 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.

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 sont 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 de données HOMERE alors que les résultats sur les points de contrôle au large donnaient des puissances plus élevées pour le SWAN ANEMOC.

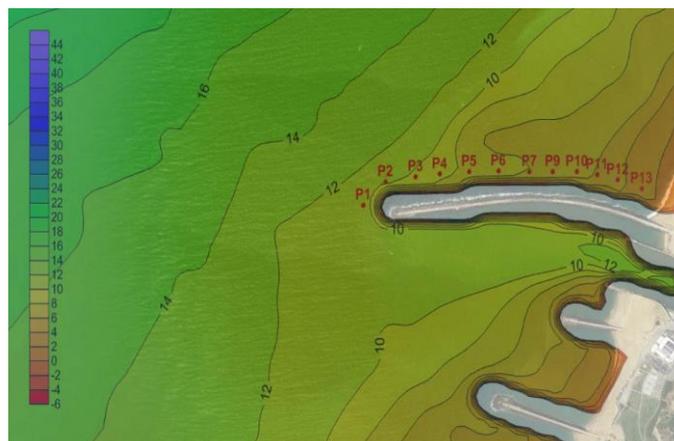


Figure 3. Localisation des points de contrôles sur la bathymétrie du MNT (convention profondeur et cotes marines).

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 situés 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.

2.2.2 Etude de la ressource houlomotrice disponible sur les sites du Conquet et Molène

L'analyse de la ressource houlomotrice aux sites d'étude repose sur l'exploitation directe de la base de données 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 cg-E fourni parmi les nombreux paramètres globaux de sortie de la base de données.

La Figure 4 montre les variations saisonnières de la puissance de houle incidente pour chacun des deux sites.

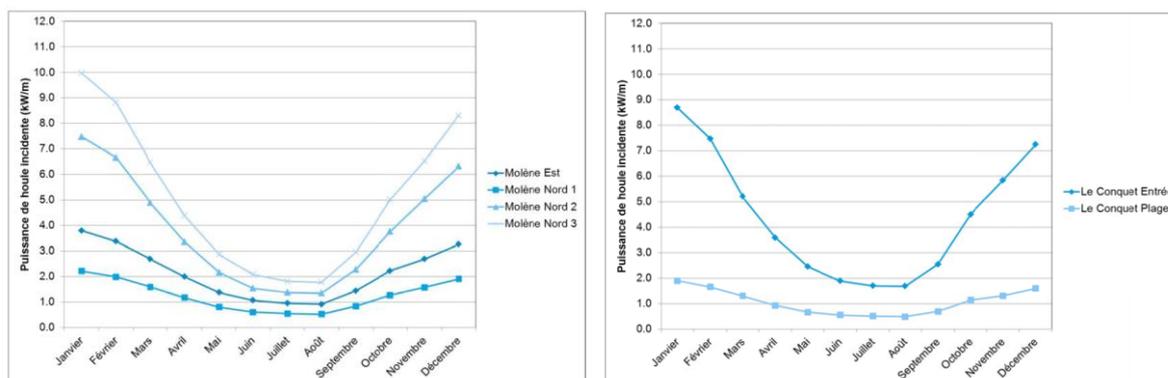


Figure 4. Puissance de houle incidente moyenne mensuelle (Molène et Le Conquet)

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 pour respectivement. 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 en phase 1 du projet EMACOP par Michard et al. (2013) dans le cadre de l'évaluation préliminaire du potentiel houlomoteur de 22 sites identifiés par les partenaires. Cette évaluation préliminaire utilise une approche simplifiée basée sur des données ANEMOC au large qui sont propagées analytiquement via la formule de Goda (2000) sans prise en compte des variations bathymétriques locales et avec un niveau moyen supposé constant. Les puissances moyennes annuelles au large calculées par Michard et al. (2013) sont respectivement de 20 et 54 kW/m aux points ANEMOC considérés face à Molène et Le Conquet, par 80 et 100 m CM de fonds respectivement. Les puissances calculées à la côte sont de 8 et 21 kW/m respectivement pour Molène et Le Conquet, par fonds de 0 et 1 m CM, contre environ 2 et 1 kW/m pour la présente étude, par 0 m CM pour les deux sites.

Parmi les nombreuses différences entre les deux études, on notera simplement ici que la non-prise en compte des variations bathymétriques locales par Michard et al. (2013) – compte tenu de la difficulté à introduire ce phénomène dans une approche simple de type Goda (2000) – conduit certainement à une forte surestimation de la puissance calculée par petits fonds devant Le Conquet. L'importance des effets de réfraction - diffraction sur le potentiel houlomoteur dans la zone ici à l'étude est notamment illustrée par l'étude de Guillou et Chapalain (2015), voir ci-dessous.

Les valeurs obtenues ici sont cohérentes avec les résultats présentés par Guillou et Chapalain (2015) dont les cartes de puissance en Mer d'Iroise font apparaître une nappe de faibles valeurs de puissance moyenne annuelle, inférieures à 10 voire 5 kW/m, correspondant à la zone abritée par Ouessant et incluant l'archipel de Molène et la zone du Conquet. Plus généralement, la puissance moyenne annuelle dépasse rarement 10-12 kW/m par fonds de moins de 20 m.

2.2.3 Estimation du potentiel houlomoteur par modélisation numérique et classification des états de mer. Application aux sites de Cherbourg, Flamanville et Antifer.

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 de la ressource). Une fois que les états de mer sont propagés à la côte, le potentiel et sa variabilité peuvent

être évalués. Cette façon de faire 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 de très grosses 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. 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 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.

La méthode a été appliquée sur 3 sites localisés dans la Manche : Cherbourg, Flamanville et Antifer.

Les résultats obtenus avec cette méthodologie fournissent des puissances comparables sur les 3 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 (Michard et al., 2013) 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 de vagues 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 nous) donne en revanche des résultats très proches.

2.2.4 Caractérisation des conditions de vagues et du potentiel houlomoteur sur les sites d'Esquibien et de Saint-Guénolé

Les processus de transformation des vagues du large jusqu'aux structures côtières sont pris en compte en utilisant le modèle de vague non hydrostatique SWASH (un acronyme de « Simulating Waves till Shore »), un code libre, qui résout les équations non linéaires en eau peu profondes, développé à l'Université de Technologie de Delft. Le modèle SWASH permet l'analyse déterministe des vagues et prend en compte les phénomènes côtiers de réfraction, levage, déferlement, diffraction et réflexion des vagues.

Le rapport présente les simulations numériques de transformation de vagues, la méthodologie employée, les paramétrages des modèles numériques réalisés et les résultats obtenus de potentiel houlomoteur des sites **d'Esquibien** et de **Saint-Guénolé** (Finistère).



Figure 5. Vue de la digue d'Esquibien - conditions de marée de basse mer (gauche) ; Photographie de l'ouvrage extérieur du port de Saint-Guérolé (droite)

Résultats site d'Esquibien

Les résultats des 30 simulations réalisées sont ensuite mis en commun pour les 9 points de sortie dans un tableur. Les données manquantes des tableaux de puissance de houle sont extrapolées à partir des résultats obtenus de simulation.

