



HAL
open science

Houlogénérateurs : projets, verrous et quelques solutions

T Kovaltchouk, H Ben Ahmed, B. Multon, J. Aubry

► **To cite this version:**

T Kovaltchouk, H Ben Ahmed, B. Multon, J. Aubry. Houlogénérateurs : projets, verrous et quelques solutions. 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CIS-TEM), Oct 2016, Marrakech, Maroc. hal-01653423

HAL Id: hal-01653423

<https://hal.science/hal-01653423>

Submitted on 1 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Houlogénérateurs : projets, verrous et quelques solutions

T. Kovaltchouk, H. Ben Ahmed, B. Multon, J. Aubry
 SATIE, ENS Rennes, Université Bretagne Loire, CNRS, 35170 Bruz
 Tel: 33 (0)2-99-05-93-30 - Fax: 33 (0)2-99-05-93-28
 benahmed@ens-rennes.fr

Résumé—Cet article présente les systèmes récupérateurs de l'énergie des vagues ou encore systèmes houlogénérateurs. Après un bref panorama du potentiel énergétique des vagues et les divers systèmes récupérateurs en cours d'étude et/ou de développement, nous décrivons le principe de fonctionnement d'un système houlogénérateur direct particulier dénommé SEAREV. Une synthèse des travaux de recherche effectués au sein de notre équipe au laboratoire SATIE, site de l'ENS Rennes sur ce sujet sera proposée en y associant les principaux résultats obtenus.

Mots clés —Energies marines, récupérateurs d'énergie, houle, houlo-générateur direct, contrôle optimal, lissage, flicker, gestion optimisée du stockage, dimensionnement sur cycle de vie.

I. RESSOURCES ÉNERGÉTIQUE DES MERS

Les océans et les mers constituent un immense gisement énergétique. Les ressources utilisables sont diverses [1, 2, 3] : chaleur solaire marine [4, 5], éolien offshore [6, 7, 8, 9], biomasse végétale océanique [8], les courants océaniques continus [13], l'énergie osmotique [14], les courants des marées [11, 12], et enfin, l'énergie houlomotrice [15] à ne pas confondre avec les précédents systèmes. Le tableau I propose un bilan global des ressources océaniques. Les chiffres sont à ne surtout pas prendre au pied de la lettre, il s'agit d'ordres de grandeur.

Pour comparaison, la production mondiale annuelle d'électricité en 2015 était d'environ 23 000 TWh. Pour la même année, la production française était de 546 TWh (évolution de +1.1% par rapport à 2014) pour une puissance installée de 129.3 GW. Au niveau du Maghreb (Tunisie, Algérie, Maroc), la consommation est d'environ 85 TWh (évolution de près de +7%) pour une puissance installée de 23 MW [16]. On s'intéresse dans ce qui suit spécifiquement à l'énergie houlomotrice en précisant tout d'abord les paramètres caractéristiques.

TABLEAU I. ORDRES DE GRANDEURS DES RESSOURCES MARINES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Energies annuelles 10 ¹² kWh (10 ³ TWh)	estimation globale	part primaire exploitable	énergie électrique récupérable
Solaire océans	400 000	4 000	80 (η 2%)
Courants océaniques continus	?	1 ?	0,3 ? (η 30%)
Biomasse marine	450	4 (1/100 ^{thème})	1 (η 25%)
Eolien offshore	>> 500	100	37 (η 37%)
Cycles hydrologiques			
Houle	80	2	0,75 (η 35%)
Osmotique	30	0,3 ?	0,1 ? (η 30%)
Marées			
Estuaires		0,6	0,6
Courants	22	1,8	0,9

II. SYSTEMES HOULO-GENERATEURS (WEC : WAVE ENERGY CONVERTERS)

A. Caractéristiques énergétiques de la houle

Les vagues sont créées et entretenues localement par le vent et prennent la même direction que lui, leur période excède rarement 8 secondes. La houle, quant à elle, se propage en dehors de la zone où le vent lui a donné naissance, avec des oscillations plus lentes, typiquement de 10 secondes, avec une grande longueur d'onde (150 m) et une vitesse de propagation (ou vitesse de phase) d'environ 14 m/s. La période peut atteindre 25 secondes et la longueur d'onde 900 m par très grosse mer (36 m/s).

La puissance d'une vague progressive pure (parfaitement sinusoïdale et unidirectionnelle) peut se calculer assez aisément si la profondeur du milieu dans lequel elle se propage est supposée infinie (en pratique plus grande que la demi-longueur d'onde). Dans ces conditions, on peut démontrer [19] que la puissance (moyenne) transmise par unité de largeur de front de vague dans la direction de propagation s'exprime par :

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{32\pi} \cdot H^2 \cdot T \approx 980 \cdot H^2 \cdot T \text{ (W/m)} \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, H est la hauteur crête à creux de la houle et T sa période. Avec de l'eau de mer (masse volumique de 1024

kg/m³), le coefficient $\frac{\rho \cdot g^2}{32\pi}$ vaut environ 980 unités SI.

Pour une mer irrégulière dont le spectre est spécifié par la hauteur significative H_s et sa période T_p (cf. §III) on obtient :

$$P_w \approx 420 \cdot H_s^2 \cdot T_p \text{ (W/m)} \quad (2)$$

L'énergie électrique effectivement récupérée dépend ensuite de la largeur de houle captée, de l'efficacité du dispositif de conversion et de la productivité du site considéré. Sur la figure 1 est donné un exemple de distribution H_s , T_p et la puissance moyenne houlomotrice annuelle sur l'île d'Yeu (France).

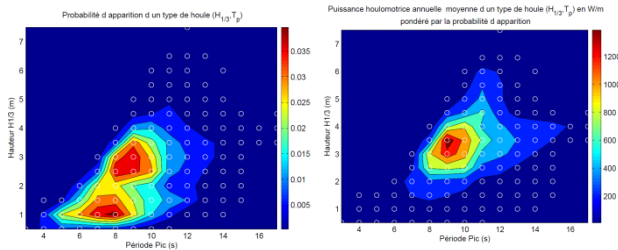


Figure 1. Exemple de probabilité d'apparition et puissance houlomotrice moyenne annuelle (Site d'Ile d'Yeu, France) [33]

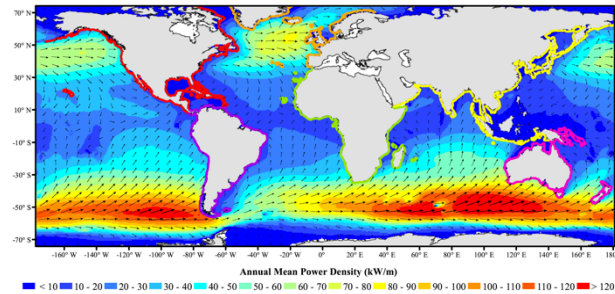


Figure 2. Distribution mondiale de la ressource énergétique moyenne de la houle ([46])

En mesurant la houle en différents points du globe sur plusieurs années, on est en mesure de dresser des cartes de la ressource moyenne disponible (figure 2).

En intégrant ces chiffres sur l'ensemble des mers du globe, on obtient une estimation de la ressource disponible. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie (IEA : <http://www.iea.org>) estime que l'énergie extractible dans le monde est d'environ 1500 TWh/an, soit 7% de la demande annuelle mondiale actuelle en électricité. La puissance théorique du flux d'énergie des vagues arrivant sur le littoral de la France métropolitaine est estimée à 40 kW/m. Le littoral français est plutôt bien exposé, la ressource théorique disponible en énergie des vagues arrivant sur les côtes atlantiques de la France métropolitaine étant estimée à 420 TWh/an (une estimation basse donne 42 TWh/an d'énergie récupérable). Cette quantité d'énergie primaire avoisine la consommation d'énergie finale électrique en France, de l'ordre de 446 TWh/an en 2015. En mer Méditerranée (cf. figure 3), la ressource houlomotrice est relativement pauvre comme le montre la figure ci-dessous.

