

**REVUE DE L'EFFET DES INTERACTIONS DE VAGUES
DANS LES PARCS HOULOMOTEURS**

***REVIEW ON THE PARK EFFECT IN ARRAYS OF
WAVE ENERGY CONVERTERS***

A. BABARIT*

* LUNAM Université, Ecole Centrale De Nantes - CNRS, Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, 44321
NANTES Cedex 3

aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Résumé

Dans ce travail, on a réalisé une revue de la littérature traitant des effets d'interactions de vagues sur l'absorption d'énergie dans les fermes houlomotrices. Les principaux résultats de ces études sont extraits, avec pour objectif d'en tirer des conclusions et de proposer des recommandations quant à l'arrangement géométrique et l'espacement dans les parcs pour minimiser les effets de parc destructifs. Dans une première partie on s'intéresse aux résultats obtenus en houle régulière qui, bien que théoriques, permettent d'identifier et de comprendre un certain nombre d'effets. Ensuite, on s'intéresse aux résultats obtenus en houle irrégulière ; à portée plus pratique. Des tendances similaires sur l'effet de parc sont observées selon le nombre de systèmes que l'on considère et l'écartement entre machines, ce qui nous permet de proposer des recommandations quant à l'arrangement des fermes houlomotrices.

Summary

In this study, a review of the literature dealing with wave interaction effects in arrays of Wave Energy Converters (WECs) is presented. Main results of the examined studies are extracted with the aim of drawing conclusions and deriving tentative guidelines for the layout of WEC arrays. The method is based on a literature review. First, results obtained in regular waves are considered. Although theoretical, they are useful to identify and understand the physical effects involved. Then, results in irregular waves – which are more practical - are discussed. It is shown that similar trends can be observed depending on the number of WECs in the array and the layout. It allows to propose tentative guidelines regarding the layout of arrays of WECs.

I – Introduction

Par définition, un système houlomoteur absorbe une partie de la ressource énergie des vagues. Par conséquent, la ressource disponible est réduite pour les houlomoteurs placés aux alentours. Cela conduit au fait que la puissance absorbée par un parc de N houlomoteurs est différente de N fois la puissance absorbée par un système isolé. C'est l'effet de parc.

Cet effet de parc est bien connu dans l'éolien. Des travaux de recherche ont montré que cet effet se réduit lorsque la distance entre les éoliennes augmente. La quantification de cette décroissance a permis d'établir des recommandations sur les distances longitudinales et latérales entre machines afin de minimiser cet effet de parc.

Pour les houlomoteurs, il n'existe pas de telles recommandations à l'heure actuelle et ce bien qu'un nombre important d'articles sur le sujet des interactions de vagues dans les parcs houlomoteurs ait été publié depuis une trentaine d'années. En analysant cette littérature, l'objectif de cette étude est de résumer les observations qui ont été réalisés jusqu'alors et d'en tirer des conclusions..

II – Littérature et résultats en en houle régulière

II – 1 Le q-factor

Le q-factor, dénomination britannique, est une mesure qui quantifie l'effet d'interactions de vagues dans les parcs houlomoteurs. Il est défini comme le rapport de la puissance absorbée par le parc divisé par N fois la puissance d'une unité houlomotrice isolée, N étant le nombre d'unités dans le parc. Si $q < 1$, cela signifie que la puissance moyenne par houlomoteur est inférieure à la puissance d'une machine isolée. L'effet de parc est donc destructif. Au contraire, si $q > 1$, l'effet de parc est constructif.

$$q = \frac{P_{array}}{NP_{isolated}} \quad (1)$$

Cette mesure a été introduit au début des années 80 par différents auteurs [1], [2], [3]. Dans leurs travaux, ils ont montré que pour différentes combinaisons d'arrangement de parcs et de fréquences de houle, il est possible d'obtenir un q-factor (effet de parc) considérablement plus grand que 1, figure 1.

Il faut cependant noter qu'il s'agit là d'un résultat éminemment théorique : en effet le cas d'étude est celui d'une ligne infinie de bouées pilonnantes, en houle régulière et avec contrôle optimal. En pratique, la houle irrégulière et le contrôle optimal semblent impossibles à réaliser. C'est la raison pour laquelle dans [5], les auteurs recommandent de privilégier pour l'application pratique des configurations qui minimise les interactions destructives ($q < 1$). C'est aujourd'hui l'opinion dominante.

II – 2 Des relations remarquables

Dans [6], il est démontré dans le domaine fréquentiel que le q-factor d'un parc sous contrôle optimal satisfait la relation :

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} q(\omega, \beta) d\beta = 1 \quad (2)$$

Où β est la direction de propagation de la houle et ω la pulsation de houle.

