

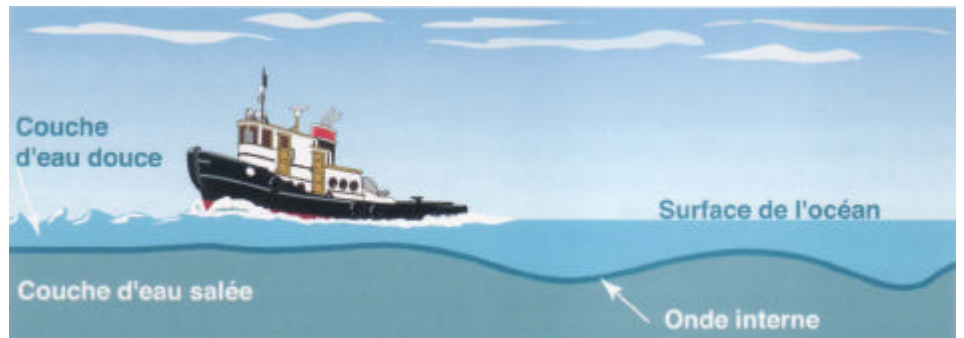
Le *mystère*

des « *eaux mortes* »

Les ondes internes, vagues se propageant sous la mer, ont des effets étranges et peu connus sur la navigation.

Le 29 août 1893, le *Fram*, qui a quitté la Norvège depuis deux mois, est en route vers le Pôle nord. Alors qu'il navigue au nord de la presqu'île de Taïmyr en Sibérie, en eau libre, par temps calme, machine à pleine pression, le navire stoppe brutalement. La vitesse passe brusquement de 5 nœuds à 1 nœud et reste stable. La progression est si lente que le professeur Fridtjof Nansen, chef de l'expédition, écrit dans son journal, « *Je pense que j'aurais pu partir devant à la rame et chasser le phoque* ».

En novembre 1898, deux ans après la fin de son expédition, Nansen envoya une lettre au professeur Vilhelm Bjerknes, un ancien camarade de classe, lui demandant son avis sur la cause du phénomène. Bjerknes formula les bonnes hypothèses : lorsqu'une couche d'eau douce surmonte l'eau salée de la mer, un navire en mouvement génère non seulement des ondes visibles à la limite entre l'eau et l'air, mais aussi des ondes invisibles, dans la mer, le long de la limite entre la couche d'eau douce et la couche d'eau salée.



1 - Phénomène « d'eau morte ».

Un navire progressant dans une couche d'eau légère surmontant une couche d'eau plus dense (eau douce au-dessus d'eau salée par exemple) crée des ondes à l'interface des deux couches. Si le tirant d'eau du navire est voisin de l'épaisseur de la couche supérieure, l'énergie consommée par la formation de ces ondes internes peut être suffisante pour stopper le navire.

Les « *eaux mortes* »

Le *Fram* a rencontré ce que les navigateurs norvégiens appelaient « *Dödvand* » ou « eau morte ». Cet étrange phénomène fait chuter la vitesse du navire, qui ne répond plus au gouvernail. Le seul indice permettant de le détecter est la présence d'eau douce ou saumâtre en surface. C'est en effet le cas ce jour-là dans le détroit au nord de l'île Taïmyr, où la couche de glace a fondu rapidement. Le 30 août, la progression est encore plus lente. Nansen écrit : « *Nous ne pouvons absolument pas prendre de vitesse dans cette eau morte, nous entraînons toute la mer avec nous [...] Nous faisons de grands ronds, tournons sur place, essayons toutes sortes de choses pour s'en sortir, mais en vain. Quand les machines s'arrêtent, le navire semble aspiré par l'arrière* ».

Le *Fram* rencontra des eaux mortes à plusieurs occasions pendant son voyage.

L'énergie qui normalement devrait servir à propulser le navire est consommée par la genèse de ces ondes internes, avec pour résultat l'arrêt complet du navire.