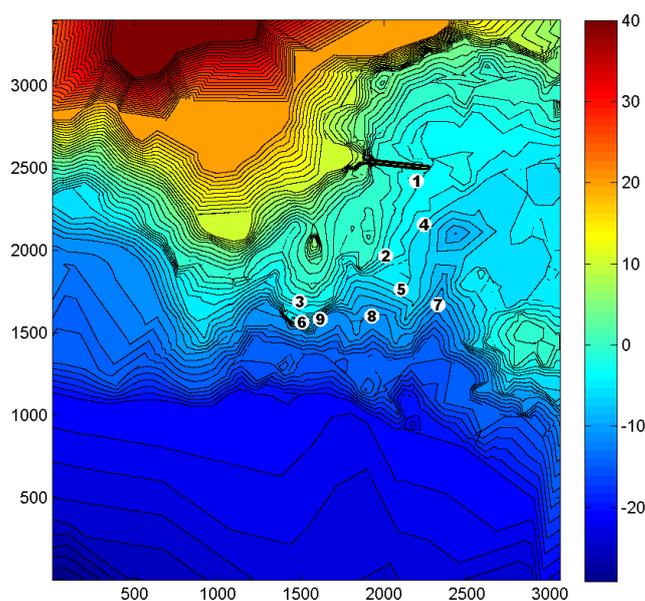


Figure 6. Carte bathymétrique du site d'Esquibien et emplacements des 9 points de sortie pour le calcul des puissances de houle et des spectres directionnels

L'énergie annuelle est calculée en multipliant les valeurs de puissance par les occurrences en nombre d'heures correspondant à chaque case du tableau d'occurrence, ce qui fournit des tableaux intermédiaires d'énergie annuelle. Concernant le cumul des résultats par niveaux de marée, une sommation est réalisée, avec les coefficients de pondération suivants (0,3 pour la basse mer, 0,4 pour la mi-marée et 0,3 pour la pleine mer) afin de rassembler les trois tableaux d'énergie correspondants en un tableau global d'énergie annuelle (tableau 8).

Par exemple, au point de sortie n° 4 situé à environ 100 m devant l'extrémité de l'ouvrage par 5 m de fond, la somme des énergies pour les couples (Hm0, Tp) fournit une énergie E annuelle moyenne de **137,4 MWh/m, soit une puissance P moyenne de 15,7 kW/m.**

Les résultats d'énergie E annuelle et de puissance P, présentés dans le Tableau 1, indiquent des variations de puissance allant de 9,35 à 20,8 kW/m sur le site.

Tableau 1. Résultats d'énergie annuelle et de puissance de houle des 9 points de sortie du site d'Esquibien

Point de sortie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E annuelle (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 site de Saint-Guérolé

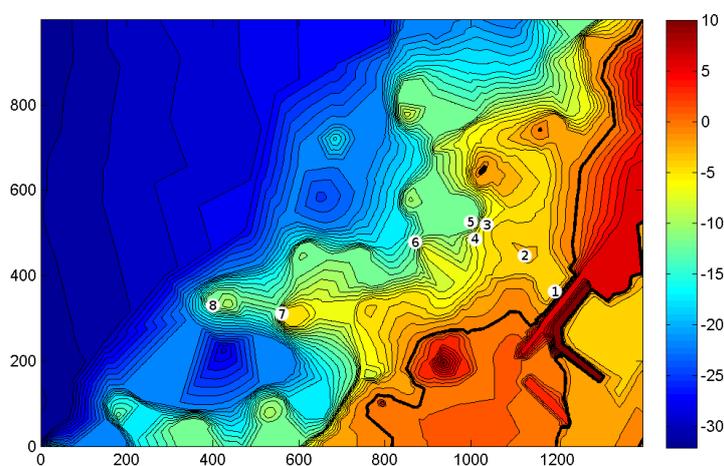


Figure 7. Carte bathymétrique du site de Saint-Guérolé et emplacements des 8 points de sortie

Tableau 2. Résultats d'énergie annuelle et de puissance de houle des 8 points de sortie du site de Saint- Guérolé

Point de sortie	1	2	3	4	5	6	7	8
E annuelle (MWh/m)	20,9	52,2	76,9	73,0	82,8	77,2	294,1	209,8
P (kW/m)	2,4	6,0	8,4	8,4	9,4	8,8	33,6	23,9

Le travail présenté dans ce rapport à l'aide de modèles numériques de simulation des vagues a permis de caractériser les conditions de vagues et d'évaluer le potentiel houlomoteur sur deux sites du Finistère. Le modèle numérique SWASH et les logiciels de pré et post-traitement associés sont des outils performants qui restituent des résultats de hauteurs et de puissances de houle à proximité des digues des sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé, en prenant en compte les processus d'interaction avec les ouvrages, comme la diffraction et la réflexion.

Signalons que la base de paramètres d'états de mer HOMERE utilisée en conditions de forçage, a fourni des données de houle sur une période suffisamment importante (1994-2012) pour permettre de réaliser des statistiques et des simulations représentatives du climat de houle aux abords des deux sites.

Les résultats de puissances de houle obtenus au plus près des digues d'Esquibien et de Saint- Guérolé sont respectivement de 11,4 kW/m et 2,4 kW/m. Ils sont différents des résultats obtenus en tranche 1 du projet EMACOP, avec un potentiel de 6,9 kW/m pour Esquibien et de 21,1 kW/m pour Saint-

Guérolé, qui s'expliquent par des données de forçage de houle différentes (utilisation de l'atlas numérique ANEMOC sur la période (1979–2003) en tranche 1), et des méthodes de calcul différentes (propagation de la houle par une formulation analytique simplifiée en tranche 1).

Pour le site d'Esquibien, le résultat obtenu en tranche 2 vient confirmer l'hypothèse d'une sous-estimation du potentiel indiqué en tranche 1, due à la configuration complexe du site, et de la prise en compte de la réflexion sur l'ouvrage.

De même, 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 de l'ouvrage, qui concentre par réfraction l'énergie des houles incidentes, avec des valeurs de 26 à 40 kW/m sur le haut fond ; ce qui ne pouvait pas être pris en compte dans la formulation analytique simplifiée. La modélisation numérique avec SWASH permet donc d'obtenir des résultats spatialisés sur les deux sites d'études, représentant un grand intérêt pour la caractérisation des zones de concentration d'énergie et l'évaluation fine des potentiels houlomoteurs aux abords immédiats des ouvrages des sites. La modélisation SWASH met en évidence la génération d'harmoniques sur petits fonds ainsi que la réflexion de la houle sur l'ouvrage.

Des informations complémentaires, comme les mesures in-situ de capteurs de pression posés au fond, ou des modélisations avec un modèle spectral à haute résolution doivent permettre de comparer et conforter ces résultats de simulations numériques. De même, un travail de recherche est envisagé pour caractériser les incertitudes des données de forçage de houle et des modèles numériques employés.

