

CHRONO SCIENCES

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.

 **edp sciences**  
[www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)

ISBN : 978-2-7598-3050-3



9 782759 830503 >

**CHRONO****SCIENCES**

**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](http://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 1<sup>er</sup> 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

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



# 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<sup>1</sup> », 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.

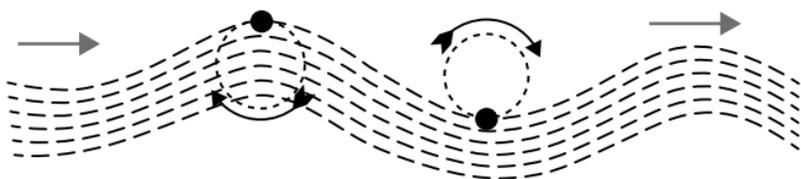


Fig. 1 ▶ Le mouvement des molécules d'eau dans une vague.

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 écopiez 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 ( $\lambda$ ) 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.

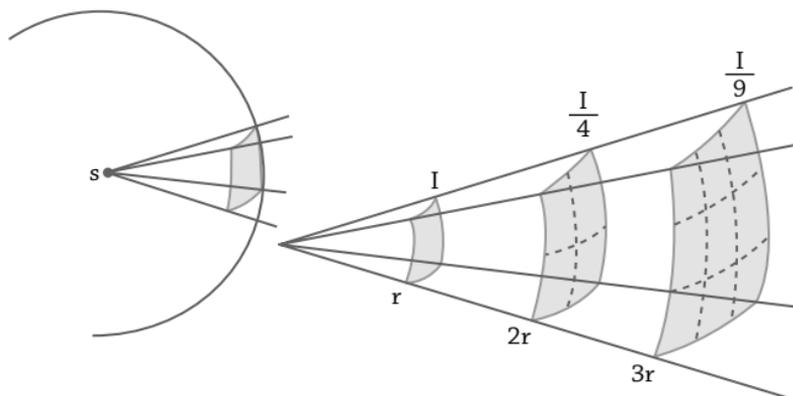
La vitesse des ondulations est la vitesse de phase telle que définie par l'équation  $v = f\lambda$ , tandis que la vitesse du train est la vitesse de groupe. Habituellement, comme dans cet exemple, la vitesse de groupe est inférieure à la vitesse de phase.

## 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 ( $I \propto 1/r^2$ ).

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  $1 \text{ cm}^2$ , soit  $0,0001 \text{ m}^2$ , on constate que nous pouvons entendre au mieux

une fraction  $0,0001/1,4 \text{ million} = 7,3 \times 10^{-11}$  (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 entendons 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.

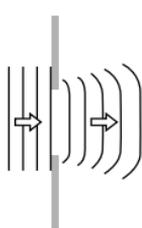
En réalité, la propagation sphérique est rare, d'abord parce que peu de sources émettent leur lumière ou leur son dans toutes les directions (les torches et les voix sont fortement directionnelles, comme en témoigne la difficulté d'entendre ce que dit quelqu'un qui a le dos tourné, surtout en plein air, 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.

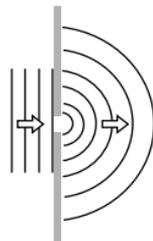
Dans un tube, un couloir ou une fibre, les ondes sont encore plus limitées et ne peuvent se déplacer que dans une ou deux directions. Dans ces cas, le son n'est pas du tout atténué géométriquement ; il ne disparaît que par absorption par le milieu qu'il traverse et par interaction avec les parois. L'absorption 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 tympanes) au même moment. C'est

très différent de ce qui se passe pour les couleurs, du moins en termes de perception : rien n'indique dans la lumière blanche qu'elle contient toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

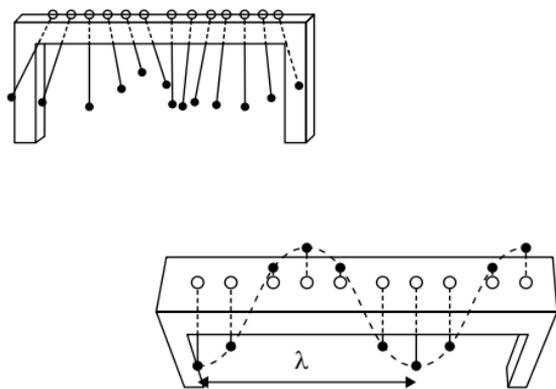
## LES ONDES LONGITUDINALES

Toutes les ondes ne sont pas composées de particules se déplaçant en cercles approximatifs, comme les vagues. Dans les *ondes longitudinales*, les particules du milieu se déplacent vers l'avant et l'arrière dans la même direction que l'onde elle-même. Dans les *ondes transversales*, le milieu se déplace dans une direction perpendiculaire à celle de l'onde. Dans certaines ondes transversales, le milieu se déplace de haut en bas, dans d'autres, il se déplace d'un côté à l'autre, ou en diagonale (du point de vue d'une personne regardant dans la même direction que l'onde). Cette direction d'oscillation est appelée la polarisation de l'onde ; une onde transversale dans laquelle le milieu se déplace de haut en bas est dite polarisée verticalement.