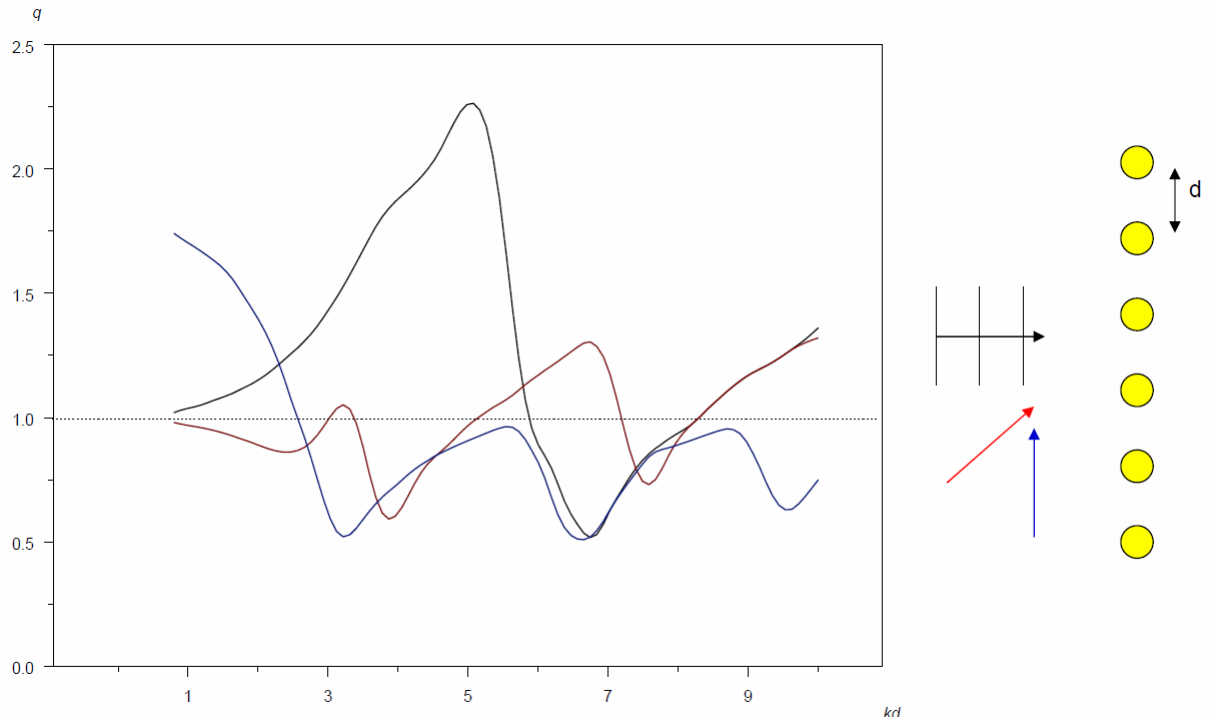


Figure 1. q -factor en fonction du produit du nombre d'ondes k et de l'espacement entre machines d pour une ligne de houlomoteurs cylindriques pilonnants avec contrôle optimal réactif. La couleur des courbes indique la direction de houle. La figure est extraite de [4].

Cela signifie que l'intégrale sur toutes les directions de houle incidente du q -factor est égale à l'unité. En d'autres termes, si le q -factor est considérablement plus grand que 1 dans une direction, il doit exister une ou plusieurs directions où il est plus petit que 1. Une illustration est présentée figure 2, tirée de [6], pour trois parcs de cinq bouées pilonnantes avec des arrangements différents.

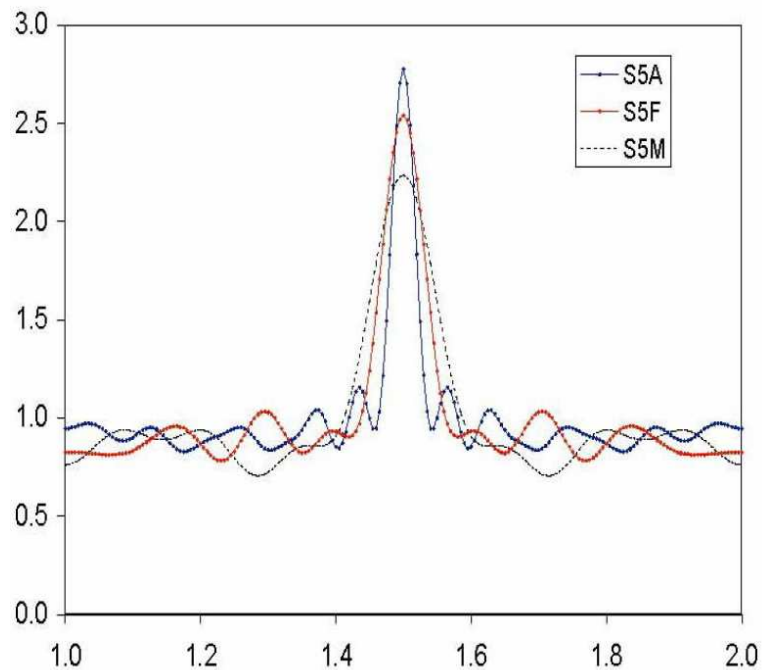


Figure 2. q -factor en fonction de l'angle d'incidence de la houle pour un parc de 5 bouées pilonnantes. La figure est tirée de [6].

On observe que l'effet de parc est beaucoup plus grand que 1 pour les directions de houle incidente proche de 180° , mais que pour toutes les autres directions de houle, l'effet de parc est négatif. Comme expliqué dans [5] et déjà discuté plus haut, ce résultat indique qu'en pratique, il n'est faisable de rechercher des configurations qui maximisent l'effet de parcs que si les directions de houle sur site varient peu. Sinon, il vaut mieux rechercher des configurations qui minimisent les effets destructifs.

Récemment, dans [7], il a été montré une généralisation de ce résultat pour un parc de houlomoteurs à N degrés de liberté indépendants :

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P_{array}(\omega, \beta) d\beta = N \frac{J}{k} \quad (3)$$

L'intégrale sur toutes les directions de la puissance absorbée par le parc P_{array} est égale au nombre de degrés de liberté N multiplié par le flux d'énergie de la houle J divisé par le nombre d'ondes k . On montre ainsi qu'en maximisant le nombre de degrés de liberté N , on optimise le maximum de puissance que peut absorber un parc. Ce résultat indique que les systèmes houlomoteurs composés d'une plateforme supportant un grand nombre de bouées oscillantes (comme la plateforme FO3 [8], le Manchester Bobber [9] ou le WEPTOS [10]), ou encore les houlomoteurs déformables (comme l'Anaconda [11] ou le SBM S3 [12]) pourraient être particulièrement performants pour absorber la houle.

II – 3 Taux de reconstruction du flux d'énergie derrière un houlomoteur isolé.

Dans [13], l'expression du flux d'énergie J à une distance d assez grande à l'arrière d'un houlomoteur isolé est établie en grande profondeur. Elle est basée sur le développement asymptotique de la fonction de Green et la représentation du champ lointain par fonction de Kochin :

$$J(d) = J_0 \left(1 + \frac{2\omega}{g} \sqrt{\frac{k}{2\pi d}} \Im \left(\tilde{H}(0) e^{-i\frac{\pi}{4}} \right) \right) \quad (4)$$

Où $\tilde{H}(0)$ est la fonction de Kochin pour la direction 0 degré et J_0 est le flux d'énergie associée à la houle incidente. On peut constater que le flux d'énergie derrière le houlomoteur est reconstruit avec la racine carrée de la distance à la source de la perturbation. Ceci prouve qu'à une distance suffisamment importante, les interactions entre houlomoteurs peuvent être négligées.

II – 4 Autres résultats remarquables pour de petits parcs en houle régulière.

Dans [14], un parc composé de deux bouées pilonnantes aligné avec la direction de propagation de la houle est considéré. Il est montré que l'effet de parc est plus important pour le houlomoteur à l'avant du parc que pour celui à l'arrière du parc. Ce résultat quelque peu surprenant peut s'expliquer par le fait que le houlomoteur à l'avant bénéficie de la houle diffractée/rayonnée émise par le houlomoteur située à l'arrière. Cet effet a également été observé dans [13] et [15].

Dans [13], un parc composé de deux houlomoteurs est également considéré, mais cette fois pour des bouées pilonnantes et pour des volets en cavalemt. L'étude montre qu'asymptotiquement, l'effet de parc décroît comme la racine carrée de la distance entre les houlomoteurs, figure 3. On remarquera que ce résultat est en accord avec le taux de reconstruction du flux d'énergie, équation 4. Il est également remarqué que l'effet de parc est

faible (<10%) dès que les houlomoteurs sont distants de quelques centaines de mètres.

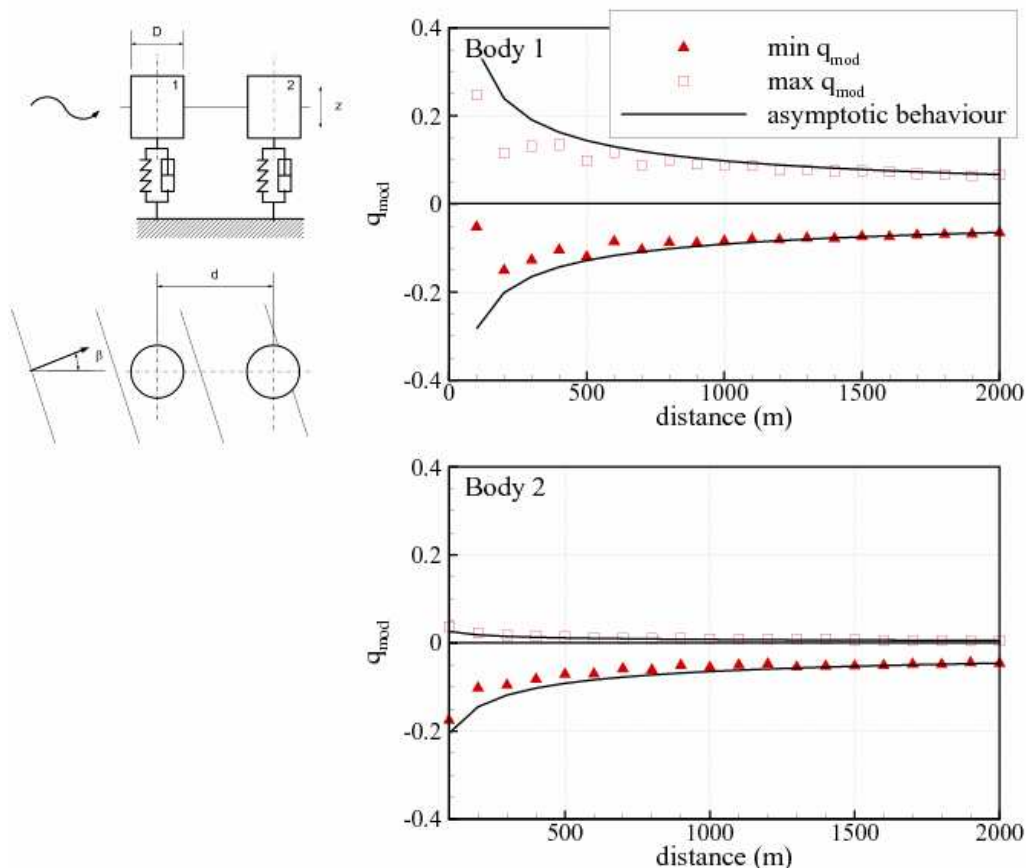


Figure 3. Evolution du maximum et minimum de l'effet de parc en fonction de la période de parc pour un parc de deux bouées pilonnantes, en fonction de l'éloignement des bouées. La figure en haut est pour la bouée à l'avant et la figure d'en bas pour la bouée à l'arrière. Les courbes en noir sont les résultats d'un lissage en utilisant une fonction en puissance -0.5. La figure est extraite de [13]

III – Littérature et résultat en houle irrégulière

III – 1 Remarques importantes.