Premières explications

Bjerknes soumit le problème à son élève Vagn Walfrid Ekman, qui s'employa à confirmer la théorie de Bjerknes, à la fois mathématiquement et expérimentalement. Il utilisa une cuve en verre contenant une couche d'eau douce surmontant une couche d'eau salée, teintée d'une couleur sombre pour mettre en évidence l'interface. En poussant une maquette de bateau à la surface, Ekman mit clairement en évidence les ondes internes se propageant le long de l'interface entre les deux couches d'eau.

Ce fut la première démonstration et explication des ondes internes dans l'océan. Cependant, des ondes internes avaient déjà été observées en des endroits très divers. Benjamin Franklin doit

Traduction et adaptation de l'article
Waves beneath the sea de

Bruce Parker,

National Weather Service, NOAA, paru dans la revue *Mariners Weather Log*, août 1999.

Océanographie

probablement être le premier à avoir écrit sur ce sujet. Dans une lettre envoyée de Madère, datée du 1^{er} décembre 1762, il décrit ce qu'il appelle une lampe italienne : un verre contenant un tiers d'eau et un tiers d'huile. Il note que la surface de l'huile (avec de l'air au-dessus) peut être immobile, alors que la surface de l'eau en dessous de l'huile semble « être en grande perturbation, augmentant et baissant en des ondes irrégulières ». De retour aux États-Unis, il répéta cette expérience plusieurs fois. Aujourd'hui, on trouve de petits blocs de plastique contenant une couche d'eau teinte en bleu, surmontée d'une couche d'huile ; à l'interface entre les deux, des ondes apparaissent, ressemblant aux vagues de l'océan. Cependant, ces ondes se déplacent lentement, prennent de l'ampleur et cassent beaucoup plus facilement que ne le feraient des ondes à la surface de la mer. (Comme nous allons le voir, cela vient de la différence de densité entre l'huile et l'eau, beaucoup plus faible que celle entre l'eau et l'air).

Une question de différence de densité

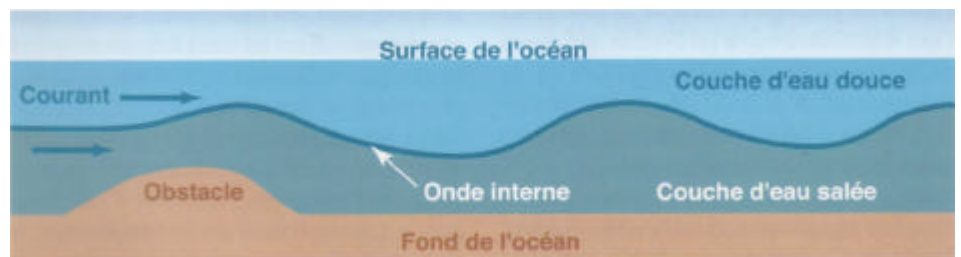
Quand on regarde plus en détail le déplacement de l'onde le long de l'interface entre les deux liquides (soit entre l'eau et l'huile, soit entre l'eau salée et l'eau douce), il existe plusieurs similitudes avec le déplacement des ondes à la surface de l'océan. Quand les deux couches sont immobiles, avec le fluide le plus léger au-dessus du plus lourd, l'interface est une ligne horizontale rectiligne, le système entier est en équilibre. En tout point, le poids du fluide est exactement compensé par la pression environnante¹. Si quelque chose perturbe l'interface, par exemple en poussant un point de l'interface vers le haut, l'eau la plus lourde de la couche inférieure s'élève au sein de la couche d'eau plus légère. Puis, la gravité fait redescendre l'eau la plus lourde². Sans aucun frottement appréciable pour arrêter ce mouvement vers le bas, l'eau la plus lourde continue sa descente par inertie, allant au-delà de sa position d'équilibre d'origine. L'eau la plus légère au-dessus suit le mouvement, remplissant le creux qui se forme. L'eau la plus légère étant maintenant entourée d'eau plus lourde, il se crée une force de

flottabilité qui entraîne l'interface à nouveau vers le haut.

