

**EXPÉRIENCES SIMPLES  
POUR COMPRENDRE UNE  
TERRE COMPLIQUÉE**

# **LA TERRE**

**ET SES ONDES**

**5**

Auteurs

Juan Martín Gómez González and Susana A. Alaniz Álvarez

Illustration

J. Jesús Silva Corona and Elisa López

Traducteurs

Thierry Calmus, Sandra Fuentes Vilchis y Paola Garcés

# Universidad Nacional Autónoma de México

**Enrique Luis Graue Wiechers**  
Recteur

**Leonardo Lomelí Vanegas**  
Secrétaire général

**William Henry Lee Alardín**  
Coordonnateur de la Recherche Scientifique

**Jorge Volpi Escalante**  
Coordonnateur de la Diffusion Culturelle

**Socorro Venegas Pérez**  
Directeur Général des Publications et du Développement Éditorial

**Lucía Capra Pedol**  
Directrice du Centro de Geociencias

**Susana A. Alaniz Álvarez**  
**Angel F. Nieto Samaniego**  
**Yadira H. Hernández Pérez**  
Coordonnateurs de la Série

**Thierry Calmus**  
**Sandra Fuentes Vilchis**  
**Paola Garcés**  
Traducteurs

**J. Jesús Silva C. et Elisa López Alaniz**  
Conception et formation

**María Teresa Orozco Ezquivel**  
Révisseuse technique

**Juan Carlos Mesino Hernández**  
Éditeur technique

Première édition: mai 2020  
D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México

Centro de Geociencias  
Universidad Nacional Autónoma de México  
No. 3001, Boulevard Juriquilla, Querétaro  
C.P. 76230, México

ISBN (Collection intégrale): 978-607-02-9195-1  
ISBN: 978-607-30-4634-3

Imprimé et fabriqué au Mexique

Ce livre ne peut être reproduit en tout ou en partie, par aucun moyen électronique ou autre, sans autorisation écrite des éditeurs.



**“EXPÉRIENCES SIMPLES  
POUR COMPRENDRE  
UNE TERRE  
COMPLIQUÉE”**

**5. La terre et ses ondes**



# Index

Introduction  
page 5

Les ondes dans la vie quotidienne  
page 6

Propriétés des ondes  
page 6

Ondes voyageant dans l'eau : vagues et tsunamis  
page 9

Ondes voyageant dans les solides : les séismes  
page 14

Ondes voyageant dans l'air : le son  
page 18

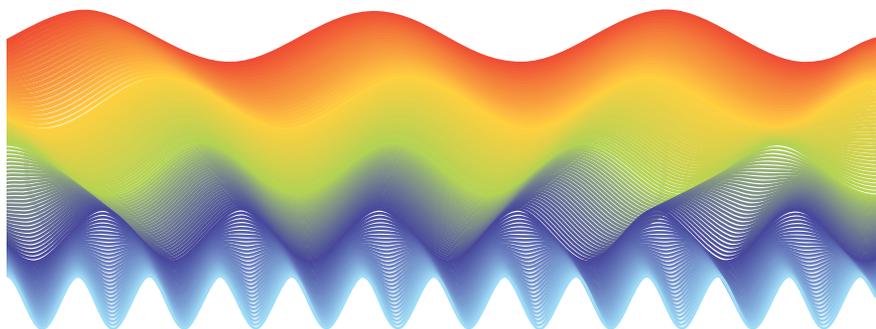
Ondes qui n'ont pas besoin d'un moyen de  
propagation : ondes électromagnétiques  
page 20

Quelques contributions de Thomas Young (1773-1829)  
page 30

Remerciements  
page 31

À propos des auteurs  
31

À propos des traducteurs  
32



## INTRODUCTION

Pour les premiers hommes qui ont habité sur Terre, de nombreux phénomènes de la nature leur ont provoqué surprise voire même la peur. Leurs explications étaient simples et parfois même fantaisistes. En améliorant leur connaissance du monde, ils ont également modifié leur façon de l'expliquer.

Au fil du temps, les connaissances se sont améliorées et les observations de la nature ont suivi ce que l'on appelle la méthode scientifique. Malgré la rigueur requise par cette méthode, cela ne signifie pas qu'on s'éloigne de l'élaboration d'hypothèses et de descriptions simples. Ainsi, une fois que le phénomène est compris, l'être humain cherche à le reproduire et, au fil du temps, à construire des modèles de plus en plus complets et élaborés. Un exemple en est l'avion, dont le premier concept, l'ornithoptère de Léonard De Vinci, était une sorte d'aéroplane qui battait mécaniquement des ailes. À l'époque, personne n'aurait imaginé que son idée évoluerait autant jusqu'à atteindre la forme actuelle des avions modernes.

