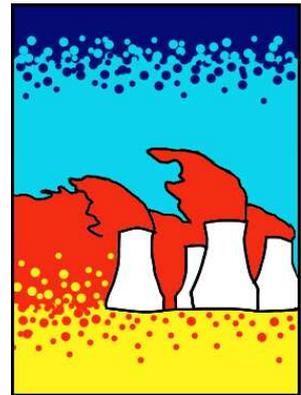


*Troisième partie*

## Chapitres techniques



# F Vagues II

## La physique de la houle en eaux profondes

La houle possède de l'énergie sous deux formes : de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique. L'énergie potentielle est celle qui permet à l'eau des creux de monter jusqu'aux crêtes. L'énergie cinétique est associée au déplacement circulaire de l'eau.

Les gens croient souvent que si la crête des vagues se déplace à 50 km/h, alors l'eau de la crête se déplace elle aussi à cette vitesse. En fait, ce n'est pas du tout le cas. C'est exactement comme la « ola » dans les stades : quand la « ola » fait le tour du stade, les personnes qui y participent ne font pas eux-mêmes le tour du stade ; ils ne font que se lever et s'asseoir l'espace d'un instant, en restant à leur place. Le déplacement de l'eau dans l'océan est de même nature : si vous observez une algue qui flotte sur l'eau alors que des vagues passent, vous verrez que l'algue ne fait que monter et descendre avec un léger mouvement de va-et-vient dans la direction de propagation de la vague — pour reproduire exactement ce mouvement lors d'une « ola », il faudrait que les personnes qui y participent fassent le mouvement du laveur de vitre qui nettoie une fenêtre d'un mouvement circulaire. La vague possède de l'énergie potentielle, car les crêtes sont plus élevées que les creux ; et elle possède de l'énergie cinétique à cause du petit mouvement circulaire de va-et-vient de l'eau.

Nos calculs approximatifs de la puissance de la houle nécessite de prendre en compte trois paramètres : une estimation de la période  $T$  des vagues (le temps entre deux crêtes) ; une estimation de la hauteur  $h$  des vagues ; et une formule de physique qui nous indique comment déterminer la vitesse  $v$  de la vague en fonction de la période.

La longueur d'onde  $\lambda$  et la période des vagues de houle (respectivement, la distance et le temps entre deux crêtes) dépendent de la vitesse du vent qui crée les vagues, comme le montre la figure F.1. La hauteur des vagues ne dépend pas de la vitesse du vent, mais plutôt de la durée pendant laquelle le vent a caressé la surface de la mer.

Vous pouvez estimer la période des vagues de houle en vous rappelant le temps qui sépare l'arrivée de deux vagues sur une plage qui donne sur l'océan. De l'ordre de 10 secondes ? Pour la hauteur, faisons l'hypothèse d'une amplitude de 1 mètre, ce qui fait 2 mètres du creux à la crête. Avec une houle d'une telle amplitude, un homme dans un canot ne peut pas voir au-delà des vagues qui l'entourent lorsqu'il est dans un creux ; c'est probablement une hauteur supérieure à la moyenne, mais on pourra revenir sur cette estimation si nécessaire. La vitesse de ces vagues en pleine mer est reliée à la période  $T$  par la formule suivante (voir Faber (1995), page 170) :

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

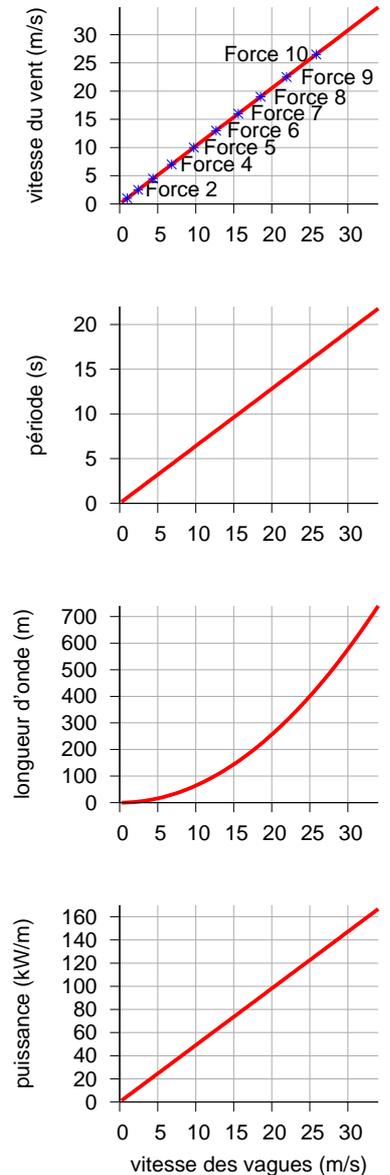


FIGURE F.1. Quelques chiffres sur la houle en eaux profondes. Dans les quatre figures, l'axe horizontal représente la vitesse des vagues en m/s. Du haut en bas, les graphes représentent : la vitesse du vent (en m/s) nécessaire pour créer une houle se déplaçant à la vitesse indiquée ; la période (en secondes) des vagues de houle ; la longueur d'onde (en mètres) des vagues de houle ; et la densité de puissance (en kW/m) d'une vague de houle de 1 m d'amplitude.

