CHRONOSCIENCES

Mike Goldsmith

Les ondes

edp sciences

Mike Goldsmith

Les ondes

On ne les voit pas forcément, pourtant nous sommes entourés d'ondes. La Terre tremble jusqu'à ses fondations ; les mers et les océans s'agitent sans cesse ; les sons se propagent à travers la terre, les mers et l'air ; notre corps est traversé d'ondes ; l'Univers est rempli d'un vaste spectre de radiations électromagnétiques, dont la lumière visible n'est qu'une infime partie. En cherchant encore plus loin, on trouve les ondes mécaniques, les phénomènes d'ondes quantiques et les ondes gravitationnelles, aujourd'hui clairement identifiées.

Ce livre présente les principaux types d'ondes, leurs sources, leurs effets, leurs utilisations et les recherches à leur sujet. Mike Goldsmith explique comment le mouvement des ondes donne lieu à toute une série de phénomènes : de la réflexion, la diffraction, l'interférence et la polarisation dans le cas des ondes lumineuses aux battements et échos pour le son. Toutes les ondes, aussi différentes soient-elles, partagent de nombreuses caractéristiques et malgré toute leur complexité, nombre de leurs comportements sont fondamentalement simples.

Mike Goldsmith est astrophysicien et acousticien. Il a travaillé sur la poussière interstellaire, les étoiles supergéantes et les substances trouvées dans d'autres galaxies, ainsi que sur la transmission du son et l'histoire du bruit. Depuis 1986, il a écrit plus de quarante livres scientifiques destinés aux enfants comme aux adultes.

ISBN : 978-2-7598-3050-3

9 782759 830503 >

edp sciences
www.edpsciences.org

CHRONOSCIENCES

Mike Goldsmith

Les ondes

Traduit de l'anglais par Alan Rodney

edp sciences

ChronoSciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir de façon très complète mais de manière abordable un sujet ou une thématique précise.

« Dans la même collection »

L'Intelligence artificielle, M. A. Boden, 2021
La Théorie quantique, J. Polkinghorne, 2021
Les Marées, D. G. Bowers et E. M. Roberts, 2021
L'Anthropocène, E. C. Ellis, 2021
L'Odorat, M. Cobb, 2021
Le Changement climatique, M. Maslin, 2022
Les Énergies renouvelables, N. Jelley, 2022
L'écologie, J. Ghazoul, 2022
Le temps, Jenann Ismael, 2022
La physique, Sidney Perkowitz, 2022
La théorie des nombres, Robin Wilson, 2023

Waves: A Very Short Introduction was originally published in English in 2018. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.
© Mike Goldsmith 2018.
© Pour la traduction française, EDP sciences, 2023.

Composition et mise en page : Desk (www.desk53.com.fr)

Imprimé en France

Papier : 978-2-7598-3050-3
E-book : 978-2-7598-3051-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Table des matières

1. L'essentiel des ondes 7
2. Les vagues 40
3. Les ondes sonores 55
4. Les ondes sismiques 67
5. Les ondes biologiques 78
6. Les ondes électromagnétiques 88
7. Les ondes quantiques 125
8. Les ondes gravitationnelles 145
Lectures supplémentaires 157
Index 161

1

L'essentiel des ondes

En février 2016, les médias internationaux ont annoncé la découverte d'ondes gravitationnelles, avec des titres tels que « LIGO entend des ondes gravitationnelles », « Les ondes gravitationnelles d'Einstein « vues » depuis les trous noirs », et « Les trous noirs entrent en collision et la gravité frémit ». Cette histoire était importante pour deux raisons. Les observations confirmaient une prédiction faite par Albert Einstein en 1916 et apportaient ainsi une preuve supplémentaire que sa théorie de la relativité générale était correcte. Ce n'est pas plus mal, car pour les scientifiques qui étudient l'Univers dans son ensemble, ou certains de ses habitants les plus exotiques comme les trous noirs, la relativité générale est presque le seul jeu disponible. La découverte est tout aussi importante pour l'astronomie d'observation : les ondes gravitationnelles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers lointain, ainsi que sur l'Univers ancien, et peuvent potentiellement nous montrer des choses que rien d'autre ne peut nous montrer. Mais nonobstant les gros titres, ces ondes ne peuvent pas vraiment être entendues ni vues ; leur grand avantage pour les futurs astronomes réside précisément dans le fait qu'elles constituent un type d'onde très différent de

celui du son ou de la lumière. Les ondes gravitationnelles sont traitées au chapitre 8.