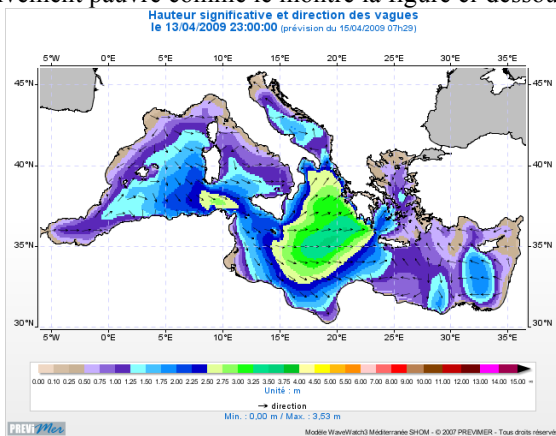


Figure 3. Distribution de la hauteur significative et direction de vent en méditerranée

Les principaux pays pouvant profiter de cette énergie sont donc ceux possédant des longueurs de côtes importantes et situés aux latitudes les plus productives :

- en Amérique : les États-Unis, le Canada et le Chili ;
- en Afrique : le Maroc, la Namibie et l'Afrique du Sud ;
- en Océanie : l'Australie et la Nouvelle-Zélande ;
- en Asie : la Russie, le Japon, la Corée, l'Inde et la Chine
- en Europe : la Norvège, le Royaume-Uni, l'Irlande, le Danemark, la Belgique, la France, l'Espagne et le Portugal.

Les principaux travaux de recherches, centres de tests et projets industriels autour de l'énergie des vagues ont donc assez naturellement émergé dans ces pays.

B. Systèmes de conversion houle-générateurs

Depuis les années 1970, de très nombreux dispositifs ont été imaginés, brevetés et/ou testés [20] mais il n'est pas possible d'en faire ici un inventaire. Cependant, en dehors des inclassables, on peut proposer une classification simplifiée [19], [21] :

- systèmes à déferlement ;
- systèmes à colonne d'eau oscillante ;
- systèmes mus par la houle.

Un second critère est celui de la localisation selon que les dispositifs sont sur la côte (shoreline), en mer mais au voisinage des côtes (nearshore) avec des fonds inférieurs à 50 m pour permettre un ancrage notamment, ou finalement au large (offshore). Les usines de production côtières doivent satisfaire de nombreuses contraintes, notamment l'adaptation à la topologie du site mais également l'acceptabilité, leur principal avantage résidant dans la facilité de raccordement aux réseaux électriques. Les systèmes nearshore ou offshore, quant à eux, permettent d'envisager des houlogénérateurs mieux standardisés et bénéficient d'une ressource énergétique plus forte. Ils sont généralement constitués de groupes de modules identiques installés en parcs, électriquement raccordés ensemble afin de mutualiser la production électrique en ne nécessitant qu'un seul câble commun à la côte. On parle aussi de *fermes houlomotrices*.

1) Systèmes à rampe de déferlement

Nous en citons deux : le **Tapchan** (Tapered channel) construit en 1985 sur la côte sur le site de Toftestallen en Norvège, d'une puissance de 350 kW et arrêté à la suite d'une tempête en 1991 et le **Wave Dragon**, système flottant dont un prototype au 1/4.5^{ème} était mis en service en 2003 au Danemark puis abandonné depuis 2012. Le principe du Tapchan est décrit sur la figure 4.

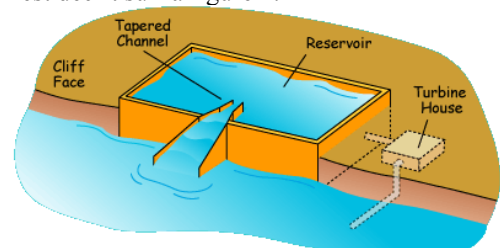


Figure 4. Principe du système à déferlement Tapchan

La qualité du remplissage du bassin dépend de la hauteur des vagues relativement à celle de la rampe de déferlement, mais également des effets de marées. Des solutions plus récentes permettent de mieux s'adapter à la hauteur de la houle en exploitant une rampe de déferlement incluant un système de captage échelonné le long de la rampe (Seawave Energy : SSG : Seawave Slot-cone Generator).

Le houlogénérateur Wave Dragon est flottant et amarré, sa hauteur de flottaison est ajustable en fonction des caractéristiques de la houle. Les dimensions de la version échelle 1 sont 300 m (distance entre extrémités des bras), 170 m (longueur) et 17 m de hauteur dont 3 à 6 m au-dessus du niveau de la mer. La masse totale est de 33 000 tonnes avec un réservoir d'une capacité de 8 000 m³. Sa puissance maximale est de 7 MW avec une productivité annuelle de 20 GWh pour une ressource moyenne de 36 kW/m. Ainsi le nombre d'heures en équivalent à pleine puissance atteint 2800. L'eau est turbinée dans des turbines de basse chute (Kaplan). Il est intéressant d'exploiter plusieurs turbines de petite puissance (ici 16 à 20), plutôt qu'une seule, ce qui permet d'améliorer le rendement en fonction du débit disponible. Des génératrices à aimants à vitesse variable permettent encore d'accroître le rendement global.

La figure 5 montre deux vues schématiques du dispositif Wave Dragon et la figure 6 montre une photographie du dispositif à échelle réduite (20kW, 237 tonnes, 58m x 33m, réservoir de 55 m³).

2) Systèmes à colonne d'eau oscillante (OWC oscillating water column)

C'est peut-être l'un des principes les plus utilisés, il est d'ailleurs emprunté à la nature où les « trous de souffleur » présents dans les côtes rocheuses mettent bien en évidence les flux et reflux d'air piégé dans une cavité soumise aux fluctuations des vagues.

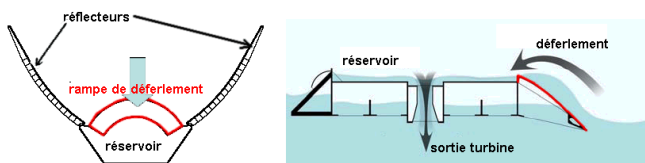


Figure 5. Vues de dessus et de profil du système flottant Wave Dragon, courtesy of Wave Dragon (www.wavedragon.net) [22]



Figure 6. Photographie du Wave Dragon à échelle réduite (58 x 33 m), courtesy of Wave Dragon.

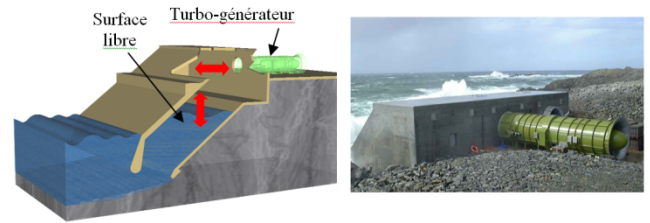


Figure 7. Dispositif à colonne oscillante LIMPET [23], courtesy of Wavegen.

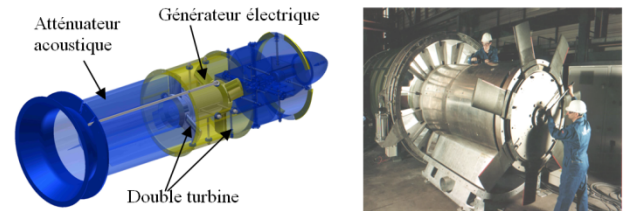


Figure 8. Turbogénérateur Wavegen à turbines Wells en cours de montage (groupe de 500 kW), courtesy of Wavegen, [23].

Pour les systèmes côtiers, citons notamment la colonne **Kvaerner** (Norvège) qui a fonctionné entre 1985 et 1988 (hauteur totale : 25m, surface libre interne 56m², turbine 500kW à 1500 t/min), le projet pilote européen **Pico**, du nom de l'île des Açores au Portugal (chambre 12 x 12 m sur 8 m de haut, 400 kW, turbine Wells à pas variable), le convertisseur **Energetech** de 1 MW en Australie (système modulaire avec collecteur parabolique : 35 m d'ouverture) et le **LIMPET** (Land Installed Marine Powered Energy Transformer), de la société Wavegen, installé sur la côte de l'île d'Islay en Ecosse d'une puissance de 500 kW, et pour finir les installations dans les ports de Haramashi et de Sakata au Japon, ainsi que celle de Kerala en Inde.

A titre d'exemple, le premier prototype du système LIMPET (1991) avait une puissance de 75 kW, une seconde version de 500 kW a été mise en service en 2001 et est raccordée au réseau électrique du Royaume Uni. Le système actuel capte les variations de pression de 3 colonnes d'eau offrant une surface totale de captation de 169 m². Le turbogénérateur est constitué de deux turbines Wells à pas fixe de 2,6 m de diamètre en contre rotation, chacune entraînant directement un générateur asynchrone de 250 kW à double alimentation fonctionnant à vitesse variable (700 à 1400 tr/mn). La turbine Wells possède l'avantage d'un couple moteur qui ne change pas de signe avec le sens de circulation du flux d'air. Le système de l'île de Pico exploite, quant à lui, une turbine Wells à pas variable. La société Wavegen propose différentes applications de son concept notamment pour constituer un mur brise vagues intégrant plusieurs générateurs de type LIMPET.

Enfin parmi les systèmes à colonnes oscillantes offshore flottants et ancrés, on citera :

- le **Sperboy** (UK) constitué d'un flotteur de 4 m de diamètre sous lequel se trouvent des tubes (colonnes d'eau oscillantes) descendant à 12 m sous la surface et au-dessus duquel se trouve le système de conversion contenant les chambres de compression et un ensemble de 4 turbines

génératrices horizontales délivrant une puissance totale maximale de 140 kW ;

- la **Mighty Whale** (Jamstec : Japan Marine Science and Technology Center) est un navire prototype de 50 m sur 30 m et 12 m de profondeur, mis en service en 1998. La puissance maximale est de 110 kW pour $H_s = 8$ m et $T_p = 10$ à 15 s. Le système de conversion comprend 3 chambres à colonnes oscillantes associées à 3 groupes turbines Wells génératrices asynchrones (1 x 50 kW et 2 x 30 kW) à vitesse variable (300 à 1800 tr/min).

3) Systèmes mus par la houle

La houle anime ici un mouvement relatif entre plusieurs corps. Un des corps peut être amarré. Le mouvement créé est souvent simple, une translation ou une rotation, mais peut être aussi plus complexe et multiple. Ce mouvement est amorti afin de récupérer de l'énergie. Le générateur électrique peut constituer lui-même l'amortisseur, on parle alors d'entraînement direct. Le mouvement peut aussi actionner des vérins hydrauliques qui compressent un fluide et le stocke dans des réservoirs haute pression. Ce fluide entraîne ensuite une turbine accouplée à un générateur électrique.

a) PowerBuoy

Le système **PowerBuoy** (Ocean Power Technologies, Inc., USA) [24] est une bouée immergée, avec une partie fixe, un ancrage tendu et une partie oscillante au rythme de la houle, le mouvement relatif est amorti pour être converti en électricité. Seule une balise indique la présence du système sous l'eau pour la navigation (cf. figure 9). Ce système, dont la fréquence propre rend ses performances très sensibles à la période de houle, nécessite un contrôle spécifique pour maximiser l'extraction de l'énergie, incluant notamment un comportement prédictif. Le dispositif de conversion comprend une pompe, un accumulateur et un moteur hydrauliques, ce dernier entraînant une génératrice électrique.

Des versions à générateur électromagnétique linéaire direct sont également étudiées. Un modèle de 40 kW a été testé entre 1997 et 2002 : il fait 9 m de haut et a un diamètre de 1,5 m au niveau du flotteur, pour une masse de 2140 kg. Des modèles de 150 et 250 kW sont envisagés.

b) CETO, Garden Island

Le principal projet autour de CETO, développé par la société australienne Carnegie Wave Energy Ltd., est le projet Perth qui comprend l'installation de trois prototypes CETO 5 de 240 kW à Garden Island, Australie, en 2015. Le CETO est un point absorbeur submergé, en mouvement plan (cavement, pilonnement), et installé près de la côte. L'originalité de cette technologie est la production d'eau désalinisée en parallèle de la production d'électricité. On peut noter néanmoins les avaries du projet expérimenté par EDF Energies nouvelles et DCNS à la Réunion, suite au passage du cyclone Bejisa début janvier 2014. La prochaine génération, le CETO 6, est prévue pour une puissance nominale de 1MW par unité.

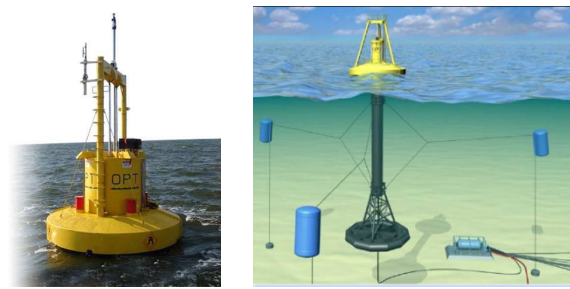


Figure 9. Photo du PowerBuoy (<http://www.oceanpowertech.com/>) [24]

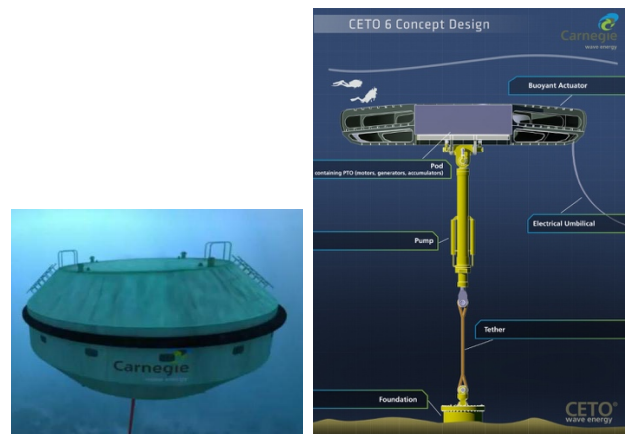


Figure 10. Unité CETO de Carnegie



Figure 11. Prototype à l'échelle 1/2 de la technologie Wavestar à Hanstholm (Danemark)

c) Wavestar, Hanstholm

La société danoise Wavestar a testé son prototype à l'échelle 1=2 pendant 4 années de 2009 à 2013, installé au large de Hanstholm, au Danemark (cf. figure 11). Il s'agit d'un ensemble de bouées pilonnantes rattachées à une structure porteuse commune. Cette société prévoit le développement d'un démonstrateur à l'échelle 1 pour 2018.

d) Pelamis

Le **Pelamis** ou « serpent de mer » est sans doute le projet le plus médiatisé et le plus avancé en termes de faisabilité industrielle et économique. Dans le Pelamis les corps en mouvement sont des cylindres reliés entre eux par des articulations à deux degrés de liberté (type sphérique à doigt). Le mouvement est amorti par des vérins hydrauliques (cf. figure 12). L'énergie est stockée sous forme pneumatique dans des cavités remplies de gaz et

mises sous pression par de l'huile. Six moteurs hydrauliques entraînent chacun une génératrice asynchrone de 125kW. Cela permet au Pelamis de fournir une énergie électrique de manière relativement continue malgré une ressource très pulsatoire. Une ferme de 3 Pelamis fut installée au nord du Portugal. La puissance installée est de 2.25MW. Le coût annoncé du kWh pour cette ferme d'Aguçadoura est de 0.23€/kWh [25] pour une production annuelle de 2.7GWh [26], soit 1200 heures à pleine puissance. Deux unités de seconde génération P2, installées sur le site d'Orkney, en Écosse, ont atteint 10 000 heures de connexion au réseau en juin 2014, mais avec de longues périodes de rapatriement. En décembre 2014, la société OPD met la clé sous la porte, faute de financement et de repreneurs. Notons que les principaux inconvénients de ce système restent sa sensibilité au milieu marin très corrosif et sa résistance à la fatigue mécanique en cyclage.

e) *Archimedes Wave Swing (AWS)*

L'idée du *AWS* est d'exploiter le mouvement de pilonnement (vertical) d'une bouée immergée. Une unité de production est constituée d'un flotteur cylindrique qui coulisse sous l'effet de la houle autour d'un autre fixé sur le fond de la mer (cf. figure 13). Le mouvement créé actionne un générateur électrique linéaire en entraînement direct. La version pilote, testée en 2004, au large du Portugal, était dimensionnée pour une puissance crête de 2MW et une puissance nominale de 1MW. Le générateur linéaire est une machine à aimants permanents déposés en surface. Le système n'ayant qu'un seul degré de liberté, la modélisation hydrodynamique et mécanique du système se ramène à une équation différentielle du second ordre. Le terme de rappel (proportionnel à la position) est dû au fait que le flotteur agit comme un piston. Lors de son mouvement il comprime et détend de l'air dans une chambre étanche mais aussi de l'azote dans des pistons. La pression de l'azote dans ces pistons est ajustable et ce terme de rappel peut donc être ajusté afin faire entrer en résonance le système pour différentes fréquences d'excitation. Cela permet de récupérer le maximum d'énergie sur une plage de périodes de houle assez élevés (entre 5 et 15s).