Dans ce numéro, nous traitons de la superposition d'ondes sur laquelle est basée l'analyse des caractéristiques de la lumière. Ce concept a été fondamental pour savoir si la lumière avait un comportement corpusculaire ou ondulatoire. Aujourd'hui, on sait que la lumière présente ces deux comportements. C'est Thomas Young qui a démontré que la lumière se comporte comme des ondes, en se basant sur l'étude du phénomène d'interférence. Cette démonstration fait partie des dix plus belles expériences de physique. Ce livret cherche à montrer la similitude entre le comportement des ondes qui constituent la lumière et les ondes produites par d'autres phénomènes.

# LES ONDES DANS LA VIE QUOTIDIENNE

Autour de l'être humain, il existe de nombreux phénomènes impliquant des ondes, tels que ceux qui se produisent lorsque l'on joue d'un instrument de musique ou lors d'un tremblement de terre. En musique, lorsque les cordes d'un instrument vibrent, l'énergie appliquée lorsque l'on frappe ou que l'on pince les cordes se propage sous forme d'ondes voyageant dans des directions différentes.

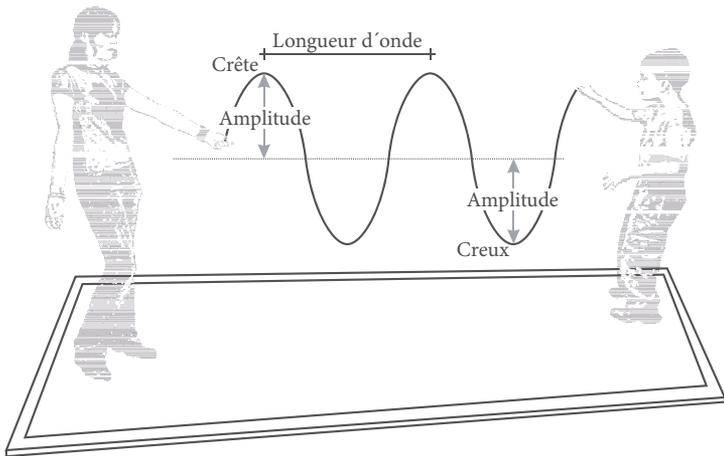
Quelque chose de similaire se produit avec les vibrations de la Terre causées par les tremblements de terre qui se propagent sur l'ensemble de la Terre. Également dans la vie de tous les jours, les ondes font partie de la radio, de la télévision, des téléphones domestiques et portables, des fours à micro-ondes, des appareils médicaux, etc. Dans chacun d'eux, il existe une source générant des ondes, qui sont une forme d'énergie qui se déplace dans toutes les directions et dont les effets peuvent être variés. Quelle que soit la manière dont les ondes ont été générées, elles conservent certaines similitudes dans leur comportement. Ces similitudes nous ont permis de comprendre, par exemple, le comportement de la lumière lors de l'observation des ondes dans l'eau.

Comme tu le sais, la lumière voyage à grande vitesse, ce qui empêche d'apprécier facilement son comportement. Tu as sûrement vu que les ondes se rencontrent et se superposent. Ce comportement est appelé interférence, à laquelle sont également liés des effets multicolores, tels que la lumière réfléchiée par le film des bulles de savon, le fin film d'huile flottant sur l'eau ou la surface d'un CD. Nous verrons ici certains de ces phénomènes et nous vérifierons l'effet de l'interférence dans les ondes grâce à plusieurs expériences.

## PROPRIÉTÉS DES ONDES

Du point de vue le plus simple, une onde est une perturbation qui se déplace avec le temps ; une onde implique un transport d'énergie. L'onde peut se reproduire plusieurs fois au même endroit pendant un certain temps (par exemple, le son d'une note de violon), ou bien elle peut se présenter de manière non répétitive (par exemple, le son d'une explosion ou le tremblement d'une corde).

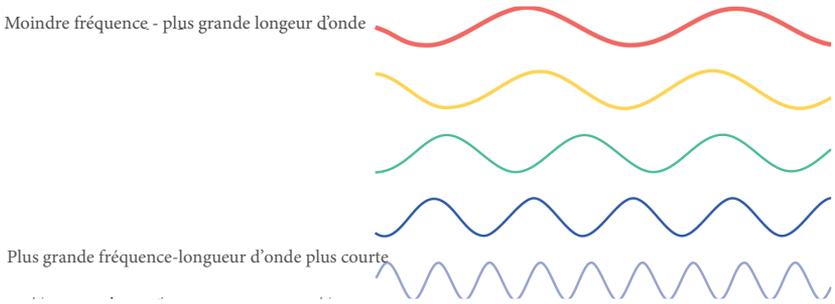
Si nous secouons une corde, nous la verrons comme une ligne qui monte et descend continuellement. Dans le cas de la lumière ou du son, la taille des ondes est plusieurs millions de fois inférieure à celle de la corde.



Avant de commencer les expériences, donnons le nom des parties les plus importantes des ondes. Le sommet de chaque vague s'appelle la crête et le point le plus bas s'appelle le creux ; la distance qui les sépare du point «zéro» de l'onde (position avant la perturbation) est appelée amplitude. La distance entre deux crêtes ou entre deux creux est appelée longueur d'onde. Si tu comptes les crêtes (ou les creux) d'une onde qui passe devant toi en une seconde, par exemple dans l'eau ou dans un oscilloscope, tu connaîtras sa fréquence.

Les différences dans les caractéristiques des ondes peuvent être facilement perçues dans le son et la lumière. Par exemple, en musique, une fréquence élevée est associée à un son aigu, telle que celle émise par un violon, alors qu'une fréquence basse est associée à un son grave, tel que celui émis par une contrebasse. Si l'amplitude est élevée, l'intensité du son (volume) l'est également. Dans le cas de la lumière, la fréquence ou la longueur d'onde est associée à la couleur, tandis que l'amplitude est liée à son intensité, c'est-à-dire au fait qu'elle soit plus ou moins lumineuse. On verra plus tard la relation entre la fréquence et la longueur d'onde.

La vitesse de l'onde ne change pas dans le milieu dans lequel elle se propage, mais lorsqu'elle change de milieu, il se produit quelque chose de semblable à ce qui t'arrive quand tu cours d'un endroit couvert de ciment à un autre avec du sable, puis dans l'eau : ta course sera de plus en plus lente. Par exemple, les ondes sonores se déplacent beaucoup plus rapidement dans les liquides et les solides que dans l'air, jusqu'à 5 fois plus rapidement dans l'eau et jusqu'à 10 fois plus rapidement dans l'acier.



D'autre part, lorsque la vitesse de l'onde est constante, si la fréquence est augmentée, la longueur d'onde diminue et inversement, si la longueur d'onde est augmentée, la fréquence diminue. Par conséquent, quand une ambulance s'approche de toi, tu entends la sirène très aiguë, car les ondes sonores diminuent leur longueur d'onde, augmentant leur fréquence, ce qui explique pourquoi le son devient plus aigu. Lorsque l'ambulance s'éloigne, les ondes en expansion augmentent leur longueur d'onde, diminuent leur fréquence et le son devient grave.



# ONDES VOYAGEANT DANS L'EAU : vagues et tsunamis

Tu auras sûrement remarqué que lorsqu'on jette des pierres dans un étang ou un lac, des cercles se développent à partir du même centre (concentriques) : ce sont des ondes qui se propagent. Dans l'expérience suivante, nous apprendrons un peu plus sur la formation de telles ondes et sur la forme qu'elles prennent. Fais attention au moment où deux ondes traversent un endroit en même temps, c'est ce qu'on appelle une interférence.

## Expérience 1

### Matériaux

- 1 récipient avec de l'eau.
- 2 pailles.

### Procédure

Nous allons d'abord utiliser une paille : place l'une de ses extrémités dans ta bouche et l'autre à la surface de l'eau ; maintenant souffle doucement dans la paille. Pour que l'exercice fonctionne mieux, la paille doit seulement effleurer la surface de l'eau.

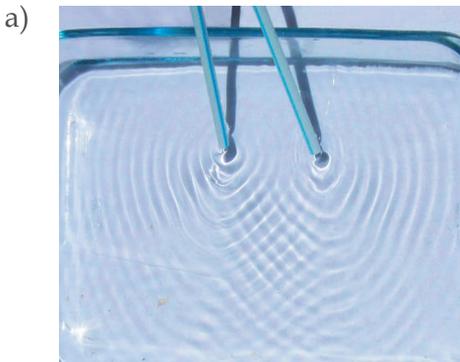
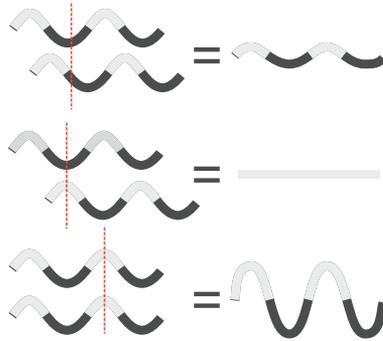
### Que s'est-il passé ?

En soufflant dans la paille, des ondes se forment qui traversent le récipient. La force du souffle modifie la forme et l'amplitude des ondes. Si tu places la paille perpendiculairement à la surface, les cercles seront concentriques.