Nos terres, nos mers et notre atmosphère sont toutes remplies d'ondes de types très différents, et au-delà de l'atmosphère, il y en a bien d'autres. On pourrait dire, en fait, qu'il n'y a rien dans l'Univers en dehors des ondes et de la matière – et on pourrait dire que la matière est également constituée d'ondes ; le chapitre 7 explore cette idée remarquable.

Le chapitre 2 expliquera ce qui fait la spécificité des vagues aquatiques, mais comme elles présentent également de nombreuses caractéristiques essentielles que toutes les vagues partagent, nous pouvons tout de suite nous y plonger.

VAGUES ET MÉDIAS

Imaginez que vous êtes debout au bord d'une falaise et que vous regardez une mer ensoleillée par un après-midi sans vent. Une succession régulière de vagues s'écoule rapidement vers le rivage. C'est du moins ce qu'il semble : si vous observez une balle de tennis flottant dans l'eau, vous constaterez que son mouvement principal est vertical, montant et descendant au passage de chaque vague. Il est donc clair que l'eau dans laquelle elle flotte ne suit pas le mouvement des vagues. Une observation plus attentive révèle que la balle se déplace latéralement ainsi que de haut en bas : vers le haut et l'avant lorsque la vague monte, vers le bas et l'arrière lorsqu'elle descend. Ce mouvement circulaire est celui des molécules d'eau elles-mêmes (*cf.* la Figure 1).

Cette différence entre le mouvement d'une vague de mer et celui des particules du milieu dans lequel elle se déplace est typique de toutes ces vagues : chaque particule effectue un mouvement répétitif et les particules voisines effectuent le

même mouvement, mais avec un léger décalage. Une « ola[1] », est également de ce type ; les seuls mouvements que chaque participant effectue sont verticaux, mais en commençant à se déplacer juste après son voisin, on crée une illusion de mouvement latéral, le même effet qui donne l'impression de mouvement avec des guirlandes de LED clignotantes. Pour fonctionner correctement, il doit y avoir le même intervalle entre chaque événement successif, et tous les événements doivent être exactement les mêmes.

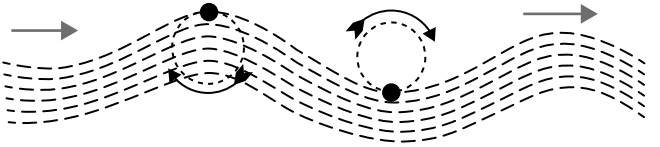


Fig. 1 Le mouvement des molécules d'eau dans une vague.

Tous les milieux ne peuvent pas servir de support aux mouvements des vagues. La plage sur laquelle les vagues déferlent peut être sculptée en forme de vague, mais, à moins d'un tremblement de terre, elle ne peut pas réellement bouger à la manière d'une vague. Pour qu'un milieu participe au mouvement des vagues, il doit d'abord résister au mouvement, puis se déplacer, et enfin résister à l'arrêt instantané. L'eau soutient les vagues parce qu'elle est naturellement plate, et toute tentative de l'entasser ou d'y faire un trou se heurte à une résistance. Si vous écopez de l'eau pour créer une dépression, celle-ci se remplira instantanément, mais – et cela est crucial pour la génération d'une vague – l'eau qui s'y engouffre dépassera quelque peu, de sorte qu'au lieu de revenir à la surface vierge d'origine, la brève dépression sera suivie d'un monticule tout aussi bref. L'échange entre la dépression et le monticule se poursuivra

1. NDT : en anglais, « vagues mexicaines ».

jusqu'à ce que la résistance de l'air et la friction entre les molécules d'eau fassent disparaître la perturbation. Jetez-vous sur un trampoline pour en faire l'expérience directe.