2.3 Dispositifs hydroliens sur ouvrages portuaires ou côtiers (S5)

Dans le cadre de la tâche S5, une étude de faisabilité technico-environnementale d'implantation de systèmes récupérateurs d'énergie hydrocinétique a été réalisée dans la zone des trois ponts à Bordeaux. Cette zone est caractérisée par la présence de trois ouvrages (de l'amont vers l'aval): la passerelle Eiffel, le pont ferroviaire, le pont routier Saint-Jean.



Une approche multicritères comprenant des composantes **environnementales, sociales et économiques** a été utilisée pour l'identification de la zone possible d'implantation d'hydroliennes sur des ouvrages de type pont. L'analyse des conditions environnementales (i.e., géographique, bathymétrique et hydrodynamique) a permis d'identifier des zones où la ressource hydrocinétique est la plus importante. D'après une modélisation numérique, cette zone se concentre essentiellement dans la **zone profonde située sous les ponts**. Or, étant donné que la morphologie des fonds est relativement homogène et que l'organisation générale des fondations de chacun des ponts est comparable, une zone a été retenue dans le cadre de cette étude : zone située coté rive droite en dehors du chenal principal de navigation entre les piles 2 et 3 de la passerelle Eiffel et entre les piles 1 et 2 du pont routier Saint-Jean. Cette zone de 75 m de large par 185 m de long occupe une surface de 1,39 Ha en dehors du chenal de navigation principal.

Ce site a fait l'objet d'analyses bathymétriques et courantologiques approfondies :

- ▶ Des relevés bathymétriques ont montré que le lit du fleuve est mobile, puisque la profondeur sondée à l'aplomb de la passerelle Eiffel varie d'une année sur l'autre. La profondeur minimale enregistrée dans l'axe central de l'arche est supérieure à 5.21 mètres.
- ▶ Dans le cadre de l'analyse de la ressource hydrocinétique, un courantomètre à effet Doppler (ADCP) a été déployé sous la passerelle Eiffel sur une période de 38 jours. Ce protocole de mesures a permis de caractériser les écoulements moyens (direction, vitesses max et moyennes) dans la zone d'étude et d'évaluer les vitesses de courant moyen sur une longue période afin d'obtenir des valeurs représentatives d'écoulement moyen annuel. Cette session de mesures de 38 jours a été effectuée pour permettre d'analyser les vitesses de courant avec différents coefficients de marée et pour un débit moyen. Les courants les plus intenses sont situés proches de la surface.

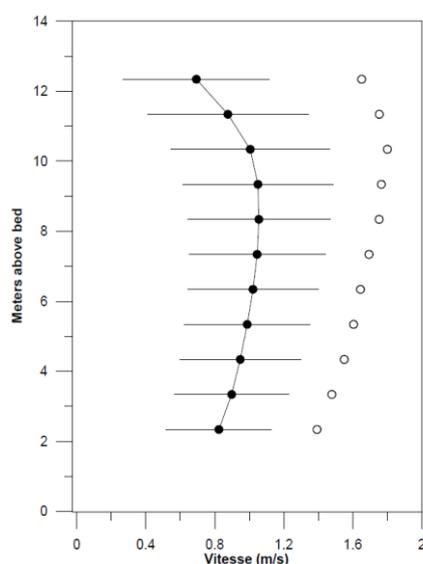


Figure 8. Profil des courants moyens avec incertitude (écart-type) et valeurs maximales instantanées

L'analyse de la ressource hydrocinétique a permis de quantifier le productible annuel par m^2 : le gisement le plus important permettrait d'extraire une énergie théoriquement exploitable de **6.5 MWh par m^2** .

Des solutions techniques quant à l'installation et l'exploitation des hydroliennes sont proposées pour favoriser l'acceptabilité environnementale et sociale du projet. Dans le cas défavorable, l'espace vertical disponible est de 6,3 m. On conservant une couche d'eau de sécurité de 1 m minimum au-dessus et en-dessous de l'hydrolienne, la hauteur de l'hydrolienne ne devra pas dépasser 4 m. De manière à permettre la continuité écologique et le passage des poissons migrateurs dans la zone, il est proposé que l'espacement entre les hydroliennes soit au minimum deux fois supérieur à la hauteur des machines.

L'hydrolienne doit être dimensionnée pour fonctionner dans les courants moyens les plus forts. Or les courants moyens dans la zone sont bidirectionnels. Pour permettre une production optimale, l'hydrolienne devra capter l'énergie cinétique des courants en surface dans les deux directions principales d'écoulement. Son positionnement, devra permettre de suivre les variations du niveau d'eau liées aux marées (cf. Figure 9).

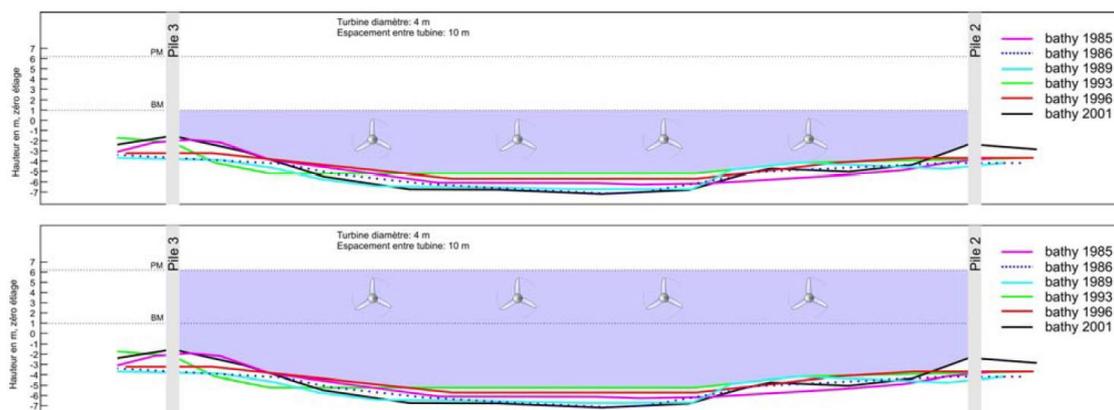
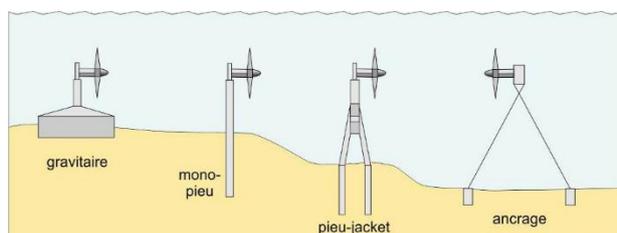


Figure 9. Proposition de positionnement des hydroliennes sous la passerelle Eiffel illustrant des variations de hauteur en fonction des marées : basse mer (en haut) et pleine mer (en bas).

Dans l'idéal, les turbines devront être positionnées et ancrées sur un axe parallèle aux ponts. Compte tenu de la proximité du pont ferroviaire, de la navigation, une première rangée de machines pourrait être positionnée en amont de la passerelle Eiffel entre les piles 2 et 3, une deuxième rangée dans la continuité de l'arche mais en aval du pont ferroviaire.