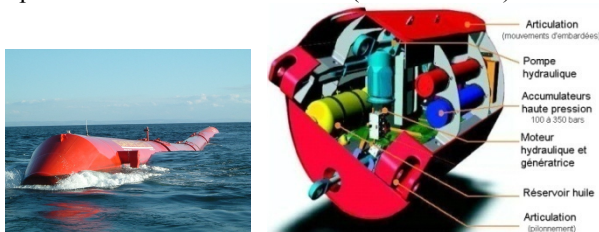


Figure 12. Le Pelamis (source : Pelamis Wave Power) [27]

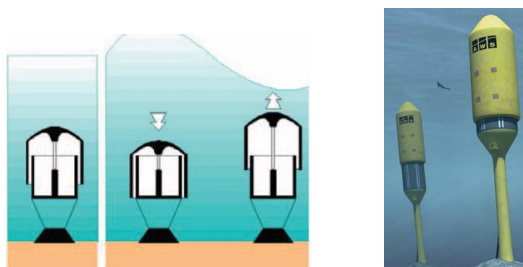


Figure 13. Principe du système AWS (<http://www.awsocan.com>)

L'effet de résonance permet d'atteindre des amplitudes de mouvement jusqu'à sept fois plus grande que l'amplitude de la variation de hauteur de la surface de la mer. L'énergie annuelle récupérée annoncée est de 1.64GWh soit 1640 heures à puissance nominale [28]. Sur la version pilote et pour des raisons de coût, la partie mobile du générateur est seulement plus longue de trois mètres que la partie fixe. Cela grève évidemment les capacités du système. Pour éviter d'avoir des mouvements d'amplitude trop importante, le système est prévu avec des butées mécaniques. Ces butées n'ont pas résisté lors de la campagne de test de la version pilote. Les systèmes actuels utilisent des amortisseurs hydrauliques eux aussi prévus pour limiter les mouvements. Cela évite au générateur de devoir fournir des forces trop importantes pour avoir des mouvements raisonnables, mais l'énergie récupérée est en contrepartie plus faible.

f) *Système Electrique Autonome de Récupération de l'énergie des Vagues (SEAREV)*

Le dispositif *SEAREV* a été développé au Laboratoire de Mécanique des Fluides (LHEEA) de l'Ecole Centrale de Nantes avec lequel une collaboration a été mise en place depuis 2003 avec le laboratoire SATIE afin d'étudier une solution de conversion d'énergie composée d'une génératrice en entraînement direct associée à un convertisseur électronique et une stratégie de pilotage en lieu et place d'une solution oléopneumatique. Ce dispositif est fondé sur un balancier (pendule) situé dans un flotteur fermé lui-même mis en mouvement par la houle (cf. figures 14). Le mouvement du pendule est amorti par un générateur électromagnétique piloté par un convertisseur électronique de puissance. Le contrôle de ce dernier permet d'imposer à chaque instant le couple qu'oppose le générateur au pendule.

Un autre système de conversion directe plus simple au sens hydrodynamique a été également étudié. Il s'agit de la bouée pilonnante représentée par la figure 15.

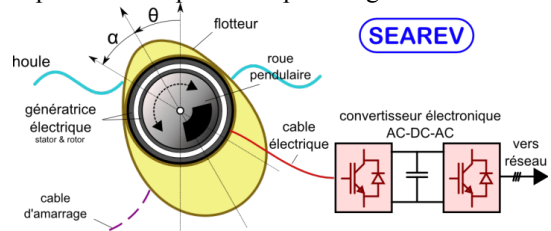


Figure 14. Schéma de principe du système houlo-générateur pendulaire SEAREV

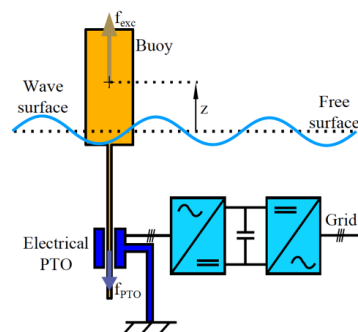


Figure 15. Schéma de principe d'une bouée pilonnante

III. TRAVAUX REALISES AU SATIE SUR LA HOULOGENERATION DIRECTE

Le dernier projet collaboratif réalisé au sein de notre laboratoire sur la houlogénération directe est un projet ANR dénommé QUALIPHE comme Qualité, Lissage et Intégration de la production houlogénérée directe. Les partenaires de ce projet sont les laboratoires LHEEA et l'IRCCyN de l'école Centrale de Nantes ainsi que le SyDev, gestionnaire du réseau en Vendée. Nous présentons dans ce suit les principaux résultats obtenus dans le cadre de nos recherches autour de la houlogénération directe. Ces recherches ont porté sur les principaux verrous de ce type de chaîne de conversion, à savoir :

- l'optimisation de la récupération au travers un contrôle optimisé ;
- le dimensionnement sur cycle de vie des composants, en particulier les plus fragiles, dans un contexte de fort cyclage et d'un surcoût lié au remplacement pouvant impacter considérablement le coût au kWh produit ;
- le respect des contraintes d'intégration au réseau, essentiellement la contrainte de flicker nécessitant un lissage de la puissance adapté ;
- enfin, compte tenu de la complexité du système global, l'élaboration d'une méthodologie de dimensionnement adapté de la chaîne électrique complète.

A. Modèle hydromécanique

La détermination de la puissance électrique récupérée nécessite le calcul des mouvements du système couplé {flotteur + pendule}. Ce calcul fait appel à une modélisation mécanique et hydrodynamique complexe. Nous ne décrivons ici que le principe général des modèles issus des travaux du LHEEA [29].

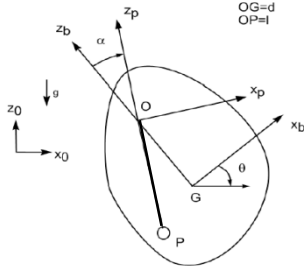


Figure 16. Repères et notations utilisés.

L'équation générale à résoudre est de la forme :

$$M \cdot \ddot{X} = \sum F_{ext} \quad (3)$$

où M représente la matrice d'inertie du système et $X = [x_G \ z_G \ \theta \ \alpha]$ est le vecteur déplacement (cf. figure 14).

F_{ext} est le vecteur de forces généralisées :

$$F_{ext} = F_p + C_{PTO} + F_H + F_R + F_{ex} \quad (4)$$

F_p représente l'effort exercé par le pendule au point O. Cette force est fonction de X, \dot{X} ainsi que des paramètres géométriques du flotteur et du pendule.

F_H représente la force hydrostatique due à la poussée d'Archimède.

F_R est la force dite de radiation correspondant à la réaction du système {flotteur + pendule} sur la houle.

C_{PTO} est le couple de récupération de l'énergie exercé par le générateur électromagnétique, sa valeur est issue d'une

stratégie de charge adéquate sur laquelle nous reviendrons ultérieurement. Lorsqu'il s'agit d'un système en translation (bouée pilonante par exemple) on parlera de force de récupération notée générale f_{PTO} (PTO=Power Take-Off). Les forces d'excitation de la houle, F_{ex} sont calculées à partir des ressources de la houle et pour une géométrie globale du flotteur imposées [29].

Concernant le profil temporel de la houle (évolution temporelle de la surface libre $\eta(t)$), il est reconstruit à partir du spectre de Pierson-Moskowitz (6) [30] qui dépend des deux paramètres précédemment signalés : H_s et T_p .

