

représenté le verseau et le capricorne, les deux signes astrologiques associés à la planète Saturne depuis Ptolémée, au premier plan de son œuvre (en bas, à gauche et à droite).

En 1675, Cassini montre que l'anneau de Saturne est constitué de plusieurs petits anneaux, séparés par des divisions, dont la plus large est depuis nommée division de Cassini (on connaît aujourd'hui 13 anneaux de matière et divisions). En 1684, il observe autour de la planète deux nouveaux satellites, nommés Téthys et Dioné.

Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les satellites de Saturne n'étaient désignés que par des numéros, de *Saturne I* à *Saturne V*. Toutefois, en 1847, l'astronome britannique John Herschel, dont le père William ajouta Mimas et Encélade en 1789 à la famille des satellites de Saturne, proposa de les remplacer par les noms de Titans, des divinités primordiales géantes qui auraient précédé les dieux de l'Olympe, et dont Cronos, c'est-à-dire Saturne, est le plus connu.

Ainsi, le plafond de Coypel aurait été obsolète au bout d'une dizaine d'années, le nombre de satellites étant passé de trois à cinq. Aujourd'hui, le peintre n'aurait sans doute pas pu envisager son allégorie planétaire, car on connaît désormais plus de 60 satellites naturels (l'existence de certains est débattue) ! Le char aurait disparu sous les putti...

Sciences et curiosités à la cour de Versailles, au château de Versailles, jusqu'au 27 février 2011.
<http://sciences.chateauversailles.fr>



© RMN (Château de Versailles) / Michèle Bellot

IDÉES DE PHYSIQUE

Profiter de la houle

Les vagues transportent beaucoup d'énergie. Il n'est cependant pas aisé de la récupérer.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Les vagues qui se déchainent sur les côtes attirent les rêveurs, les amateurs de sensations fortes et, plus récemment, ceux en quête d'énergie propre et renouvelable : ne peut-on pas tirer profit de la puissance de cette eau en mouvement, comme le fait l'usine marémotrice de la Rance, près de Saint-Malo ? Mais l'énergie des vagues ne se laisse pas facilement domestiquer : l'idée a déjà suscité près d'un millier de brevets dans le monde...

Pourquoi cette difficulté ? Commençons par analyser le phénomène des vagues. La houle a son origine dans les vents qui viennent « frotter » la surface des océans : ils y amorcent des rides, qui s'amplifient jusqu'à devenir des ondulations aptes à parcourir des milliers de kilomètres sans s'atténuer.

L'énergie de la houle est en partie potentielle, en partie cinétique. L'énergie potentielle correspond au fait que l'eau n'est pas étale : de l'énergie est nécessaire pour soulever une partie de l'élément liquide au-dessus du niveau moyen et former ainsi des crêtes et des creux.

L'énergie cinétique correspond aux mouvements de l'eau. Ces mouvements, contrairement à celui des spectateurs dans la ola des stades ou celui de la membrane d'un tambour, ne se limitent pas à des oscillations verticales. La quantité d'eau présente dans une colonne verticale n'est pas constante lorsque sa hauteur varie ; l'eau

étant incompressible, elle se déplace alors vers les colonnes voisines ou inversement : des mouvements horizontaux sont associés aux mouvements verticaux.

Lorsque la longueur d'onde des vagues, c'est-à-dire la distance entre deux crêtes consécutives, est inférieure à la profondeur de l'eau (on dit qu'on est en eau profonde), l'eau décrit un mouvement circulaire (voir la figure 1). À la surface de l'eau, le rayon du cercle du mouvement est égal à

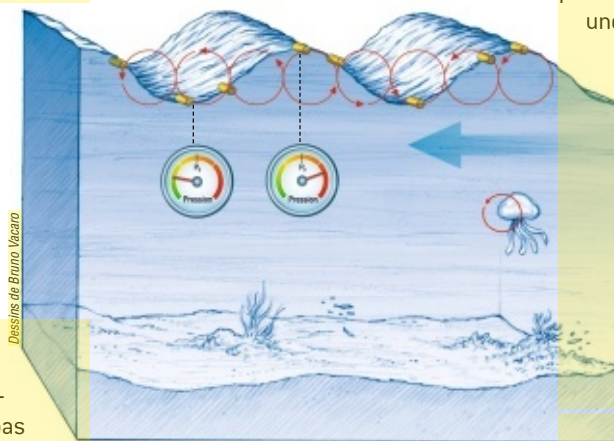
l'amplitude des oscillations, mais le diamètre du cercle décrit diminue rapidement avec la profondeur.

Une puissance considérable

Comme dans toutes les ondes linéaires, l'énergie cinétique des vagues est en moyenne égale à l'énergie potentielle. Il suffit donc d'estimer l'énergie potentielle pour connaître l'énergie totale. Prenons donc une houle de deux mètres d'amplitude.

Pour simplifier le calcul, assimilons le profil de l'ondulation à un créneau. On suppose ainsi que l'eau est abaissée de un mètre sur une demi-longueur d'onde et élevée de un mètre sur la seconde demi-longueur d'onde. Le travail mis en jeu est égal au produit de la masse d'eau déplacée par l'accélération de la pesanteur et par l'élévation ; on calcule qu'il est de cinq kilojoules par mètre carré.

Qu'en est-il maintenant de la puissance de cette houle qui avance vers la côte ? En eau profonde, la vitesse à laquelle cette énergie se propage est proportionnelle à la racine carrée du produit de l'accélération de la pesanteur par la longueur d'onde de la vague. Pour une vague de 64 mètres de longueur d'onde, on obtient une vitesse de cinq mètres par seconde. La puissance par mètre linéaire est donc d'environ 25 kilowatts. C'est considérable : multipliée par 200 kilomètres de côte (cinq pour cent du



1. LA HOULE TRANSPORTE de l'énergie à la fois potentielle et cinétique. L'énergie potentielle est due aux différences de hauteur des colonnes d'eau. L'énergie cinétique provient des mouvements de l'eau, qui s'effectuent non seulement verticalement, mais aussi horizontalement. Ainsi, un bouchon qui flotte effectue un mouvement circulaire. Le rayon de ce mouvement diminue rapidement avec la profondeur. Pour produire de l'énergie, on peut par exemple exploiter les variations de pression en un point donné, la pression hydrostatique étant plus élevée sous une crête, moins élevée sous un creux.

littoral atlantique français), la puissance serait égale à cinq gigawatts, soit de l'ordre de grandeur de la puissance fournie par les éoliennes en France en 2010.

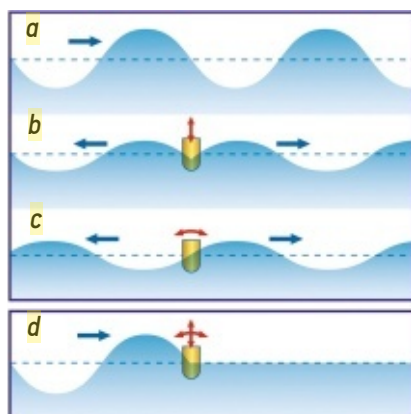
Comment récupérer cette puissance ? Généralement, l'idée est de profiter du va-et-vient des masses d'eau pour actionner un dispositif électromécanique. On a le choix entre des dispositifs étendus (projets *Pelamis* ou *Wave Dragon*) et des dispositifs plus simples qualifiés de « ponctuels », car petits par rapport à la longueur d'onde des vagues. Ils sont de conceptions très variées, comme l'attestent les unités *PowerBuoy* et *Archimedes* (voir la figure 3). Quelques principes physiques de base nous permettront cependant de déterminer la puissance maximale à attendre des dispositifs ponctuels.

Pour ce faire, déterminons l'énergie prélevée de la houle en analysant comment cette onde a été modifiée par la bouée. Utilisons un raisonnement analogue à celui qui permet, en optique, de déterminer l'énergie maximale absorbée par un atome dans un faisceau lumineux ; ce maximum correspond, à un coefficient numérique près, à l'énergie incidente sur une surface égale au carré de la longueur d'onde lumineuse.

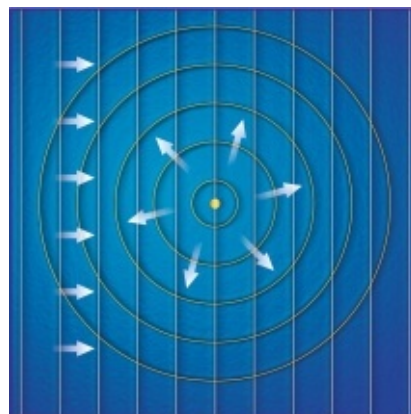
À grande distance du « capteur ponctuel », l'onde résultante est la superposition de l'onde incidente et d'une onde circulaire émise par le capteur (voir la figure 2). On observe alors deux effets : dans la direction de propagation de l'onde incidente, on a des interférences destructives entre l'onde incidente et celle émise par le capteur ; et dans toutes les autres directions, il y a émission d'énergie.

Les interférences se traduisent par le fait que, sur une certaine étendue, l'amplitude de la houle est plus faible qu'elle n'aurait été en l'absence du dispositif. Ainsi, la houle transporte moins d'énergie. L'énergie prélevée est proportionnelle au produit de l'amplitude initiale de la houle par l'amplitude de l'onde émise. Et pour un effet maximal, les oscillations du capteur doivent être en opposition de phase par rapport à la houle.

Ainsi, plus l'amplitude des oscillations est grande, plus l'énergie prélevée serait



2. UNE BOUÉE QUI OSCILLE de façon appropriée peut absorber l'énergie des vagues. Le schéma de la situation à une dimension aide à le comprendre (a, houle non perturbée). Une oscillation verticale sur une surface liquide plane crée une onde symétrique (b). Une oscillation horizontale crée une onde antisymétrique (c). La superposition des trois cas de figure (houle non perturbée, oscillations verticales et horizontales de la bouée avec des amplitudes adéquates) conduit à l'absorption de l'énergie incidente (d). Le schéma de droite représente la situation en deux dimensions, vue de dessus.



importante, mais c'est sans compter sur le second effet : l'onde émise par le capteur transporte une énergie proportionnelle au carré de son amplitude. La puissance réellement récupérée par le capteur est donc la différence entre l'énergie prélevée à la houle et l'énergie réémise.

Trouver le bon réglage

On doit ainsi ajuster l'amplitude des oscillations du capteur de façon à augmenter au maximum l'énergie prélevée à l'onde sans que l'énergie rayonnée ne vienne tout faire perdre. On montre que l'optimum est atteint quand la puissance récupérée est identique à la puissance émise.

Le calcul indique en outre que la puissance récupérée est alors égale à la puissance de la houle initiale qui arrive sur un segment dont l'extension est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement. Cela donnerait au plus 500 kilowatts pour une houle de deux mètres d'amplitude et ayant une longueur d'onde de 64 mètres.

Or les rendements actuels ne sont que de quelques pour cent... À cela s'ajoutent trois autres difficultés. La première est qu'en réalité, les mouvements de la surface des océans sont complexes et correspondent

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Falnes, A review of wave-energy extraction, *Marine Structures*, vol. 20(4), pp. 185-201, 2007.

K. Budar et J. Falnes, A resonant point absorber of ocean-wave power, *Nature*, vol. 256, pp. 478-479, 1975.



Retrouvez les articles de J.-M. Courty et É. Kierlik sur www.pourlascience.fr