

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

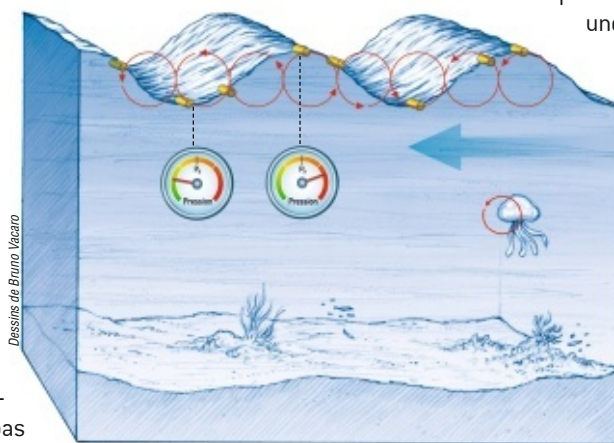
l'amplitude des oscillations, mais le diamètre du cercle décrit diminue rapidement avec la profondeur.

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.

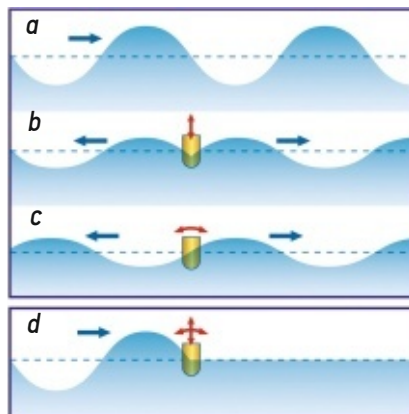
Comment récupérer cette puissance ? Généralement, l'idée est de profiter du va-et-vient des masses d'eau pour actionner un dispositif électromécanique. On a le choix entre des dispositifs étendus (projets *Pelamis* ou *Wave Dragon*) et des dispositifs plus simples qualifiés de « ponctuels », car petits 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.

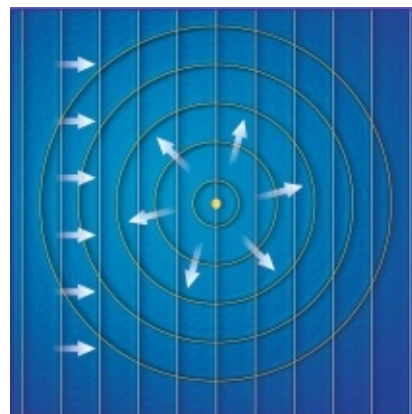
À grande distance du « capteur ponctuel », l'onde résultante est la superposition de l'onde incidente et d'une onde circulaire émise par le capteur [voir la figure 2]. On observe alors deux effets : dans la direction de propagation de l'onde incidente, on a des interférences destructives entre l'onde 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

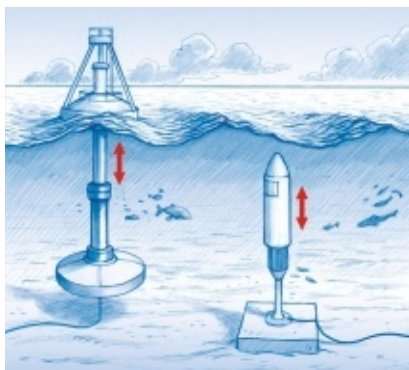
J. Falnes, A review of wave-energy extraction, *Marine Structures*, vol. 20(4), pp. 185-201, 2007.

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 E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

3. PLUSIEURS DISPOSITIFS produisant de l'électricité à partir de l'énergie de la houle ont déjà été testés et sont sur le point d'être exploités commercialement. L'un d'eux est *PowerBuoy*, un dispositif à flotteur conçu par la Société américaine *Ocean Power Technologies*. Un autre est *Archimedes Waveswing*, dispositif immergé construit par la Société écossaise *AWS Ocean Energy*. Dans les deux cas, le va-et-vient d'un cylindre qui coulisse à l'intérieur d'un autre engendre de l'électricité par induction électromagnétique.



à la superposition d'ondes provenant de directions différentes et n'ayant pas la même longueur d'onde. À la lumière de ce qui précède, il est impossible d'avoir une récupération d'énergie maximale pour des longueurs d'onde très différentes : le processus d'optimisation sera donc au mieux

un compromis, adapté aux formes particulières de la houle du lieu d'installation.

La deuxième difficulté est que ces dispositifs doivent résister aux plus fortes des tempêtes, ce qui accroît notablement le coût de leur installation. Enfin, il reste techniquement délicat de convertir de l'énergie fournie irrégulièrement avec des temps caractéristiques de 10 secondes en énergie électrique régulée à 50 hertz (cycles de 0,02 seconde).

C'est pourquoi l'énergie de la houle, quoique propre et renouvelable, n'en est qu'au stade des expérimentations poussées. Le projet actuel le plus ambitieux, SEABASED, est la construction en Suède d'une ferme de 500 unités houlomotrices d'une puissance totale de dix mégawatts. Le projet français SEM-REV, visant à tester divers prototypes, sera quant à lui déployé en 2011 au large du Croisic. ■

Mardi 8 février 2011 à 18h30
au Palais de la Découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous faire partager leur passion pour la science !