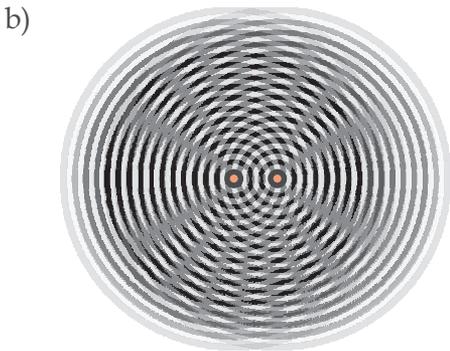
### Où est l'interférence ?

La forme circulaire des ondes dans l'eau est modifiée lorsqu'elles rebondissent sur le bord du récipient et reviennent (se réfléchissent) au centre de celui-ci. Ces ondes, lorsqu'elles rencontrent celles qui continuent de se former du bout de la paille, se chevauchent, puis il arrive que deux ondes traversent le même endroit en même temps ; à ce moment l'interférence se produit. Lorsque les crêtes

de deux ondes se rencontrent, leurs amplitudes s'additionnent, produisant une onde encore plus grande : alors, une interférence constructive se produit ; tandis que si une crête coïncide avec un creux, l'amplitude de l'onde résultante diminue : on parle alors d'interférence destructive.



a) Modèle d'interférence utilisant deux pailles.  
 b) Modification de l'amplitude due à des interférences constructives et destructives. Lorsque deux crêtes ou creux coïncident, l'interférence est constructive ; on voit des espèces de bandes lumineuses si les crêtes des deux ondes coïncident, ou bien des bandes plus sombres si les creux coïncident. Lorsqu'une vallée et une crête coïncident, l'interférence est destructive et on observe une espèce de zone sans onde (des lignes grises, perpendiculaires aux ondes dans le diagramme).



## Variation à deux pailles

Pour rendre l'interférence plus visible, nous allons modifier légèrement l'expérience. Maintenant, nous allons utiliser deux pailles.

### Procédure

Place un bout de chaque paille dans ta bouche et ouvre-les en forme de "V" ; place le bout de chaque paille sur la surface de l'eau. Maintenant souffle doucement dans les deux.

### Que s'est-il passé ?

De la pointe de chaque paille, deux ensembles de cercles concentriques se forment. Après quelques secondes, les cercles en croissance se chevaucheront et commenceront à interférer les uns avec les autres. Cet ensemble d'ondes, une fois combinées, forme à la surface de l'eau une figure connue sous le nom de "modèle d'interférence".



### Une autre modification

Tu peux choisir l'une des options suivantes pour modifier les interférences :

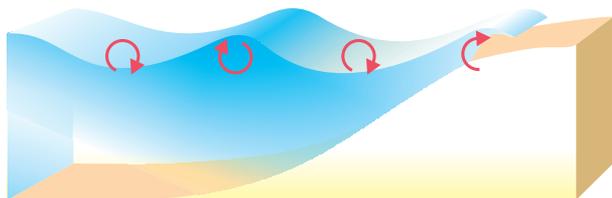
1. Varier la force du soufflement.
2. Changer la distance entre les bouts des pailles.

Dans les deux cas, tu verras comment le modèle d'interférence varie.

### Applique-le à ta vie

En mer, sont générées des ondes dont l'amplitude et la longueur d'onde dépendent de la force du vent, à la manière de ce qui s'est passé dans l'expérience. Le vent qui agite l'eau peut faire grossir les vagues de manière importante. Lorsqu'elles atteignent une certaine

hauteur, les vagues perdent leur équilibre et se «cassent» pour deux raisons : la première, lorsque leur hauteur augmente suffisamment pour que la crête ne puisse pas maintenir son propre poids (il a été calculé que la vague se casse lorsque l'amplitude est supérieure à  $1/7$  environ de la longueur d'onde) ; et la seconde, lorsque la vague frappe les côtes, la partie supérieure se déplacera plus vite que la partie inférieure et se brisera, comme on peut le voir sur la plage.



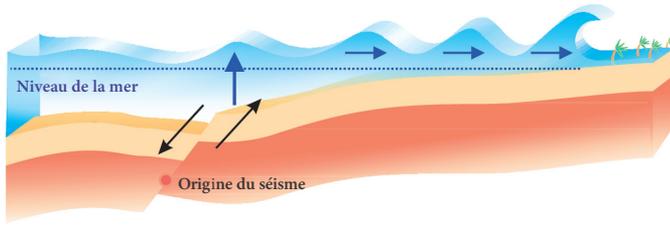
Mouvement des particules d'eau (indiqué par des flèches) dans la mer près de la côte.