Ce processus explique pourquoi les vagues apparaissent rarement seules ; même si la source est un événement unique (comme une pierre tombant dans une piscine), le résultat est généralement une courte série (un train) de vagues.

La plupart des vagues peuvent être définies par quelques paramètres seulement ; si l'on considère à nouveau une balle flottant sur une mer couverte de vagues, on s'aperçoit rapidement qu'elle répète son mouvement cyclique à l'infini, en mettant toujours le même temps pour revenir à un point donné, par exemple du pic au creux et de nouveau au pic. Ce temps est appelé la *période* de l'onde. Il est souvent plus facile de mesurer la *fréquence* d'une onde que sa période. Si un cycle a une période d'un dixième de seconde, alors sa fréquence est de dix cycles par seconde, ou dix hertz (mathématiquement, la fréquence est l'inverse de la période).

La fréquence (en hertz) est également le nombre de pics d'ondes qui passent devant un point en une seconde. La distance entre les pics adjacents, ou les creux, est la *longueur d'onde*. La distance entre la position moyenne et le sommet ou le creux d'une vague est son *amplitude*. Pour les vagues en mer, on parle parfois de la hauteur, car elle est plus facile à estimer ; elle correspond à la distance entre le creux et la crête et est donc égale à deux fois l'amplitude.

Le concept de vitesse est légèrement plus compliqué : la vitesse à laquelle les molécules d'une vague d'eau se déplacent sur leur trajectoire est la vitesse des particules de la vague. Une chose plus simple à mesurer est la vitesse à laquelle les crêtes de la vague se déplacent vers le rivage ; c'est la *vitesse de phase*. Si le terme « vitesse » est mentionné sans qualificatif, c'est généralement la vitesse de phase qui est visée.

La vitesse de phase (v), la longueur d'onde (λ) et la fréquence (f) sont liées par l'équation simple $v = f\lambda$.

Le mot phase fait ici référence à la hauteur d'une onde en un point. Il devient intéressant de comparer les ondes. Par exemple, s'il existe deux ondes de même forme, amplitude et longueur, dans lesquelles les pics de l'une coïncident avec les creux de l'autre, on dit que les ondes sont en antiphase.

Un troisième type est la *vitesse de groupe*. Si vous jetez une pierre dans un étang, un train composé de plusieurs ondulations concentriques se crée. Alors que le train ne se déplace que lentement vers l'extérieur, des ondulations individuelles se forment sur le bord intérieur, se déplacent rapidement vers l'extérieur à travers l'anneau et s'estompent à son extrémité.

La vitesse des ondulations est la vitesse de phase telle que définie par l'équation $v = f\lambda$, tandis que la vitesse du train est la vitesse de groupe. Habituellement, comme dans cet exemple, la vitesse de groupe est inférieure à la vitesse de phase.

DIFFUSION ET DÉCLIN

Dans presque toutes les ondes, l'amplitude diminue régulièrement avec la distance de la source. Cette atténuation a deux causes.

L'effet d'atténuation dominant est généralement l'étalement géométrique d'une onde. Lorsqu'un feu d'artifice explose en l'air, les ondes sonores et lumineuses se propagent dans toutes les directions. Les ondes lumineuses se déplacent à des millions de mètres par seconde, les ondes sonores à des centaines de mètres par seconde, de sorte que la sphère sonore en expansion est en retard sur la sphère lumineuse et que nous entendons la détonation après l'avoir vue.

Plus on est éloigné du feu d'artifice, plus la détonation est silencieuse et plus l'éclair est faible, car les énergies lumineuses et sonores de l'explosion doivent se répartir sur des surfaces sphériques de plus en plus grandes (*cf.* la Figure 2).