Invité

Christophe Salomon

Directeur de recherche au CNRS, Christophe Salomon dirige le groupe « Gaz de Fermi ultrafroids » au sein du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure, à Paris. Il étudie les gaz d'atomes ultrafroids. Son équipe est aussi engagée dans la mission spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne, qui vise à envoyer en 2013, sur la Station spatiale internationale, l'horloge PHARAO à atomes froids.

Palais de la Découverte **SCIENCE**

SCIENCE & GASTRONOMIE

Attention au froid !

Il fait brunir certains végétaux, qui sont alors un peu moins bons pour la santé.

Hervé This



Une pomme, une poire qui tombent se talent (le tissu végétal brunit à l'endroit du choc) à une vitesse qui dépend de l'espèce et de la variété. Pourquoi ? Parce que le choc endommage les cellules : des enzymes, initialement présentes dans des compartiments intracellulaires spécifiques du fruit, sont libérées de ces compartiments, réagissent avec des polyphénols pour former des composés nommés quinones, lesquels polymérisent en formant des composés bruns qui se lient aux protéines cellulaires.

Les cuisiniers jugent ce brunissement enzymatique des végétaux nuisible à l'appréciation de leurs plats, et ils le combattent souvent à l'aide de jus de citron... ignorant que l'acide ascorbique pur, responsable de l'effet du jus de citron, leur coûterait moins cher et serait plus efficace. Sans compter qu'il éviterait de donner un goût de citron qui n'est pas toujours souhaitable : pour les fonds d'artichaut parés, pour les avocats préparés en purée, pour les fruits coupés...

Depuis que le froid s'est introduit dans les cuisines, les chocs ne sont plus les seules causes de brunissement enzymatique : la congélation aussi conduit à des brunissements déplorables, d'origine voisine du brunissement des chocs. En effet, la congélation de l'eau, dont les tissus végétaux sont majoritairement constitués, crée des cristaux de glace, qui percent les compartiments intracellulaires et même les cellules.

Aujourd'hui, on explore un brunissement qui se produit au froid, même quand l'eau ne gèle pas : les ananas conservés entre 0 et 8 °C présentent parfois des taches sombres en même temps que leur chair devient trans-

parente. C'est ce que l'on nomme le cœur noir de l'ananas.

Les stress associés au refroidissement conduisent à des désorganisations des cellules végétales, mais quelles sont les enzymes actives dans ce phénomène particulier ? Astrid-Kim Raimbault et ses collègues du CIRAD ont exploré le brunissement des ananas au froid... et découvert pourquoi certaines variétés ne brunissent pas : ils ont déterminé que l'activité des enzymes polyphénoloxydases est responsable du brunissement.

Les polyphénoloxydases participent aux défenses des plantes, par exemple dans leur lutte contre le froid, en renforçant les parois cellulaires par polymérisation des quinones, ce qui engendre des mélanines insolubles. Ces polyphénoloxydases ont été observées dans les variétés d'ananas sensibles au brunissement enzymatique, et la technique d'électrophorèse sur gel (on sépare des protéines en les faisant migrer, sous l'action d'un champ électrique) permet, dès un stade précoce, de savoir si une variété sera ou non sensible au froid.

Question suivante : si des quinones réactives se forment dans les végétaux endommagés ou attaqués par des insectes, par exemple, est-il bon de consommer ces végétaux ? La réponse est non. Les quinones sont très réactives et les molécules de l'organisme n'aiment pas qu'on les modifie par des liaisons covalentes : elles y perdent leur fonction. Ce qui est « naturel » n'est pas nécessairement bon ! Dans cet ordre d'idées, on a hélas oublié un article essentiel, publié en 1990 par Bruce Ames (le biochimiste américain qui a mis au point des tests peu coûteux pour analyser le pouvoir mutagène d'un composé).

B. Ames a comparé le risque dû aux « pesticides naturels » et celui dû aux résidus de pesticides synthétiques. Le calcul montrait que 99,99 pour cent (en masse) des pesticides absorbés par les Américains, en raison de leur alimentation, provenaient des composés utilisés par les plantes pour se défendre. À l'époque, on n'avait testé l'effet carcinogène que de 52 pesticides naturels (alors que tous les pesticides de synthèse sont très largement étudiés), et la moitié d'entre eux étaient cancérogènes pour les rongeurs. Autrement dit, les pesticides naturels ou de synthèse présentent les mêmes dangers... et les risques que font courir les résidus de pesticides de synthèse sont bien inférieurs à ceux que font courir les pesticides naturels. B. Ames avait intitulé son article *Les pesticides de l'alimentation (99,99 % sont naturels)*.

Que manger, finalement, avec tous ces dangers ? La conclusion semble s'imposer : des fruits et des légumes sains, manipulés avec soin, protégés des insectes, avec aussi peu de résidus de pesticides de synthèse que possible, protégés en partie du brunissement par du jus de citron ou de l'acide ascorbique... C'est du bon sens... éclairé par la science.



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr