



HAL
open science

Modélisation numérique et expérimentale d'un système houlomoteur électro-actif déformable

Aurélien Babarit, B Gendron, J Singh, C Melis, P Jean

► **To cite this version:**

Aurélien Babarit, B Gendron, J Singh, C Melis, P Jean. Modélisation numérique et expérimentale d'un système houlomoteur électro-actif déformable. 13es Journées de l'Hydrodynamique (JH13), Nov 2012, Chatou, France. hal-01201954

HAL Id: hal-01201954

<https://hal.science/hal-01201954>

Submitted on 18 Sep 2015

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.

**MODELISATION NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE
D'UN SYSTEME HOULOMOTEUR ELECTRO-ACTIF
DEFORMABLE**

***NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF
AN ELECTRO-ACTIVE DEFORMABLE WAVE ENERGY
CONVERTER***

A. BABARIT^{*}, B. GENDRON^{}, J. SINGH^{*}, C. MELIS^{**}, P. JEAN^{**}**

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

^{**} SBM Offshore, 24 avenue de Fontvielle, BP 199, 98007 MONACO
aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Résumé

Cet article présente un résumé des travaux menés en collaboration par l'ECN et SBM depuis 2010 dans le cadre du projet S3. Ces travaux ont porté sur la modélisation numérique et expérimentale d'un houlomoteur radicalement innovant dénommé S3. Le houlomoteur est constitué par un tube souple dont la structure est également le convertisseur d'énergie : le matériau constitutif de la paroi est en effet un polymère électro actif (EAP). Dans une première partie, la théorie sur laquelle est basé le modèle numérique est présentée. La difficulté vient du fait que le système est déformable. On s'en affranchit grâce à une décomposition modale sur la base des modes propres. Ensuite, le modèle expérimental est présenté. Les comparaisons entre le modèle numérique et expérimental apparaissent encourageantes. Enfin, une optimisation technico-économique des dimensions de la machine est réalisée.

Summary

This paper summarizes the collaborative work which has been performed by ECN and SBM since 2010 within the frame of the S3 project. The topic of the work has been numerical and experimental modelling of a radically new Wave Energy Converter, called S3. The wave energy converter is a flexible tube in which the structural material is also the Power Take Off (PTO): the material is actually an electro active polymer. In the first part, the mathematical framework and the numerical model are presented. Here, the issue is in the fact that the WEC is flexible. This is solved thanks to a mode shape decomposition of the general solution. Then, the experimental model is described. Fair comparison between numerical and experimental work is achieved. Eventually, an optimization of the main parameters is shown.

I – Introduction

Depuis 2009, la société SBM développe un système houlomoteur innovant dénommé S3. Il consiste en un long tube élastique et déformable dont la paroi est partiellement constituée par un polymère électro-actif. Cette dernière fait donc également office de système de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique (Power Take Off en anglais).

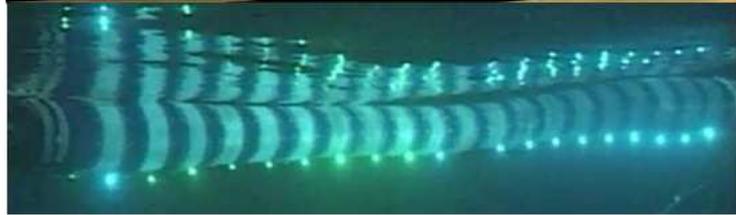


Figure 1. Le houlomoteur S3 dans le bassin de houle de l'Ecole Centrale de Nantes

Le principe de fonctionnement est le suivant : le tube est rempli d'eau de mer et est légèrement pressurisé. Il est placé juste sous la surface libre. Sous l'action de la houle incidente, le tube se déforme et des ondes progressives sont générées à la surface et dans le fluide à l'intérieur du tube. Ces ondes ont leurs propres caractéristiques physiques, et il en résulte une différence de pression entre l'écoulement extérieur et intérieur. Le travail fourni par cette différence de pression et les déformations de la paroi correspond à l'énergie des vagues qui est absorbée par le système.

Ce principe a de nombreux avantages, dont les plus remarquables sont :

- La structure et le convertisseur sont mutualisés. En quelque sorte, on évite ainsi les coûts de fabrication de la structure, et le système résultant est donc plus compétitif que les houlomoteurs plus classiques.
- Le convertisseur est distribué sur toute la surface du système. On évite ainsi les concentrations de contraintes qui sont à l'origine de nombreux problèmes (fatigue, survie) dans les houlomoteurs plus classiques.