Sur la plage, tu peux voir qu'il y a des vagues plus grosses que d'autres. Lorsque les crêtes (ou les creux) de deux vagues de caractéristiques similaires se rencontrent, leur amplitude augmente et tu dois faire attention quand elles s'approchent de toi. A d'autres moments, tu verras qu'il y a des vagues qui, au loin, semblent grosses mais qui, lorsqu'elles atteignent le rivage, ne sont pas si grandes. Dans ce cas, une interférence destructive s'est produite et les vagues se sont éliminées mutuellement.

### **Exemples dans la nature : tsunamis**

Les tsunamis (ou raz-de-marée) sont de très grosses vagues pouvant être générées par un tremblement de terre, une explosion volcanique, une avalanche sous le fond de la mer ou la chute d'une météorite. Un tsunami s'est produit le 24 décembre 2004 près de l'île de Sumatra. Tout d'abord, un fort tremblement de terre qui s'est produit à 30 km de profondeur a secoué l'île, avec une intensité pouvant aller jusqu'à VII et une magnitude de 9.2 sur l'échelle de Richter. Ensuite, le fond marin s'est levé et le tsunami s'est formé ; il a tellement grandi qu'il a provoqué de nombreuses catastrophes dans la partie nord-ouest de la grande île de Sumatra et dans des pays voisins plusieurs minutes plus tard. Les vagues les plus hautes ont atteint une hauteur d'environ 25 mètres près de la plage et leur longueur d'onde a atteint plus de 100 km en pleine mer. La différence entre une vague de plage et un tsunami, outre sa taille, réside dans le fait

que la première ne fait que déplacer les particules près de la surface, tandis que dans le cas du second, l'onde affecte toute la tranche d'eau depuis la surface jusqu'au fond.



## Échelle de Mercalli modifiée (simplifiée)

I. Détecté uniquement par des instruments.

II. Perçu par les gens en repos. Les objets suspendus peuvent osciller.

III. Perçu à l'intérieur. Les véhicules garés peuvent bouger légèrement.

IV Perçu à l'extérieur. La vaisselle, les vitres des portes et des fenêtres vibrent et les murs craquent. Les voitures garées se balancent clairement.

V. Perçu à l'extérieur. Des morceaux de verre et de vitre se brisent et des objets instables tombent.

VI. Perçu par tout le monde. Quelques meubles lourds changent de place. Légers dégâts.

VII. Dommages mineurs dans des bâtiments bien conçus et bien construits, et importants dans ceux mal planifiés. Il est perçu par les personnes qui conduisent des véhicules en mouvement.

VIII. Dommages considérables dans des bâtiments ordinaires avec effondrement partiel et grand dans les structures faiblement construites. Renversement des meubles lourds. Perte de contrôle des véhicules en mouvement.

IX. Dommages importants dans certains bâtiments, avec effondrement partiel. Les bâtiments quittent leurs fondations. Le sol craque nettement. Les tuyaux souterrains se cassent.

X. La plupart des bâtiments sont détruits depuis leurs fondations ; fissures considérables du sol. Glissements de terrain considérables sur les berges des rivières et les pentes abruptes. Débordement des fleuves et des rivières.

XI Les ponts et les structures de maçonnerie sont détruits. Larges fissures dans le sol. Enfoncements et glissements en terrain meuble.

XII. Destruction totale. Ondes visibles sur le sol. Objets jetés en l'air.

L'échelle de Mercalli est utilisée pour déterminer l'intensité d'un séisme en fonction des dégâts causés et varie d'un lieu à l'autre. Sa différence avec l'échelle de magnitude de Richter est que celle-ci mesure l'énergie libérée, enregistrée dans les sismographes et n'a donc qu'une seule valeur.

# ONDES VOYAGEANT DANS LES SOLIDES : les séismes

## Interférence des ondes dans l'eau et dans les solides

As-tu remarqué que dans des endroits comme un étang ou une baignoire, la surface de l'eau n'est presque jamais complètement plate ? Si tu t'en approches, tu verras que la surface présente des ondulations qui changent constamment. Dans l'expérience suivante, nous verrons comment ces ondulations sont le produit de l'interaction entre les ondes lors de leur propagation.

### Expérience 2

#### Matériaux

- Un récipient transparent (par exemple en plastique ou en verre).
- De l'eau.
- Soleil de midi.
- Deux cuillères, règles ou bâtons de bois.

#### Procédure

Tiens le récipient à deux mains sous les rayons de soleil ou pose-le sur une table ou sur un fond en verre transparent. Verse de l'eau dedans jusqu'à environ la moitié. Le récipient doit être à au moins 50 cm du sol. Frappe maintenant l'un des bords du récipient.



