



HAL
open science

Optimisation en couplage fort du pilotage et de la chaîne de conversion tout-électrique du houlogénérateur SEAREV

Judicael Aubry, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Marie Ruellan

► **To cite this version:**

Judicael Aubry, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Marie Ruellan. Optimisation en couplage fort du pilotage et de la chaîne de conversion tout-électrique du houlogénérateur SEAREV. EF 2009, Sep 2009, Compiègne, France, France. pp.P47. hal-00439646

HAL Id: hal-00439646

<https://hal.science/hal-00439646>

Submitted on 8 Dec 2009

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.

OPTIMISATION EN COUPLAGE FORT DU PILOTAGE ET DE LA CHAÎNE DE CONVERSION TOUT-ELECTRIQUE DU HOULOGENERATEUR SEAREV

Optimization in Hard Coupling of Control Strategy and All Electric Chain of SEAREV Wave Energy Converter

AUBRY Judicael¹, MULTON Bernard¹, BEN AHMED Hamid¹, RUELLAN Marie²

¹SATIE, ENS Cachan Antenne de Bretagne, CNRS, UEB, Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ

²SATIE, Université de Cergy-Pontoise, rue d'Eragny, 95031 Cergy Pontoise

judicael.aubry@bretagne.ens-cachan.fr

Résumé

Un système complexe, comme le houlogénérateur SEAREV, peut se décomposer en plusieurs sous-systèmes interagissant entre eux de manière plus ou moins couplée. L'optimisation globale d'un tel système ne peut se faire qu'en considérant l'ensemble des sous-systèmes. C'est ce que l'on appelle "l'approche système"¹. Mais lorsque le modèle numérique associé à un de ces sous-systèmes est très gourmand en temps de calcul (résolution d'équations différentielles, inversions de matrices de grande taille...), il n'est pas possible de conserver cette approche système. Il faut alors accepter une dégradation du problème d'optimisation. Dans notre cas, cela a consisté en une transformation d'un problème à variables continues en un problème à variables mixtes (discrètes et continues). Les variables discrétisées étant celles liées au modèle numériquement lourd, le temps de calcul est fortement diminué par un pré-calcul de ce modèle pour toutes les combinaisons discrètes possibles des variables. Nous nous plaçons dans le cadre de l'optimisation simultanée de la stratégie de pilotage du houlogénérateur SEAREV² et de sa chaîne de conversion tout-électrique. Cette optimisation a pour but de nous fournir des solutions (ensemble de paramètres décrivant la stratégie de pilotage, la géométrie de la génératrice électrique et les caractéristiques électriques du convertisseur) optimisant deux objectifs que sont la maximisation de l'énergie électrique récupérée et la minimisation du coût de la chaîne électrique. Les résultats obtenus sur un état de mer, permettent de montrer l'intérêt d'une optimisation par une "approche système" (ou simultanée) vis-à-vis d'une optimisation découplée (ou séquentielle) des paramètres de pilotage et de ceux de la chaîne électrique. Une optimisation sur deux états de mer permet quant à elle d'apporter un début de réponse à la question de l'existence d'un état de mer "dimensionnant".

Mots Clés : Houlogénérateur, Chaîne de conversion tout-électrique, Optimisation multi-objectif, Approche Système.

Abstract

A complex system, as the Wave Energy Converter SEAREV, can be broken up into several subsystems interacting with each other in a way more or less coupled. The global optimization of such a system can only be done by considering all subsystems. This is called "the system approach". But when the model associated with one or more of these subsystems is very heavy in computing time (solving differential equations, large matrices inversion...), it is not possible to keep this system approach. Then, we must accept a degradation of the optimization problem. In our case, it consists in a transformation of a continuous variables problem in a mixed variables problem (discrete and continuous). The discretized variables are those related to the heavy numerically model and then the computational time is greatly reduced by pre-calculating the model for all the possible discrete combinations of the variables.

We place ourselves within the framework of the simultaneous optimization of the SEAREV control strategy and its all-electric conversion chain. This optimization is intended to provide solutions (set of parameters describing the control strategy, the geometry of the electrical generator and the electrical characteristics of the converter) optimizing two objectives : the maximization of the recovered electrical energy and the minimization of the all-electric chain cost. The results obtained on a sea state, show the relevance of an "system approach" (or simultaneous) optimization compared to a decoupled (or sequential) optimization of the control parameters and those of the electrical chain. An optimization on two sea states allows to provide an initial answer to the existence of a "determinant for sizing" sea state.

Keywords : Wave Energy Converter, All-Electric Conversion Chain, Multi-objective Optimization, System Approach.

INTRODUCTION

Le SEAREV est un système de récupération de l'énergie des vagues. Le principe a été élaboré au Laboratoire de Mécanique des Fluides (LMF) de l'Ecole Centrale de Nantes avec lequel une collaboration a été mise en place depuis quatre ans 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 oléopneumatique³. Parmi la diversité des systèmes houlogénérateurs, le SEAREV est classé dans la catégorie des systèmes à corps mus par la houle⁴. En effet, comme on peut le voir sur la figure 1, le système étudié est constitué d'un flotteur mis en mouvement par la houle. A l'intérieur de celui-ci, une roue à masse excentrée, faisant office de pendule, oscille par rapport au flotteur. Une génératrice électrique (type machine synchrone à aimants par exemple) en entraînement direct, capable de fonctionner en régime de défluxage, permet de convertir l'énergie mécanique de la roue pendulaire en énergie électrique et amortit alors le mouvement relatif entre ces deux parties. Une des stratégies de pilotage de l'amortissement⁵ consiste à générer, via la génératrice électrique, un couple de frottement visqueux, c'est-à-dire avec un couple résistant proportionnel à la vitesse de rotation, avec, en outre, un écrêtage de la puissance mécanique convertie. Il en résulte deux paramètres de contrôle de ce couple : le coefficient d'amortissement β exercé par la génératrice sur le pendule et la puissance d'écrêtage mécanique P_{lev} .