II – Modèle numérique

Afin de dimensionner et d'optimiser le système, SBM et l'Ecole Centrale De Nantes se sont attachés au développement d'un modèle numérique capable de prédire la réponse dynamique du S3. Les étapes clés de ce travail sont exposés ci-dessous. Par manque de place, le lecteur devra se référer à [2] pour les détails.

II – 1 Notations et hypothèses

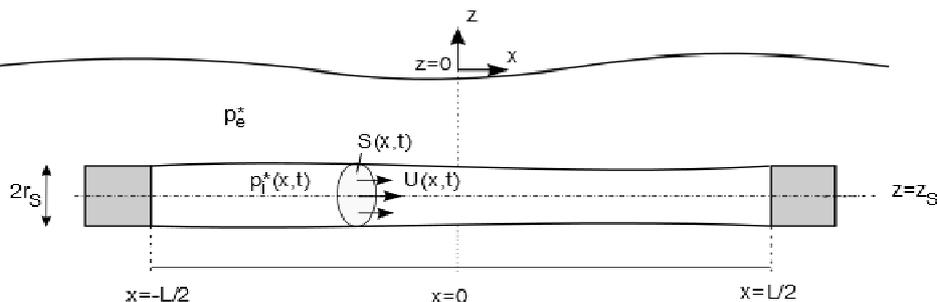


Figure 2. Schéma du problème

Considérons un tube de longueur L fabriqué dans un matériau élastique de densité ρ_{tube} . On note r_s son rayon à l'équilibre, z_s l'enfoncement de son axe sous la surface libre et h_s l'épaisseur de la paroi. La masse du tube est $M_{tube} = 2\rho_{tube}\pi r_s h_s L$.

On suppose que la déformation du tube est homogène radialement. Elle ne dépend donc que de la coordonnée horizontale x et du temps t . On note alors $r(x,t)$ le rayon du tube et $S(x,t)$ sa section.

Dans la direction de l'axe du tube, on suppose que le tube est indéformable. Cette caractéristique est obtenue en pratique par l'ajout de fibre inextensible dans la direction longitudinale. Le mouvement horizontal du tube est donc un mouvement de cavement pur, noté X .

Les deux extrémités du tube sont encastrés dans un manchon indéformable, de masse $M_{towhead}$. Chacun de ces manchons est connecté à un système d'ancrage.

Dans la suite, on suppose que toutes les quantités dynamiques sont suffisamment petites pour pouvoir appliquer une théorie linéarisée.

II – 2 Equations générales

Écoulement intérieur : On suppose les effets de viscosité négligeables et l'écoulement homogène à l'intérieur du tube. Les équations régissant l'écoulement interne découlent alors de l'équation d'Euler et du principe de conservation de la masse :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_i}{\partial x} \\ \frac{\partial S}{\partial t} = -S_s \frac{\partial U}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

Avec $U(x,t)$ la vitesse de l'écoulement dans le tube, p_i la composante dynamique de la pression et S_s l'aire de la section du tube à l'équilibre.

Écoulement extérieur : On note $p_e(M)$ la composante dynamique de la pression extérieure en un point M quelconque, et $\bar{p}_e(x,t)$ sa valeur moyennée sur un contour extérieur $C(x)$ du tube. On se place dans le cadre de la théorie potentielle linéarisée. Ainsi, les différentes composantes de l'écoulement extérieur sont découplées et peuvent être traitées séparément. Le champ de pression correspondant à la diffraction est obtenue de manière classique. Celui correspondant à la radiation tire partie d'une approche en modes généralisées : le problème aux limites est résolu pour chaque mode de déformation de la paroi (voir chapitre II-3), et la contribution totale de la radiation s'obtient par combinaison linéaire.

Equation de paroi : En faisant un bilan des forces sur un petit élément de paroi et en moyennant sur le contour, on peut montrer l'équation de paroi suivante :

$$p_i = \bar{p}_e - \frac{T_s}{4\pi S_s} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{h_s}{r_s} \left(\frac{S_s}{S} \sigma_\theta - \sigma_{\theta_s} \right) \quad (2)$$

Avec T_s la prétension longitudinale, $\sigma_\theta(x,t)$ la valeur de la contrainte dans la paroi et σ_s la valeur à l'équilibre statique de cette contrainte. Dans cette dernière équation, on

suppose que le terme $\left(\frac{S_s}{S}\sigma_\theta - \sigma_{\theta_s}\right)$ se comporte comme la somme d'un terme d'amortissement et de raideur, de coefficients respectifs B et K . L'équation de paroi linéarisée peut alors s'écrire :

$$p_i = \bar{p}_e - \frac{1}{DS_s} \frac{1}{K_0^2} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{1}{DS_s} (S - S_s) + \frac{\rho}{S_s} \eta \dot{S} \quad (3)$$

Avec $D = \frac{r_s}{h_s S_s K}$, $\frac{1}{K_0^2} = \frac{T_s D}{4\pi}$ et $\eta = \frac{h_s S_s B}{\rho r_s}$. La variation de pression à la traversée de la paroi est donc la somme d'un terme de raideur en flexion, d'un terme de raideur élastique, et d'un terme d'amortissement.

Equation du mouvement horizontal : De part la présence de fibres inextensibles, le tube ne peut se déformer dans la direction axiale. Le mouvement de cavement du tube est donc un mouvement de solide rigide. Par un bilan des efforts sur chacun des manchons extrémités et en intégrant l'équation d'Euler sur la longueur du tube, on montre :

$$M\ddot{X} = -2K_a X + (\Delta p_i - \Delta \bar{p}_e) S_s \quad (5)$$

Avec $M = M_{tube} + 2M_{towhead}$, $\Delta p_i = p_i|_{x=\frac{L}{2}} - p_i|_{x=-\frac{L}{2}}$ et $\Delta \bar{p}_e = \bar{p}_e|_{x=\frac{L}{2}} - \bar{p}_e|_{x=-\frac{L}{2}}$. Le mouvement horizontal du tube est donc régi par les raideurs d'ancrage et les différences de pression extérieures mais aussi intérieures aux deux extrémités du tube.

Conditions aux limites : Le tube est supposé encastré dans des manchons indéformables à ses deux extrémités. Il en résulte les conditions aux limites suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} S\left(\pm \frac{L}{2}\right) = S_s \\ U\left(\pm \frac{L}{2}\right) = \dot{X} \end{array} \right. \quad (6)$$

II – 3 Modes propres

Dans un premier temps, on s'intéresse à la détermination des modes propres du système (oscillations libres en eau calme $\bar{p}_e = 0$ et sans amortissement $B=0$). On néglige également les effets de radiation.

On définit alors une variable intermédiaire χ tel que sa dérivée temporelle soit égale à la vitesse intérieure du fluide :

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = U \quad (7)$$

En combinant alors les équations 1, 3 et 7, on obtient l'équation de propagation d'onde :

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho D} \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho D} \frac{1}{K_0^2} \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} = 0$$

(8)

Par des techniques habituelles de séparation des variables, et en utilisant les conditions aux limites 6 et l'équation pour le mouvement horizontal 5, on peut alors montrer que les solutions de 8 sont de la forme $\chi(x,t) = \tilde{\chi}_n^{(k)}(x)e^{i\omega_n^{(k)}t}$, $k \in \{1,2\}$ avec :

$$\tilde{\chi}_n^{(1)}(x) = \tanh\left(\frac{K_n^{(1)}L}{2}\right) \frac{\sin\left(k_n^{(1)}x\right)}{\cos\left(\frac{k_n^{(1)}L}{2}\right)} - \tan\left(\frac{k_n^{(1)}L}{2}\right) \frac{\sinh\left(K_n^{(1)}x\right)}{\cosh\left(\frac{K_n^{(1)}L}{2}\right)}$$

$$\tilde{\chi}_n^{(2)}(x) = K_n^{(2)} \tanh\left(\frac{K_n^{(2)}L}{2}\right) \frac{\cos\left(k_n^{(2)}x\right)}{\cos\left(\frac{k_n^{(2)}L}{2}\right)} + k_n^{(2)} \tan\left(\frac{k_n^{(2)}L}{2}\right) \frac{\cosh\left(K_n^{(2)}x\right)}{\cosh\left(\frac{K_n^{(2)}L}{2}\right)}$$

(9)

Avec les nombres d'onde $K_n^{(1)}, k_n^{(1)}, K_n^{(2)}, k_n^{(2)}$ solutions des équations d'onde :

$$\frac{k_n^{(1)}L}{2} \tanh\left(\frac{K_n^{(1)}L}{2}\right) = \frac{K_n^{(1)}L}{2} \tan\left(\frac{k_n^{(1)}L}{2}\right)$$

$$\frac{K_n^{(2)}L}{2} \tanh\left(\frac{K_n^{(2)}L}{2}\right) + \frac{k_n^{(1)}L}{2} \tan\left(\frac{k_n^{(1)}L}{2}\right) - \eta \left(\frac{K_n^{(1)}}{k_n^{(1)}} + \frac{k_n^{(1)}}{K_n^{(1)}}\right) \tanh\left(\frac{K_n^{(2)}L}{2}\right) \tan\left(\frac{k_n^{(2)}L}{2}\right) = 0$$

(10)

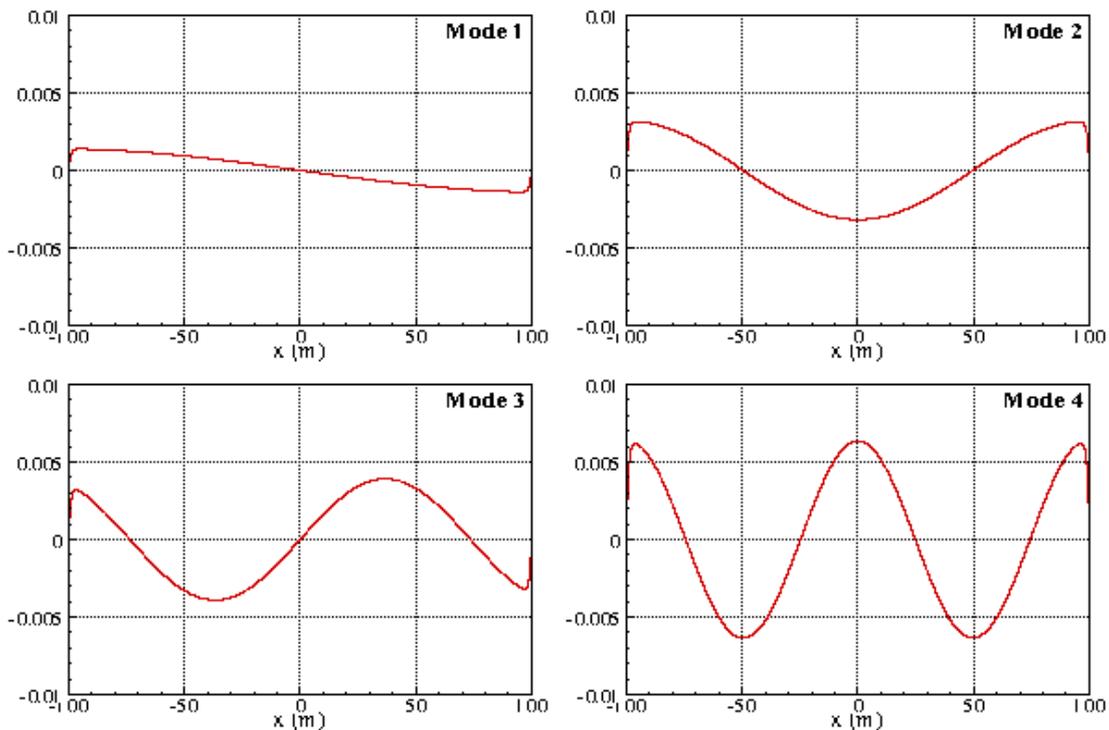


Figure 3. Quatre premiers modes de déformation d'un tube de longueur 200m et de diamètre 3m.

Afin d'alléger les notations par la suite, on définit l'ensemble des réponses modales $\hat{\chi}_m$, qui correspond à l'ensemble des modes de type (1) et (2) classé par ordre croissant de

fréquences propres. La figure 4 présente les quatre premiers de ces modes de déformation ($S - S_s$) pour le cas d'un tube de longueur 200m, et de diamètre 3m. Comme on pouvait s'y attendre, ces modes de déformation présente un nombre croissant d'oscillations. L'aspect le plus intéressant à remarquer est peut être la variation de section rapide aux extrémités imposée par les conditions d'encastrement.

II – 4 Oscillations forcées

On s'intéresse à présent à la solution du problème complet, c'est-à-dire forcé par la houle incidente, en tenant compte des effets de radiation et d'amortissement dans le matériau. L'équation de propagation correspondante est :

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho D} \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho D} \frac{1}{K_0^2} \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_e}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 \dot{\chi}}{\partial x^2} \quad (11)$$

On cherche alors une solution sous la forme d'une décomposition linéaire sur la base des modes, dont les coefficients dépendent du temps :

$$\chi(x, t) = \sum_m c_m(t) \hat{\chi}_m(x) \quad (12)$$

En injectant cette décomposition dans l'équation 11, après quelques manipulations et en définissant la projection modale ${}^x f$ de la fonction f tel que ${}^x f = \frac{1}{\rho} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) \frac{\partial \hat{\chi}_m}{\partial x} dx - \left[(f \hat{\chi}_m) \Big|_{x=\frac{L}{2}} - (f \hat{\chi}_m) \Big|_{x=-\frac{L}{2}} \right]$, on peut montrer que les coefficients $\mathbf{C} = [c_m]_{1 \leq m \leq N}$ sont solution de l'équation différentielle du mouvement (dans le domaine fréquentiel) :

$$(\mathbf{I} + {}^x \mathbf{A}) \ddot{\mathbf{C}} + ({}^x \mathbf{B} + \eta \boldsymbol{\varepsilon}) \dot{\mathbf{C}} + \omega_m^2 \mathbf{C} = {}^x \mathbf{p}_{\text{ex}} \quad (13)$$