## **Que s'est-il passé ?**

Lorsque tu frappes le récipient, tu verras une onde dans l'eau qui se déplace d'un côté à l'autre. Les ondes ressembleront à des bandes à nuances sombres et claires. Si tu observes plus attentivement, tu remarqueras que peu après avoir heurté le récipient, des ondes apparaîtront, parmi lesquelles tu verras presque simultanément des ondes de grande amplitude, puis d'autres de moindre amplitude. En effet, les ondes se déplacent plus rapidement à travers les parois (solides) que dans l'eau (liquide). Lorsque le récipient a vibré, toutes ses parois ont produit des ondes dans l'eau. C'est un moyen de vérifier la vitesse des ondes dans deux milieux. De plus, comme les ondes se propagent plus rapidement dans la partie solide du récipient, tu verras presque en même temps une onde d'amplitude similaire à la première de l'autre côté.

## **Explique**

Si deux ou plusieurs ondes voyageant dans un milieu se rencontrent, le résultat obtenu sera la somme des ondes individuelles. Tu le verras projeté sous forme de rayures de nuances de gris différents. Les bandes claires et sombres correspondent à une interférence constructive lorsque les crêtes et les creux coïncident respectivement. En fin de compte, c'est cet effet qui finit par générer ce type de réseau lumineux qui se déplace continuellement avec le mouvement de l'eau, comme on peut le voir dans une piscine.

## **Exemples d'ondes progressives dans les solides : Les effets des séismes**

Les séismes se produisent lorsqu'il y a un déplacement entre deux blocs de la croûte terrestre, l'énergie alors libérée se propage dans la Terre sous forme d'ondes sismiques dans toutes les directions.

Parfois, pendant leur trajet, les ondes sont confinées près de la surface de la Terre et rebondissent entre les structures qui constituent la croûte. Ce phénomène s'est produit lors du séisme survenu dans le Michoacán le 19 septembre 1985 (magnitude 8.1 sur l'échelle de Richter, et avec une intensité pouvant atteindre IX dans celle de Mercalli). L'énergie qui a été libérée dans le lieu d'origine du séisme

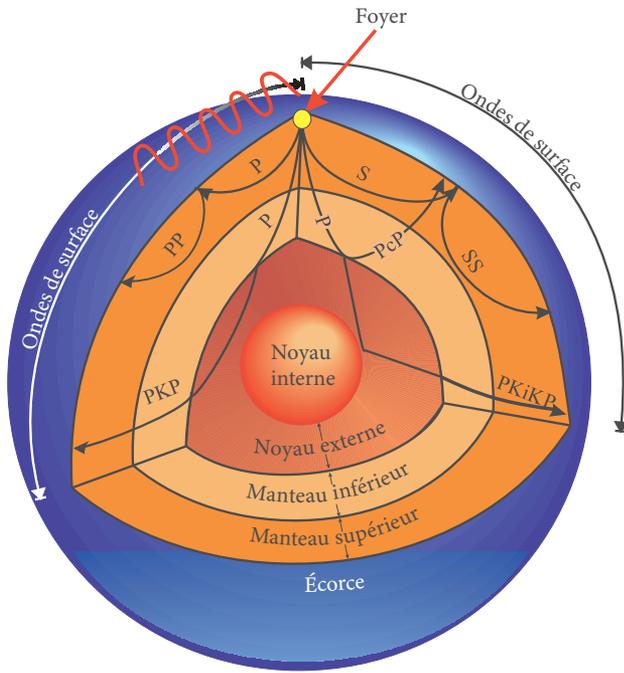
a atteint la vallée de México et les ondes ont été attrapées dans la zone de l'ancien lac, composé principalement par de l'argile, du sable et du gravier. De cette façon, les ondes ont commencé à rebondir sur les roches plus rigides situées au pied de collines comme Chapultepec et Estrella. Ces rebonds ont provoqué une concentration des ondes sismiques dans certaines zones et, en interférant de manière constructive, une augmentation de leur amplitude comme dans l'expérience où nous avons frappé sur le récipient d'eau. La fréquence de vibration du terrain a coïncidé avec l'oscillation de plusieurs bâtiments, qui sont donc entrés en résonance, ce qui est une autre façon d'appeler l'«interférence constructive». C'est la résonance qui a causé l'effondrement de plusieurs bâtiments.

## **Exemple d'utilisation des ondes pour connaître l'intérieur de la Terre**

Une explosion ou un séisme sont des sources d'énergie générant des ondes sismiques qui se propagent et se réfléchissent sur les différentes couches de l'intérieur de la Terre. Ces ondes peuvent être enregistrées par un ensemble de détecteurs situés à la surface de la planète. Pour la recherche de pétrole, d'eau ou de minerais, on utilise la sismologie d'exploration, qui utilise des détecteurs d'ondes appelés géophones. Dans le cas de l'enregistrement de l'énergie libérée par les tremblements de terre, les détecteurs utilisés s'appellent des sismographes. Le temps nécessaire pour faire passer les ondes sismiques de la source aux détecteurs permet de calculer la profondeur et l'épaisseur des couches qui composent la Terre.