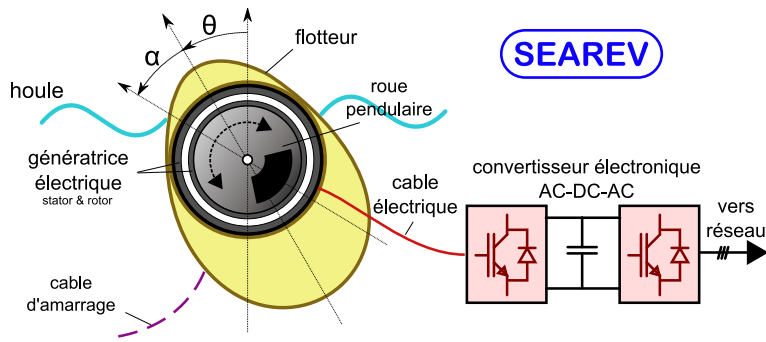


FIGURE 1 – Schéma de principe du SEAREV

Le système étudié est constitué d'un flotteur mis en mouvement par la houle. A l'intérieur de celui-ci, une roue à masse excentrée, faisant office de pendule, oscille par rapport au flotteur. Une génératrice électrique (type machine synchrone à aimants par exemple) en entraînement direct, capable de fonctionner en régime de défluxage, permet de convertir l'énergie mécanique de la roue pendulaire en énergie électrique et amortit alors le mouvement relatif entre ces deux parties. Une des stratégies de pilotage de l'amortissement⁵ consiste à générer, via la génératrice électrique, un couple de frottement visqueux, c'est-à-dire avec un couple résistant proportionnel à la vitesse de rotation, avec, en outre, un écrêtage de la puissance mécanique convertie. Il en résulte deux paramètres de contrôle de ce couple : le coefficient d'amortissement β exercé par la génératrice sur le pendule et la puissance d'écrêtage mécanique P_{lev} .

$$T = \begin{cases} \beta\Omega & \text{si } \beta\Omega^2 \leq P_{lev} \\ \frac{P_{lev}}{\Omega} & \text{si } \beta\Omega^2 > P_{lev} \end{cases} \quad (1)$$

OBJECTIF ET METHODOLOGIE

L'objectif de ce travail est d'approfondir⁵ le problème de l'optimisation du dimensionnement de la génératrice électrique et de son convertisseur électronique de puissance, dans un contexte système et de sollicitation temporelle fluctuante, donc sur cycle. Nous choisissons comme objectifs d'optimisation, la maximisation de l'énergie électrique récupérée sur une année E_{elec} (en pratique sur une succession d'états de mer différents) ainsi que la minimisation du coût de la chaîne électrique C_{elec} incluant le coût des matières premières de la machine et le coût du convertisseur complet (2 onduleurs MLI dos à dos) fondé sur une observation des coûts pratiqués sur une large plage de puissances nominales.

$$E_{elec} = \int_{\Delta T} T(t)\Omega(t) - P_{Joule}(t) - P_{iron}(t) dt (Wh) \quad (2)$$

$$C_{elec} = C_{Machine} + C_{Converter} (euros) \quad (3)$$

avec

$$C_{Machine} = M_{Fe}c_{Fe} + M_{Cu}c_{Cu} + M_{Mag}c_{Mag} (euros) \quad (4)$$

$$C_{Converter} = 6.7 * S_{Converter}^{0.7} (euros) \quad (5)$$

Le choix de ces deux objectifs n'est pas arbitraire. Ils permettent de traiter a posteriori la minimisation du prix de revient du kWh⁷ du système complet. Il suffit pour cela de tracer la tangente au front de Pareto passant par le point $(0, -C_{Searev})$ (C_{Searev} représente le coût du SEAREV hors chaîne électrique). Le point de contact correspond à la solution qui minimise le coût du kWh pour le C_{Searev} donné.

Les paramètres d'optimisation décrivent la géométrie de la génératrice (modèle volontairement simplifié mais qui peut être enrichi), les caractéristiques électriques nominales (tension et courant) du convertisseur ainsi que les paramètres de contrôle