Ces oscillations à l'interface entre les deux couches se propagent horizontalement parce que les particules d'eau se déplacent non seulement de haut en bas, mais aussi de gauche à droite. En fait, les particules d'eau des deux couches suivent des trajectoires circulaires tournant en sens inverse de part et d'autre de l'interface. L'énergie est transférée horizontalement aux particules d'eau avoisinantes, et ainsi l'onde (Le. la déformation de l'interface) se propage le long de l'interface.

En raison de la petite différence de densité entre les deux couches d'eau, la

interne est déterminée par la différence de densité entre les deux couches et par l'épaisseur des couches. La résistance à l'avancement du navire atteint son maximum quand la vitesse du navire est proche de celle de l'onde interne. Si le navire a assez de puissance pour aller plus vite que l'onde interne (généralement une vitesse de 5 noeuds est suffisante), il peut se sortir des eaux mortes. C'est pourquoi les eaux mortes posent moins de problème aujourd'hui avec les navires modernes. Néanmoins, on a relevé des cas où le navire fut ralenti, puis stoppé net (quelquefois avec de fortes vibrations). Dans certains cas, on a cru à un échouage



2 - Un courant rencontrant un obstacle au fond de l'océan génère des ondes à l'interface entre deux couches d'eau de densité différente. C'est le cas par exemple au-dessus du talus continental à l'approche des côtes.

force de gravité restituée est réduite ; elle est plus faible que la force restituée pour les ondes à la surface océanique. Les particules de l'eau la plus lourde, soulevées à la crête d'une onde interne, sont à peine plus lourdes que les particules d'eau environnantes. C'est pourquoi il leur faut du temps pour ralentir et commencer à redescendre. De même, il faut du temps pour que la force de flottabilité se manifeste lorsque les particules d'eau légères pénètrent dans la couche d'eau inférieure. Cela a pour conséquence des ondes de grande amplitude (elles se déplacent plus haut ou plus bas avant de ralentir), se propageant lentement. Une onde interne a une période qui varie de 10 minutes à plusieurs heures, alors que les ondes en surface ont des périodes de quelques secondes à quelques minutes. Les ondes internes peuvent atteindre des hauteurs de plusieurs centaines de pieds dans l'océan, beaucoup plus que les ondes de surface.

Fréquent dans les fjords et les rivières

Pour qu'un navire soit pris dans une eau morte, il faut d'une part que son tirant d'eau soit proche de l'épaisseur de la couche d'eau douce en surface et, d'autre part, qu'il navigue à une vitesse inférieure à la vitesse de propagation de l'onde interne créée. La vitesse d'une onde

et on a mis le navire en cale sèche pour examen, pour s'apercevoir finalement qu'il n'y avait aucun dégât.

Autrefois, quand les navires étaient moins puissants, les incidents étaient fréquents partout dans le monde où une couche d'eau douce surmonte une couche d'eau salée, notamment dans les fjords de Scandinavie. Un fjord est une vallée glaciaire envahie par la mer se terminant au niveau de l'océan par un talus. Les eaux salées froides et denses de l'océan remplissent le fond du fjord. L'eau de surface est plus légère en raison de l'eau douce provenant des rivières qui se jettent dans le fjord. Le talus à l'entrée du fjord agit comme un filtre, empêchant les ondes de l'océan les plus chargées en énergie de pénétrer dans le fjord, si bien qu'il y a peu de mélange et que les deux couches d'eau se maintiennent. Ainsi un fjord est un endroit idéal pour la génération d'ondes internes. En revanche, l'eau morte est moins courante dans les rivières parce que les forts écoulements, en particulier les courants de marée, favorisent le mélange de la colonne d'eau. Dans les rivières à courant faible, on rencontre des phénomènes d'eau morte en des lieux précis (là où l'épaisseur de l'eau douce est équivalente au tirant d'eau du navire) et à des périodes précises : généralement les eaux mortes sont présentes en amont pendant la saison sèche, en aval et hors de l'embouchure pendant la saison des pluies. Les eaux mortes sont également plus

1. Ndlr : autrement dit, il y a équilibre hydrostatique ; le principe d'Archimède est respecté. Le poids d'une particule d'eau est compensé par une force d'intensité égale au poids du volume d'eau déplacé.

2. Ndlr : l'eau lourde étant entourée d'eau plus légère, le principe d'Archimède n'est plus respecté.

fréquentes pendant la brise de mer et la marée montante, lesquelles favorisent le maintien de la couche d'eau douce.

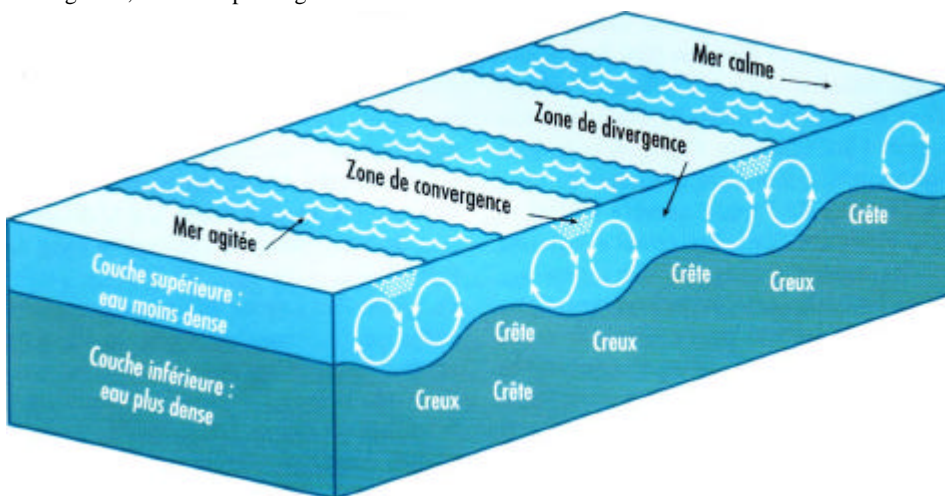
Mais aussi au large

Les ondes internes ne sont pas limitées aux rivières et aux fjords où l'eau douce coule au-dessus de l'eau salée. En fait, la plupart des ondes internes ont lieu au large, en eau libre. Là, les différences de densité sont principalement dues à des différences de températures de l'eau. La couche supérieure est plus légère parce qu'elle est plus chaude. Le Soleil réchauffe les eaux de surface océanique. Ce réchauffement se propage lentement en profondeur. En fait, ce sont les ondes de surface qui mélangent l'eau mais à une profondeur limitée, si bien qu'il se forme une couche supérieure, plus chaude, de température homogène. L'interface entre les deux couches, correspondant à une variation brutale de la température, est appelée thermocline (l'interface entre des eaux douces et salées est appelée halocline). C'est le long de la thermocline que les ondes internes de l'océan se propagent. Lorsque la densité de l'eau augmente avec la profondeur (en raison de la décroissance de température ou de l'augmentation de salinité), l'eau est dite « stratifiée ». Là où l'eau est stratifiée, les ondes internes sont possibles.

Parce que la différence de densité entre les couches supérieure chaude et inférieure froide de l'océan est plus faible que celle entre les couches d'eau douce et d'eau salée, et parce que l'épaisseur de ces couches est importante, les hauteurs des ondes internes océaniques peuvent être plus importantes que celles des fjords et des rivières. Les ondes internes ont souvent une hauteur de 160 pieds, mais ont été mesurées à des hauteurs de 600 pieds. Ces ondes internes produisent aussi des courants qui peuvent atteindre des vitesses de 6 nœuds. Les ondes internes les plus importantes tendent à apparaître là où la thermocline est profonde et où les mécanismes de génération sont assez énergétiques (endroits comme le détroit de Gibraltar, où la vitesse des courants augmente du fait de l'étroitesse du passage).

Lorsque les deux couches de fluides sont proches en densité, une faible perturbation suffit pour déplacer l'eau verticalement et pour générer une onde interne. Comme nous l'avons vu, cette perturbation peut être un déplacement de navire, mais elle peut être aussi un changement de la force du vent ou de la pression à la surface de l'océan. Quand une eau stratifiée coule sur

un obstacle au fond d'une rivière (ou sur une dorsale océanique ou sur n'importe quel relief sous-marin), les particules de fluide sont déplacées vers le haut, puis vers le bas du fait de la gravité, amorçant une oscillation. La période des ondes internes qui en résultent peut varier de quelques minutes à plusieurs jours. Les ondes internes de marée, avec une thermocline ou une halocline se déplaçant de haut en bas à la fréquence de la marée, sont probablement les variétés les plus courantes. Un tremblement de terre peut aussi produire un tsunami interne en même temps que le tsunami de surface, beaucoup plus violent et destructeur. Nous avons seulement parlé des ondes internes circulant horizontalement le long de l'interface entre deux couches d'eau, telle que la thermocline. Mais, la température de l'eau peut diminuer progressivement avec la profondeur, de manière continue. Dans ce cas, il n'y a pas de thermocline et les ondes internes peuvent se réfléchir sur le fond ou sur une couche de densité différente. Les ondes internes constituent donc un mécanisme important de transport d'énergie de la surface vers le fond de l'océan.



un obstacle au fond d'une rivière (ou sur une dorsale océanique ou sur n'importe quel relief sous-marin), les particules de fluide sont déplacées vers le haut, puis vers le bas du fait de la gravité, amorçant une oscillation. La période des ondes internes qui en résultent peut varier de quelques minutes à plusieurs jours. Les ondes internes de marée, avec une thermocline ou une halocline se déplaçant de haut en bas à la fréquence de la marée, sont probablement les variétés les plus courantes. Un tremblement de terre peut aussi produire un tsunami interne en même temps que le tsunami de surface, beaucoup plus violent et destructeur.

Nous avons seulement parlé des ondes internes circulant horizontalement le long de l'interface entre deux couches d'eau, telle que la thermocline. Mais, la température de l'eau peut diminuer progressivement avec la profondeur, de manière continue. Dans ce cas, il n'y a pas de thermocline et les ondes internes peuvent se réfléchir sur le fond ou sur une couche de densité différente. Les ondes internes constituent donc un mécanisme important de transport d'énergie de la surface vers le fond de l'océan.

Les ondes solitaires

Des perturbations soudaines peuvent générer des ondes internes « solitaires ». Une onde interne solitaire (aussi appelée « soliton ») est une simple crête ou creux qui se déplace le long de la thermocline. Certaines ondes peuvent parcourir des centaines de milles marins. Des perturbations générées le long d'une cassure du plateau continental ou dans un

détroit peuvent produire des paquets de solitons, lesquels voyagent toujours avec le plus grand soliton en tête du paquet. Lorsque de forts courants de marée font osciller de l'eau stratifiée sur le relief du plateau continental ou à travers un détroit, ils génèrent de longues ondes internes de marée. Celles-ci deviennent instables en remontant la pente du plateau continental, exactement comme une vague déferlant sur une plage. Cette cassure de l'onde interne de marée génère des paquets de solitons, avec souvent des hauteurs importantes et des courants intenses.

Par exemple, des paquets de solitons internes ont été observés dans des zones pétrolières de la mer de Chine. Ils avaient été générés 350 milles à l'est et 2 à 4 jours plus tôt, par un forçage de marée sur le fond peu profond dans le détroit de Luzon (à mi-chemin entre Taiwan et les Philippines). Ces ondes ont voyagé à des vitesses de 4 à 8 nœuds et ont été réfractées autour d'une île créant un ensemble d'interférences de fronts d'onde. Les paquets de solitons sont très fréquents dans cette zone et observables toute l'année. Certains mois, ces paquets arrivent toutes les douze heures. Ces ondes peuvent être hautes de 65 pieds et accompagnées par des courants de l'ordre de 3 nœuds, voire davantage.

Manifestations en surface

Bien que les ondes internes ne soient pas directement visibles, elles ont un effet sur la surface de l'océan nettement observable. La figure 3 illustre l'exemple d'une circulation produite par propagation des ondes internes. Quand l'interface s'enfonce, l'eau de la couche supérieure descend vers le creux de l'onde interne

provoquant un « vide » en surface, immédiatement comblé par l'eau avoisinante. En surface, il y a donc convergence à l'aplomb des creux de l'onde interne. Inversement, au-dessus des crêtes de l'onde interne, il y a divergence. Ceci a pour conséquence que les débris flottant à la surface se rassemblent au-dessus des creux. Ces débris amortissent les petites vaguelettes rendant la surface lisse comme un miroir. Ainsi, en surface, de longues bandes parallèles d'eau calme alternent avec de longues bandes d'eau plus agitée.

De tels exemples de circulation ont été observés par Nansen et par d'autres pendant des incidents d'eau morte. Le commentaire de Nansen « *nous entraînon*s toute la mer avec nous » est une description caractéristique d'eau morte et désigne une zone calme (au-dessus du creux invisible de l'onde interne juste au-dessous de l'arrière du navire) qui se déplace avec le navire. Son commentaire « *au moment où les machines stoppent, le navire semble aspiré par l'arrière* » correspond au déplacement de la bande calme (et des autres bandes qui lui succèdent) en liaison avec le déplacement de l'onde interne au-dessous. Au large, les ondes internes plus importantes génèrent des rangées parallèles de surface lisse et d'eau agitée atteignant 60 milles de long. La différence de rugosité de la surface s'observe sur les images satellite de type SAR (radar à synthèse d'ouverture) ou même sur une photographie ordinaire si le soleil est dans un bon angle. Quant aux solitons internes, ils sont précédés par une très longue bande d'eau agitée (dite « *ridée* ») et suivis par une bande d'eau calme de longueur équivalente.

Un danger pour l'activité offshore et les sous-marins

L'intérêt suscité aujourd'hui par les ondes internes n'est pas dû aux phénomènes d'eau morte, mais aux dégâts qu'elles peuvent causer, spécialement dans le cas d'opérations de forage pétrolier. Des ondes de grandes hauteurs (plus particulièrement des paquets de solitons internes) et les courants intenses qui les accompagnent peuvent créer d'énormes moments de torsion aux structures offshore ; on a observé des plates-formes pétrolières déplacées horizontalement sur des centaines de pieds et verticalement sur des dizaines de pieds. Les navires de forage sont particulièrement sensibles à ces effets. Conçus pour forer jusqu'à une profondeur de 7 000 pieds, ils utilisent des

Ondes internes atmosphériques

Les ondes internes se produisent aussi dans l'atmosphère, circulant à l'interface entre une couche d'air chaud et une couche d'air froid. Elles peuvent engendrer des nuages particuliers, les nuages d'onde, organisés en bandes parallèles le long des crêtes. On les rencontre souvent sous le vent des montagnes : ce sont les ondes de sillage que les pilotes de vol à voile utilisent pour prendre de l'altitude.

systèmes de positionnement dynamique pour maintenir une position constante pendant le forage. Des études dans la mer d'Andaman à l'ouest de la Birmanie ont montré des accroissements dans les tensions de la ligne de forage correspondant à des paquets de solitons de 200 pieds observés indépendamment. Les ondes internes sont capables de causer la rupture d'éléments verticaux tels que des « *risers* » et des « *tethers* ». C'est pourquoi des modèles de prévision de soliton interne ont été développés.

Les ondes internes ont également été citées comme une cause possible de la disparition de sous-marins. L'événement le plus célèbre est sans doute la disparition de l'*USS Thresher* le 10 avril 1963, dans le golfe du Maine. La cause de la tragédie, présentée comme la plus probable par l'US Navy, est une défaillance du système d'arrivée d'eau de mer dans la salle des machines provoquant un court-circuit et une panne de propulsion. Arrivé à un point, le sous-marin plongea au-dessous de sa profondeur critique et coula au fond. Cependant, deux jours plus tôt, une importante tempête avait traversé le golfe du Maine, créant un tourbillon de subsurface et (ce fut une hypothèse) une onde interne de 300 pieds de haut. Un sous-marin naviguant à travers une onde interne pourrait très rapidement passer d'une eau dense à une eau moins dense et, devenant subitement plus lourd, commencer à couler. Sans une vidange rapide des ballasts et assez de puissance pour le propulser vers la surface, le sous-marin continuerait à piquer vers le fond.