- Cette revue n'inclue pas les résultats obtenus au moyen d'outils basés sur les équations de propagation de la densité d'onde. En effet, la manière dont sont modélisés les houlomoteurs dans ces outils à l'heure actuelle n'est pas jugée satisfaisante.
- Les résultats obtenus pour des parcs de houlomoteurs séparés par de petites distances (quelques diamètres caractéristiques), comme le Manchester Bobber [9] ou la plateforme FO3 [8] par exemple, ne sont pas pris en considération. En effet, ces systèmes devraient être considérés comme une seule unité, comme cela est fait dans [8].

III – 2 Effet de parc dans les petites fermes (jusqu'à 10 unités).

A notre connaissance, [16] a été le premier à chercher à quantifier l'effet de parc en houle irrégulière du point de vue de la production d'énergie en moyenne annuelle. Deux configurations géométriques de ferme ont été considérées, figure 4.

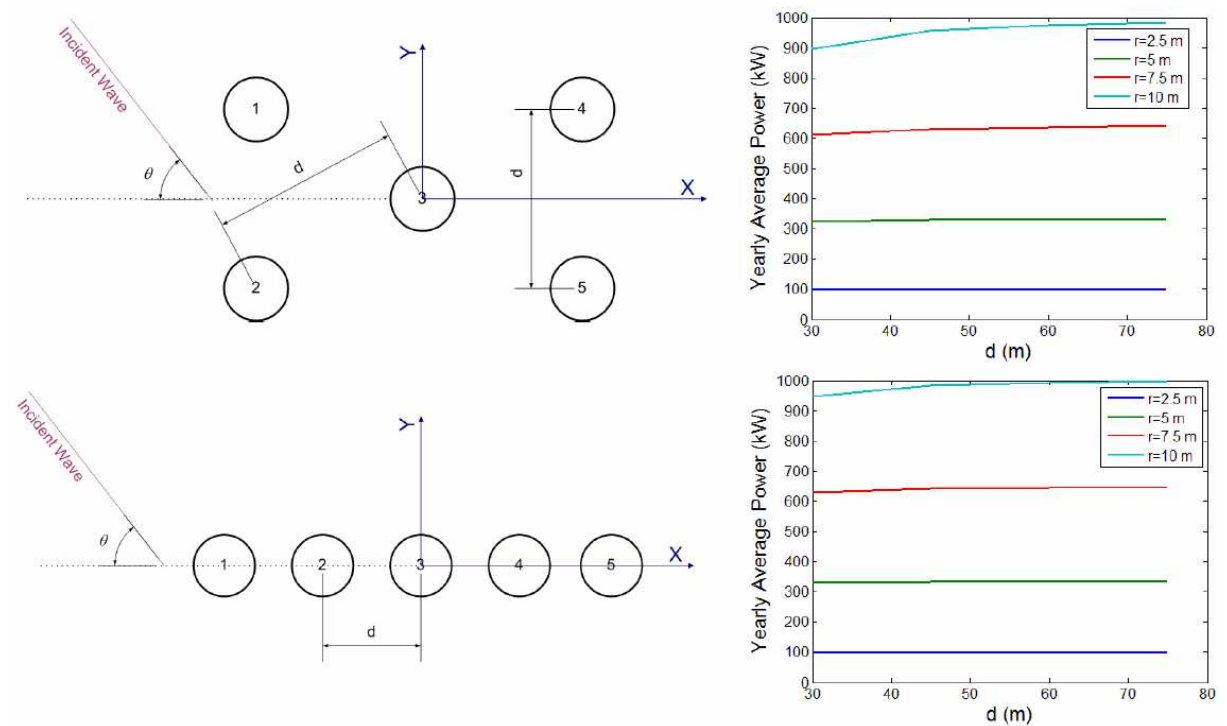


Figure 4. Puissance moyenne annuelle absorbée par un parc houlomoteur en fonction de la distance entre les bouées. La figure est extraite de [16].

Cette étude montre que :

- L'absorption d'énergie est quasiment indépendante de l'éloignement lorsque la distance entre bouée est supérieure à 4 rayons.
- L'optimisation du coefficient d'amortissement représentant le convertisseur d'énergie (PTO) ne modifie pas significativement la production d'énergie en comparaison avec la valeur obtenue pour une unité isolée.

Des résultats comparables ont été obtenus dans les travaux suivants :

- Dans [17] pour un parc de quatre bouées pilonnantes : il est montré que réduction de la puissance absorbée en houle irrégulière est au maximum de 8%, et que l'optimisation du coefficient modélisant le PTO pour chaque unité du parc n'augmente l'absorption d'énergie que par 1%.
- Dans [13] pour une ferme de deux bouées pilonnantes (array I de la figure 5) et deux volets en cavalemt (array II de la figure 5). On constate que dans les deux cas, l'effet de parc est négligeable dès que la distance est plus grande qu'une centaine de mètres.
- Dans [18] pour un parc de deux houlomoteurs. Il est observé que l'effet de parc est toujours inférieur à 5% pour des distances supérieures à la centaine de mètres, figure 6.
- Dans [15] pour un parc de 10 volets en cavalemt. Une étude systématique de l'effet de parc en fonction de l'éloignement longitudinal et latéral a été réalisée. Il est montré que la puissance absorbée en moyenne annuelle ne changent que de quelques pourcents par rapport à celle d'un système isolée, figure 7.