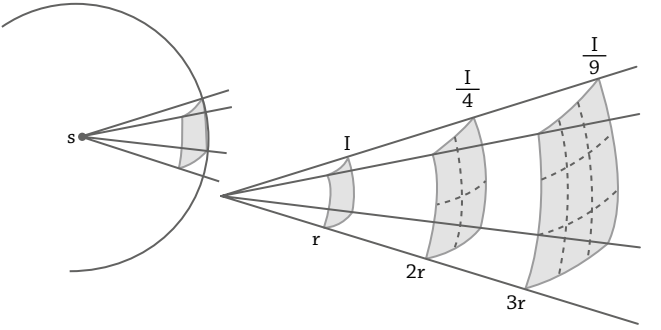


Fig. 2 Propagation sphérique. Lorsque l'énergie provenant d'une source (S) s'étend librement dans toutes les directions, elle se propage sur des surfaces de plus en plus grandes. Ces zones augmentent en fonction du carré de la distance (r) de la source, de sorte que l'intensité (I) diminue en proportion inverse de ces zones $\left(I \propto 1/r^2\right)$.

Nos rétines et nos tympans sont des surfaces de collecte d'énergie et moins il y a d'énergie répartie sur ces surfaces, plus nos sensations sont faibles ou silencieuses. Dans le cas de l'explosion, une certaine quantité d'énergie a été répartie uniformément sur une enveloppe sphérique de l'espace, et le rayon de cette enveloppe augmente à la vitesse du son (environ 330 mètres par seconde (m/s)). Ainsi, une seconde après l'apparition de la foudre, cette enveloppe aura un rayon (*r*) d'environ 330 mètres, ce qui signifie que l'énergie de l'explosion sera répartie sur une surface sphérique de $4\pi r^2$, soit environ 1,4 million de mètres carrés. Si l'on suppose que la surface des tympans humains est d'environ 1 cm^2, soit 0,0001 m^2, on constate que nous pouvons entendre au mieux

une fraction 0,0001/1,4 million = $7{,}3 \times 10^{-11}$ (très approximativement un « billionième », 10^{-12}) de ce son.

Une seconde plus tard, le rayon de la sphère a doublé et sa surface a été multipliée par 4. À cette distance, nous entendrons environ un quart de billionième du son original. Trois secondes après l'événement, le niveau sonore est tombé à un seizième de billionième, et ainsi de suite. Nous pouvons donc constater qu'à mesure que la distance augmente linéairement, l'intensité sonore diminue au carré (*loi de l'inverse du carré*).

Cela peut sembler étrange. Un éclair à un kilomètre de distance ne semble pas énormément plus fort ou plus lumineux qu'un éclair à deux kilomètres. L'explication est que nos systèmes sensoriels ont évolué de telle sorte qu'une forte augmentation de l'énergie d'un stimulus n'entraîne pas une augmentation proportionnelle de la sensation qu'il provoque. Un son dont la puissance double n'est perçu que comme ayant augmenté d'environ 10 %, et il en va de même (grossièrement) pour la lumière ; des lois similaires s'appliquent aux odeurs, aux goûts et à d'autres sensations. Ce merveilleux système nous permet de détecter une vaste gamme de niveaux de lumière et de son sans être éblouis ou assourdis. Mais l'œil et l'oreille sont de très mauvais instruments pour mesurer les niveaux d'énergie absolus des lumières ou des sons (ce qui n'est pas surprenant, puisque de telles mesures n'ont aucune valeur de survie, sauf peut-être pour les physiciens).

J'ai été vague jusqu'à présent en utilisant le mot « son », un terme qui peut désigner des choses très différentes. Un microphone mesure le *niveau de pression acoustique* du champ énergétique, qui est lié d'une manière vague et compliquée à *la sonie,* ou *volume sonore*, qui est la sensation que le champ énergétique déclenche en nous. Tout cela sera expliqué au chapitre 3.