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (5)$$

avec $a_i = \sqrt{2S(f_i) \Delta f}$

Où $S(f)$ est le spectre d'énergie et f la fréquence :

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right)$$

$$A = \frac{5 H_s^2}{16 T_p^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{5}{4} \frac{1}{T_p^4}$$

Les N composantes fréquentielles, espacées d'un pas Δf , qui composent une houle sont générées selon le spectre $S(f)$ avec une phase φ_i à l'origine aléatoire.

En générant plusieurs profils pour différentes valeurs de H_s et T_p , nous pouvons déterminer des cycles de fonctionnement du générateur représentatifs de plusieurs états de mer.

B. Contrôle optimisé pour la récupération

Différents modes de contrôle peuvent être envisagés. Lorsqu'on parle de contrôle, il s'agit ici d'imposer une consigne de couple récupérateur $C_R(t)$ qu'exerce la génératrice électrique sur le pendule en fonction de l'état du système et de son histoire ou la consigne de force $f_{PTO}(t)$ dans le cas d'un récupérateur direct de type bouée pilonnante.

L'une des premières difficultés est le développement d'un modèle suffisamment précis pour la conception et la comparaison de stratégies de contrôle, avec en particulier, les différents choix d'hypothèses sur la prise en compte ou non des non-linéarités hydromécaniques et mécaniques, des contraintes géométriques (en présence de butées), des limites de fonctionnement de la chaîne électrique (de la génératrice ou de l'électronique de puissance) ou encore des pertes dans cette même chaîne.

Plusieurs travaux nous ont permis de mettre en avant l'importance de la chaîne électrique dans la conception d'un contrôle, que ce soit avec un contrôle paramétré optimisé basé sur l'adaptation d'impédance mécanique [39] ou avec un contrôle optimal prédictif (MPC) basé sur le principe du maximum de Pontryagin [40] (nécessitant une observation de l'état ainsi qu'une prévision des efforts extérieurs, comme illustré sur la figure 15).

L'importance de la prise en compte de la chaîne électrique dans le choix et la conception d'un contrôle de la

récupération permet ainsi de défendre, dans ce contexte, l'idée de co-optimiser la conception du système récupérateur et de son contrôle, dans une approche système. Ainsi une co-optimisation contrôle-dimensionnement a été effectuée dans le cadre d'une **bouée pilonnante** [40]. A titre d'exemple, la figure 17 présente, pour un seul état de mer ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s), deux types de contrôles différents développés : un contrôle passif optimisé avec une force du PTO proportionnelle à la vitesse (amortissement visqueux) et le résultat du contrôle prédictif.

Sur cette figure, on voit qu'à chaque instant, les contraintes de force et de puissance sont bien respectées, tandis que la force du PTO subit beaucoup moins d'à-coups que les contrôles bang-bang qui émergent habituellement de l'utilisation du principe du maximum. La puissance moyenne est très différente entre les deux cas : 45 kW moyens pour le contrôle passif contre 110 kW pour le contrôle MPC, soit un gain d'un facteur supérieur à deux.

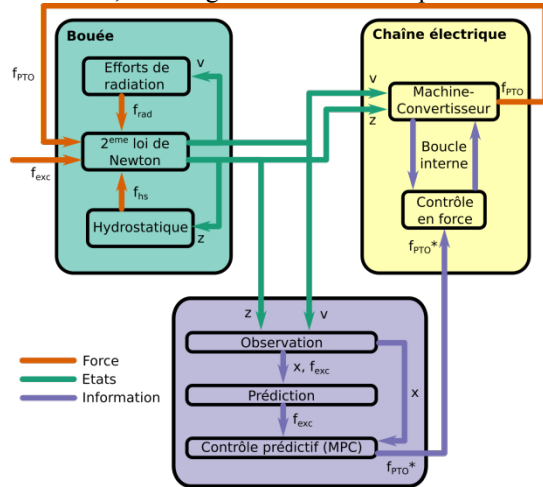


Figure 17. Interactions entre la bouée, la chaîne électrique et le contrôle dans le cas du contrôle prédictif (MPC) d'une bouée pilonnante [40].

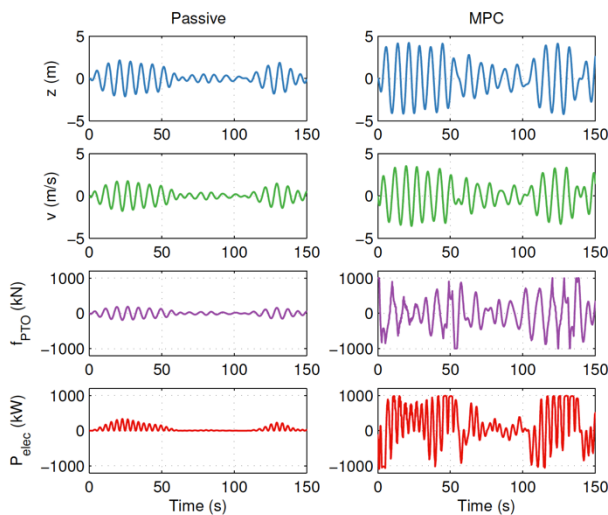


Figure 18. Comparaison entre un contrôle passif optimisé et le contrôle prédictif (MPC) (état de mer : $H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s avec exactement le même profil temporel de la force d'excitation)

C. Cyclage thermique des convertisseurs statiques

Il est connu que les semi-conducteurs de puissance constituent l'un des éléments vulnérables dans les convertisseurs de puissance fonctionnant en fort régime de

cyclage. Or, le cyclage de la puissance dans un houlogénérateur à chaîne électrique direct provient directement des vagues, avec, des cycles très nombreux et d'amplitudes assez grandes (cf. figure 19). De plus, le coût d'intervention lié à de la maintenance corrective pour un système off-shore est très élevé. Il a donc été jugé important d'évaluer l'influence d'une contrainte de fiabilité sur la conception d'un convertisseur statique, en particulier dans le choix des composants.

La technologie correspondant à ce niveau de puissance est l'IGBT. Tout d'abord, un modèle électro-thermique a été mis en œuvre afin de connaître la dynamique de la température de jonction des composants (cf. figure 20). A partir de là, une méthode de comptage de cycle (algorithme Rainflow) couplé à des modèles de vieillissement des fils de bonding et des brasures a permis l'évaluation de la fiabilité pour différents cas, dépendant du choix des composants électroniques (taille des puces) et du système de refroidissement (taille du radiateur) [41].

La conclusion apportée par cette étude montre que le surdimensionnement nécessaire pour atteindre une fiabilité de 99 % semble assez raisonnable (augmentation de 10% de la taille des puces) et ne devrait donc pas impacter le coût du convertisseur de manière importante. Néanmoins, dans ce contexte de fluctuations importantes de la puissance, il semble bien nécessaire de prendre en compte le vieillissement des composants en cyclage thermique afin qu'ils ne soient pas un élément particulièrement vulnérable de l'ensemble.

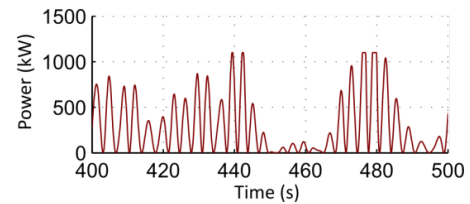


Figure 19. Exemple de profil de puissance électrique produite

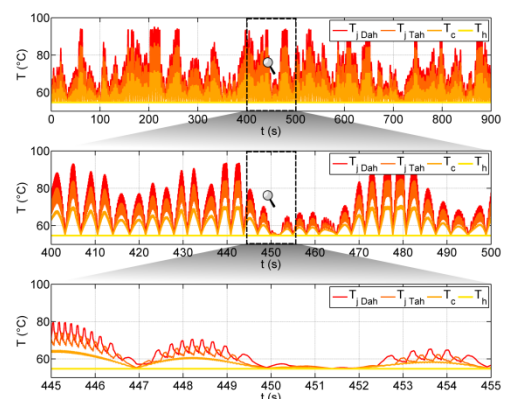


Figure 20. Profils de températures simulées au sein du redresseur actif : on peut voir apparaître trois périodicités : les groupes de vagues, les vagues et la période électrique au sein de la génératrice [41].