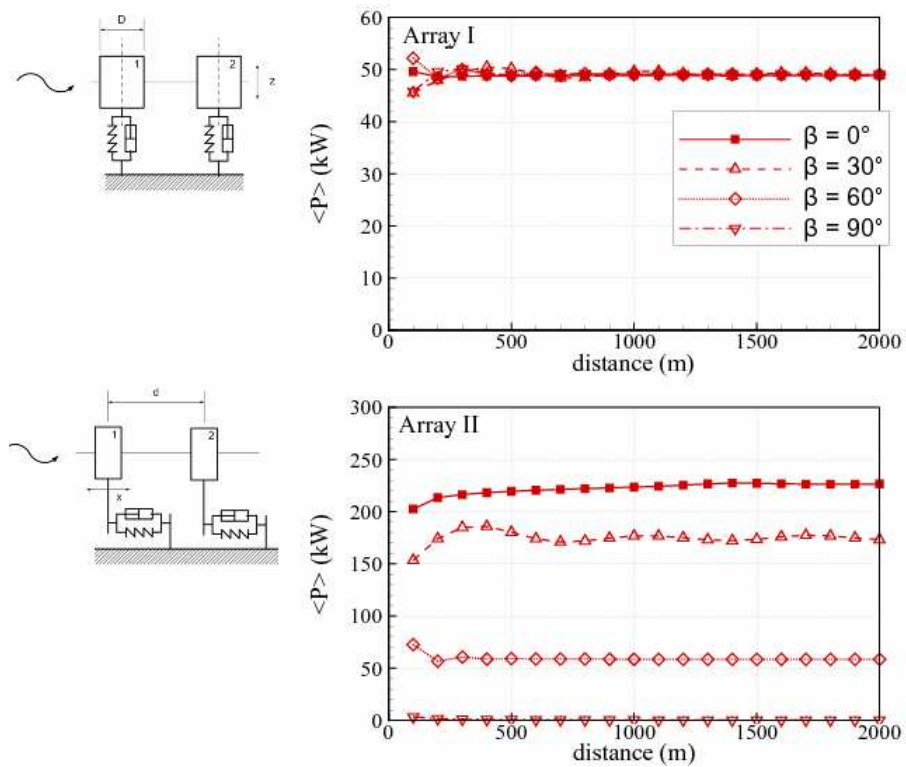


Figure 5. Puissance absorbée en moyenne annuelle en fonction de l'éloignement pour un parc de deux bouées pilonnantes (en haut) et de volets en cavalemt (en bas). La figure est extraite de [13].

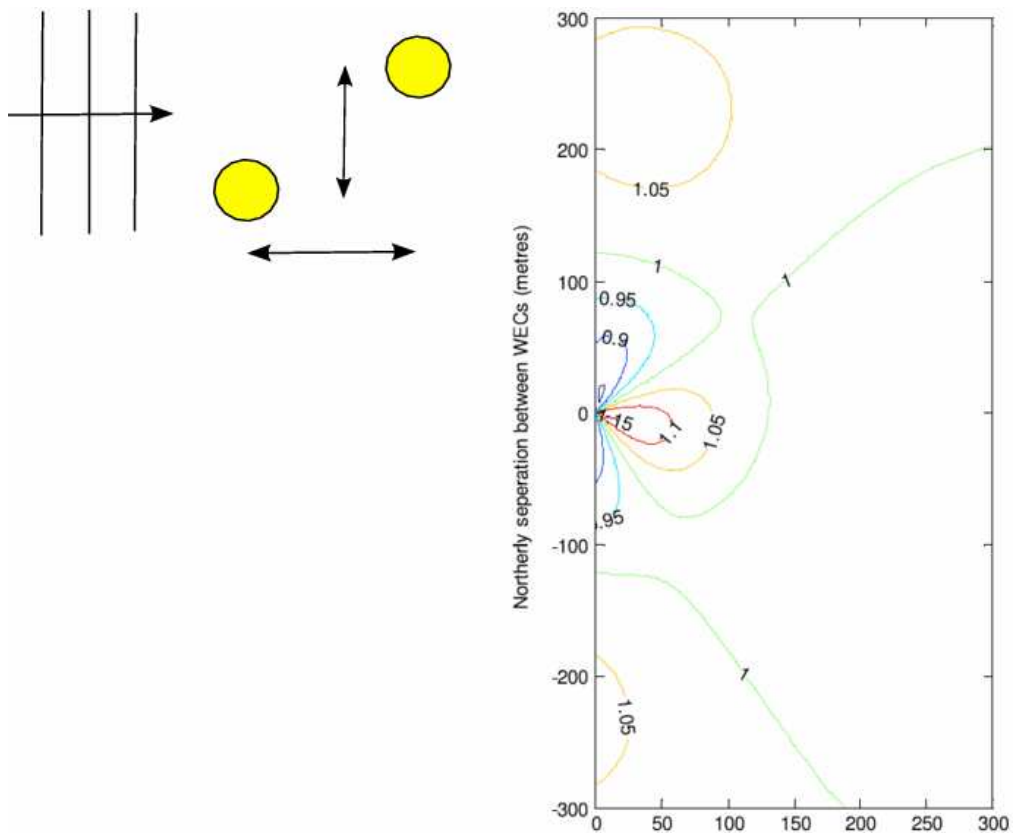


Figure 6. Effet de parcs en fonction de la position relative des houlomoteurs. La figure est extraite de [18].