En réalité, la propagation sphérique est rare, d'abord parce que peu de sources émettent leur lumière ou leur son dans toutes les directions (les torches et les voix sont fortement directionnelles, comme en témoigne la difficulté d'entendre ce que dit quelqu'un qui a le dos tourné, surtout en plein air, lorsqu'il n'y a pas de surfaces réfléchissantes devant lui). Deuxièmement, en raison de la réflexion de la surface de la Terre, l'énergie se propage à partir de sources extérieures à travers des hémisphères, et non des sphères, et les niveaux de luminosité ou de son diminuent donc environ deux fois moins vite que dans le cas sphérique (*très* approximativement ; en pratique, la plupart des surfaces absorbent assez bien le son et la lumière, ce qui augmente le taux de chute).

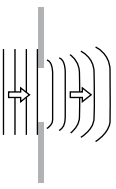
La propagation hémisphérique est également caractéristique des ondes sonores sous-marines en eau profonde, car elles sont fortement réfléchies par la surface de la mer. Lorsque l'eau est peu profonde, les ondes sonores sont limitées à la fois au-dessus et au-dessous, et elles ne peuvent donc se propager qu'en cercle. Dans ce cas, par un argument similaire à celui des enveloppes sphériques, le taux de chute de l'énergie est proportionnel à la seule distance parcourue, et non à son carré. En outre, la présence de valeurs de température quasi-constantes à différentes profondeurs océaniques signifie que ce type d'effet sandwich se produit dans l'eau elle-même, et pas seulement entre la surface de l'eau et le fond marin.

Dans un tube, un couloir ou une fibre, les ondes sont encore plus limitées et ne peuvent se déplacer que dans une ou deux directions. Dans ces cas, le son n'est pas du tout atténué géométriquement ; il ne disparaît que par absorption par le milieu qu'il traverse et par interaction avec les parois. L'absorption est un sujet complexe sur lequel nous reviendrons pour différents types d'ondes dans les chapitres suivants.

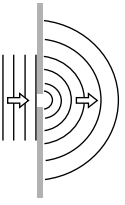
DIFFRACTION ET INTERFÉRENCE

La plupart des complexités attribuées aux ondes proviennent de leurs interactions avec les objets, et l'une des plus familières est leur tendance à contourner les coins, ce qui est la raison principale pour laquelle nous pouvons entendre des choses qui sont hors de notre ligne de vue. Cet effet, appelé *diffraction*, affecte la plupart des ondes. En présence d'un obstacle, tel qu'un banc de sable, notre observateur au sommet de la falaise verrait les vagues se propager autour de ses bords, dans la zone calme située au-delà (*cf.* la Figure 3).





Diffraction faible lorsque la longueur de l'ouverture est supérieure à la longueur d'onde



Diffraction plus importante lorsque la longueur de l'ouverture est inférieure à la longueur d'onde

Fig. 3 Diffraction d'ondes.

Les vagues peuvent interagir entre elles ainsi qu'avec les obstacles ; si les crêtes de deux vagues se rencontrent, le résultat sera un pic plus élevé (*interférence constructive*),

tandis que si une crête rencontre un creux, il y aura un effet d'annulation (*interférence destructive*). Là encore, ces figures d'interférence peuvent être observées sur la mer, et sont plus évidentes lorsque les vagues se rencontrent à angle droit. On parle alors de mer croisée ou d'ondes carrées. (*cf*. la Figure 4).



Fig. 4 Mer croisée à l'île de Ré.

Dans une *configuration d'interférence* comme celle-ci, les pics et les creux accentués, ainsi que les zones plates, n'existent que lorsque leurs ondes parentes se croisent ; lorsque les ondes se rencontrent et se mélangent, elles ne forment donc pas de nouvelles ondes permanentes, mais conservent leur identité d'origine. C'est ce qu'on appelle le *principe de superposition* et il est d'une grande importance pratique : il explique pourquoi, lorsque nous entendons des mots ou de la musique, nous pouvons encore entendre les notes, les mots et les instruments individuels, même si les ondes sonores qui les composent se trouvent au même endroit (c'est-à-dire à nos tympans) au même moment. C'est