Lorsqu'un séisme se produit, deux types principaux d'ondes se propagent à l'intérieur de la planète. Les premières ondes qui atteignent le sismographe sont les ondes «P» qui sont transmises à la fois dans les solides et dans les liquides ; les ondes «S» arrivent quelques instants plus tard, mais elles ne sont transmises que dans les solides. Grâce à cette différence de comportement des ondes, on sait qu'il existe dans la Terre des couches « solides » (croûte, manteau inférieur et noyau interne), une couche «plastique» comme celle du manteau supérieur, qu'on appelle l'asthénosphère, et la couche «liquide» dans le noyau externe. À propos, dans cette couche liquide un effet de convection y est créé, lequel produit le champ magnétique terrestre.

Si le séisme se produit à faible profondeur, des ondes de surface sont également générées, ce qui explique le mouvement que tu ressens sous tes pieds.



L'identification des différentes couches composant la Terre a été réalisée grâce à l'utilisation d'ondes sismiques, dont la variation de vitesse en fonction du milieu qu'elles traversent est essentielle à cette identification. Les ondes P sont les ondes primaires directes, les ondes PP indiquent celles qui sont réfléchies à la surface, les ondes PcP sont des ondes réfléchies sur le noyau externe, les PKP sont les ondes directes diffractées dans le noyau externe, PKiKP, les ondes PKP réfléchies dans le noyau interne, les ondes S sont les ondes secondaires directes, et les ondes sont des ondes S réfléchies à la surface de la Terre.

# ONDES VOYAGEANT DANS L'AIR : le son

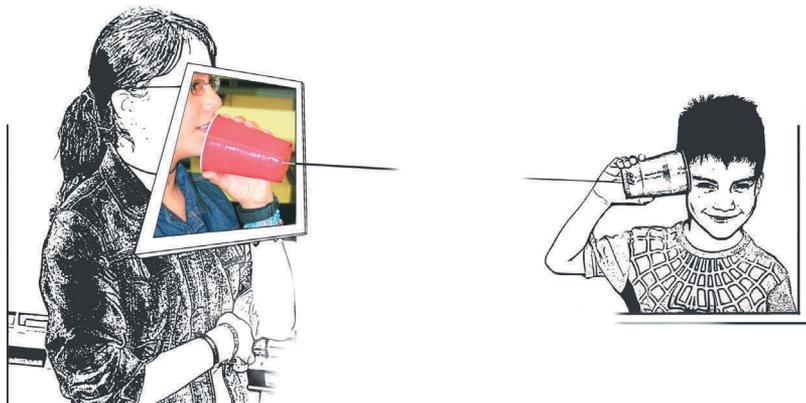
## Expérience 3

### Matériaux

- Deux verres en plastique.
- Plus de cinq mètres de fil.

### Procédure

Fais un trou au bas des verres et attache les extrémités du fil dans chacun d'eux. Demande à un ami de tenir l'un des verres et séparez-vous pour que le fil soit le plus tendu possible. Maintenant, chuchote quelques mots dans le verre. Tu réaliseras que même si tu les as dits très doucement, ton ami t'a entendu.



### Explique

Un corps émet un son quand il vibre, ce qui stimule l'audition. Lorsque tu parles dans le verre, les ondes de ta voix sont transmises au long du fil qui le font vibrer, comme si tu jouais avec un *slinky* (jouet similaire à un ressort très long et très flexible). Les ondes traversent le fil et, lorsqu'elles atteignent le verre à l'autre bout, elles se propagent à nouveau dans l'air du second verre comme des ondes acoustiques. Lorsque les ondes atteignent le tympan, celui-ci commence à vibrer et communique ces vibrations à travers un ensemble d'os qui se heurtent les uns aux autres et excitent les ramifications du nerf auditif.

Comme tu l'as peut-être remarqué, le son n'est pas seulement transmis dans l'air, mais dans tout autre matériau, qu'il soit gazeux, liquide ou solide ; le seul milieu où il ne se propage pas est le vide. La vitesse moyenne du son dans l'air est de 331 m/s ; dans l'eau de mer, elle est de 1435 m/s, tandis que dans les solides tels que l'acier, elle est de 5 000 m/s. Cela montre que la vitesse de propagation du son dépend du matériau qui sert de moyen de transport.

## Applique-le dans ta vie

Si tu vis ou que tu vas à la campagne, tu peux vérifier intuitivement que la vitesse du son est inférieure à celle de la lumière.