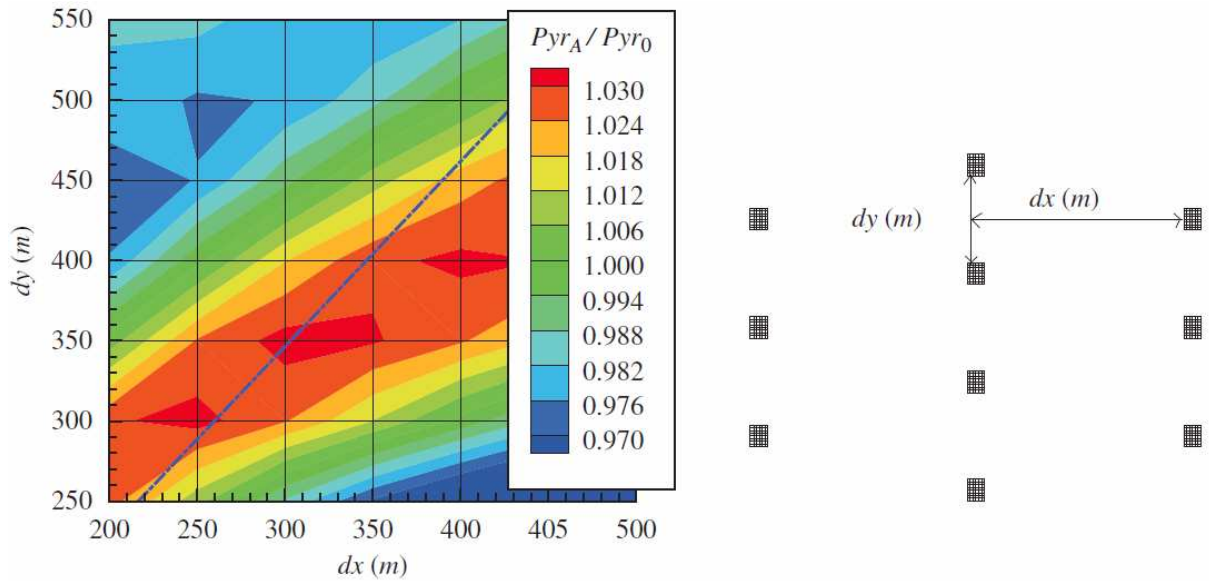


Figure 7. Effet de parc dans une ferme de 10 volets en cavaleme en fonction de la position relative des systèmes. La figure est extraite de [15].

II – 3 Effet de parc dans les grandes fermes (plus de 10 unités).

Récemment, dans [19], le cas de 10 bouées pilonnantes a été étudié en houle irrégulière. L'arrangement du parc a été optimisé afin de maximiser mais aussi minimiser la puissance absorbée en moyenne annuelle. L'arrangement optimal dans le cas de la maximisation conduit à une augmentation de la puissance de seulement quelques pourcents (jusqu'à 5%). On obtient à nouveau les ordres de grandeurs rencontrés dans les études cités plus haut.

Par contre, dans le cas de la minimisation, l'effet de parc peut conduire à une réduction de la puissance moyenne absorbée jusqu'à 30%, ce qui est loin d'être négligeable. La figure 8 présente la configuration de parc correspondante. On peut observer qu'il s'agit d'un arrangement particulier, les systèmes étant essentiellement placés les uns derrière les autres.

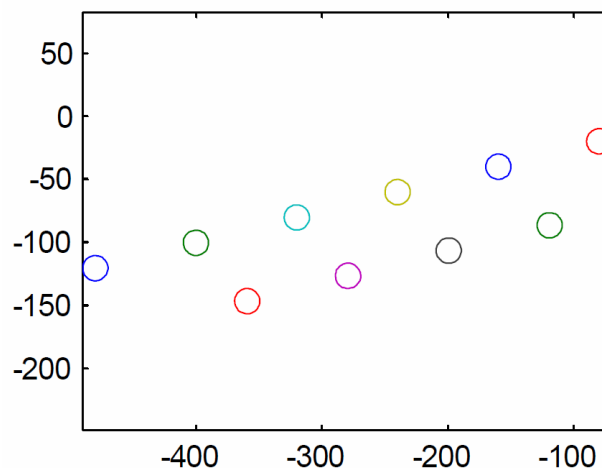


Figure 8. Configuration de ferme optimale pour minimiser la puissance absorbée pour un parc de 10 bouées pilonnantes. L'état de mer est $T_p=10.2s$, $H_s=4m$. La figure est extraite de [19].

Dans [15], des parcs de 4x4 et 5x5 volets en cavaleme sont considérés. La puissance absorbée en moyenne annuelle par unité d'une rangée (une rangée étant définie comme une ligne de houlomoteurs perpendiculaires à la direction de propagation de la houle) est tracée,

figure 9. R1 correspond avec la rangée qui reçoit la houle en premier. R4 et R5 sont les rangées les plus à l'arrière. La ligne pointillée est la puissance moyenne absorbée par une unité isolée.