Pour assurer l'ancrage des hydroliennes, une structure porteuse est nécessaire pour maintenir la turbine sous l'eau. Les fondations peuvent prendre plusieurs formes (cf. §2.3) :

- ▶ fondation de types pieux foncés dans le sol ;
- ▶ système sur ouvrage existant ;
- ▶ structure flottante ;
- ▶ fondation à embase gravitaire ;
- ▶ structure entre deux eaux.



En conclusion, la zone d'étude retenue, au niveau des 3 ponts à Bordeaux, semble être techniquement la plus propice à la mise en place d'hydroliennes estuariennes. En effet, plusieurs critères apparaissent comme favorables :

- ▶ ressource énergétique,
- ▶ prédictibilité de la ressource (courant de marée dominant),
- ▶ proximité du raccordement et des servitudes portuaires,
- ▶ espace disponible (bathymétrie et superficie de la zone).

3 Avancement des tâches « Outils »

3.1 Outils d'évaluation du rendement des dispositifs houlomoteurs (O1)

3.1.1 Dispositifs de type batteur inversé (D2)

L'objectif de la tranche 2 du projet EMACOP est de poursuivre les développements par l'Ecole Centrale de Nantes des outils d'évaluation du rendement initiés en tranche 1 du projet pour les dispositifs de type **batteur inversé** (D2).

Des outils numériques **fréquentiel et temporel** d'évaluation des performances énergétiques des dispositifs houlomoteurs de type batteur inversés perçant la surface libre placés devant une digue parfaitement réfléchissante ont été développés. Les simulations ont été effectuées en considérant une direction de houle incidente perpendiculaire à la digue. Les matrices de puissance de ces dispositifs ont été évaluées pour des géométries de flaps **adaptées aux sites de Saint-Jean-de-Luz et Bayonne**.

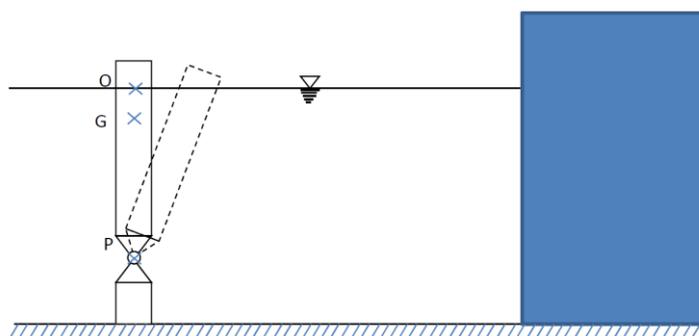


Figure 10. Configuration de couplage flap-digue

Les simulations effectuées ont permis de quantifier les pertes par effet visqueux avec une diminution de puissance de l'ordre de 40% par rapport au modèle sans prise en compte des effets visqueux. Un calcul complet de matrice de puissance sera effectué afin de quantifier plus précisément ces pertes par effets visqueux. Egalement, le calcul actuel est effectué en utilisant des coefficients de traînée issus de la littérature.

Les résultats de puissance moyenne annuelle brute absorbée par le PTO (P_{w1}), estimés sur les sites de Saint-Jean-de-Luz et Bayonne en prenant en compte les pertes par effet visqueux sont donnés dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3. Puissances moyennes absorbées sur les sites de Bayonne et Saint-Jean-de-Luz, avec prise en compte des pertes par effets visqueux

		Flap seul	Flap à 15m	Flap à 30m	Ressource (kW/m)
Saint Jean de Luz	P_{w1} (kW)	152	318	349	16.5
	η (%)	46	96	1.05	
	P_{w2} élec (kW)	106	223	243	
Bayonne	P_w (kW)	-	373	-	22
	η (%)	-	85	-	
	P_{w2} élec (kW)		262		

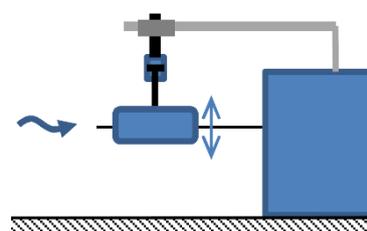
Pour le flap à 15m devant la digue, le *capture width ratio* est légèrement plus élevé sur le site de Saint-Jean-de-Luz que sur le site de Bayonne. Il est remarquable de constater que le *capture width ratio* est multiplié par 2 par rapport à une configuration de flap isolé.

En prenant en compte un rendement de convertisseur de 70%, pour un flap placé à 15m devant la digue, la **puissance moyenne électrique disponible P_{w2} estimée sur le site de Saint-Jean-de-Luz est de 223kW ; elle est de 262 kW sur le site de Bayonne.**

3.1.2 Dispositifs de type flotteur pilonnant (D3)

L'objectif de la tranche 2 du projet EMACOP est de poursuivre les développements des outils d'évaluation du rendement initiés en tranche 1 du projet. Pour les dispositifs D3 de type flotteur pilonnant placés devant une digue, les modèles fréquentiel et temporel développés ont permis :

- ▶ d'estimer numériquement la matrice de puissance
- ▶ de calculer la puissance moyenne absorbée sur les sites de Saint-Jean-de-Luz et Bayonne



Les résultats de puissance moyenne annuelle brute absorbée par le PTO (P_{w1}) calculés pour les sites de Bayonne et Saint-Jean-de-Luz sont présentés dans le Tableau 4. Dans le cas du flotteur placé à 10m devant la digue, le *capture width ratio* calculé est de 38% à Bayonne et 32% à Saint-Jean-de-Luz : pour cette configuration, du point de vue du rendement le site de Bayonne est plus intéressant que le site de Saint-Jean-de-Luz.

Tableau 4. Puissances moyenne annuelle absorbées

		Flotteur seul	Flotteur à 10m	Flotteur à 30m	Ressource (kW/m)
Saint Jean de Luz	P_{w1} (kW)	26	53	26	16.5
	η (%)	16	32	16	
	P_{w2} élec (kW)	18	37	18	
Bayonne	P_{w1} (kW)	-	83	-	22
	η (%)	-	38	-	
	P_{w2} élec (kW)		58		

Les *capture width ratio* (CWR) calculés restent relativement faibles, mais il est particulièrement remarquable de noter que les configurations d'installation du flotteur proche de la digue (10m) permettent de doubler le rendement hydrodynamique. Cet effet se réduit au fur et à mesure que le flotteur est installé plus loin de la digue.

En prenant en compte un rendement de convertisseur de 70%, pour une bouée placée à 10m devant la digue, la **puissance moyenne électrique disponible estimée sur le site de Saint-Jean-de-Luz est de 37kW ; elle est de 58kW à Bayonne.**

3.1.3 Dispositifs de type colonnes d'eau oscillantes (OWC – D4)

Les études menées dans le cadre de cette tâche ont permis de mettre en œuvre le code AQUADYN-OWC sur des cas-tests de colonnes d'eau oscillantes (OWC), puis de développer une chaîne de calcul permettant d'évaluer numériquement la matrice de puissance pneumatique d'une OWC.