A titre d'exemple, nous avons représenté sur la figure 21 les résultats de cette étude à probabilité de défaillance constante sur 20 ans (0,1 %, 1 % et 10 %) en fonction des deux paramètres de dimensionnement (calibre courant et résistance thermique globale). On peut observer que la taille des semi-conducteurs et du radiateur ont un immense impact sur la fiabilité. On remarque également que le

dimensionnement initial ($I_{rated} = 1400 \text{ A}$; $R_{th(h-a)} = 7 \text{ K/kW}$) conduit à une probabilité de défaillance de 5 % (un peu en dessous de la ligne à 10 %), ce qui est trop élevé par rapport à notre cahier des charges (99 % de fiabilité). Tous les points situés sous une ligne permettent d'obtenir un taux de défaillance plus faible (fiabilité plus élevée). Dans cet exemple, avec un calibre 1400 A, il faudrait une résistance thermique globale inférieure à 6.4 K/kW pour obtenir une fiabilité meilleure que 99 % sur 20 ans, ou encore, en conservant le système de dissipation à 7 K/kW, un calibre courant de plus de 1450 A.

D. Lissage de la production et intégration au réseau

Les fortes fluctuations de la production (cf. figure 19), en plus d'obliger le concepteur à résoudre des problèmes de fiabilité, peut également poser des problèmes de qualité de la tension au point de connexion, les fluctuations de puissances entraînant des fluctuations de la tension, provoquant un effet de papillotement indésirable sur les sources lumineuses (appelé flicker en anglais). Cela peut particulièrement être le cas lors de la connexion d'une ferme houlogénératrice de taille assez importante sur un réseau de distribution côtier faible. Or, le niveau de flicker est généralement limité réglementairement par le gestionnaire de réseau. Néanmoins, une étude sur différentes technologies de houlogénérateurs [42] a permis de conclure que la sévérité du flicker n'est pas proportionnelle au nombre d'individus, mais proportionnelle à la racine carré de ce dernier (\sqrt{N}) : cela signifie que la compensation statistique (effet de foisonnement) entre les productions des différents individus limite déjà naturellement les fluctuations au point de connexion. Si la contribution d'une ferme au flicker dépasse les limites imposées par un gestionnaire réseau, il peut alors s'avérer nécessaire de lisser la production par l'utilisation d'un système de stockage d'énergie, comme illustré par la figure 22.

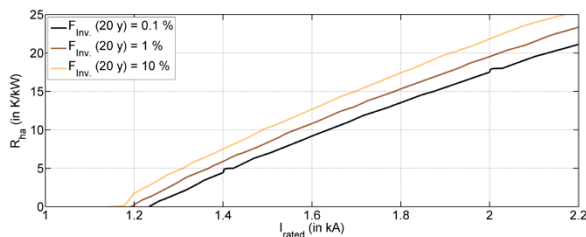


Figure 21. Courbes d'iso probabilité de défaillance sur 20 ans des semi-conducteurs du redresseur actif dans le plan (calibre courant des semi-conducteurs)-(résistance thermique du système de dissipation) pour une température ambiante de 30 °C.

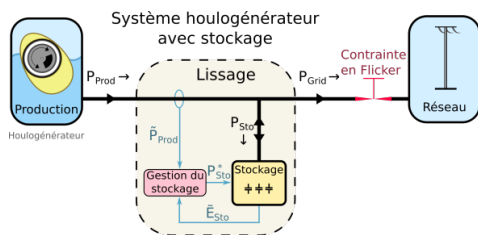


Figure 22. Architecture du lissage de la production d'un houlogénérateur afin de respecter une contrainte en flicker au point de connexion.

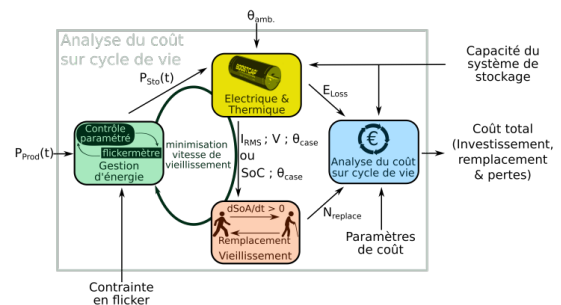


Figure 23. Évaluation du coût sur cycle de vie appliqué au dimensionnement de la capacité énergétique d'un système de stockage

Deux technologies ont été plus particulièrement comparées afin de permettre ce lissage : les super-condensateurs et les batteries Li-ion de haute puissance. En plus des possibilités natives en termes de coût d'investissement, de puissance et d'énergie, il est primordiale vu le contexte de comparer les capacités de ces technologies en cyclage. Basé sur des expériences et des données constructeur, des modèles de vieillissement ont ainsi permis la mise en place des analyses de coût sur cycle de vie, comme illustré par la figure 23. Le contrôle choisi pour la gestion de l'énergie au sein du système de stockage est un contrôle paramétré optimisé. C'est un contrôle linéaire, inspiré de la logique floue, qui contient trois paramètres permettant de décider la puissance à stocker P_{sto} en fonction de la puissance produite P_{prod} et de l'état d'énergie du stockage E_{sto} :

$$P_{sto} = \alpha \cdot P_{prod} - \frac{E_{sto} - E_{min}}{\tau} \quad (7)$$

Les trois paramètres de ce contrôle (α , τ et E_{min}) sont optimisés afin de respecter la contrainte en flicker, mais aussi minimiser la vitesse de vieillissement du système de stockage (afin d'avoir un contrôle qui minimise le coût sur cycle au final).

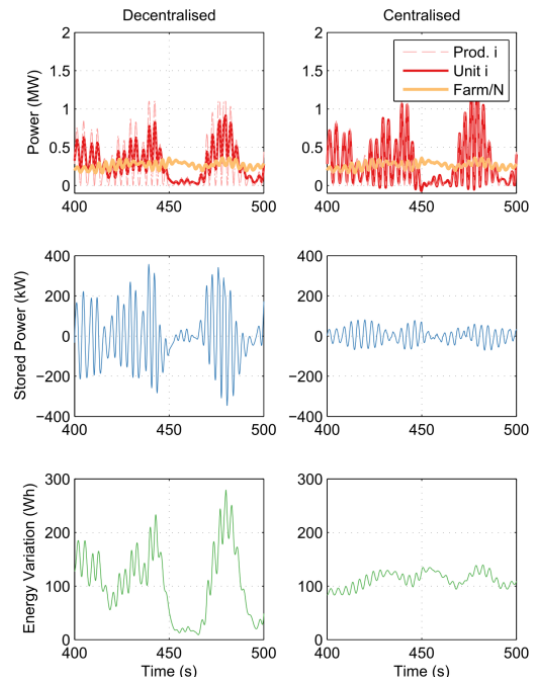


Figure 24. Lissage de production houlogénérée : profils de puissance et d'énergie stockée à l'échelle d'une unité de production (et de la ferme, pour la puissance produite), comparaison entre les gestions décentralisée et centralisée, avec la même contrainte de flicker au point de raccordement.

Le choix ayant été fait d'effectuer le lissage de la production de la ferme grâce à des systèmes de stockage distribués (un système de stockage par unité de production), deux architectures de contrôle ont été comparées [43] : entièrement décentralisé (se basant uniquement sur des informations locales) ou entièrement centralisé (se basant sur des informations à l'échelle de la ferme). Comme pour le flicker, l'effet de foisonnement a une grande importance et permet donc de limiter l'utilisation du système de stockage grâce à la centralisation de l'information et de la décision, comme illustré par la figure 24.

De la même façon que les analyses sur cycle de vie ont permis de comparer différentes architectures de contrôle, elles ont également permis de comparer différentes technologies de stockage [44], comme illustré par la figure 25.

Ainsi, il semblerait que les deux technologies peuvent s'avérer intéressante dans ce contexte, avec un petit avantage pour les supercondensateurs (d'autant plus que la technologie est plus mature et bénéficie ainsi de retours d'expériences comparé aux dernières générations de batteries Li-ion). Au final, les coûts liés au lissage de la production, même dans les cas extrêmes étudiés dans nos travaux [45] (une vingtaine d'individus sur un réseau de distribution faible), ne devrait pas grandement affecter le coût de production du kWh houlogénééré.