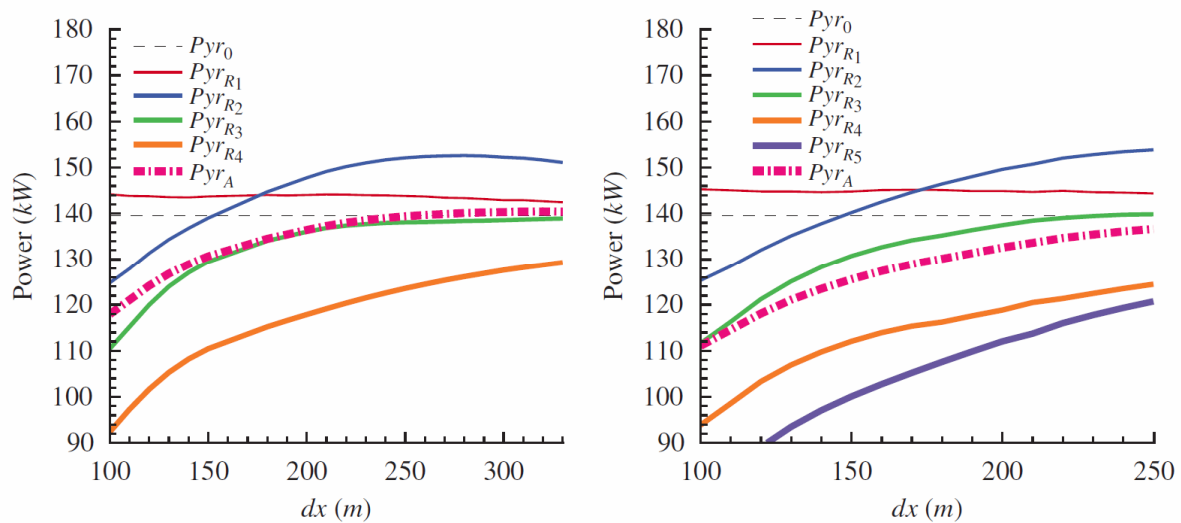


Figure 9. Puissance moyenne absorbée par unité pour des parcs de NxN volets en cavalemt. La ligne noire en pointillée est pour un système isolé, la ligne en rose est pour la totalité du parc, les autres lignes sont les résultats en moyenne pour chaque rangée. La figure est extraite de [15].

On constate que, à l'exception de la première rangée, la puissance moyenne absorbée par chaque rangée diminue à mesure que l'on s'enfonce dans le parc (le numéro de la rangée augmente) : la puissance de la rangée $n+1$ est inférieure à la rangée n . De plus, il apparaît que la différence de puissance entre deux rangées est d'ordre constant, sauf pour la première rangée. Ainsi, il est tentant de penser que si on ajoutait des rangées à ces deux exemples, la puissance absorbée par ces rangées serait inférieure à celle de la rangée précédente, et que la différence serait du même ordre que pour les premières rangées. Ce résultat indique que dans une ferme houlomotrice, le nombre de rangées doit être réduit autant que possible.

III – Conclusions et proposition de recommandations

Au vu de ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- En théorie, les interactions de vagues dans un parc houlomoteur constitué de N systèmes peuvent être constructives. Ainsi, la puissance absorbée peut être plus grande que celle de N houlomoteurs isolés. Cependant, en pratique (houle irrégulière, contrôle non optimal), les effets constructifs sont limités et il faut plutôt rechercher à minimiser les effets destructifs.
- On a observé que bien souvent, l'effet de parc est constructif pour la première rangée d'un parc : cette rangée bénéficie de l'énergie réémise par les autres rangées par diffraction et radiation. Cependant, ce n'est en général pas suffisant pour compenser la diminution de la puissance absorbée des autres rangées par effet de parc. Au total, l'effet de parc est le plus souvent destructif.
- Dans de petites fermes avec des configurations habituelles (moins de 10 systèmes en réseau carré ou en quinconce), l'effet de parc est inférieur à quelques pourcents dès que l'éloignement entre machines est plus grand qu'une centaine de mètres (typiquement 100 – 200 mètres pour des houlomoteurs de dimension

caractéristique 10 – 20 mètres). En prenant en compte les incertitudes associées à la modélisation numérique (théorie linéarisée), la position des houlomoteurs, la bathymétrie, l'effet de parc apparaît donc négligeable.

- Pour des fermes plus grandes, on observe que l'effet de parc peut devenir notable. En effet, on a observé que la puissance moyenne absorbée par une rangée n est inférieure à celle de la rangée $n-1$, et que le taux de décroissance est grosso modo constant. Alors, le nombre de rangées devrait être minimisé. On notera cependant, que même pour cinq rangées, l'effet de parc ne dépasse pas 10% dans le cas de 25 volets en cavalement.

Il est important de remarquer que dans la littérature, les dimensions caractéristiques des houlomoteurs étudiés sont limitées à 10 – 20 mètres, et les principes de fonctionnement sont basés sur celui de la bouée oscillante. On peut donc raisonnablement se demander ce qu'il advient de ces conclusions si on considère des systèmes de dimensions beaucoup plus importantes et/ou si le principe de fonctionnement est différent (déferlement par exemple). Cependant, en tenant compte de ces limitations, on propose de formuler les recommandations suivantes :

Petite ferme composée de systèmes oscillants de taille conventionnelle (jusqu'à une dizaine de machines de dimensions caractéristiques 10 – 20 mètres)

Pour de petites fermes (moins de dix machines de dimensions caractéristiques 10 – 20 mètres) avec une configuration classique (carré ou en quinconce) et des éloignements de l'ordre de plus de 10 fois la dimension caractéristique (100 – 200 mètres), l'effet de parc est négligeable : la littérature montre qu'il est normalement inférieur à quelques pourcents.