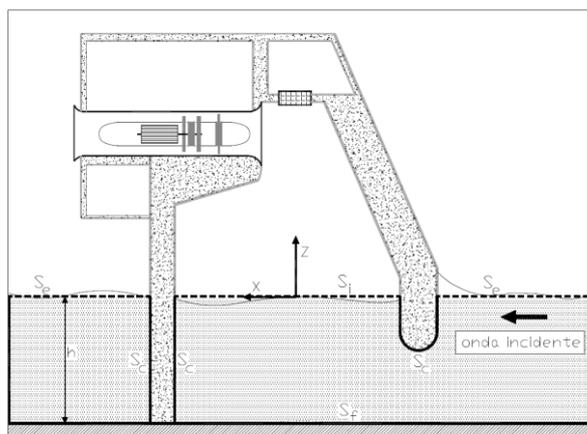


Figure 11. Schéma de principe de l'OWC – Source : Thèse A. Brito Melo

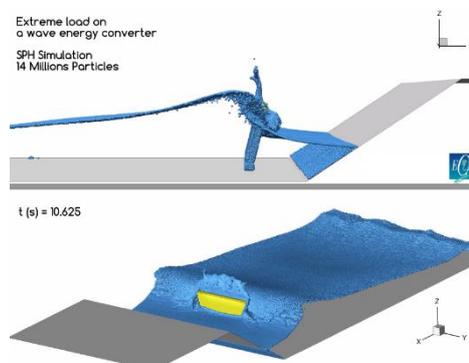
Le rendement pneumatique de l'OWC ainsi que la matrice de puissance ont été calculés pour un coefficient d'amortissement de turbine de $219 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$. A partir de cette matrice de puissance, et des données de probabilité d'occurrence des états de mer sur le site de Pico² (qui conduisent à une estimation du potentiel houlomoteur de $23\text{kW}/\text{m}$), la puissance pneumatique moyenne de l'OWC a été calculée, puis comparée aux résultats d'Anna Brito-Melo² obtenus à partir d'une évaluation expérimentale des fonctions de transfert, et d'un modèle mathématique de l'OWC.

Il est constaté que la chaîne de calcul développée permet d'obtenir un **bon ordre de grandeur de la puissance pneumatique d'une OWC**. Toutefois, des incertitudes persistent dans l'utilisation du code AQUADYN-OWC, et des problèmes numériques subsistent pour certains types de géométries d'OWC. Les développements devraient donc être poursuivis pour identifier et résoudre les problèmes numériques, ce qui permettrait également de quantifier les incertitudes et de valider l'utilisation du code AQUADYN-OWC et de la chaîne de calcul associée pour évaluer le rendement des OWC.

3.2 Outils d'évaluation de la survivabilité des dispositifs houlomoteurs (O1)

3.2.1 Dispositifs de type batteur inversé (D2)

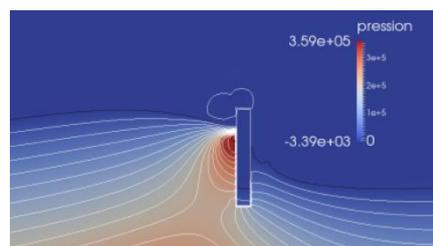
- **Approche ECN** : l'effet de chargements extrêmes sur le dispositif D2 a été évalué dans plusieurs configurations par un logiciel basé sur la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Cette méthode numérique, caractérisée par une approche lagrangienne, permet la simulation d'écoulements violents avec de fortes déformations de la surface libre. En particulier, le logiciel 'SPH-Flow' développé au sein de l'ECN en collaboration avec l'entreprise HydrOcean a été validé sur de nombreux cas-tests, notamment de simulation d'événements extrêmes. Pour évaluer correctement les chargements sur les structures, des variantes de la méthode SPH standard ont été utilisées. En effet, les signaux de pression obtenus par la méthode standard sont généralement fortement



² Brito-Melo A. – Modélisation de la centrale européenne à énergie des vagues sur l'île de Pico, Açores – Thèse de doctorat, IST / ECN – 1999

bruités. Les variantes développées à l'ECN, notamment les méthodes Riemann-SPH et δ -SPH, permettent d'obtenir des prédictions de chargements bien plus précises avec un faible surcoût de temps de calcul. Le site d'étude spécifique est la digue de Tarnos sur la côte de Bayonne dont les données géométriques et d'état de mer ont été partagées. En première approximation les caractéristiques de la vague dimensionnante proche de la côte ont été calculées par le biais de formules semi-empiriques (formule de Goda), puis une vague avec ces caractéristiques a été générée dans un bassin numérique avec un générateur de houle.

- ▶ **Approche UPPA : Le lieu de référence choisi pour cette étude est l'extrémité de la digue** du port de Bayonne. Le modèle UPPA a dans un premier temps été validé sur des cas académiques, ce qui a permis de montrer la difficulté de simuler des impacts impulsifs extrêmes (i.e. impliquant une incidence de la surface libre quasi nulle). Cette difficulté n'est pas propre au modèle mais plus à la physique impliquée dans ce type d'impact. Les conditions extrêmes ont ensuite été estimées au lieu de référence puis appliquées sur les systèmes D2. Les simulations réalisées en configuration de sécurité montrent que les efforts sont dans ce cas plus limités que pour les colonnes d'eau oscillantes (D4).



3.2.1 Dispositifs de type colonnes d'eau oscillantes (OWC – D4)

L'étude de la survivabilité des dispositifs houlomoteurs de type colonnes d'eau oscillantes (D4) a été abordée par 2 équipes, selon différentes approches : Université de Pau et du Pays de l'Adour (UPPA) et Université du Havre (ULH).

- ▶ **Approche UPPA :** Cette contribution a été consacrée à l'estimation des efforts extrêmes susceptibles d'être générés sur les systèmes houlomoteurs à colonne d'eau oscillante. Le lieu de référence choisi pour cette étude est l'extrémité de la digue du port de Bayonne. Le modèle a été validé dans un premier temps sur des cas académiques, ce qui a permis de montrer la difficulté de simuler des impacts impulsifs extrêmes (i.e. impliquant une incidence de la surface libre quasi nulle). Cette difficulté n'est pas propre au modèle mais plus à la physique impliquée dans ce type d'impact. Les conditions extrêmes ont ensuite été estimées au lieu de référence appliquées au dispositif D4. **Il est ainsi montré que le système à colonne d'eau oscillante est soumis à un chargement extrême après l'impact sur le mur frontal lorsque l'eau pénètre dans la chambre.** Le problème n'est pas réellement solutionné par l'utilisation d'événements et pourrait réduire le champ d'utilisation de cette technique à des profondeurs inférieures à 10m.
- ▶ **Approche ULH :** L'objet était d'évaluer les contraintes de pression que pourra subir l'ouvrage dans les conditions locales de houle afin de préparer à son pré-dimensionnement. En effet de tels systèmes ont déjà été installés à différents endroits du monde (île de Pico aux Açores, île d'Islay en Ecosse) mais ces récupérateurs d'énergie sont parfois mis à rude épreuve lorsque la mer est déchaînée. La méthode utilisée est celle de la simulation numérique d'écoulements par la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). Il s'agit d'une méthode instationnaire Lagrangienne particulière. Le laboratoire LOMC développe son propre code de calcul, nommé "Josephine", et qui est libre (open source). Il aura été nécessaire de l'adapter pour permettre de simuler l'impact d'une solution sur une géométrie idéalisée de type 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). Aucun blocage algorithmique n'a été identifié pour ce travail. La méthode SPH utilisée

converge (en espace et en temps) sur ces cas d'impact bref et intense. C'est un point très positif. Les pressions obtenues sont actuellement comparables aux pressions mesurées, sans que ces dernières soient pour autant précisément reproduites.