E. Méthodologie de dimensionnement global de la chaîne électrique

La dernière partie traitée dans cet article concerne la méthode préconisée pour le dimensionnement global de la chaîne électrique d'un houlogénérateur direct. La conversion d'énergie doit se faire de la meilleure façon possible, c'est à dire avec le meilleur rendement mais aussi avec le coût le plus faible. Pour répondre à ces deux objectifs nous avons deux choix de critères d'optimisation possibles :

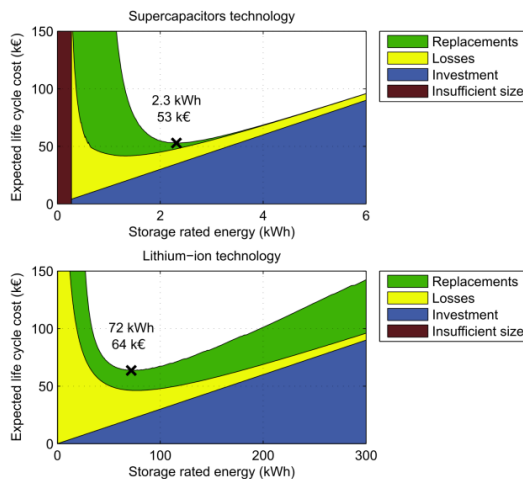


Figure 25. Recherche du minimum de l'espérance du coût sur cycle de vie en fonction de la capacité énergétique (technologies supercondensateurs et lithium-ion de puissance)

- D'un côté nous pouvons simplement minimiser le prix du kWh sur le cycle de fonctionnement du système. Cela consiste à réaliser une optimisation mono-objectif. Le prix du kWh est le critère économique le plus

important mais il nécessite de connaître le prix de tous les composants du système (volant, flotteur, amarrages, espace en mer...);

- De l'autre nous pouvons chercher à maximiser l'énergie électrique récupérée mais aussi à minimiser le coût. Nous allons voir que cette optimisation bi-objectifs permet d'obtenir directement les résultats de plusieurs optimisations mono-objectifs.

Par ailleurs, afin de réduire la complexité du problème et de limiter le temps de calcul nous considérons la géométrie du flotteur et du volant fixe, seuls les paramètres de la chaîne électriques seront donc variables. Nous noterons C_{Autres} le coût du système hors chaîne électrique. Nous notons respectivement $C_{chaîne}$ et E_{elec} , le coût de la chaîne électrique et l'énergie électrique récupérée. Le coût du kWh, est noté $C_{kWh} = C_{chaîne} / E_{elec}$.

La contradiction entre les deux objectifs $C_{chaîne}$ et E_{elec} nous permet de postuler l'existence d'un front de Pareto que l'on peut écrire sous la forme de la fonction $C_{chaîne}(E_{elec})$ monotone et en l'occurrence croissante (cf. figure 26). Si nous souhaitons trouver sur ce front le point qui minimise le coût du kWh, il faut vérifier la relation (8) :

$$\frac{\partial C_{kWh}}{\partial E_{elec}} = 0 \text{ pour } C_{chaîne} = \frac{\partial C_{chaîne}}{\partial E_{elec}} E_{elec} - C_{Autres} \quad (8)$$

Le point sur le front qui vérifie cette relation voit sa tangente passer par le point $(0, -C_{Autres})$ dans le plan $(E_{elec}, C_{chaîne})$.

Alors qu'une optimisation mono-objectif, minimisant le coût du kWh, serait nécessaire pour chaque valeur de C_{Autres} , une optimisation bi-objectif permet après une analyse post-calcul, de déterminer le coût du kWh minimal, C_{kWh}^* , en fonction de n'importe quelle valeur de C_{Autres} [38]. Il est alors aussi possible de connaître le coût maximal du système récupérateur (hors chaîne électrique et pour une géométrie fixe) permettant d'assurer la rentabilité du système, selon la valeur de rachat du kWh.

A titre d'exemple, sur la figure 27 est représenté le front de Pareto obtenu en utilisant une méthode d'optimisation sous contraintes basée sur les essais particulières dans le plan des objectifs contradictoires que sont le coût de la chaîne électrique (à minimiser) et l'énergie électrique récupérée (à maximiser).

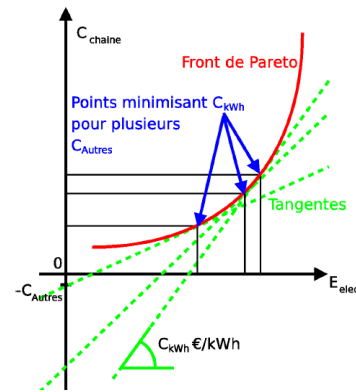


Figure 26. Minimisation de C_{kWh} à partir d'une optimisation bi-objectifs $(E_{elec}, C_{chaîne})$

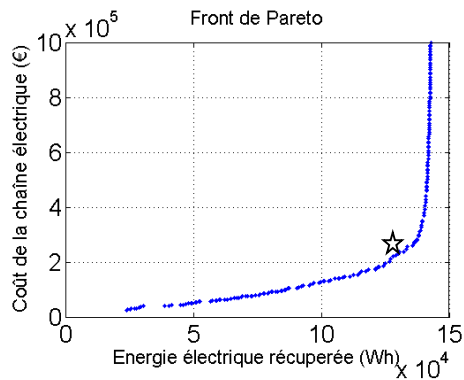


Figure 27. Front de Pareto obtenu dans le plan des objectifs : Energie électrique & Coût de la chaîne électrique obtenu pour houle $T_p=3s$, $H_s=8m$

IV. CONCLUSION

Le potentiel des ressources énergétiques marines est important et leur variété est telle que l'on peut envisager dans la plupart des régions du globe une participation tout à fait significative à la production mondiale d'électricité, mais également d'hydrogène, d'eau douce, de froid... Les solutions technologiques sont encore en pleine évolution. La plupart d'entre elles n'a pas encore été confrontée aux contraintes de la nature et du marché et il reste encore généralement un travail considérable de recherche et de développement. Compte tenu, des courbes d'apprentissage économique à peine amorcées, le potentiel de baisse des coûts d'investissement de la plupart des technologies marines est très élevé, ce qui laisse entrevoir des coûts de production très attractifs à terme. Ainsi, il est surtout important de développer une volonté politique suffisante pour expérimenter le plus rapidement possible dans les conditions réelles et difficiles du milieu marin, en prenant évidemment des risques. En effet, comme dans tous les autres domaines, il faudra des échecs (constructifs) pour progresser et atteindre une réelle maturité industrielle.

Concernant les aspects de dimensionnement, les systèmes récupérateurs d'énergie posent de façon cruciale le problème de la méthodologie employée. En effet, la nécessité de manipuler des modèles multi-physiques (hydrodynamique-mécanique-électromagnétique-électrique pour les houlogénérateurs par exemple), la nécessité aussi de considérer des durées de fonctionnement très longues, le nombre de variables et de contraintes élevés et enfin l'existence de sollicitations complexes, fluctuantes voire aléatoires imposent une attention particulière quant à la démarche d'optimisation système. Cela implique notamment une vérification systématique des résultats obtenus ainsi qu'une étude de sensibilité vis-à-vis à la fois des paramètres considérés fixes lors de l'étude mais aussi vis-à-vis des modèles adoptés et leur influence sur la configuration « optimale » obtenue. En dehors du domaine de génie électrique, il reste bien évidemment beaucoup de travaux de recherche et de développement à réaliser. On peut citer : l'amarrage (architecture, dimensionnement en fatigue), la modélisation hydrodynamique d'une ferme couplée, les tests en sollicitation marines extrêmes,

l'estimation précise des coûts de réalisation et d'installation, l'interaction système-milieu marin (biofouling),

REMERCIEMENTS :

Les travaux les plus récents présentés dans cet article ont été effectués dans le cadre du projet ANR PROGELEC « QUALIPHE ».

