

Le système électrique autonome de récupération de l'énergie des vagues



L'énergie des vagues est une source d'énergie renouvelable dont l'exploitation reste un défi à l'heure actuelle. S'appuyant sur plus de 20 ans d'expérience dans la recherche sur les énergies marines, le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes est depuis 2002 à la tête du projet SEAREV, un concept simple et robuste de récupération de l'énergie des vagues, mais doté d'un contrôle sophistiqué. Nous présentons ici le principe du système ainsi que les résultats d'essais en bassin.

Les vagues qui animent la surface des océans du globe représentent une source d'énergie renouvelable inexploitée considérable. Bien que des travaux de recherche aient commencé dès le début des années 80, à la suite des deux chocs pétroliers, aucun système de récupération de l'énergie des vagues n'a encore prouvé sa supériorité sur les autres et ne s'est imposé comme la solution technologique.

Il y a à cela plusieurs raisons. D'abord, le problème est rendu difficile par le caractère irrégulier des vagues. Il s'agit en effet d'un phénomène aléatoire oscillant, dont les caractéristiques de période et d'amplitude varient vague après vague. Ensuite, le caractère inhospitalier du milieu marin est un élément qu'il ne faut pas sous-estimer. Nombre de prototypes ont ainsi été détruits lors des premières tempêtes, montrant que la robustesse est un enjeu déterminant dans ce problème.

Classiquement, on distingue trois familles de systèmes :

- Les systèmes à déferlement : dans ces systèmes, une plage artificielle sert à faire déferler les vagues, ce qui permet de remplir un réservoir situé plus haut que le niveau de la mer. Des turbines basse pression transforment ensuite cette réserve d'énergie potentielle en électricité.

- Les systèmes à colonne d'eau oscillante : dans ces systèmes, une cavité pleine d'air est en contact avec l'océan par l'intermédiaire d'une ouverture sous marine. Dans cette cavité, la colonne d'eau oscille sous l'action des vagues qui entrent par l'ouverture, chassant et aspirant de l'air à travers une ouverture ménagée dans le haut de la cavité. Une turbine à air placée à cet endroit permet de convertir le flux d'air en électricité.

- Les systèmes à flotteur actionnés par les vagues : dans ces systèmes, les vagues sont utilisées pour mettre en mouvement un flotteur.



Figure 1 – Le prototype du système à déferlement wave dragon. De larges bras paraboliques permettent de focaliser la houle sur la rampe de déferlement, au centre de l'image. ©wavedragon

Article proposé par :

Aurélien Babarit, aurelien.babarit@ec-nantes.fr

Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR 6598, CNRS/ECN, Nantes



Figure 2 – La centrale de Pico : un système à colonne d'eau oscillante. La cavité dans laquelle oscille la colonne d'eau est contenue dans le cube de béton que l'on peut voir sur la photo.

©wave energy center

SEAREV : un principe simple...

Le système de récupération de l'énergie des vagues SEAREV appartient à cette dernière famille de systèmes. Il est composé simplement d'un flotteur fermé à l'intérieur duquel est accrochée une masse. Le flotteur est mis en mouvement par les vagues, la masse oscille avec son mouvement propre, et le mouvement relatif existant entre ces deux corps est transformé en électricité par l'intermédiaire de pompes et moteurs hydrauliques, et d'une génératrice, tous éléments contenus dans le flotteur hermétique. Le courant est ensuite amené à terre par l'intermédiaire d'un câble électrique. Ce câble sera ensouillé, c'est-à-dire enfoui dans le fond marin, afin d'éviter tout conflit d'intérêt avec les autres usagers de la mer.

Le système présente ainsi de nombreux avantages :

- Toutes les parties mobiles sont contenues dans la coque du flotteur et sont donc protégées des agressions du milieu marin. Ainsi, les coûts de maintenance du SEAREV et les risques de panne sont minimisés par rapport à un système dont les parties mobiles sont en contact avec l'océan.

- La masse mobile est en pratique un grand cylindre dont le centre de gravité est décentré. Le cylindre pouvant faire un tour complet selon son axe de révolution, le système ne présente pas de butées, et est donc particulièrement résistant dans les mers extrêmes.

- Le système n'a pas besoin de référence externe, puisque sa référence, la gravité – qui, à travers le cylindre se comporte comme un pendule – est embarquée. Il ne nécessite donc qu'un ancrage souple et léger, moins coûteux qu'un ancrage tendu.

- Le système de conversion de l'énergie hydraulique permet de lisser les fluctuations dans la production d'énergie



Figure 3 – Pelamis : un système à flotteur actionné par les vagues. Le système est composé de plusieurs cylindres articulés. Le mouvement entre ces cylindres est utilisé pour pomper de l'huile dans des accumulateurs haute pression par l'intermédiaire de vérins hydrauliques.

©pelamis wave power

due aux groupes de vagues grâce à un stockage hydropneumatique dans un accumulateur haute pression, et de fournir ainsi au réseau électrique une puissance stable.

... Et un contrôle sophistiqué

En première approximation, la production d'énergie est proportionnelle à la vitesse du mouvement relatif entre la coque et la roue pendulaire. Or, le SEAREV est un système d'oscillateurs couplés. Il présentera donc de bonnes perfor-

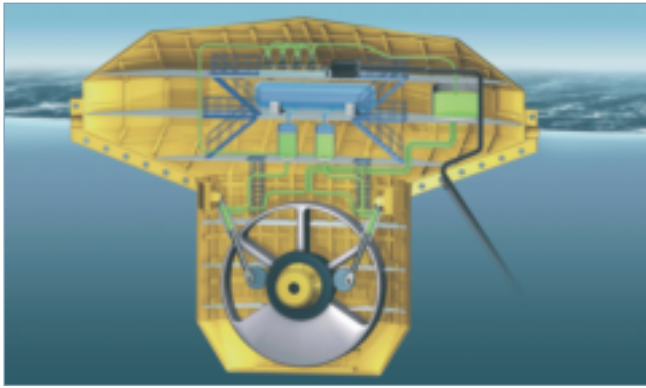


Figure 4 – Le principe du système SEAREV, vue d'artiste.

mances en terme de récupération d'énergie, pour des houles de période proche de ses périodes de résonance. Malheureusement, les vagues sont un phénomène dont la période et la hauteur varie continuellement et il est donc important de prévoir des moyens de contrôle capables d'adapter la dynamique du système aux vagues rencontrées.

Un premier type de contrôle, dit contrôle lent, consiste à modifier les caractéristiques mécaniques du système, à travers des ballasts par exemple, pour adapter sa réponse à la moyenne des périodes des houles incidentes. Un second contrôle, dit contrôle continu, permet d'adapter la réponse du système à chaque vague et d'en tirer le maximum d'énergie. En fait, comme dans l'éolien avec la limite de Betz (limite théorique d'efficacité d'une éolienne), il existe une limite théorique à la capacité d'absorption d'un récupérateur d'énergie des vagues du type SEAREV, et on peut définir un contrôleur capable d'atteindre cette limite. Malheureusement, ce contrôleur optimal est anti-causal, c'est-à-dire qu'il nécessite la prédiction du futur de la houle, et est donc difficilement réalisable pratiquement.

Pour le SEAREV, on a donc adopté un type de contrôle sub-optimal (c'est-à-dire moins bon que l'optimal) connu sous le nom de contrôle par latching (verrouillage en anglais). Ce contrôle, introduit dès les années 80 pour des applications à l'énergie des vagues par Budal et Falnes, consiste à bloquer le pendule en position lorsque sa vitesse relative s'annule et à le relâcher quelques instants plus tard, lorsque la phase de la houle est plus favorable. On provoque par ce moyen des résonances paramétriques dans la dynamique du système, qui permettent d'amplifier considérablement les mouvements, et donc la production d'énergie. De plus, puisqu'on bloque le pendule à vitesse nulle, la dépense d'énergie nécessaire pour appliquer le contrôle est minimale (à l'image du frein à main d'une voiture).

Pour mettre en évidence le potentiel du contrôle par latching appliqué au SEAREV, on a porté sur la figure 6 une simulation numérique du mouvement

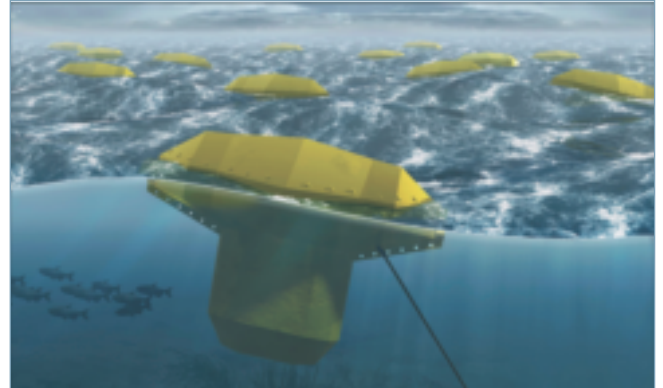


Figure 5 – Une ferme de modules SEAREV, vue d'artiste.

du système en houle régulière avec et sans contrôle. Sur cet exemple, le contrôle par latching est mis en route à $t = 360$ s. On constate l'amplification du mouvement qui en résulte, et l'accroissement de l'absorption d'énergie.

Les validations expérimentales

En 2006, deux campagnes d'essais sur une maquette au $1/12^e$ ont été réalisées dans le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes. Ce bassin, unique en France de par ses dimensions ($50 \times 30 \times 5 \text{ m}^3$) permet, grâce à des batteurs articulés, de générer des vagues similaires à celles qui peuvent être rencontrées en mer, mais à échelle réduite. Les hauteurs significatives des vagues générées varient ainsi de 1 cm à 1 m, avec des périodes pouvant aller de 0,85 à 5 secondes. En focalisant la houle, il est même possible de générer au centre du bassin une vague déferlante d'une hauteur de 2 mètres.

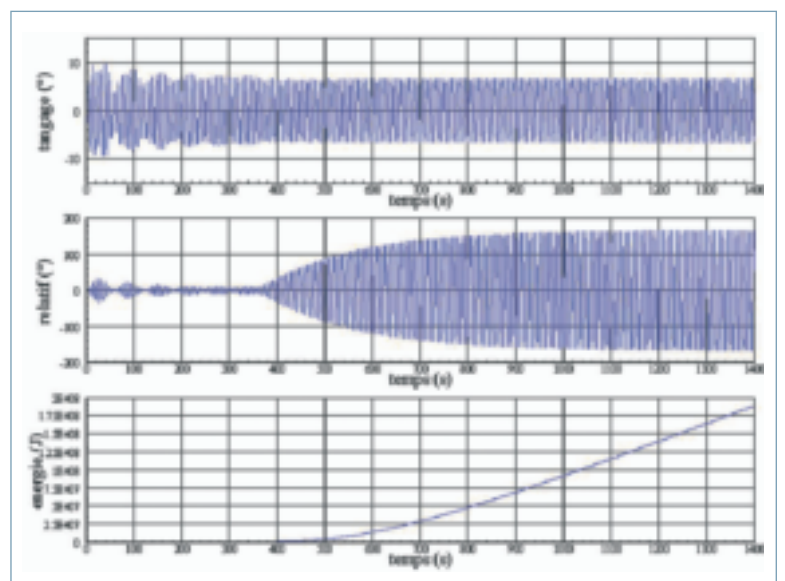


Figure 6 – Enregistrements temporels du mouvement de tangage, du mouvement du pendule, et de l'énergie produite par le SEAREV. Le contrôle par latching est mis en route à $t = 360$ secondes.



Figure 7 – Le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes.
©École Centrale de Nantes

La maquette a été équipée d'instruments de manière à pouvoir mesurer à la fois les mouvements du flotteur et de la roue pendulaire. Une centrale d'inertie a été utilisée pour mesurer les accélérations et les vitesses de rotation du flotteur, ainsi qu'un système de trajectographie vidéo pour les mouvements du système. Pour les mouvements de la roue pendulaire, un simple codeur a été utilisé.