Avec \mathbf{I} la matrice identité, ${}^x \mathbf{A}$ la matrice de masse d'eau ajoutée des modes, ${}^x \mathbf{B}$ la matrice d'amortissement de radiation, $\boldsymbol{\varepsilon} = \left(\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\partial \hat{\chi}_m}{\partial x} \frac{\partial \hat{\chi}_l}{\partial x} dx \right)_{1 \leq l \leq N, 1 \leq m \leq N}$ la matrice d'amortissement modal et ${}^x \mathbf{p}_{\text{ex}}$ le vecteur colonne des coefficients d'excitation des modes (dues à la houle incidente et diffractée).

La résolution de l'équation du mouvement ne présente pas de difficultés et permet de déterminer la réponse du système à diverses conditions de houle.

III – Validation expérimentale

En parallèle, des essais de validation du principe ont été réalisés dans le bassin de houle de l'Ecole Centrale de Nantes, en juillet 2011. La maquette est un tube de 10m de long constitué par le matériau électro-actif. Le matériau a permis notamment de mesurer les déformations du tube et des capteurs ont permis de mesurer la pression interne.

III – 1 Maquette et instrumentation

La maquette est composée des éléments suivants :

- Un tube porteur en silicone permettant de créer une chambre interne remplie d'eau, renforcé dans le sens de la longueur par des fibres d'aramide pour bloquer ses déformations axiales,
- 20 sections indépendantes constituées chacune d'un enroulement de polymère électro-actif noyé par moulage dans du silicone et des connexions électriques étanches nécessaires à leur raccordement. Ces sections sont glissées en place sur le tube porteur (rayures claires sur la Figure 4) et maintenues par friction sur le tube porteur une fois gonflé,
- Des séparateurs en silicone permettant de porter et fixer l'instrumentation (rayures bleues foncées sur la Figure 4),
- Deux obturateurs gonflables permettant de sceller la chambre aux deux extrémités du tube porteur, de remplir la chambre et de transmettre les efforts d'ancrage,
- Une ligne de mousse glissée dans la chambre interne pour permettre à l'assemblage de flotter.



Figure 4. Maquette pendant son assemblage – Test de gonflage.

La partie déformable de la maquette mesure 10m pour la première partie des essais et 7m pour la seconde partie. Son diamètre au repos (non gonflé) mesure 0.42m. La maquette est ancrée au centre du bassin au moyen de quatre lignes quasi-horizontales, montées en ligne avec des ressorts. L'assemblage présente une période en « cavalemeant » (si le corps était vraiment indéformable) en dehors de la période des houles testées (au environ de 15s pour le tube de 10m).

Afin de valider le modèle numérique, les grandeurs suivantes ont été mesurées :

- Les déformations radiales du tube à chaque section d'EAP. En effet, chaque enroulement d'EAP a la propriété de changer de capacité électrique quand il se déforme. Pour la déformation considérée, la capacité est donnée par la relation : $C = C_0 \lambda^p$, avec C la capacité sous contrainte, C_0 la capacité au repos, λ le taux de déformation radiale, ratio du rayon déformé et du rayon au repos, et p , un facteur de forme. Chaque section a été préalablement calibrée et les valeurs de C_0 et p déterminées. Durant les tests, les sections sont reliées à un capacimètre et la relation est inversée afin d'obtenir les valeurs instantanées de λ le long du tube.
- Les pressions internes et externes le long du tube. Deux sangles portant chacune 20 capteurs de pression à membrane céramique ont été assemblées. Une est glissée dans le tube porteur et l'autre est mise en regard à l'extérieur du tube. Les deux sangles sont solidarisées à l'aide d'aimants cousus sur chaque sangle.
- Les positions en 3D de points repartis sous la maquette (points lumineux visibles sur la figure 1) par trajectographie vidéo. Une « guirlande » de LEDs (cibles actives) a été

fixée sous la maquette grâce aux aimants servant à assembler les sangles de capteurs de pression. Six caméras sous-marines ont été disposées au fond du bassin sous la maquette afin de filmer les trajectoires des cibles et un logiciel ad-hoc a permis de déduire les positions des cibles.

- Les efforts dans les quatre ancrages à l'aide de capteurs de force.
- L'élévation de la houle a différentes positions autour de la maquette ainsi que l'élévation non perturbée au centre de la maquette, mesurée en début de campagne.

III – 2 Tests en vague

La table ci-dessous résume les séries de tests en vague effectués au cours de la campagne.