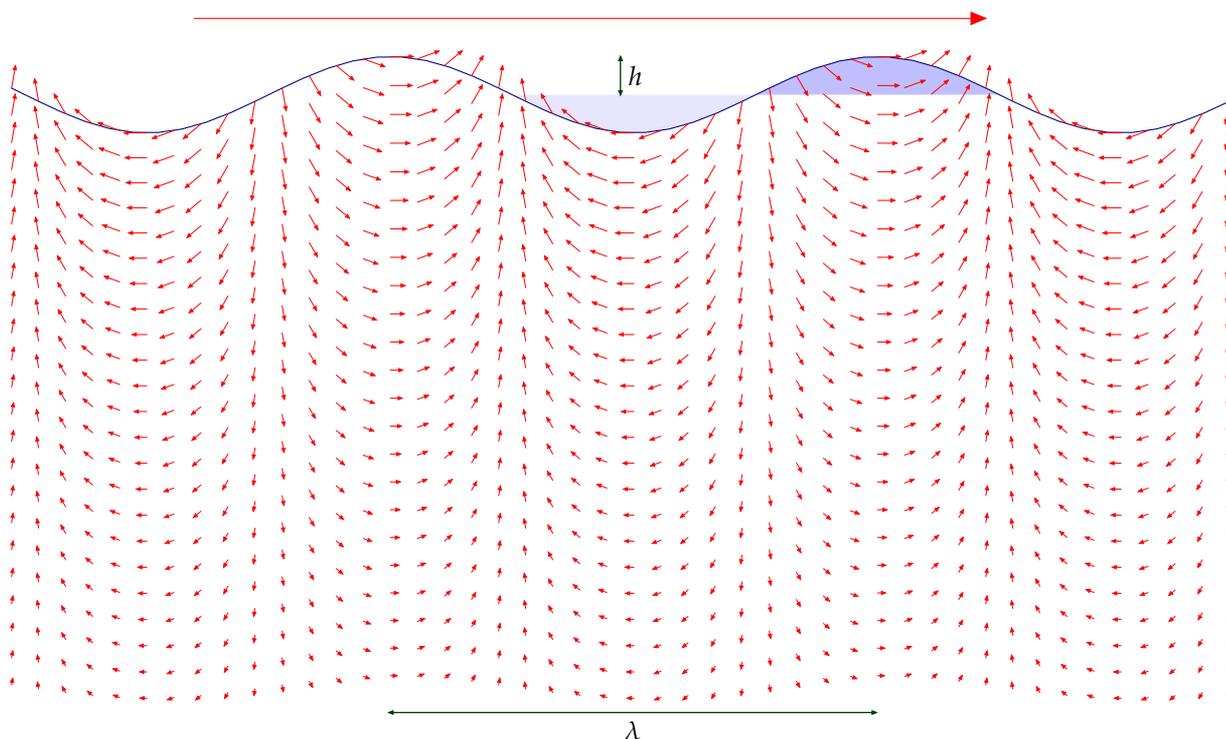


FIGURE F.2. Une vague possède de l'énergie sous deux formes : de l'énergie potentielle associée à l'eau qui monte du creux en gris clair vers la crête en gris foncé ; et de l'énergie cinétique de toute l'eau de surface qui recouvre quelques longueurs d'onde — la vitesse de l'eau est schématisée par les petites flèches. La vitesse des vagues se déplaçant de gauche à droite est représentée par la grosse flèche tout en haut.

où  $g$  est l'accélération de la pesanteur ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Par exemple, si  $T = 10$  secondes, alors  $v = 16 \text{ m/s}$ . La longueur d'onde d'une telle vague de houle — la distance entre les crêtes — est alors de  $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$ .

Pour une houle de longueur d'onde  $\lambda$  et de période  $T$ , si la hauteur de chaque crête et la profondeur de chaque creux est de  $h = 1 \text{ m}$ , l'énergie potentielle qui passe ainsi par unité de temps et de longueur est égale à :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq m^* g \bar{h} / T, \quad (\text{F.1})$$

où  $m^*$  est la masse par unité de longueur, qui vaut à peu près  $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$  (en approximant la surface de la crête grisée de la figure F.2 par la surface d'un triangle), et où  $\bar{h}$  est le changement d'altitude du centre de gravité de la masse d'eau qui monte et descend — il est à peu près égal à  $h$ . On a donc :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq \frac{1}{2}\rho h \frac{\lambda}{2} g h / T. \quad (\text{F.2})$$

(Le calcul aurait plus rigoureux si l'on avait utilisé des intégrales, mais ici, cela aurait donné le même résultat.) Comme  $\lambda/T$  correspond à la vitesse à laquelle les vagues se déplacent, c'est-à-dire  $v$ , on a :

$$P_{\text{potentielle}} \simeq \frac{1}{4}\rho g h^2 v. \quad (\text{F.3})$$

Les vagues ont une énergie cinétique en plus de leur énergie potentielle, et, de manière tout à fait remarquable, toutes deux sont parfaitement égales, même si je ne détaille pas le calcul ici. La puissance totale des vagues est donc le double de la puissance que nous avons calculée pour leur énergie potentielle :

$$P_{\text{totale}} \simeq \frac{1}{2} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.4})$$

Cette solution ne pose qu'un seul problème : sa valeur est trop forte, parce que nous avons négligé une propriété étrange des ondes dispersives : l'énergie de l'onde à la surface de l'eau ne se déplace pas à la même vitesse que la crête des ondes ; elle se déplace à une vitesse que l'on appelle la vitesse de groupe qui, pour la houle en eaux profondes est égale à la moitié de la vitesse  $v$  des crêtes. On peut se rendre compte de ce phénomène en jetant un galet dans une mare et en regardant les ondes avec attention. Cela signifie que l'équation F.4 est fautive : il faut diviser son terme de droite par deux. L'expression correcte de la puissance par unité de longueur de front d'onde est donc :

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v. \quad (\text{F.5})$$

Avec comme valeurs  $v = 16$  m/s et  $h = 1$  m, on obtient :

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m}. \quad (\text{F.6})$$

Cette estimation grossière colle assez bien avec les valeurs mesurées dans l'Atlantique (Mollison, 1986) (voir page 87.)

Les pertes dues à la viscosité du milieu aqueux sont faibles : des vagues de houle avec une période de 9 secondes doivent faire trois fois le tour de la Terre pour perdre 10 % de leur amplitude.

## Des systèmes houlomoteurs concrets

### *Les installations en eau profonde*

Quel est le rendement des systèmes houlomoteurs ? Les « batteurs » de Stephen Salter ont été bien étudiés : une rangée de canards de 16 m de diamètre se nourrissant de l'énergie de la houle atlantique avec une puissance moyenne de 45 kW/m pourrait permettre, en comptant les pertes en ligne, de fournir 19 kW/m au centre de l'Écosse (Mollison, 1986).

Le projet Pelamis porté par *Ocean Power Delivery* a supplanté le projet de Stephen Salter comme caisson flottant houlomoteur en eau profonde : quatre caissons flottants de 3,5 m de diamètre, reliés entre eux par des charnières articulées formant un véritable serpent de mer de 130 m de long. La puissance maximale obtenue par chaque serpent est de 750 kW. Ces systèmes Pelamis sont conçus pour être installés au mouillage dans des eaux d'environ 50 m de profondeur. Dans une usine houlomotrice,

39 serpents installés sur trois rangées feraient face à la direction de houle dominante, occupant une surface de l'océan de 2,5 km de front par 400 m de longueur (soit une surface de 1 km<sup>2</sup>). La largeur efficace d'un de ces systèmes Pelamis est de 7 m (dans les conditions optimales, un tel système extrait 100 % de l'énergie sur 7 m de large). Les promoteurs affirment qu'une telle ferme houlomotrice pourrait fournir 10 kW/m.

### *Les installations en eaux peu profondes*

A peu près 70 % de l'énergie de la houle est perdue par frottement sur le fond quand la profondeur décroît de 100 m à 15 m. En eau peu profonde, la puissance des vagues par unité de longueur de littoral est donc réduite à environ 12 kW/m. L'Oyster, développé par la Queen's University de Belfast et la société *Aquamarine Power Ltd* [[www.aquamarinepower.com](http://www.aquamarinepower.com)], est composé d'un aileron vertical de 12 m de haut, et il est supposé être fixé sur un support plat posé par 12 m de fond dans des zones où la puissance moyenne incidente des vagues de houle est supérieure à 15 kW/m. La puissance crête est de 600 kW. Un seul Oyster produirait environ 270 kW avec des creux de vagues de houle supérieurs à 3,5 m. Selon les prévisions effectuées, un Oyster devrait produire une puissance par unité de masse installée supérieure à un Pelamis.

Les systèmes Oyster, qui actionnent en fait une pompe à double piston, pourraient aussi être utilisés pour dessaler directement de l'eau de mer par osmose inverse. « La production maximale d'eau douce d'un système de dessalement Oyster est comprise entre 2 000 et 6 000 m<sup>3</sup>/jour ». Si l'on en juge par l'installation de l'île de Jersey (qui consomme 8 kWh par m<sup>3</sup>), cela équivaut à entre 600 et 2 000 kW d'électricité.