Un moteur couple est utilisé pour modéliser le système de conversion de l'énergie mécanique en électricité. Il est relié à la roue pendulaire par l'intermédiaire d'une courroie crantée. Un capteur de couple permet de mesurer le couple exercé sur la roue pendulaire. Le produit de ce couple par la vitesse relative de la roue donne accès à la puissance instantanée produite par la maquette. Le contrôle par latching est quant à lui assuré au moyen de freins électromagnétiques. Ils sont pilotés en temps réel par des algorithmes basés sur les données de position fournies par les capteurs. Enfin, des sondes à houle placées en avant de la maquette permettent de mesurer les caractéristiques des vagues incidentes.

La *figure 10* permet de comparer les puissances absorbées par le SEAREV telles qu'elles sont prédites par le modèle numérique et mesurées lors des essais en bassin.

L'accord entre le modèle et la prédiction est relativement satisfaisant, excepté pour les fréquences de houle comprises entre 0,52 et 0,58 Hz. Pour ces fréquences, la différence s'explique par l'entrée en jeu d'un phénomène non linéaire non pris en compte par le modèle numérique : le slamming.

Le slamming apparaît lorsque la maquette impacte violemment la surface libre (voir *figure 12*). Il en résulte la formation de jets, qui se traduisent par une dissipation importante d'énergie. Cette énergie dissipée représente autant d'énergie qui n'est pas absorbée par le système, donc, pour un récupérateur d'énergie des vagues, le slamming doit être évité autant que faire se peut. Dans le cas du SEAREV, à la vue de ces résultats, la décision a été prise de faire évoluer la forme générale du système pour des entrées d'eau avec des angles moins aigus, afin de limiter ces effets de slamming.

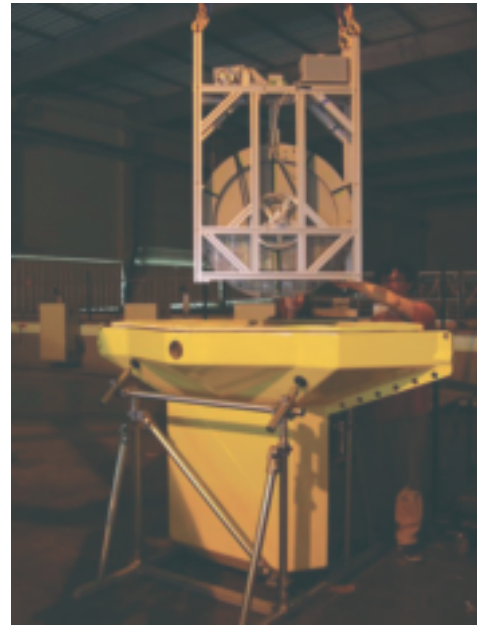


Figure 8 – L'assemblage de la maquette. On distingue sur cette image le système de roue pendulaire qui vient prendre place à l'intérieur de la coque du SEAREV. ©Jean-luc Toularastel/UMR 6598

