

## Préface

Lors des conférences publiques sur les énergies marines, il est facile de capter l'attention des auditeurs par cette citation de Victor Hugo<sup>1</sup> : « Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées. Qu'est-ce que l'océan ? Une énorme force perdue. Comme la terre est bête ! Ne pas employer l'océan ! » Or cette accroche débute par l'évocation du mouvement des vagues, reflétant la fascination de tout un chacun devant une expression aussi immédiate du potentiel énergétique de l'océan. Mais la tâche de récupération de cette énergie se révèle aussi ardue que l'impression générée sur le spectateur au bord de la plage. L'ouvrage rédigé par Aurélien Babarit structure une indispensable réflexion sur ce vaste domaine défriché par des inventeurs, des océanographes, des mécaniciens ainsi que des économistes.

Cet ouvrage est conçu dans l'esprit d'un support de cours suffisamment détaillé pour apporter à des étudiants de 3<sup>e</sup> cycle une approche globale et synthétique sur les convertisseurs d'énergie de la houle et des vagues ; un précis qui a également la vocation d'apporter une connaissance de base à des ingénieurs ayant soit l'ambition de développer de nouveaux systèmes, soit le devoir d'évaluer rapidement une solution qui leur serait proposée avec un dispositif inédit, ou encore pour un déploiement sur un site particulier. Nous retrouvons ainsi, tout au long de l'exposé, à la fois des remarques qui soulignent les déductions portées par le bon sens physique qu'il convient de développer chez des étudiants, mais aussi des avertissements sur les résultats parfois non intuitifs qu'un ingénieur averti se doit de connaître, car ils sont issus de travaux théoriques datant déjà de quelques décennies, ou bien proviennent de l'état de l'art sur les développements aboutis.

---

1. Dans *Quatre-vingt-treize*, « Le cachot », 1874.

Au premier chapitre, nous retrouvons le fondement physique de l'évaluation du gisement énergétique des vagues et de la houle, avec un rappel de la théorie linéaire qui fournit l'ordre de grandeur de la puissance disponible, en évoquant les limites que l'on rencontre dans la pratique en petits fonds, en mer croisée crainte des navigateurs, et en décrivant les avancées de l'océanographie en termes de mesure et de prédiction de ces phénomènes. Pour une fourniture pratique d'électricité d'origine houlomotrice, l'estimation n'est complète qu'à la condition de détailler le coût de la conversion, ce qu'apportent les éléments de marché fournis avec leur *Levelized Cost Of Energy* (LCOE), point de comparaison entre toutes les formes d'énergies.

L'historique de ce secteur s'avère riche car déjà séculaire, et le deuxième chapitre contient quelques anecdotes très instructives sur les essais-erreurs des pionniers et des développeurs contemporains. Il convient d'ailleurs d'encourager, parmi les futurs lecteurs de ce manuel, les développeurs à nettement mieux partager leurs retours d'expériences qu'ils ne les détaillent à ce jour. Le panorama mondial reflète un attrait constant, et malgré des faillites retentissantes, il fait état d'un renouveau qui, sur des méthodes d'ingénierie à base d'innovation structurée et de *stage gating*, devrait faire franchir des étapes concluantes de développement de ces systèmes.

Le troisième chapitre entreprend l'exercice intrinsèquement difficile que je qualifierais de « taxonomie », en référence à la biodiversité, qui consiste à décrire et à classer les différents concepts houlomoteurs. Or il s'agit souvent de tout un ensemble, comportant une fondation ou un ancrage, des éléments en mouvement relatif conduisant au choix d'une conversion électrique directe ou non (air comprimé, hydraulique). Cette description s'avère en effet indispensable pour comprendre comment le concepteur promet d'assurer le bon équilibre entre fiabilité (il s'agit même, la plupart du temps, de « survivabilité ») et le non-surdimensionnement induisant des coûts excessifs en CAPEX (donc initialement) mais aussi en OPEX (les différentes stratégies de maintenance induites par un système flottant ou fixé au fond).

Au dernier chapitre, ce manuel apporte un cadre théorique pour l'évaluation *a priori* des performances, par l'établissement de bornes supérieures de production, avec les préconisations nécessaires vis-à-vis d'une estimation pratique. L'efficacité est reliée à la notion de dimension d'un dispositif multicorps par rapport aux caractéristiques locales des vagues et de la houle à convertir. Nous en venons donc au résultat le plus pratique de cet ouvrage, à savoir comment disposer d'arguments pour l'évaluation rapide de l'adéquation d'un système à un lieu d'exploitation. Ce sont des premières pistes encourageantes pour poursuivre une réflexion essentielle au devenir de l'énergie houlomotrice. Cette réflexion doit également prendre en compte les différents

paradigmes d'exploitation, sur un site isolé ou connecté à un réseau global qui peut tirer un avantage stratégique d'associer les vagues dans un mix d'énergies renouvelables.

En résumé, un ouvrage instructif avec des arguments et une méthode scientifique qui devrait engendrer bien des vocations !

Dr. Yann-Hervé DE ROECK  
Directeur de France Énergies Marines



# Introduction

Depuis le début des années 2000, les énergies renouvelables connaissent un développement spectaculaire. En 2016, la puissance installée mondiale en énergie éolienne a atteint 487 GW alors qu'elle n'était que de 24 GW en 2001. Elle a atteint 295 GW pour l'énergie solaire photovoltaïque alors qu'elle n'était que de 1,6 GW en 2001. Ces indicateurs sont de bon augure au vu de l'impérieuse nécessité de la transformation de notre système énergétique.

L'énergie des vagues constitue un autre gisement d'énergie renouvelable. Contrairement à l'éolien ou au solaire, il est encore inexploité aujourd'hui. Ce n'est pas faute d'avoir essayé. Depuis quarante ans, inventeurs, ingénieurs, chercheurs ont imaginé nombre de systèmes pour récupérer l'énergie des vagues. Si tous ces efforts n'ont pas permis de converger vers une solution technologique satisfaisante, il en résulte une littérature scientifique et technique abondante ainsi que des retours d'expériences nombreux et divers.

Pour un non-initié, ce foisonnement peut être un obstacle. Afin de faciliter la découverte du sujet, nous proposons dans cet ouvrage une synthèse et une discussion des notions et concepts de base en énergie des vagues. Ce travail s'adresse donc aux étudiants, chercheurs, développeurs, industriels et décideurs curieux d'acquérir une vision globale et les clefs de compréhension indispensables du domaine. Il est le résultat de quinze années de recherche et de sept années d'expérience à enseigner ce thème, notamment aux élèves-ingénieurs de deuxième et troisième année de Centrale Nantes.

Cet ouvrage est constitué de quatre chapitres et de deux annexes. Les chapitres deux et trois ainsi que la première annexe sont accessibles à un large public. Les chapitres un et quatre et la seconde annexe sont plus techniques et nécessitent un minimum de connaissances mathématiques.

Dans le premier chapitre, nous nous intéresserons au potentiel de l'énergie des vagues à la fois du point de vue de la ressource énergétique et du marché de l'électricité. Un premier objectif est de fixer les idées quant aux caractéristiques et aux ordres de grandeur de la ressource que l'on souhaite exploiter. Nous verrons notamment que, bien que le gisement énergétique soit considérable, il est un ordre de grandeur inférieur à la consommation énergétique mondiale et ne saurait donc constituer une solution majoritaire dans un système énergétique décarboné. Un autre objectif est de faire prendre conscience au lecteur, si nécessaire, des contraintes économiques auxquelles sont confrontées toutes les technologies de production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables.

Dans le second chapitre, nous proposons une mise en perspective historique de la récupération de l'énergie des vagues. En effet, un aspect remarquable de ce thème est le très grand nombre d'inventions qu'il a suscité. Un premier objectif de ce chapitre est donc de permettre au lecteur, éventuellement néophyte et porteur d'un concept de système de récupération de l'énergie des vagues, de tirer les leçons du passé et de se situer par rapport aux systèmes ayant été testés. Par ailleurs, cette visite de l'histoire de l'énergie des vagues montrera que, s'il est vrai que certains projets de démonstrations en mer de centrales houlomotrices<sup>1</sup> se sont soldés par des échecs cuisants, une plus large proportion de projets ont été menés à bien. Nous souhaitons ainsi démontrer au lecteur que la problématique en énergie des vagues n'est pas technique – oui, nous pouvons récupérer l'énergie des vagues pour en faire de l'électricité – mais économique : comment récupérer l'énergie des vagues à un coût acceptable ?

Si les différents principes de fonctionnement des centrales houlomotrices sont mentionnés dans le second chapitre, nous avons fait le choix de réserver leurs présentations détaillées au troisième chapitre. En raison de la prolifération de ces centrales à laquelle nous assistons depuis le début des années 2000, nous pensons qu'il existe un risque que le lecteur soit quelque peu perdu parmi tous les concepts à la fin du deuxième chapitre. En revenant de façon détaillée sur les principes de fonctionnement et les différentes classifications possibles pour les centrales houlomotrices, nous montrerons qu'ils constituent des grilles de lecture particulièrement utiles pour s'orienter dans cette jungle. Dans la seconde partie de ce troisième chapitre, nous présentons de nouvelles tendances, peut-être porteuses de rupture technologique.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons à la performance énergétique des centrales houlomotrices. Comme pour tout système énergétique, il est instructif de quantifier leurs rendements, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie disponible. Nous l'abordons dans un premier temps d'un point de vue théorique, puis

---

1. Dans cet ouvrage, nous utiliserons indifféremment « centrale houlomotrice » ou « système houlomoteur » comme termes génériques pour dénommer un système de récupération de l'énergie des vagues. Remarquons que, dans la littérature, nous pouvons trouver aussi le terme « houlogénérateur ».

nous confrontons ces résultats théoriques aux performances énergétiques qui ont pu être observées sur des machines en conditions réalistes. Enfin, puisque dans l'absolu le critère déterminant est le coût de l'énergie, nous terminons par les résultats d'une étude comparant une sélection de centrales houlomotrices d'un point de vue technico-économique.