L'exemple le plus familier d'une onde longitudinale est un son, mais pour se faire une idée plus précise du fonctionnement des ondes longitudinales, le plus simple est d'imaginer une longue rangée de pendules, chacun étant relié à ses voisins par un ressort. Si un pendule est mis en oscillation, il transmettra son mouvement à ses voisins. Si les ressorts sont peu rigides (comme les sections d'un « slinky »), il faudra un temps non négligeable pour que le mouvement d'un pendule soit transféré à son voisin, car le ressort mettra un certain temps à se détendre avant que son extrémité ne commence à bouger. Avec un ressort très rigide, l'extrémité la plus éloignée commencera à bouger presque aussi vite que l'extrémité la plus proche, de sorte que le passage du mouvement d'un pendule à l'autre est très rapide (si les ressorts étaient complètement rigides, le déplacement d'un pendule ferait bouger tous les autres pratiquement instantanément).

Ces exemples montrent que la vitesse d'une onde augmente avec la rigidité du milieu : c'est pourquoi les ondes sonores se déplacent beaucoup plus vite dans les métaux que dans les liquides. Dans le caoutchouc mou, qui n'est pas du tout rigide, la vitesse du son peut être aussi faible que 40 m/s, soit environ celle d'une voiture rapide.

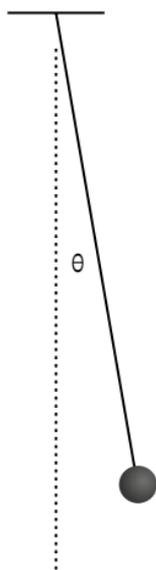
Avec notre séquence de pendules, nous pouvons définir la longueur d'onde comme la distance entre les pendules qui sont dans le même état de mouvement. Nous pouvons choisir que cet état soit au maximum à gauche, ou à la verticale, ou au maximum à droite, ou ce que nous voulons ; dans la figure 5, deux pendules au point le plus éloigné de leur balancement vers l'observateur ont été sélectionnés. L'amplitude de l'onde est la distance la plus grande que le pendule parcourt depuis sa position de repos (verticale) (cf. la Figure 6).



**Fig. 5** ▶ Série de pendules oscillants vus sous deux angles. La longueur d'onde ( $\lambda$ ) est la distance entre deux pendules dans le même état de mouvement.

Une particule (molécule, atome ou ion) dans un solide se comporte un peu comme un pendule : elle peut se déplacer, mais elle ne peut pas se replacer. Ainsi, si elle est frappée, elle sera simplement secouée sur le côté et reviendra en arrière,

dépassant son point d'équilibre et retombant, et ainsi de suite. Dans un liquide ou un gaz, bien que les molécules ne soient pas liées de manière permanente à leurs voisines, l'effet est presque similaire : de même qu'un plongeur de haut niveau qui tombe à plat ventre dans une piscine notera avec détresse que l'eau met du temps à laisser la place aux objets qui se déplacent rapidement, de même une molécule qui est poussée latéralement par une impulsion de pression voit sa progression stoppée net – au lieu de se déplacer loin, elle met ses voisines en mouvement très brièvement. Dans la plupart des cas, ce sont des groupes entiers de molécules qui sont mis en mouvement et nous pouvons donc dire que les ondes sont composées de régions de haute et de basse pression.



**Fig. 6** L'amplitude d'un pendule est l'angle maximal que fait la tige du pendule avec la verticale descendante.

Mais il existe une différence fondamentale entre les ondes dans les solides et les fluides. Dans un fluide, une fois qu'une

molécule a été secouée latéralement et a rebondi, elle dérive facilement dans n'importe quelle direction. Dans un solide, une molécule poussée latéralement aura tendance à revenir à sa position initiale – elle a, en quelque sorte, une « mémoire » de cette position – ce qui signifie que les solides peuvent supporter des oscillations latérales (*transversales* ou de *cisaillement*), un fait de grande importance pour les sismologues (*cf.* le chapitre 4).