Longueur [m]	Gonflage [%]	Incidence [deg]	Type	Hauteur [m]	Periode [s]
10	30	0	régulière	0.2	1 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 4 (par pas 0.25s) 4 à 5 (par pas 0.5s)
10	30	0	irrégulière	0.2	3.2;4.5
10	30	0	régulière	0.4	2.2 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 4 (par pas 0.25s) 4 à 5 (par pas 0.5s)
7	30	0	régulière	0.2	2.6 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 3.75 (par pas 0.25s)
7	30	0	régulière	0.1	1.4 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 3.75 (par pas 0.25s)
7	30	30	régulière	0.1	1.1 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 3.75 (par pas 0.25s)
7	30	0	irrégulière	0.1	2.4
7	30	30	irrégulière	0.1	1.4 ; 1.8 ; 2.4
7	20	0	régulière	0.1	1.4 à 3 (par pas 0.1s) 3 à 3.75 (par pas 0.25s)
7	40	0	irrégulière	0.2	1.8 ; 2.4 ; 3.2

Tableau 1. Séries de tests effectués au cours de la campagne d'essai de Juillet 2011 à l'ECN

La longueur du tube a été modifiée en cours de campagne à cause d'une rupture sur le tube porteur. Cette variation a permis d'en voir l'effet sur les modes propres du système. Le gonflage correspond à la déformation statique de la chambre. La variation de ce paramètre influe à la fois sur la masse du système et à la raideur de la paroi (comportement hyperélastique du silicone), et donc également sur ses modes propres. Le changement de hauteur de houle a permis d'évaluer l'importance des termes non linéaires (dissipation visqueuse dans le matériau, traînée, etc...). Le changement d'incidence de la houle a permis de confirmer que le système peut fonctionner lorsque la houle n'est pas alignée avec le tube.

Enfin, l'utilisation de houles irrégulières a permis de valider que le système fonctionne en environnement réel.

III – 3 Comparaisons avec le modèle numérique

Des comparaisons ont ainsi pu être faites entre les résultats numériques et expérimentaux. Un aperçu est présenté sur la figure suivante, en termes de taux déformation en fonction de la

section du tube. On observe un accord très satisfaisant, après calibration du taux d'amortissement de déformation dans la paroi du tube.

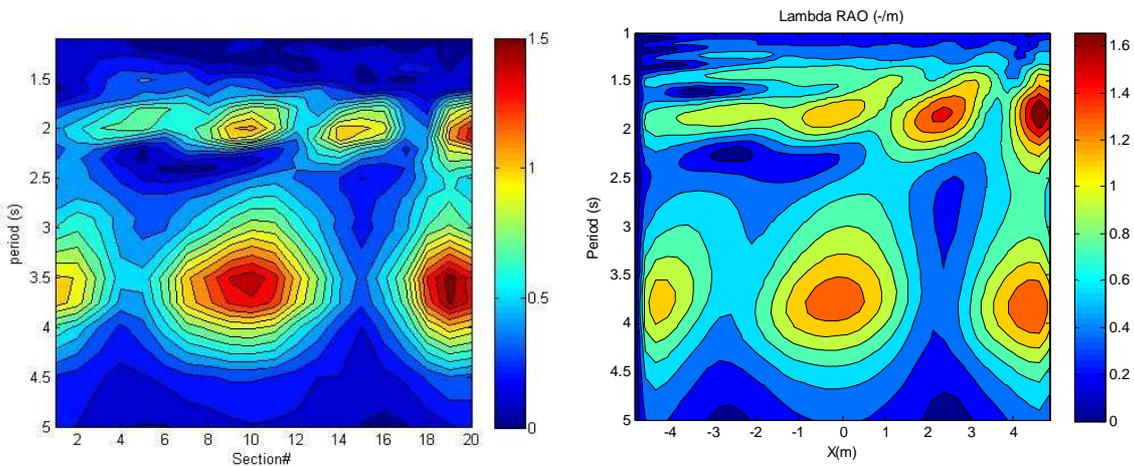


Figure 5. Comparaison entre les résultats expérimentaux (à gauche) et numérique (à droite) pour le tube de 10m de longueur

IV – Optimisation

Le modèle numérique ayant été validé par les résultats expérimentaux, le travail a ensuite porté sur l'optimisation de la géométrie d'un prototype, afin de maximiser l'absorption d'énergie, de minimiser la masse de matériau à mettre en œuvre et de minimiser la fatigue dans le matériau.