13 Paramètres à optimiser...

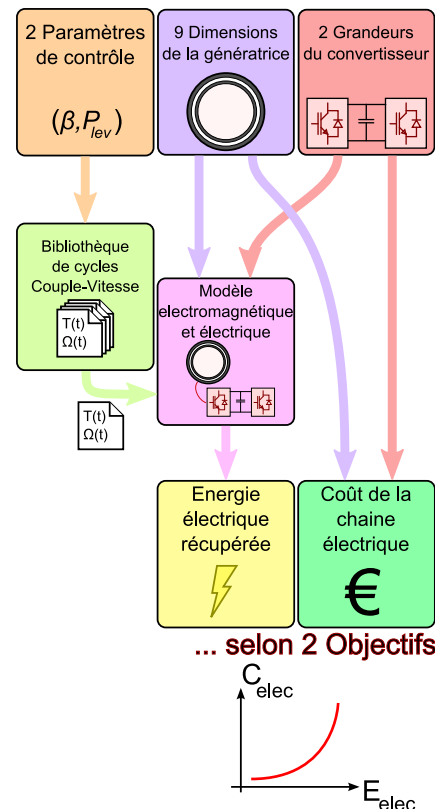


FIGURE 2 – Présentation de l'optimisation

du couple récupératif (β et P_{lev}) car ils influent directement sur l'allure du cycle Couple-Vitesse ($T(t), \Omega(t)$) qui dimensionne la chaîne électrique et donc sur la productivité énergétique mécanique E_{mech} du cycle. D'un point de vue numérique, une optimisation simultanée de tous ces paramètres pose un problème de temps de calcul. En effet, lorsque l'on envisage l'optimisation d'un problème de plus d'une dizaine de paramètres (ici 13), le nombre d'évaluations des objectifs nécessaire à une bonne convergence dépasse très vite la dizaine de milliers. Seulement dans notre cas, le modèle hydrodynamique et mécanique du SEAREV est une équation différentielle non linéaire à plusieurs variables qu'il faut résoudre sur un horizon temporel relativement important afin d'obtenir le cycle Couple-Vitesse nécessaire à l'évaluation des performances de la chaîne électrique. Sa résolution, pour des paramètres de contrôle (β et P_{lev}) donnés, un état de mer fixé et sur un horizon temporel de 1256 s, prend quelques dizaines de secondes, selon le pas de temps choisi, sur un PC de dernière génération (Intel Core 2 Duo). Dix mille évaluations de ce modèle représenteraient un temps de calcul supérieur à 1 jour. Si l'on souhaite relancer plusieurs fois l'optimisation ou augmenter le nombre d'évaluations pour vérifier par exemple la bonne convergence, pour évaluer les solutions sur les cycles d'une année entière, ou même effectuer des analyses de sensibilité à certains paramètres, un tel temps de calcul devient très vite inacceptable. Nous utilisons dans ce travail un algorithme d'optimisation multi-objectif à base d'essais particuliers (MOPSO)⁶ développé sous MATLAB au laboratoire.

Pour pallier ce problème, nous choisissons de discrétiser les valeurs des paramètres de contrôle du couple récupératif. Cette discrétisation permet d'effectuer un calcul systématique préliminaire de toutes les possibilités de (β, P_{lev}). Pour un état de mer donné, tous les cycles Couple-Vitesse ainsi obtenus sont sauvegardés (cf. Fig 2) et peuvent être alors rechargés en mémoire pendant l'optimisation, et ceci en un temps beaucoup plus faible que celui nécessaire au calcul complet du modèle hydrodynamique. Nous avons concrètement choisi de limiter à 30 le nombre de valeurs possibles pour chacun des paramètres de contrôle ce qui représente au final 900 possibilités (cycles) à pré-calculer. Cette méthode est ici efficace car le nombre de paramètres que l'on doit discrétiser est faible.

Cette méthode permet donc de lancer des optimisations avec un nombre d'évaluations des objectifs très important en conservant un temps de calcul raisonnable. Tous les fronts de Pareto présentés plus bas ont été obtenus en réunissant 10 fronts obtenus chacun en évaluant 900000 fois les objectifs. Résoudre 9 millions de fois le modèle hydrodynamique aurait pris plusieurs années. Avec cette méthode, les 10 fronts sont obtenus au bout de deux heures !

DESCRIPTION DES MODÈLES

Modèle hydrodynamique et mécanique

La modélisation hydrodynamique et mécanique du SEAREV a été effectuée au LMF de l'école Centrale de Nantes.

En partant d'un état de mer donné, elle permet de reconstruire un cycle de fonctionnement Couple-Vitesse. L'état de mer est généralement représenté par les deux grandeurs statistiques que sont la hauteur significative H_s et la période pic T_p ⁷. Elles permettent de caractériser complètement le spectre fréquentiel de l'énergie transportée par la houle. Ce spectre est appelé "de Pierson-Moskovitz" :

$$S(f) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{T_p} \frac{1}{f^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \frac{1}{(T_p f)^4}\right) \quad (6)$$

Il permet de reconstruire un profil temporel de houle selon la formule suivante :

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (7)$$

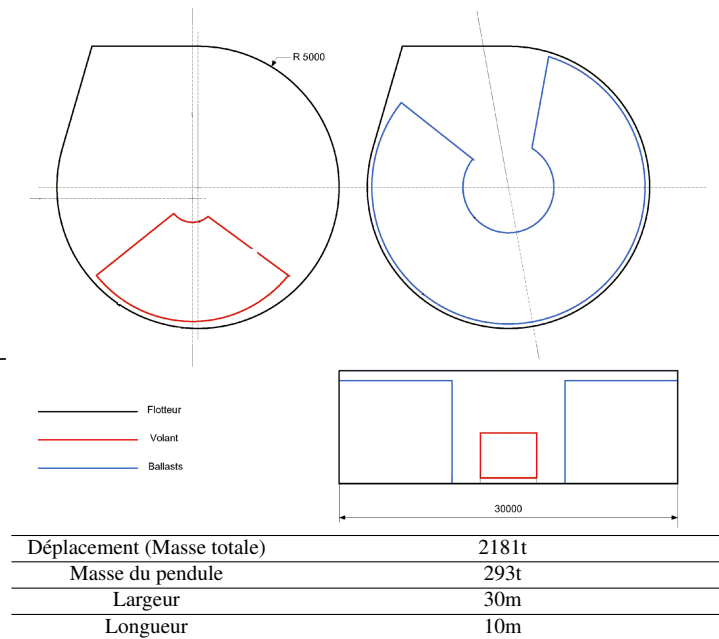


FIGURE 3 – Géométrie du SEAREV considérée

Ce profil temporel (cf exemple Figure 4) est ensuite utilisé pour résoudre l'équation différentielle décrivant le mouvement de l'ensemble du système. Il est alors possible de remonter au cycle Couple Vitesse de la génératrice