## LES ONDES TRANSVERSALES

On peut facilement créer des ondes transversales dans une corde tendue de quelques mètres de long. Si vous attachez une extrémité à un poteau et secouez rapidement l'autre extrémité de haut en bas, vous pouvez atteindre un état dans lequel le centre de la corde bouge beaucoup, tandis que votre extrémité a peu tendance à bouger. En augmentant la vitesse à laquelle vous secouez la corde, vous devriez être capable de créer un modèle différent, dans lequel le centre de la corde bouge à peine, mais les deux points situés au quart et aux trois quarts de la corde bougent beaucoup. Les points qui bougent beaucoup sont généralement appelés des *ventres de vibration*, tandis que les points presque immobiles (y compris l'extrémité que vous tenez et l'extrémité fixe) sont des *nœuds de vibration*. Avec suffisamment d'effort et d'habileté, vous pouvez être en mesure de former trois *ventres de vibration* (*cf.* la Figure 7). Puisque les ventres de vibration sont à des positions fixes, ce que vous avez créé s'appelle des *ondes stationnaires*. Leur vitesse de phase est nulle.

De ces trois exemples, le deuxième, avec les deux ventres de vibration, est une onde complète, dont la longueur est celle de la corde. Dans le premier cas, la corde ne contient que la moitié d'une onde et dans le troisième, une et demie. Les ondes stationnaires sont importantes dans de nombreux

Ondes sismiques 67, 71, 74  
 Ondes sonores 11, 14, 21, 28  
 Ondes stationnaires 20, 60, 75  
 Ondes thêta 79  
 Ondes transitoires 60  
 Ondes transversales 17, 20, 69,  
 71, 84  
 Orgue 23  
 Oscillation de la surface libre 50  
 Osselets 58  
 Ozone 118

## P

Partiel (acoustique) 21  
 Pattes de chat 43  
 Pendule 17, 18, 19, 31-33, 68, 85  
 Période 10, 40, 85  
 Péristaltisme 83  
 Phase 11, 34, 61, 90  
 Phosphorescence 119  
 Photons 38, 39, 90, 92, 94, 96, 118,  
 121, 123, 140, 141, 151  
 Piano 29  
 Pieuvre 82  
 Piézoélectrique 64  
 Pinceau d'Haidinger 116  
 Planck, Max 89, 92, 125, 128, 137  
 Polarisation 17, 89, 90, 98, 111, 115-  
 117, 140, 141, 153, 155  
 Principe de superposition 16  
 Principe d'incertitude 131  
 Principe d'indétermination 132  
 Propagation ionosphérique 99  
 Prospection de pétrole et de gaz 72  
 Pulsar 150, 153

## R

Radar 42, 104, 105  
 Rafales de rayons gamma 124  
 Rayleigh, Lord (John Williams  
 Strutt) 70, 72, 73, 75, 114, 115  
 Rayonnement du corps noir 113  
 Rayonnements ionisants 118  
 Rayons gamma 37, 38, 110, 122,  
 123, 124  
 Rayons X 37, 65, 110, 119, 120, 121,  
 122, 124  
 Réflexion 14, 22, 24, 27-29, 91, 92,  
 104, 142  
 Réflexion interne totale 28, 29  
 Réfraction 22, 24, 28, 29  
 Relativité 95  
 Relativité générale 7, 145, 150  
 Résolution 104  
 Résonance 48, 49, 75, 80, 85, 101,  
 105  
 Résonance d'Helmholtz 48  
 Résonance portuaire 48  
 Rétroaction positive 45  
 Röntgen, Wilhelm 119  
 Roulis du sol 72  
 Rythme circadien 83

## S

Satellite 42, 51, 93, 140, 152  
 Scanographie 120  
 Seiche 50  
 Serpents 84  
 Sismomètre 69  
 Society for Psychical Research 56

Soleil 53, 76, 77, 94, 95, 109, 113, 114,  
116-120, 124, 126, 146, 151, 152  
Soliton 54  
Sonar 62, 63, 65  
Sonie 13  
Son pur 29, 30, 55, 59, 101  
Spectre électromagnétique 37, 38,  
55, 88, 109, 118  
Spectroscopie 114  
Spencer, Percy 105  
Surf beat 47  
Synapses 80

## T

Thalès 35, 67  
Théorie des cordes 143  
Théorie du tout 154  
Théorie quantique 137, 138, 140-  
142, 157  
Tourbillons 44  
Train de vagues 41  
Transition interdite 119  
Transmission 23  
Tremblement de terre 9, 50, 51, 67,  
68, 72, 73, 76  
Trous noirs 7, 146, 152-154  
Tsunami 50  
Turing, Alan 86

## U

Ultrasons 64, 65, 66  
Ultraviolets 37, 117-119  
Une vague sur neuf 41  
Une vague sur sept 41

## V

Vagues capillaires 42, 43, 45  
Ventres de vibration 20, 21, 105  
Verrouiller en phase 81  
Vers de terre 83  
Vibration forcée 75  
Vibration libre 75  
Vision thermique 108  
Vitesse de groupe 11, 41, 132, 133  
Vitesse de la lumière 29, 94, 97,  
98, 146  
Vitesse de phase 10  
Vitesse du son 12, 18, 28, 49, 63  
Volume sonore 13, 57

## Y

Young, Thomas 89

## Z

Zhang Heng 67