IV – 1 Maximisation de l'absorption d'énergie

Pour une configuration donnée, le paramètre déterminant la quantité d'énergie absorbée et la durée de vie du système houlomoteur est le coefficient d'amortissement de parois B . Ce coefficient d'amortissement regroupe deux phénomènes distincts ; d'une part les pertes visqueuses causées par les déformations du matériau en chaleur et d'autre part, l'énergie extraite par le polymère électro-actif. Le premier phénomène est une caractéristique imposée du caoutchouc employé, alors que le deuxième peut être modulé pour absorber plus ou moins d'énergie. C'est donc sur ce deuxième coefficient d'amortissement, représentatif de l'énergie extraite, que la maximisation d'énergie a lieu.

Afin d'extraire un maximum d'énergie, les bagues de polymères électro-actifs nécessitent un taux de déformation d'au moins 10%. En dessous de cette valeur, toute l'énergie disponible est perdue en chaleur par des phénomènes de fuites. Or, l'extraction d'énergie par les bagues de polymères électro-actifs s'oppose aux déformations du système houlomoteur. Il existe donc un compromis à trouver entre déformations et énergie disponible à extraire.

La figure 6 montre l'évolution des différentes puissances en fonction du coefficient d'amortissement représentatif de l'extraction d'énergie du polymère électro-actif.

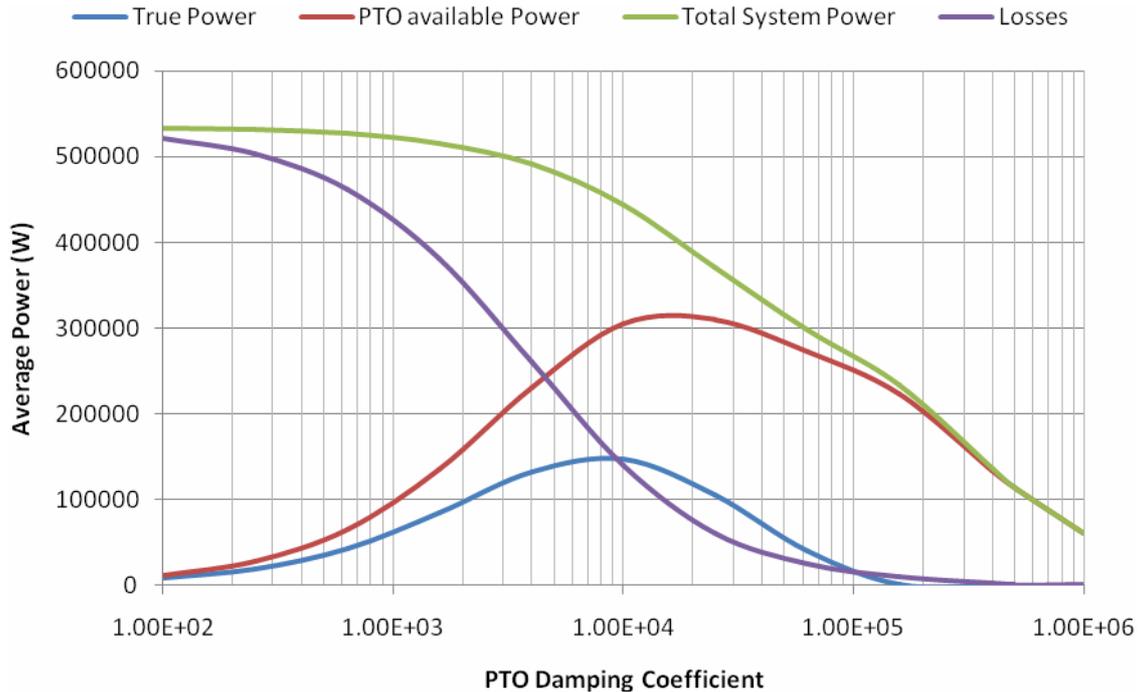


Figure 6. Puissance moyenne absorbée en fonction du coefficient d'amortissement B .

La courbe violette correspond à l'énergie perdue en chaleur par les déformations du caoutchouc. Lorsque les bagues de polymères électro-actifs ne sont pas utilisées, toute l'énergie est perdue à cause des effets visqueux.

La courbe verte décrit l'énergie totale disponible dans le système. Lorsque les bagues d'EAP sont sollicitées, les déformations du système houlomoteur diminuent, entraînant ainsi une baisse de l'énergie totale disponible.

La courbe rouge en forme de cloche correspond à l'énergie disponible dans les bagues d'EAP. Elle augmente avec le coefficient d'amortissement au départ. Par contre, si le coefficient devient trop grand, les déformations du système sont réduites et l'énergie disponible - et donc absorbée - diminue.

La courbe bleue correspond à la puissance extraite par les bagues d'EAP. Étant donné qu'il est nécessaire d'avoir au minimum 10% de taux de déformation pour extraire de l'énergie, cette courbe est plus faible que l'énergie disponible. C'est sur le maximum de cette courbe que le coefficient d'amortissement est basé.