électrique. Ce cycle, et donc son potentiel énergétique, dépendent de plusieurs paramètres. Ils dépendent d'une manière générale de la géométrie du SEAREV. Nous la considérerons comme fixe (cf Figure 3), mais il faut garder à l'esprit qu'elle doit être elle-même optimisée... Ils dépendent aussi de l'état de mer (H_s-T_p) ainsi que des deux paramètres de contrôle du couple, qui, rappelons le, sont : le coefficient d'amortissement visqueux β et la puissance d'écrêtage mécanique P_{lev} (dans les phases d'écrêtage, l'amortissement est régulé pour que la puissance reste constante et égale à P_{lev}). Les figures présentées dans ce chapitre sont obtenues pour un état de mer de (8 s-3 m) et pour des paramètres de contrôle $\beta = 5.10^6 \text{ N.m.s}^{-1}$ et $P_{lev}=1 \text{ MW}$. La durée totale du cycle est de 1256 s.

Pour cet état de mer (8 s-3 m), nous représentons dans le plan (β, P_{lev}) , les variations de la valeur moyenne de la puissance mécanique (puissance récupérée qu'il reste à convertir électriquement et représentative de l'énergie récupérable sur le cycle). Nous remarquons ainsi qu'à puissance mécanique d'écrêtage fixée, il existe une seule valeur de β qui maximise la valeur moyenne de la puissance mécanique (points blancs). Cette valeur est constante pour de fortes valeurs de P_{lev} puis à tendance à croître ensuite lorsque P_{lev} diminue. Les irrégularités que l'on peut observer sont principalement dues à la non-linéarité du problème mécanique. La valeur moyenne de la puissance mécanique récupérée tend vers un maximum d'environ 260 kW (sur le cycle de 1256 s cela représente une énergie de 91 kWh). Pour un état de mer de (8 s-3 m), la puissance par mètre de front de mer est d'environ 40 kW.m^{-1} ($P_{wave} \approx 500H_s^2T_p$). Avec une longueur de 30 m, le géométrie du SEAREV considéré récupère, pour cet état de mer, au maximum 21% de l'énergie houlomotrice disponible.

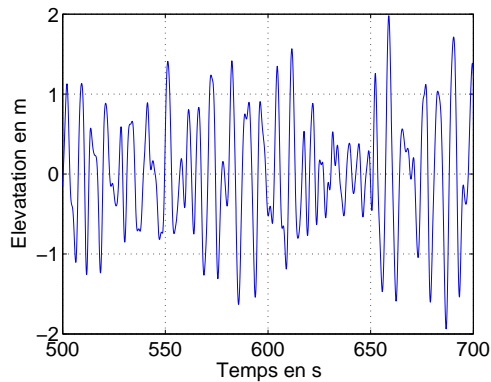


FIGURE 4 – Profil temporel d'élevation de la surface libre sur l'état de mer de l'exemple (8s,3m)

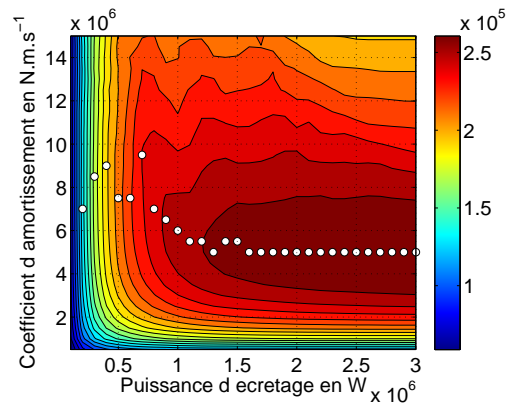


FIGURE 5 – Variation de la valeur moyenne de la puissance mécanique récupérée en fonction de P_{lev} et de β ; Points blancs : à P_{lev} donnée, valeur de β maximisant la valeur moyenne de la puissance mécanique

Modèle électromagnétique et électrique

Le modèle électromagnétique et électrique de l'ensemble convertisseur-machine considéré ici se base sur le modèle de Park (donc linéaire) d'une génératrice type synchrone à aimants déposés en surface. Ce modèle intègre déjà des critères de minimisation de pertes⁸ sous contraintes de tension et de courant liées aux grandeurs nominales du convertisseur mais aussi de désaimantation des aimants et de saturation des parties ferromagnétiques. Cette optimisation, incluant les contraintes, permet d'intégrer implicitement les critères de défluxage de la génératrice⁹. Nous pouvons formaliser cette optimisation, qui doit être faite pour chaque point de fonctionnement du cycle, de la manière suivante :

$$\min_{i_{0d}, i_{0q}} P_{Joule} + P_{Iron} \quad (8)$$

En respectant les contraintes

$$\begin{aligned} (T, \Omega) & \text{fixé} \\ v & \leq v_{rated} \\ i & \leq i_{rated} \\ H & \geq H_k \\ B & \leq B_{sat} \end{aligned} \quad (9)$$

Pour montrer un exemple, nous avons représenté sur la figure 6, l'espace de fonctionnement atteignable, dans le plan couple-vitesse pour un ensemble convertisseur machine particulier (les valeurs négatives correspondent au fonctionnement générateur car nous avons conservé des conventions en moteur). Nous constatons sur cette topologie, une légère aptitude au défluxage. Pour s'en convaincre, nous avons aussi représenté (cf Fig 7) la zone de fonctionnement atteignable, avec la même machine, mais cette fois en n'autorisant pas le défluxage (en fixant $i_{0d} = 0$). Nous remarquons alors que toute une zone à vitesse élevée ne peut plus être atteinte.