3.3 Evaluation du potentiel houlomoteur d'un site (O2)

L'évaluation du potentiel houlomoteur d'un site, étudiée en tranche 2, est dans la continuité du travail de la première tranche qui s'est concentré sur l'analyse et la caractérisation des états de mer multimodaux en développant une boîte à outils sous la forme d'un programme capable d'opérer la décomposition spectrale en systèmes de vagues (mer du vent et houle). Au cours de cette deuxième tranche, le but était de **quantifier l'apport de la décomposition spectrale des états de mer sur l'évaluation de la ressource houlomotrice**. Le travail consistait donc à choisir un site connu par son fort potentiel houlomoteur, à décomposer le spectre de vagues au large du site en systèmes de houle et de mer du vent, à calculer les paramètres réduits pour chaque partition et à les propager jusqu'à la côte en se basant soit sur les formules analytiques de Goda (utilisées par Open Ocean) soit sur le modèle numérique de propagation SWAN (utilisé par GlobOcean). Le potentiel houlomoteur peut être déduit par la suite. Open Ocean et GlobOcean ont suivi le schéma précédent afin d'évaluer le potentiel houlomoteur au large et à la côte du site choisi et de quantifier les incertitudes par rapport au potentiel calculé directement à partir des spectres disponibles.

L'évaluation du potentiel houlomoteur d'un site repose essentiellement sur le calcul du flux d'énergie des vagues à travers une surface verticale fictive. Il existe deux méthodes pour estimer la puissance des vagues :

- ▶ une approximation des eaux profondes dite AEP valable essentiellement au large du site étudié ;
- ▶ une autre formulation plus fine appelée CgE, basée sur une approche spectrale qui livre une valeur plus précise du potentiel disponible.

Un état de mer complexe ne peut en effet être décrit fidèlement qu'à travers un spectre directionnel, qui représente la répartition des densités d'énergie en fonction des fréquences et des directions.

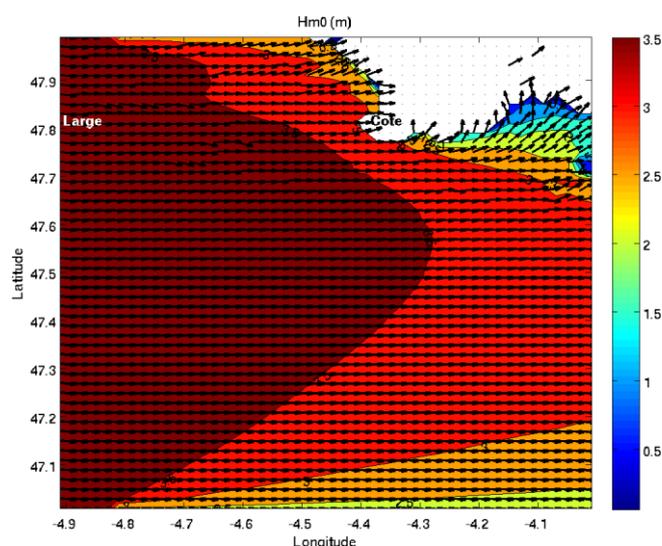


Figure 12. Exemple de propagation : les états de mer sont principalement d'ouest (Situation du 1 Janvier 2012 à 00h TU).

L'étude de tranche 2 présente la **comparaison** entre l'évaluation du potentiel houlomoteur de spectres de vagues reconstitués à l'aide d'une formulation de Jonswap d'une part et des spectres de vagues disponibles à partir de la base de données HOMERE d'autre part. La quantification des incertitudes a révélé les conclusions suivantes :

- ▶ Une incertitude de 4 % a été obtenue au large de Saint-Guénolé entre ces deux méthodes. L'erreur provient essentiellement de la reconstitution spectrale puisque le spectre issu de la formulation de Jonswap reste un spectre analytique qui ne s'ajuste pas parfaitement au spectre omnidirectionnel de départ, notamment dans le cas d'états de mer multi-modaux. Le potentiel houlomoteur au large du Site Saint-Guénolé est de l'ordre de 40 kW/m. Open Ocean et GlobOcean ont obtenu des résultats qui convergent, les méthodes de calcul pour le large étant en effet quasi-identiques.
- ▶ A la côte, l'incertitude relative reste assez faible (entre 4 et 5 %) considérant les spectres reconstitués après décomposition spectrale à partir du spectre HOMERE à la côte. L'erreur provient toujours de la reconstitution avec la formulation de Jonswap.
- ▶ Cette incertitude augmente pour atteindre 10% pour les calculs menés par Open Ocean avec la méthode de propagation des paramètres de chaque système détecté au large à l'aide des formules analytiques de Goda puis la reconstitution des spectres à la côte. En effet, à l'erreur relative inhérente à la formulation de Jonswap vient s'ajouter l'erreur due à la propagation. La méthode de Goda reste néanmoins une bonne solution pour une évaluation préliminaire du potentiel houlomoteur à la côte sans avoir recours à un modèle numérique et à une base de données assez complexes et coûteux à développer.
- ▶ L'étude de sensibilité réalisée pour la période 2012 a permis d'expliquer en partie les divergences entre les Hs issus de SWAN et ceux fournis par la base de données HOMERE. Les résultats issus de la méthode Goda produisent des résultats assez proches de HOMERE. Cependant cette méthode a été appliquée avec des paramètres géométriques non conformes à la bathymétrie SHOM.
- ▶ Le flux d'énergie à la côte de Saint-Guénolé est estimé à **23 kW/m** c'est-à-dire presque la moitié du potentiel disponible au large. Cette diminution considérable étant due aux différentes transformations et interaction avec le fond, que subissent les vagues lors de leur propagation vers la côte.
- ▶ Afin de réduire l'incertitude due à la combinaison des actions de partitionnement / propagation / reconstitution, Open Ocean a utilisé la méthode de la formulation de Jonswap modifiée et a ainsi considérablement amélioré les spectres reconstitués à la côte en les ajustant au mieux aux spectres fréquentiels initiaux de la base de données HOMERE. Cette modification a eu un impact direct sur la puissance de vagues obtenue à la côte qui a convergé vers celle calculée directement à partir du spectre HOMERE, **l'erreur relative passant en effet de 10% à seulement 1% en suivant cette méthode.**
- ▶ De nouvelles simulations SWAN avec une résolution plus fine et la prise en compte d'un vent plus précis seraient intéressantes à effectuer afin de réduire également l'erreur relative de cette méthode.

3.4 Impact hydrosédimentaire local et régional (O3)

La tâche O3 s'intéresse aux impacts hydrosédimentaires des EMR à la fois localement sur l'ouvrage et rétroactivement sur l'environnement de l'ouvrage. Lors de la tranche 1, la tâche O3 a consisté à réaliser un état des connaissances actuelles de la caractérisation des impacts hydro-sédimentaires

potentiels générés par un parc de structures immergées et à inventorier des outils numériques disponibles pour la quantification de ces impacts pour les trois filières de récupération d'énergie suivantes : (i) l'énergie éolienne offshore « posée » (en phase de déploiement industriel) ; (ii) l'énergie hydrolienne qui utilise l'énergie cinétique des courants via une turbine (en phase de démonstration) ; (iii) l'énergie houlomotrice qui utilise l'énergie des vagues (en phase de démonstration également).

A l'issue de cet état des connaissances, des verrous scientifiques à lever ont été identifiés et un programme a été établi. La tranche 2 avait pour objet la modélisation (de type CFD) du système houlomoteur avec ou sans ouvrage et la détermination des coefficients de traînée et d'inertie pour des conditions réalistes sur site. L'étude s'appuie sur deux contributions :

- ▶ **la modélisation hydrodynamique du volet oscillant (FLAP)** par ARTELIA. La modélisation du volet oscillant est réalisée à l'aide de l'outil numérique OpenFOAM. Après un test relativement concluant quant à la stabilité du système en 2D, un canal à houle a été implémenté en 3D. Ce canal a une longueur de 100m, une largeur de 40m et une profondeur de 15m. Le volet est disposé en son milieu. Les recherches se sont concentrées sur la méthode dite du « morphing », dans laquelle le maillage dans le voisinage de l'objet en mouvement se déforme. Cette méthode est sans doute, à l'heure actuelle, la mieux adaptée à ce type de mouvement qui est implémentée dans le logiciel OpenFOAM. Cette méthode contraint fortement le mouvement du volet à de petites oscillations angulaires. Si le déplacement du volet dépasse une certaine limite, le maillage se déforme au-delà des critères acceptables, et le calcul ne peut plus continuer. Une perspective de solution serait d'améliorer le 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).

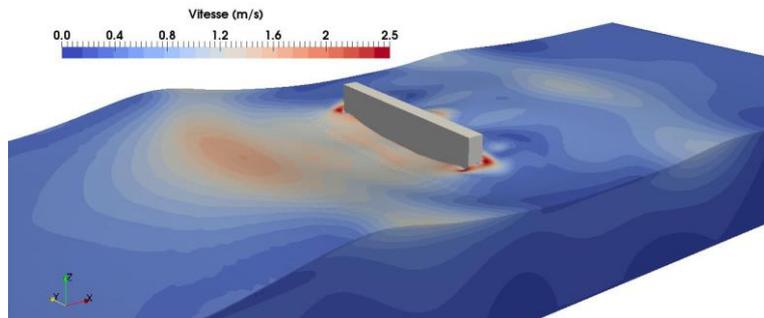


Figure 13. Illustration des champs de vitesse 3D autour du volet soumis à une houle normale, obtenus par modélisation CFD 3D

- ▶ **la modélisation hydrodynamique du flotteur** par l'UTC. Il s'agit d'une part de modéliser la dynamique d'un flotteur semi-submergé dans un bassin à houle en fonction de sa position dans le domaine modélisé, et d'autre part d'estimer l'énergie à récupérer dans chaque configuration, et également de préparer le modèle pour d'autres configurations prévues dans le PN EMACOP. Une modélisation numérique effectuée par le modèle CFD OpenFoam version 2.3.0 a été faite en résolvant les équations complètes 3D de Navier-Stokes pour le milieu fluide, qui ont été couplées aux équations 1D-V (1DOF vertical) pour le transport de solide rigide (le flotteur). Le modèle couplé Fluide-Solide reproduit assez bien le comportement général de la propagation des vagues en présence du flotteur.

3.5 Dimensionnement de l'ouvrage et étude socio-économique (O4)

Cette étude consiste à optimiser un dispositif à franchissement sur le site de Saint-Jean-de-Luz. La méthodologie générale de l'étude en tranche 2 s'articule autour de 3 axes :

- ▶ Etude de sensibilité de la solution proposée à différents paramètres ;
- ▶ Estimation préliminaire du coût ;
- ▶ Estimation de la solution optimale en termes de coût au kWh produit.

L'étude de la tranche 2 traite uniquement des **dispositifs de franchissement**. Le site retenu pour cette tâche est celui de Saint-Jean-de-Luz dont la topographie est mieux connue.

Le pré-dimensionnement du génie civil a été mené de façon simplifiée en estimant les efforts internes principaux dans la structure puis les épaisseurs et emplacements des principaux appuis et dalles. Il est à noter que l'on ne dispose que de très peu d'informations sur les structures existantes et les fondations, ce qui rend ce travail difficile et approximatif.

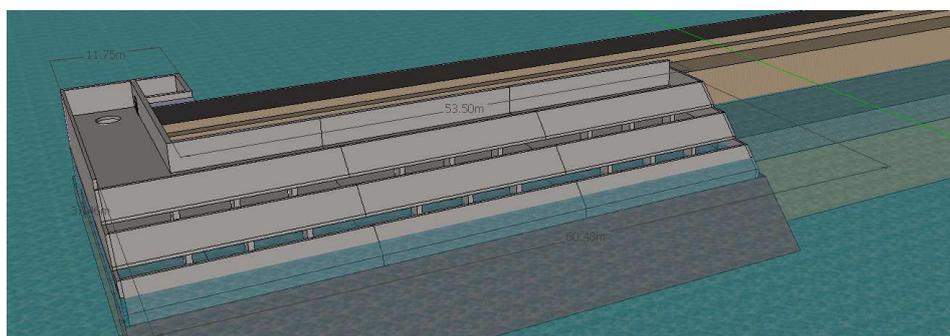


Figure 14. Exemple de schématisation de l'implantation d'un système à franchissement sur le site de Saint-Jean-de-Luz

L'impact des aménagements envisageables sur le coût du kWh produit est évalué. La sensibilité du prix au kWh produit a été étudiée suivant les paramètres suivants : taille des bassins, capacité des turbines (puissance installée), nombre de bassin. 8 configurations ont été envisagées en tout :

- ▶ solution de référence (3 bassins espacés de 2 m, largeur 16, 12 et 8 m respectivement),
- ▶ cas 2 : augmenter la largeur des bassins,
- ▶ cas 3 : diminuer la largeur des bassins,
- ▶ cas 4 : augmenter la puissance des turbines,
- ▶ cas 5 : diminuer la puissance des turbines,
- ▶ cas 6 : supprimer le bassin supérieur,
- ▶ cas 7 : cas 6 + recentrer les 2 bassins,
- ▶ cas 8 : 4 bassins de plus petite taille.