Avec le coefficient d'amortissement réglé pour obtenir une capacité d'extraction d'énergie maximale, il est possible de déterminer la durée de vie N_{break} du S3 en fonction du nombre de cycles autorisé ϵ . Les paramètres (a, b) de la relation suivante ont été établis à l'aide de tests de fatigues réalisés par SBM.

$$N_{break}(\epsilon) = a\epsilon^{-b}$$

Sur la base de la puissance disponible d'une configuration de S3, de la durée de vie et de la quantité de matière nécessaire, il est alors possible de trouver une géométrie optimale pour un site marin donné.

IV – 2 Recherche d'une configuration optimale

Une approche paramétrique est utilisée pour la recherche de l'optimum. Une multitude de géométries ont été générées avec différentes longueurs, diamètres et épaisseurs avec les intervalles suivantes.

- Longueurs : 20m à 500m
- Diamètres : 0,4m à 3m
- Epaisseurs : 0,015m à 0,09m

Chaque configuration est évaluée économiquement à l'aide de la relation suivante.

$$NPV = -CAPEX + \sum_1^{N_{years}} \frac{Income - OPEX}{(1 + IRR)^{N_{years}}} \quad (14)$$

La configuration optimale correspond à celle avec une valeur actuelle nette (NPV) positive et le plus grand taux de rentabilité interne.

Le revenu (Income) correspond à la puissance ciblée pour une durée d'utilisation donnée. Dans le cas du S3, le temps d'exploitation est de 20 ans et la puissance cible moyenne de 400kW. Afin d'atteindre la puissance cible, plusieurs tubes en parallèle sont considérés et il est supposé qu'ils n'ont aucune influence les uns sur les autres. Le site considéré est le site d'essai en mer SEM-REV.

L'investissement (CAPEX) correspond à la masse totale des systèmes houlomoteurs nécessaires pour atteindre la puissance cible et à l'ancrage qui est considéré comme proportionnel au volume des S3 utilisés en parallèles.

Les coûts d'entretien (OPEX) correspondent à la masse totale des systèmes houlomoteurs remplacés à la fin de la durée de vie en fatigue des matériaux, autant de fois que nécessaire pendant la durée d'exploitation.

En utilisant la formule (14), on a abouti à la configuration optimale de tube suivante :

- 9 à 10 tubes
- Longueur de 290m
- Diamètre de 2.4m
- Epaisseur de 9cm

Néanmoins, ce résultat peut probablement être amélioré en élargissant le nombre de cas pour l'étude ou en prenant en compte un algorithme d'optimisation. De plus, le S3 étant un système houlomoteur flexible, il serait possible de réaliser l'optimisation sur chaque bague de polymère électro-actif plutôt que sur la globalité du système et d'augmenter ainsi son efficacité totale. Enfin, l'amélioration des performances de l'électronique de puissance ainsi que des performances du matériau électro-actif permettra peut être à l'avenir de mieux exploiter l'énergie disponible dans les bagues d'EAP.

V – Conclusion

L'étroite collaboration entre le laboratoire LHEEA de l'Ecole Centrale De Nantes et la société SBM Offshore dans le cadre du projet S3 soutenu par l'ADEME a permis de dépasser les premiers verrous technologiques nécessaires à la modélisation et l'optimisation d'un houlomoteur révolutionnaire entièrement déformable et parfaitement adapté à la nature complexe de la ressource énergie des vagues. SBM dispose maintenant d'un outil numérique calibré expérimentalement pour prédire la production électrique d'un système houlomoteur électro actif déformable. Il est désormais possible d'optimiser sa forme géométrique et ses caractéristiques physiques. Ceci permettra de mieux cibler les spécifications techniques de tous les éléments nécessaires à la réalisation d'un prototype.

Pour permettre à ce concept de voir le jour à l'échelle industrielle, il faudra d'abord faire un saut technologique dans la performance des matériaux polymères électro-actifs, notamment dans leur mise en œuvre, leur tenue en fatigue et leur densité d'énergie.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du soutien des Investissements d'Avenir à travers le Fonds démonstrateur de l'ADEME « démonstrateurs en énergies renouvelables et chimie verte ».

Références

- [1] P. Jean, A. Wattez, G. Ardoise, C. Mélis, R. Van Kessel, A. Fourmon, E. Barrabino, J. Heemskerk, J.P. Queau. Standing wave tube electro active polymer wave energy converter. In *Proc of the SPIE Smart Structures/NDE conference 2012*, San Diego, California, USA.
- [2] A. Babarit, J. Singh, C. Mélis, P. Jean. A numerical model for analyzing the hydroelastic response of a flexible Electro Active Wave Energy Converter. *Submitted for publication*.