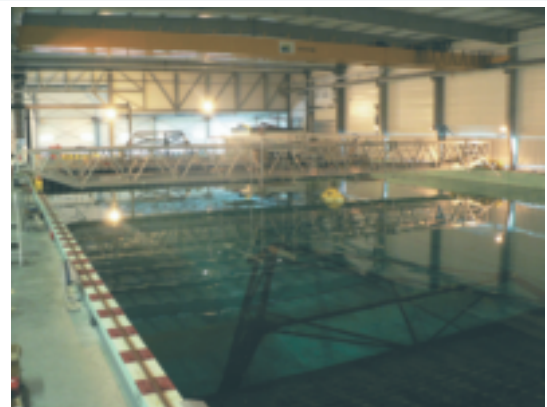


Figure 9 – La maquette dans le bassin de houle.
©Jean-luc Toularastel/UMR 6598

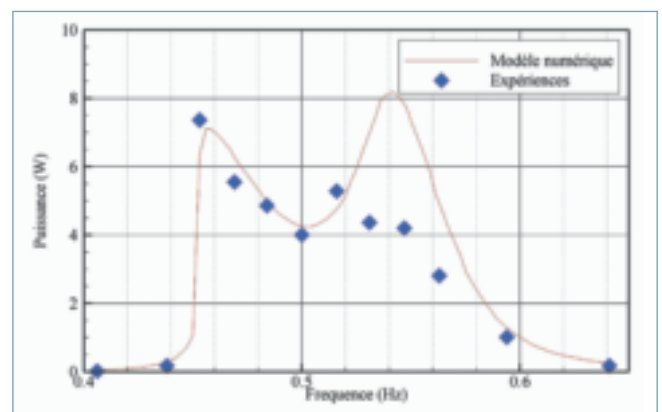


Figure 10 – Puissances absorbées par la maquette prédite par le modèle numérique et mesurée lors des essais, en fonction de la fréquence de la houle. La houle considérée est monochromatique et son amplitude correspond à une amplitude de 1 mètre à l'échelle 1.



Encadré 1

La ressource énergie des vagues

À première vue, la houle est un phénomène aléatoire. Ainsi, chaque vague est différente de celle qui la précède et de celle qui la suit, en hauteur comme en période. Cependant, lorsqu'on analyse le contenu fréquentiel de la houle par transformée de Fourier, on se rend compte que son spectre d'énergie est, lui, stationnaire sur des échelles de temps de l'ordre de l'heure.

Grâce à des bouées de mesure, des campagnes de mesures en mer ont permis de caractériser ces spectres d'énergie. Ainsi, ils peuvent être décrits par des fonctions semi-empiriques, dont la plus connue est le spectre de Pierson-Moskowitz :

$$S(f) = \frac{5H_{1/3}^2 T_1^4}{16f^5} \exp\left(-\frac{5T_1^4}{4f^4}\right)$$

où

- $H_{1/3}$ est la hauteur significative des vagues. Cette hauteur correspond à la valeur moyenne du tiers des vagues les plus hautes observées sur l'échantillon considéré. On utilise cette valeur parce que historiquement, elle correspond bien à la valeur ressentie et donnée par les marins lorsqu'on leur demande la hauteur des vagues qu'ils ont rencontrées à un moment donné. Mathématiquement, $H_{1/3}$ est définie comme le double de la racine carrée du moment d'ordre 0 du spectre.

- T_1 est la période pic du spectre de houle, c'est-à-dire la période pour laquelle S est maximum.

À partir de ces deux valeurs, il est possible de calculer la puissance transportée par mètre de front d'onde, c'est-à-dire par mètre perpendiculaire à la direction de propagation des vagues. Exprimée en kW/m, elle est donnée par :

$$P \approx 0,4T_1 H_{1/3}^2$$

Dans le cas d'une petite houle, typiquement $T_1 = 6s$ et $H_{1/3} = 1m$, la puissance transportée vaut environ 2,4 kW/m. Sur les côtes atlantiques, il est fréquent de rencontrer des houles de caractéristiques $T_1 = 9s$ et $H_{1/3} = 2,5m$, pour lesquelles la puissance transportée atteint 22,5 kW/m. Enfin, lors de l'ouragan

Katrina, il a été mesuré en mer des houles de caractéristiques $T_1 = 17s$ et $H_{1/3} = 14m$, pour lesquelles la puissance atteint le chiffre record de 1,33 MW/m. Dans ce cas, un kilomètre de front de vagues représente la puissance produite par une centrale nucléaire !

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. Avec 40 kW/m, le littoral français est plutôt bien exposé, la ressource théorique disponible en énergie des vagues arrivant sur les côtes atlantique de la France métropolitaine étant estimée à 420 TWh/an. Cette quantité d'énergie primaire avoisine la consommation d'énergie finale électrique en France, de l'ordre de 450 TWh/an en 2006.

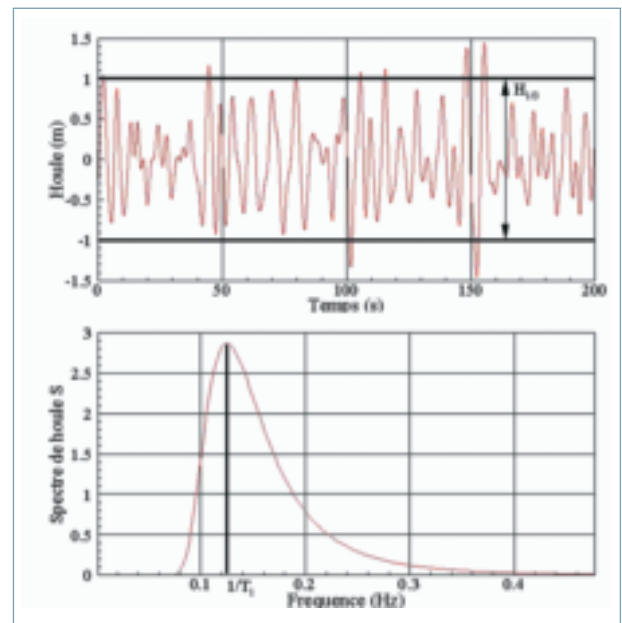


Figure 1 – Enregistrement temporel de houle et sa transformée de Fourier.

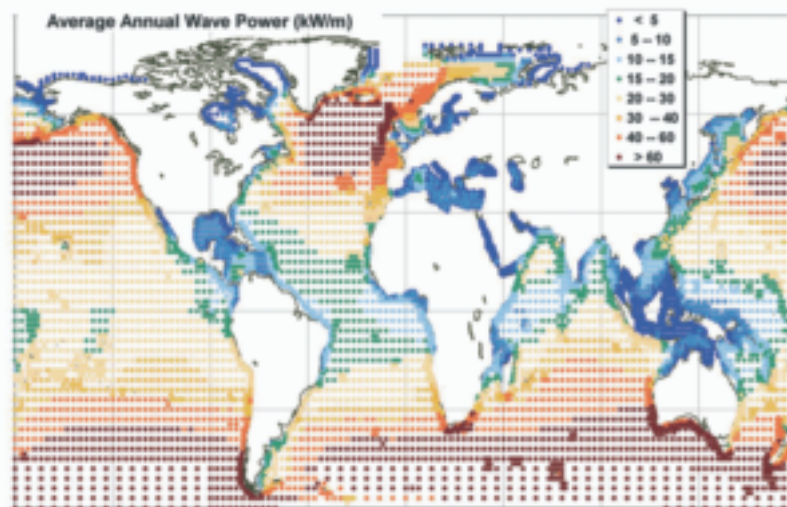


Figure 2 – Répartition de la ressource énergie des vagues dans les mers du globe. Puissance moyenne transportée par mètre de front d'onde. ©Douglas Westwood