On ne saura jamais si une onde interne a joué un rôle dans la tragédie du *Thresher*. En revanche, l'effet des ondes internes sur la transmission du son dans l'eau est mieux connu. Les sous-marins jouent sur leur profondeur pour rester dans une couche de densité qui les rend indétectables par les sonars des bâtiments de surface.

Plancton, marsouins et rémoras géants

Les ondes internes ont d'autres effets encore mal connus. On a remarqué que la colonne d'eau au-dessus du creux de l'onde, donc sous une zone de convergence en surface, était riche en plancton. Des marsouins ont été observés mangeant dans cette zone calme. On a également observé des marsouins surfant sur des ondes internes, comme sur une vague de surface. Ils apprennent à progresser ainsi, inclinés sur la face de l'onde.

Dans son rapport décrivant ses expériences et son traitement mathématiques des ondes internes, Eckman cite diverses anecdotes. Depuis l'Antiquité, diverses explications ont été avancées par les marins pour expliquer cette force mystérieuse qui retient les navires. Certains navigateurs invoquaient les dieux ou autres forces surnaturelles, d'autres parlaient de roches magnétiques ou de mollusques accrochés à la coque qui soudainement grossissaient. Ils ont aussi imaginé un énorme rémora (un rémora de taille normale s'accroche aux requins ou à d'autres poissons) accroché à la coque du navire et capable de le retenir sur place, même par vent fort. La zone lisse qui suit le navire faisait croire aux marins que quelque chose collait l'eau au navire, celui-ci entraînant l'ensemble d'où la vitesse fortement réduite.

Pendant des années, les marins ont essayé les moyens les plus divers pour s'échapper de l'eau morte : naviguer en zigzags, faire courir tout l'équipage de l'avant à l'arrière du pont, écopier la mer, filer de l'huile à l'avant du navire, manœuvrer le gouvernail rapidement, tirer des coups de feu dans l'eau ou la frapper avec des rames. Remorquer le navire a généralement plus de succès, le remorqueur ayant généralement un tirant d'eau plus faible. Le plus efficace consiste à réduire autant que possible la longueur de la remorque, ce qui permet à l'hélice du remorqueur de brasser l'eau autour du navire remorqué, détruisant l'interface sur laquelle circule l'onde interne.

Une eau morte qui changea le cours de l'histoire

De toutes les histoires collectées par Ekman, ayant un rapport avec les ondes internes, la plus célèbre est la bataille navale d'Actium, le 2 septembre 31 avant J.-C., au cours de laquelle les flottes de Marc Antoine et de Cléopâtre furent

battues par celle d'Octave. Ekman cite Pline le Naturaliste qui explique que, pendant cette bataille navale, un rémora s'accrocha au navire d'Antoine et le retint si fort qu'il fut obligé d'embarquer sur un autre navire. Bien sûr, on ne le saura jamais, mais l'hypothèse d'Ekman attribuant à une onde interne cette immobilisation du navire est envisageable. La bataille d'Actium se passait en mer Adriatique, le long de la côte Dalmate (près de la Croatie d'aujourd'hui), une région qui reçoit de grandes quantités d'eau douce de rivière. La flotte d'Antoine fut complètement bloquée près du rivage par la flotte d'Octave. Octave avait des navires de faible tirant d'eau, tandis que ceux d'Antoine étaient de lourds vaisseaux de guerre romains, profonds, équipés de catapultes. Des historiens rapportent que les navires d'Octave, plus légers, étaient plus manœuvrables. Mais peut-être ce jour-là y avait-il une couche d'eau saumâtre à la surface, auquel cas les vaisseaux plus lourds et plus profonds d'Antoine auraient été plus facilement capturés par les eaux mortes, justifiant l'explication de Pline le Naturaliste. La bataille s'acheva finalement quand Cléopâtre prit la fuite avec ses 60 navires et qu'Antoine abandonna ses légions et décampa à sa suite. Il est possible que les ondes internes jouèrent un rôle dans cette bataille navale qui changea l'histoire et fit d'Octave le premier empereur de Rome, sous le nom d'Auguste.