Grande ferme composée de systèmes oscillants de taille conventionnelle (plus de dix machines de dimensions caractéristiques 10 – 20 mètres)

Pour de grandes fermes (plus de dix machines de dimensions caractéristiques 10 – 20 mètres), l'effet de parc croît avec le nombre de rangées dans le parc. Par conséquent, le nombre de rangée devrait être le plus faible possible, avec un éloignement le plus grand possible. A titre indicatif, l'effet de parc est de 5% pour un parc de 5x5 volets en cavalement avec un éloignement de 200 mètres. La réduction de puissance absorbée pour la rangée 5 est de 20%. Par contre, rien ne permet de conclure que le nombre de systèmes par rangée devrait être limité. On notera également qu'on peut s'attendre à observer un effet de parc constructif pour la première rangée du parc.

Ferme composée de systèmes oscillants non conventionnels, ou de systèmes à principe non oscillants (houlomoteurs à déferlement ou de grandes dimensions).

Pour des houlomoteurs oscillants de grandes dimensions, il n'y a pas d'information disponible dans la littérature. Des travaux sont en cours à ce sujet à l'ECN et seront présentés à la conférence. Les résultats dont nous disposons actuellement indiquent que les recommandations ci-dessus restent valables pourvu que les rapports d'aspects soient maintenus.

Remerciements

Ces travaux ont reçus le soutien de la Commission Européenne à travers le 7^e PCRD (MARINA Platform – Marine Renewable Integrated Application Platform, Grant Agreement 241402)

Références

- [1] K. Budal, Theory of absorption of wave power by a system of interacting bodies. *Journal of Ship Research*, Vol. 21, pp 248-253, 1977
- [2] D.V. Evans, Some theoretical aspects of three dimensional wave energy absorbers. In *Proc. Of the 1st Symposium on Wave Energy Utilization*, Gothenburg, Sweden, 1979
- [3] J. Falnes, Radiation impedance matrix and optimum power absorption for interacting oscillators in surface waves. *Applied Ocean Research*, Vol. 2, pp 75-80, 1980
- [4] G. Thomas, Some observations on modelling arrays of wavepower devices. Slideshow of presentation at NUIM Wave Energy Workshop, Maynooth, Ireland, October 25th, 2011
- [5] G. Thomas, D.V. Evans, Arrays of three dimensional wave energy absorbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 108, pp 67-88, 1981
- [6] C. Fitzgerald, G. Thomas, A preliminary study on the optimal formation of an array of wave power devices. In *Proc. of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007
- [7] H.A. Wolgamot, P.H. Taylor, R. Eatock Taylor, The interaction factor and directionality in wave energy arrays. *Ocean Engineering*, Vol. 47, pp 65-73, 2012
- [8] G. De Backer, M. Vantorre, C. Beels, J. De Rouck, P. Frigaard, Power absorption by closely spaced point absorbers. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 4(6), pp 579-591, 2010
- [9] S. Weller, T. Stallard, P.K. Stansby, Experimental measurements of irregular wave interaction factors in closely spaced arrays. in *Proc. Of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009
- [10] A. Pecher, J.P. Kofoed, T. Larsen, Design specifications for the WEPTOS Hanstholm WEC. *Energies*, Vol. 5, pp 1001-1017, 2012
- [11] F.J.M. Farley, R.C.T. Rainey, J.R. Chaplin, Rubber tubes in the sea. *Phil. Trans. R. Soc. A*, Vol. 370, pp 381-402, 2012
- [12] P. Jean, A. Watez, G. Ardoise, C. Melis, R. Van Kessel, A. Fourmon, E. Barrabino, J. Heemskerk, J.P. Queau, Standing wave tube electro active polymer wave energy converter. In *Proc. of SPIE8340*, 83400C, 2012
- [13] A. Babarit, Impact of long separating distances on the energy production of two interacting wave energy converters. *Ocean Engineering*, Vol. 37, pp 718-729, 2010
- [14] B. Child, V. Venugopal, Interaction of waves with an array of floating wave energy devices. In *Proc of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007
- [15] B. Borgarino, A. Babarit, P. Ferrant, Impact of wave interactions effect on energy absorption in large arrays of Wave Energy Converters. *Ocean Engineering*, Vol. 41, pp 79-88, 2011
- [16] P. Ricci, J.B. Saulnier, A.F. de O. Falcão, Point-absorber arrays: a configuration study off the Portuguese West-Coast. In *Proc. of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007
- [17] J. Cruz, R. Sykes, P. Siddorn, R. Eatock Taylor, Wave Farm Design: Preliminary studies on the Influences of Wave Climate, Array Layout and Farm Control. In *Proc. Of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009
- [18] M. Folley, T.J.T. Whittaker, The effect of sub-optimal control on the spectral wave climate on the performance of wave energy converter arrays. *Applied Ocean Research* Vol. 31(4), pp 260-266, 2009

- [19] B.F.M. Child, J. Cruz, M. Livingstone, Development of a tool for optimising arrays of wave energy converters. In *Proc. Of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference*, Southampton, The UK, 2011