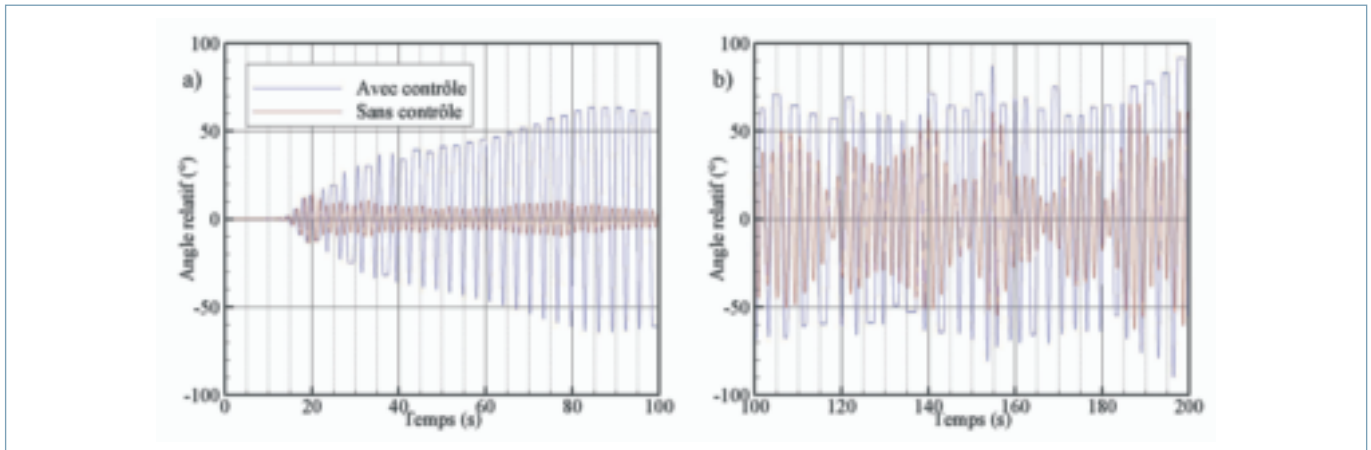


Figure 11 – Enregistrements temporels du mouvement relatif de la roue pendulaire (= productif) avec et sans contrôle par latching dans le cas a) d'une houle régulière, b) d'une houle irrégulière.

Les essais en bassin ont également permis de mettre au point les algorithmes du contrôle par latching. La *figure 11* présente la comparaison d'enregistrements temporels du mouvement de la roue pendulaire avec et sans contrôle par latching, dans des cas de houle régulière et irrégulière.

Sur cet exemple, le contrôle permet d'amplifier l'amplitude du mouvement par un facteur 6 dans le cas de la houle régulière. La puissance produite par le système étant proportionnelle au carré de l'amplitude du mouvement, en première approximation, l'énergie produite est multipliée par environ 36 ! Dans le cas d'une houle aléatoire, plus réaliste par rapport à la houle qui peut être réellement rencontrée en mer, le gain apporté par le contrôle par latching sur l'amplitude du mouvement est plus variable, mais, globalement, il résulte un facteur 2 sur l'énergie produite.

Ces essais en bassin nous ont permis de valider le principe de fonctionnement du SEAREV, de qualifier les outils de simulation numérique et de démontrer l'efficacité du contrôle par latching avec le gain de production d'énergie attendu. Cependant, des phénomènes non-linéaires, non prédits par les théories classiques de tenue à la mer, ont été observés et ont des effets négatifs sur le comportement du système. De nouvelles études sont en cours afin de définir des nouvelles formes de système moins sensibles à ces effets. Ainsi, les travaux de développement du SEAREV conti-



Figure 12 – Slamming. ©Mathieu Durand/UMR 6598

nent. Le projet SEAREV est à présent porté par un consortium industriel dont l'objectif est la validation économique du concept et la construction d'une machine optimisée à l'échelle 1 dans les années à venir. Cette machine sera testée sur des sites d'expérimentation avant de voir paraître les premières fermes de démonstration à plusieurs machines.

Ont également participé à ce travail : A. Clément, M. Durand, H. Mouslim, Laboratoire de Mécanique des Fluides CNRS UMR 6598, M. Guglielmi, Institut de Recherche en Cybernétique et en Communication et Cybernétique de Nantes CNRS UMR 6597, B. Multon et H. Ben Hamed, Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie CNRS UMR 8029

Nous remercions nos collègues techniciens du laboratoire de Mécanique des Fluides de l'École Centrale de Nantes pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée dans la mise au point du montage expérimental.

POUR EN SAVOIR PLUS

Falnes (J.), « Ocean Waves and Oscillating Systems », Cambridge University Press, 2000.

Cruz (J.), « Ocean Wave energy – Current status and Future Perspectives », Springer, 2008.

Babarit (A.), « Optimisation Hydrodynamique et Contrôle Optimal d'un Récupérateur de l'Énergie des Vagues. » Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2005.