REFERENCES

- [1] 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), 15th – 17th October 2008, Brest, France, <http://www.icoe2008.com/fr/>
- [2] C. Abonnell et. Al, “Energie des Mers”, publié au nom d'ECRIN à une conférence pour l'OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), Paris (Assemblée Nationale) le 20 octobre 2004, 22 pp.
- [3] B. Multon, A.H. Clément, M. Ruellan, J. Seigneurbieux, H. Ben Ahmed, « Systèmes de conversion des ressources énergétiques marines », Chapitre 7 du tome 1 du livre « Les Nouvelles Technologies de l'Energie », Hermès Publishing, ISBN 2-7462-1376-1, 2006, 45p.
- [4] W. H. Avery, “Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)”, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Vol 11, 2002, pp. 123-160.
- [5] W. Avery, C. Wu, “Renewable energy from the ocean. A guide to OTEC”, Oxford Univ. Press, 1994.
- [6] G. Beslin, “Eolien offshore : attentes, espoirs et réalités”, colloque GEVIQ'2002, Marseille, pp.43-46, 12-13 juin 2002.
- [7] H.G. Matthies et al. “Study of Offshore Wind Energy in the EC (Joule I project)”, Verlag Natürliche Energie, Brekendorf, Germany, 1995.
- [8] EWEA (European Wind Energy Association), “Wind Force 10. A blue print to achieve 10% of the world electricity from wind power by 2020”, report 1999.
- [9] A. R. Henderson, R. Leutz, T. Fujii, “Potential for Floating Offshore Wind Energy in Japanese Waters”, Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering (ISOPE) Conf., Kitakyushu, Japan, May 2002.
- [10] J.F. Bonnet, “Les apports solaires implicites dans les activités humaines.” Thèse de doctorat, ENSAM, Centre de Bordeaux, 395 p, 1998.
- [11] M. Le Boulluec, “L'exploitation de la ressource hydrocinétique : état de l'art”, Seatech Week Conf. Brest, oct. 2004.
- [12] B. Dal Ferro, “W&T : scale of the opportunity”, Séminaire franco-britannique sur les Énergies Marines, CDROM proc, Le Havre, 19-20 janv. 06.
- [13] P. Fraenkel, “Marine Current Turbines : feedback on experience so far”, Seatech Week, Brest, CDROM proc., 20-21 oct. 2004.
- [14] A.T. Jones, W. Finley, “Recent development in salinity gradient power”, IEEE OCEANS 2003 Proceedings, Vol. 4, 22-26 Sept. 2003, pp.2284-2287.
- [15] T. Thorpe, “Wave Energy”, chap. 15 of 2004 Survey of Energy Resources, World Energy Council 2004, p.401-417.
- [16] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire>
- [17] C. Abonnell, “Some Aspects of the RanceBulb Turbines after almost 40 years' service –Feedback of experience”, Second CA-OE, Work Shop, nov. 2005, Uppsala.
- [18] M. Banal, “L'énergie marémotrice”, REE n°8, sept.97, pp.6-7.
- [19] A. Clément et al. “Wave energy in Europe: current status and perspectives”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pergamon, 6 (2002), pp.405-431.
- [20] Rapport danois “Bølgekræftforeningens Konceptkatalog” (revue des concepts de générateurs fonctionnant à partir de la houle), avril 2001, www.waveenergy.dk.
- [21] H. Mouslim et A. Babarit « SEAREV : Système électrique autonome de récupération de l'énergie des vagues », Techniques de l'Ingénieur, IN96, 2008
- [22] H.C. Soerensen, E.F. Madsen, L. Christensen, J.P. Kofoed, P. Frigaard, W. Knapp, “The results of two years testing in real sea of Wave Dragon”, proc. of 6th European Wave and Tidal Energy Conference, Glasgow, aug. sept. 2005.

- [23] G. Mackie, "Wavepower an operator experience", Seatech Week, Brest, CDROM proc., 20-21 oct. 2004.
- [24] Taylor G.W. (Ocean Power Technologies, Inc.), "Wave Energy Commercialisation" London Energy Group, 3rd Annual Alternative Energy Seminar, 10 dec. 2003.
- [25] R W Yemmu, R M Henderson, C A Taylor, "The OPD Pelamis WEC: Current Status and Onward Programme", Wave Energy Conferences, Alborg 2000.
- [26] R. Pelc, R. Fujita., "Renewable energy from the ocean", Marine Policy Revue (Elsevier) n°26 (2002) p.471-479.
- [27] R. Henderson, "State of the Art Hydraulics for the Pelamis Wave Energy Converter", Second CA-OE, Work Shop, nov. 2005, Uppsala.
- [28] H. Polinder, E. Damen et F. Gardner. Linear pm generator system for wave, energy conversion in the aws. IEEE Transactions on Energy Conversion, volume 19, no. 3, p. 7, September 2004.
- [29] A. Babarit, – Optimisation Hydrodynamique et Contrôle Optimal d'un récupérateur de l'Énergie des Vagues. . Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2005
- [30] A. Clément. : "Propagation des ondes de gravité". Cours de l'Ecole Centrale de Nantes, 2002.
- [31] M. Ruellan – Méthodologie de dimensionnement d'un système électromagnétique de récupération de l'énergie des vagues. Thèse de doctorat de l'École normale supérieure de Cachan (2007).
- [32] M. Ruellan. Pré-dimensionnement d'un houlo-générateur pendulaire. REE, pp.87-97, Juin/juillet 2006.
- [33] A. Babarit, H. B. Ahmed, A. Clément, V. Debusschere, G. Duclos, B. Multon et G. Robin. Simulation of electricity supply of an atlantic island by offshore wind turbines and wave energy converters associated with a medium scale local energy storage. Renewable Energy, volume 31, pp. 153-160, February 2006.
- [34] M. Ruellan, B. Rozel, H. Ben Ahmed, B. Multon, A. Babarit, A. Clément, "Pre-design of direct electrical PTO for the SEAREV wave energy device", Second CA-OE (Coordination Action on Ocean Energy) Workshop, Uppsala, 2-3 Nov. 2005.
- [35] J. Falnes : "Ocean Waves And Oscillating Systems : Linear Interactions Including, Wave-energy Extraction". Cambridge University Press, 2000.
- [36] A. Babarit et A. Clément. Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves. Applied Ocean Research, pp. 77-91, 2006.
- [37] J. Tissandier, A. Babarit, A.H. Clément, "Study of the smoothing effect on the power production in an array of SEAREV wave energy converters", ISOPE 2008-TPC-389.
- [38] J. Aubry, M. Ruellan, H. Ben Ahmed, B. Multon, « Minimisation du Coût de Production du kWh par l'Optimisation d'une chaîne "tout-électrique" pour le convertisseur d'énergie houlomotrice SEAREV », 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), 15th – 17th October 2008, Brest, France.
- [39] T. Kovaltchouk, B. Multon, H. Ben Ahmed, J. Aubry, F. Rongère, and A. Glumineau, "Influence of control strategy on the global efficiency of a Direct Wave Energy Converter with electric Power Take-Off (revised version)," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013.
- [40] T. Kovaltchouk, F. Rongère, M. Primot, J. Aubry, H. Ben Ahmed, and B. Multon, "Model Predictive Control of a Direct Wave Energy Converter Constrained by the Electrical Chain using an Energetic Approach," in *European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, 2015, pp. 1-10.
- [41] T. Kovaltchouk, J. Aubry, B. Multon, and H. Ben Ahmed, "Influence of IGBT Current Rating on the Thermal Cycling Lifetime of a Power Electronic Active Rectifier in a Direct Wave Energy Converter," in *Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, pp. 1-10.
- [42] T. Kovaltchouk, S. Armstrong, A. Blavette, H. Ben Ahmed, and B. Multon, "Wave farm flicker severity: Comparative analysis and solutions," *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 32-39, 2016.
- [43] T. Kovaltchouk; A. Blavette; J. Aubry; H. Ben Ahmed; B. Multon, "Comparison between Centralized and Decentralized Storage Energy Management for Direct Wave Energy Converter Farm," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. PP, no.99, pp.1-1.
- [44] T. Kovaltchouk, H. Ben Ahmed, B. Multon, J. Aubry, and P. Venet, "An aging-aware life cycle cost comparison between supercapacitors and Li-ion batteries to smooth Direct Wave Energy Converter production," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2015.
- [45] T. Kovaltchouk. "Contributions à la co-optimisation contrôle-dimensionnement sur cycle de vie sous contrainte réseau des houlogénérateurs directs." Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2015 ;
- [46] K. Gunn et C. Stock-Williams, "Quantifying the global wave power resource", *Renewable Energy*, t. 44, p. 296-304, 2012.