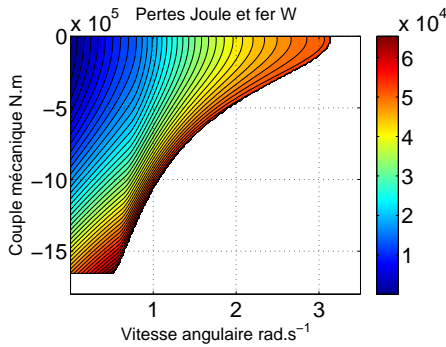


FIGURE 6 – Exemple d'ensemble convertisseur-machine : gabarit Couple-Vitesse obtenu avec possibilité de défluxage

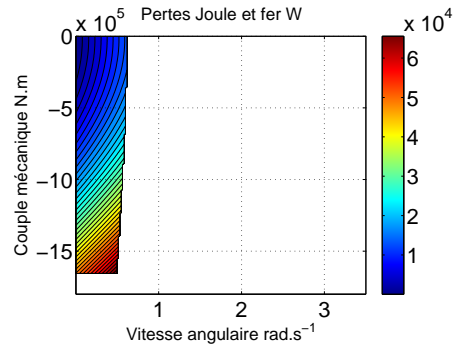


FIGURE 7 – Convertisseur-machine de la figure 6 : gabarit Couple-Vitesse obtenu cette fois sans défluxage

ANALYSE DES RÉSULTATS

Optimisation sur un état de mer

Nous avons effectué une optimisation de l'ensemble du système pour l'état de mer typique précédent (8 s-3 m). Chaque solution obtenue sur le front de Pareto (cf. Fig 8 courbe bleue) correspond à un ensemble de paramètres décrivant le contrôle du couple récupératif, la géométrie de la génératrice et les caractéristiques nominales du convertisseur. Ces solutions optimisent deux objectifs qui sont la puissance électrique moyenne P_{elec} (choisir le critère d'énergie électrique E_{elec} n'est intéressant que pour un dimensionnement sur une année, sur un seul état de mer nous préférons P_{elec} qui correspond à la puissance mécanique moyenne P_{mech} diminuée des pertes moyennes sur cycle) ainsi que le coût de la chaîne électrique C_{elec} . Les deux objectifs choisis sont bien contradictoires. Un convertisseur avec une forte puissance apparente associé à une génératrice de masse élevée permettra de récupérer une puissance moyenne plus élevée. Le maximum de la puissance électrique moyenne tend vers une limite qui est celle du maximum de la puissance mécanique récupérée (en l'absence d'écrêtage : puissance P_{lev} infinie ≈ 260 kW).

La démarche d'optimisation présentée ici, tient compte du couplage qui existe entre le dimensionnement de la génératrice et le choix des paramètres de contrôle. Pour se convaincre de l'intérêt d'un tel couplage, nous présentons sur la même figure, les résultats d'une optimisation où les paramètres de contrôle sont fixés ($\beta = 5.10^6$ N.m.s⁻¹ et $P_{lev} = 1$ MW) (cf. Fig 8 courbe verte). Nous remarquons alors que le front de Pareto obtenu est beaucoup moins étendu. Il est notamment impossible d'atteindre de faibles coûts de la chaîne électrique. Cela s'explique, entre autres, à cause du convertisseur d'électronique de puissance qui doit alors avoir une puissance apparente supérieure ou égale à la puissance d'écrêtage.

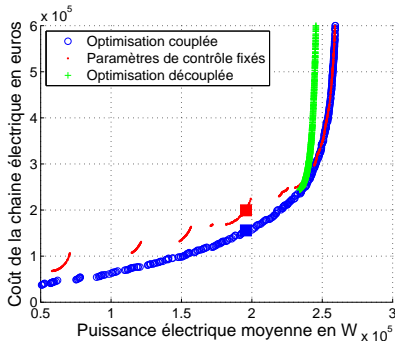


FIGURE 8 – Fronts de Pareto obtenus avec trois méthodologies d'optimisation différentes

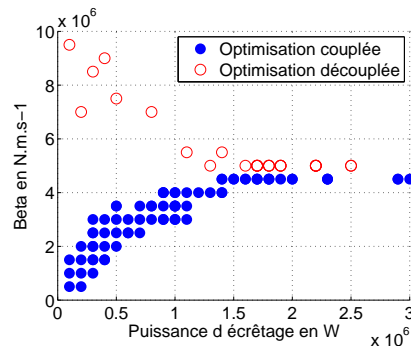


FIGURE 9 – Paramètres de contrôle solutions de l'optimisation couplée et découplée

Dans nos précédents travaux sur ce sujet, les paramètres de contrôle étaient optimisés de manière préliminaire et donc découplée. Les objectifs considérés étaient alors la maximisation de la puissance mécanique moyenne P_{moy} et la minimisation de la puissance mécanique maximale P_{max} (celle-ci peut-être différente de la puissance d'écrêtage P_{lev} notamment si cette dernière n'est jamais atteinte). Nous traçons donc sur la même figure (cf Fig 8 courbe rouge), les résultats d'une optimisation de la chaîne électrique obtenus en limitant les valeurs des paramètres de contrôle à ceux optimisant les objectifs P_{moy} et P_{max} . Les résultats obtenus sont toujours dominés au sens de Pareto par ceux de l'optimisation couplée. Cela montre donc bien l'intérêt d'une optimisation couplée de la chaîne électrique et des paramètres de contrôle.