D'une façon générale, le coût de l'installation varie de manière presque linéaire en fonction de la production annuelle : il n'y a pas de solution idéale qui permet de produire plus sans coût supplémentaire.

La Figure 15 ci-après présente les coûts d'investissement et les productions des 8 cas étudiés.

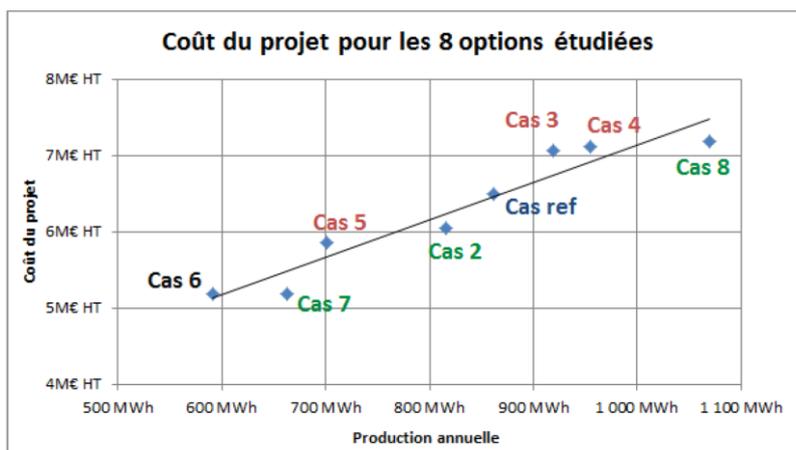


Figure 15. Coûts d’investissement et les productions des 8 cas étudiés

La Figure 16 ci-dessous compare les solutions étudiées en termes de coût du MWh produit réparti sur 30 ans de production.

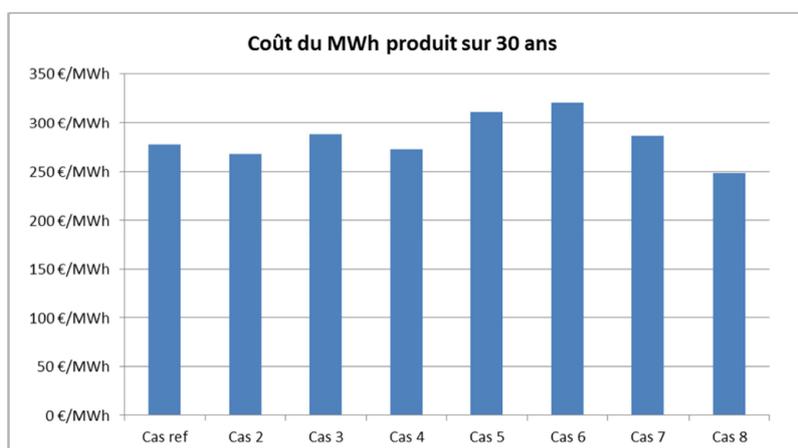


Figure 16. Coûts d’investissement en fonction de la production annuelle

L’analyse montre que le prix ainsi calculé, 250 €/MWh, représente plus du double du prix de vente de l’électricité constaté sur les installations hydroélectriques utilisant l’énergie des rivières (mécanisme d’obligation d’achat, entre 85 et 125€/MWh suivant la puissance et la régularité de la production).

Le prix du kW installé est quant à lui d’environ 4000 €/kW. Ce prix est faible par rapport aux installations hydroélectriques en rivière (3000 à 12000 €/kW pour les basses chutes) mais le facteur de charge (nombre d’heures équivalent pleine puissance) de 535 heures/an est largement en dessous (environ 2000 heures/an pour les installations de pointe, plus de 4000 heures/an pour les installations au fil de l’eau). La rentabilité de l’installation est très pénalisée par la variabilité et le caractère intermittent de la production électrique.

4 Valorisation

Les communications et publications sur les résultats établis dans le cadre du projet national EMACOP sont fournies ci-dessous :

Articles scientifiques				
Simulations numériques de l'impact de la houle sur une paroi verticale par la méthode SPH	X.Z. Lu, J.-M. Cherfils, G. Pinon, E. Rivoalen, J. Brossard	In 21ème Congrès Français de Mécanique	26/08/2013	Bordeaux, France
An overview of analytical, numerical and experimental methods for modelling oscillating water columns	V. Baudry, A. Babarit, A.H. Clement	10th EWTEC conference	02/09/2013	Aalborg, Denmark
EMACOP Project: Assessment of Wave Energy Resource Along France's Coastlines	G. Dufour, B. Michard, E. Cosquer, E. Fernagu	Marine Structures and Breakwaters conference	18/09/2013	Edinburgh, UK
SPH Numerical computations of wave impact onto a vertical wall	X. Lu, J.-M. Cherfils, G. Pinon, E. Rivoalen, J. Brossard	9th SPHERIC International Workshop	02/06/2014	Paris, France
Evaluation du potentiel houlomoteur de 22 sites français en Manche et Atlantique	B. Michard, E. Cosquer, G. Dufour	13èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil	02/07/2014	Dunkerque, France
Modélisation par la méthode SPH de l'impact de la houle sur une paroi verticale	X. Lu, J.-M. Cherfils, G. Pinon, E. Rivoalen, J. Brossard	13èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil	02/07/2014	Dunkerque, France
Projet EMACOP : modélisation numérique des vagues à l'approche de la digue d'Esquibien par le code SWAS	J. Coignard, B. Michard, J.-F. Filipot, P. Sergent	13èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil	02/07/2014	Dunkerque, France
Numerical modeling of the effect of tidal stream turbines on the hydrodynamics and the sediment transport	J.Thiebot, P. Bailly du Bois, S. Guillou	Renewable energy	01/03/2015	
Assessment of Navier-Stokes Modelling of an oscillating Water Column wave energy converter	V. Rameliarison, D. Astruc, G. Chapalain	EWTEC - 11th European Wave and Tidal Energy Conference	06/09/2015	Nantes, France
EMACOP project: characterising the wave energy resources of hot spots in Brittany for on-shore WEC	B. Michard, E. Cosquer, A. Mallégol, J. Coignard, G. Amis, J.-F. Filipot, K. A. Kpogo-Nuwoklo, M. Olagnon, F. Ropert, P. Sergent	EWTEC - 11th European Wave and Tidal Energy Conference	06/09/2015	Nantes, France

Power matrix assessment and extreme loads estimation on a flap type wave energy converter in front of a dike	V. Baudry , S. Marrone , A. Babarit, D. Le Touzé , A.H. Clément	EWTEC - 11th European Wave and Tidal Energy Conference	06/09/2015	Nantes, France
A comparative study of the wave energy collected at Saint Jean de Luz (France) by an overtopping converter and a flap activated converter	M. Mory , J. Dugor , V. Baudry , A. Babarit , A.H. Clement	EWTEC - 11th European Wave and Tidal Energy Conference	06/09/2015	Nantes, France