Sur la figure 9, nous présentons les paramètres de contrôle solutions de l'optimisation couplée ainsi que les paramètres de contrôle optimisant les objectifs P_{moy} et P_{max} . Nous constatons que la tendance suivie sur le front de Pareto de l'optimisation couplée est une diminution simultanée de β et de P_{lev} , alors que pour l'optimisation découplée β augmente lorsque P_{lev} diminue.

Nous détaillons dans la suite une solution particulière de l'optimisation couplée (cf Fig 8 carré bleu) et une autre de l'optimisation découplée (cf Fig 8 carré rouge) qui conduisent toutes deux à la même valeur moyenne de la puissance récupérée. Les figures 10 et 11 présentent les géométries des génératrices obtenues, avec en détail une paire de pôles. Les figures 12 et 13 présentent les gabarits Couple-Vitesse de ces génératrices ainsi que le cycle correspondant aux paramètres de contrôle de ces solutions. Enfin le Tableau 1 récapitule quelques caractéristiques résultantes des solutions présentées.

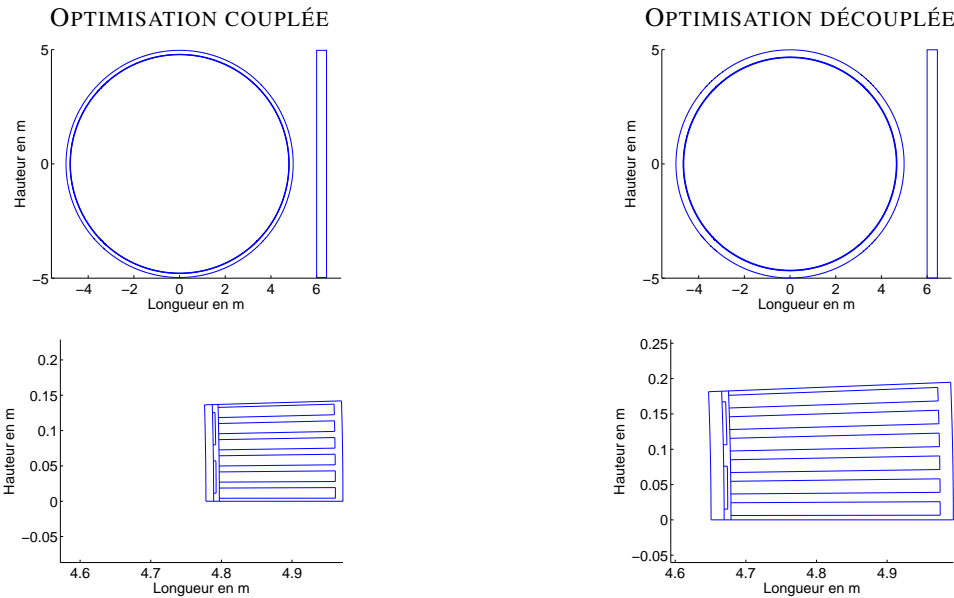


FIGURE 10 – Géométrie de la solution de l'optimisation couplée FIGURE 11 – Géométrie de la solution de l'optimisation découplée

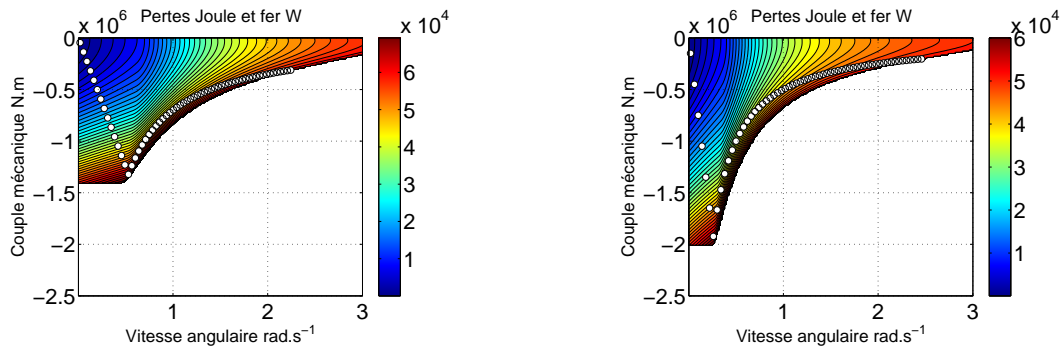


FIGURE 12 – Gabarit Couple-Vitesse et cycle de fonctionnement correspondant FIGURE 13 – Gabarit Couple-Vitesse et cycle de fonctionnement correspondant

Nous constatons, bien que ces deux solutions récupèrent au final la même énergie électrique, que les paramètres de contrôle sont différents. Dans le cas de l'optimisation découplée, la puissance d'écrêtage est plus faible (500 kW contre 700 kW pour l'optimisation couplée) et cela entraîne une puissance apparente du convertisseur et donc un coût associé plus faibles. Seulement pour obtenir la même énergie électrique, le coefficient d'amortissement visqueux doit être plus élevé (7.5 MN.m.s⁻¹ contre 2.5 pour l'optimisation couplée). La conséquence directe est que le couple maximal sur le cycle est plus important (1.9 MN.m contre 1.3 pour l'optimisation couplée) comme on peut le voir sur les figures 12 et 13), cela entraîne donc un surdimensionnement de la génératrice. Le surcoût engendré sur la génératrice est alors plus important que celui gagné sur le convertisseur. L'interprétation de ce résultat doit bien sûr être pondérée par le fait que les paramètres de coût sont discutables et peuvent évoluer, d'où la nécessité d'études de sensibilité à ces paramètres.

Paramètres	Unité	Optimisation couplée	Optimisation découplée
Énergie électrique récupérée	kWh	68	68
Coût de la chaîne électrique	k€	155	200
Coût de la génératrice (parties actives)	k€	66	123
Coût du convertisseur	k€	89	77
Puissance apparente du convertisseur	kVA	780	630
Puissance mécanique d'écrêtage	kW	700	500
Coefficient d'amortissement visqueux	MN.m.s ⁻¹	2.5	7.5
Énergie mécanique du cycle	kWh	74	75
Nombre de paires de pôles	-	220	161
Masse des parties actives	kg	14000	27000
Masse des aimants	kg	234	345
Diamètre externe	m	10	10
Longueur externe	m	0.43	0.45

Optimisation sur plusieurs états de mer

Nous allons étudier dans ce chapitre l'influence d'une optimisation sur plusieurs états de mer. Sur un site donné, il apparaît au cours d'une année une multitude d'états de mer, chacun ayant une certaine fréquence d'occurrence. Les états de mer les plus énergétiques sont ceux qui ont à la fois une puissance importante mais aussi une fréquence d'occurrence élevée. Il existe certains états de mer qui sont très puissants mais avec une faible fréquence d'occurrence. Nous allons voir si ces états de mer puissants mais peu énergétiques, sont "dimensionnants" pour la chaîne électrique. Pour simplifier la présentation de l'approche, nous considérons simplement que deux états de mer.

Nous avons représenté sur la figure 14, trois fronts de Pareto. Le premier (courbe bleue) est obtenu sur un état de mer typique (8 s-3 m, $P_{wave} \approx 40 \text{ kW.m}^{-1}$). Le deuxième (courbe verte) est obtenu avec un état de mer très puissant mais peu probable (12 s-7.5 m, $P_{wave} \approx 300 \text{ kW.m}^{-1}$). Nous remarquons sur ce dernier que la puissance moyenne récupérée maximale est plus importante. Ces deux états de mer diffèrent par leur potentiel énergétique mais aussi par l'allure des cycles temporels qu'ils engendrent. A paramètres de contrôle donnés, les vitesses maximales atteintes, avec l'état de mer puissant, seront plus importantes en zone d'écrêtage qu'avec l'état de mer typique.

Nous avons voulu savoir comment, les solutions de chaînes de conversion optimisées sur un état de mer, se comportaient si on les testait sur l'autre. Nous fixons donc les paramètres de la chaîne électrique à une des solutions d'un front de Pareto, et nous ré-optimisons les paramètres de contrôle sur l'autre état de mer pour balayer l'ensemble des points de fonctionnement requis. Toutes les solutions obtenues sur l'état de mer typique ne "supportent" pas l'état de mer puissant quels que soient les paramètres de contrôle choisis. En particulier, leur zone de défluxage n'est pas suffisamment étendue pour atteindre les vitesses élevées engendrées par l'état de mer puissant. Nous avons en outre pu calculer les performances sur l'état de mer typique, de quelques solutions obtenues avec l'état de mer plus puissant. Celles-ci sont représentées par les points pleins noirs sur la figure 14. On remarque donc que les chaînes optimisées sur l'état de mer puissant ne sont pas optimales sur l'état de mer typique mais elles restent "proches" du front de Pareto et respectent les différentes contraintes.

Nous représentons un troisième front de Pareto (courbe rouge) qui est obtenu en considérant des fréquences d'occurrence de 90% pour l'état de mer (8 s-3 m) et de 10% pour l'état de mer (12 s-7.5 m). Là encore, nous pouvons calculer les performances des solutions dimensionnées sur l'état de mer puissant (cf Fig 14 cercles noirs) et les comparer aux solutions directement optimisées sur ce mélange des deux états de mer. Bien que les solutions dimensionnées sur l'état de mer puissant ne soient pas optimales sur ce mélange d'états de mer, la différence au niveau des objectifs est relativement faible avec les solutions optimisées pour cela.

Nous résumons dans le tableau 2, quelques grandeurs caractéristiques de deux solutions convertisseur-machine valant chacune 300 k€. La première dimensionnée sur l'état de mer (12 s-7.5 m), la deuxième dimensionnée sur le mélange des deux états de mer. Ces deux solutions ont des objectifs proches, mais leurs topologies sont différentes. Si l'on souhaite donc dimensionner rigoureusement la chaîne électrique sur deux états de mer, il faut l'optimiser en les considérant tous les deux et avec des paramètres de contrôle propres à chacun. En effet, ce sont ces solutions dimensionnées sur ces deux états de mer qui sont les meilleures au sens de Pareto par rapport aux solutions dimensionnées sur un seul état de mer. Par contre les solutions optimisées sur l'état de mer puissant semblent être proches

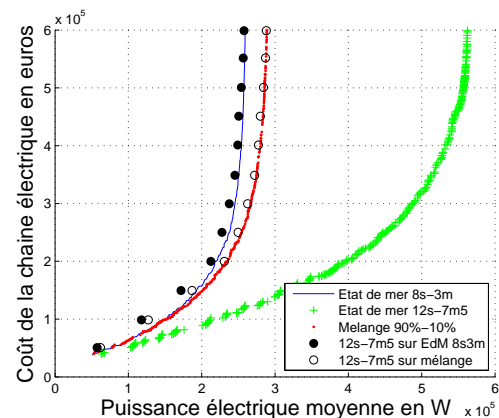


FIGURE 14 – Fronts de Pareto d'optimisation sur différents états de mer

des solutions dimensionnées sur les deux états de mer. Celui-ci pourrait donc servir d'état de mer "dimensionnant" dans le cadre d'un prédimensionnement de la chaîne électrique.

Paramètres	Unité	Mélange 90% -10%	Etat de mer 12 s-7.5 m
Energie électrique récupérée sur le mélange	kWh	93	91
Coût de la chaîne électrique (mach.-conv.)	k€	300 (158-142)	300 (132-168)
Puissance apparente du convertisseur	kVA	1520	1930
Nombre de paires de pôles	-	141	203
Masse des parties actives	kg	35903	28324
Diamètre externe	m	10	10
Longueur externe	m	0.58	0.86

NOMENCLATURE

Nom	Définition	Unité	Nom	Définition	Unité
β	Coefficient d'amortissement visqueux	N.m.s ⁻¹	$C_{machine}$	Coût de la génératrice	€
P_{lev}	Puissance mécanique d'écretage	W	$C_{converter}$	Coût du convertisseur	€
T	Couple électromagnétique	N.m	$S_{converter}$	Puissance apparente du convertisseur	VA
Ω	Vitesse de rotation de la génératrice	s ⁻¹	v_{rated}	Tension nominale du convertisseur	V
H_s	Hauteur significative	m	i_{rated}	Courant nominal du convertisseur	A
T_p	Période pic	s	H_k	Champ coercitif des aimants	A.m ⁻¹
$S(f)$	Densité spectrale de puissance de la houle		B_{sat}	Induction limite	T
$\eta(t)$	Élévation de la surface libre	m	E_{elec}	Energie électrique récupérée sur le cycle	W.h
P_{lin}	Puissance linéique de la houle	kW.m ⁻¹	C_{elec}	Coût de la chaîne électrique	€
E_{mech}	Energie mécanique du cycle	W.h	c_X	Coût massique de l'élément X	€/kg ⁻¹

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une méthode d'optimisation du dimensionnement de la chaîne de conversion tout-électrique en la couplant avec l'optimisation des paramètres de contrôle du couple de récupération. Nous avons montré qu'une discrétisation de ces derniers paramètres permettait de réduire considérablement le temps de calcul nécessaire à l'optimisation.

Nous avons décrit brièvement les différents modèles présents dans le calcul, puis présenté les résultats d'une optimisation sur un état de mer donné. Une comparaison avec des méthodes d'optimisation non couplées a été effectuée, en observant les fronts de Pareto et en étudiant deux solutions particulières. Cela a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une optimisation couplée en terme d'optimalité des solutions obtenues.

Nous avons aussi étudié l'influence de l'apparition d'un second état de mer sur le dimensionnement de la chaîne électrique. L'état de mer le plus puissant peut, dans l'approche simplifiée d'un prédimensionnement, être considéré comme "dimensionnant", mais les solutions obtenues restent toujours inférieures (au sens de Pareto) à celles dimensionnées de manière rigoureuse sur les deux états de mer.

Les auteurs remercient la Région Bretagne pour son soutien financier au travers de l'Allocation de Recherche Doctorale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] REGNIER J., Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multi-critère, Thèse de Doctorat, INP de Toulouse, 2003
- [2] BABARIT A., Optimisation hydrodynamique et contrôle optimal d'un récupérateur de l'énergie des vagues, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2005
- [3] M. RUELLAN, H. BEN AHMED, B. MULTON, C. JOSSET, A. BABARIT, A. CLÉMENT, Design Methodology for a SEAREV Wave Energy Converter, A paraître dans IEEE trans. on Energy Conversion sept. 2009.
- [4] J. FALNES, A review of wave-energy extraction, Marine Structures, Elsevier, Septembre 2007
- [5] RUELLAN M., Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues, Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, soutenue le 11 décembre 2007.
- [6] COELLO C.A., SALAZAR M., MOPSO : A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization, Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), Vol. 2, pp. 1051-1056, IEEE Service Center, Piscataway, New Jersey, May 2002.
- [7] AUBRY J., Minimization of the kWh cost by optimization of an all-electric chain for the SEAREV Wave Energy Converter, International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), 2008
- [8] S. MORIMOTO, Y. TONG, Y. TAKEDA, T. HIRISA, Loss minimization control of permanent magnet synchronous motors drives, IEEE Trans. Ind. Electron., vol 41, no 5, pp 511-517, Oct 1994
- [9] AUBRY J., Contribution à l'optimisation d'une chaîne électrique associée à un système de récupération de l'énergie des vagues, Rapport de Master 2 Recherche, École Polytechnique de l'Université de Nantes, soutenue le 11 juillet 2008.