- Pour te rendre compte de la différence de vitesse relative entre la lumière et le son, tu peux utiliser une lampe et demander de l'aide à un ami. Séparez-vous de plusieurs dizaines de mètres et crie dès que tu allumes la lampe : ton ami verra immédiatement la lumière, tandis que ton cri arrivera quelques instants plus tard. Galilée a mené une expérience similaire dans le but de déterminer la vitesse de la lumière. Toutefois, il a seulement pu conclure que la vitesse du son est inférieure à celle de la lumière.
- Lorsque tu assistes à un feu d'artifice, rends-toi compte que quelques secondes après le lancement d'une fusée, tu perçois la lumière de l'explosion, mais le son de la fusée t'arrive quelques secondes plus tard.
- Lorsqu'il y a un orage et que tu observes un éclair traversant le ciel, le tonnerre survient quelques secondes plus tard. Tu peux même calculer la distance à laquelle est tombée la foudre. Compte le nombre de secondes entre le moment où tu vois l'éclair et celui où tu entends le tonnerre : trois secondes correspondent à une distance d'environ un kilomètre, car la lumière parcourt presque 300 000 kilomètres par seconde (km/s) : c'est la raison pour laquelle il atteint tes yeux presque instantanément, alors que le son voyage beaucoup plus lentement, à 0.331 km/s.

# ONDES QUI N'ONT PAS BESOIN D'UN MOYEN DE PROPAGATION : ondes électromagnétiques

Dans la nature, il existe un type d'onde ne nécessitant pas de matériau pour se propager : ce sont les ondes électromagnétiques. Ce type d'ondes est peut-être le plus courant dans ta vie, car la lumière appartient à ce type d'ondes.

## Lumière et double fente

### Expérience 4

Thomas Young a montré que, lorsque les rayons lumineux émis par deux sources se rencontraient, un modèle d'interférence apparaissait, signe sans équivoque que la lumière se comportait comme une onde. Maintenant, nous reproduirons une partie de l'expérience sur la double fente de Young qui fut le premier à découvrir ce phénomène.

#### Matériaux

- Un morceau de papier métallique (tu peux l'obtenir d'emballages à biscuits ou d'aliments frits).
- Un cutter.
- Une lampe.
- Une règle en métal.

#### Procédure

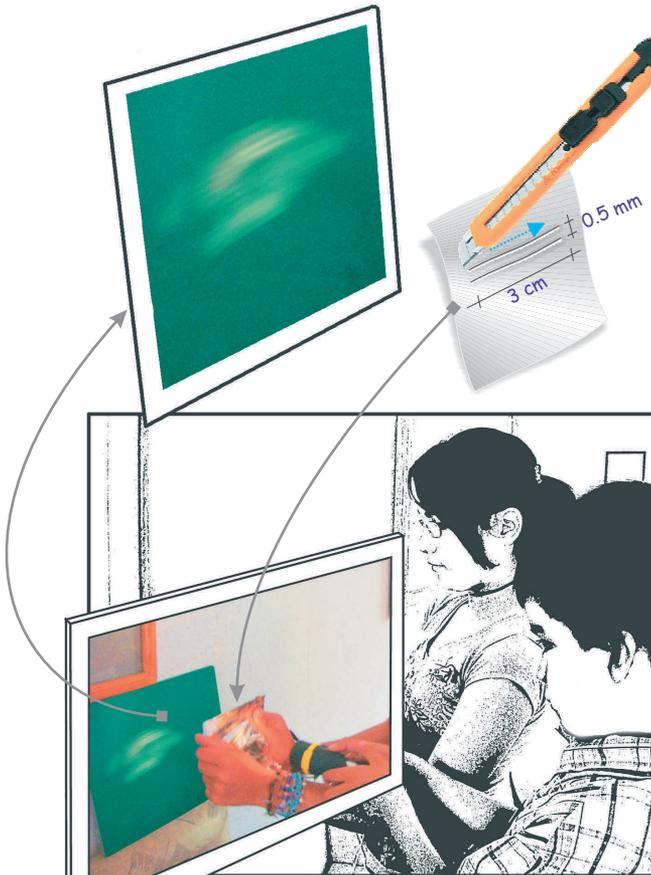
Demande à un adulte de faire les coupes avec le cutter. Il faut faire deux coupes parallèles d'environ 3 cm de long sur le papier. La distance entre les coupes doit être aussi petite que possible, environ un demi-millimètre (0.5 mm). Demande à quelqu'un de tenir le papier étiré avec les deux mains ; allume la lampe et dirige le faisceau de lumière vers les fentes du papier. Projette l'image sur un mur, de préférence sombre, pour voir le résultat.

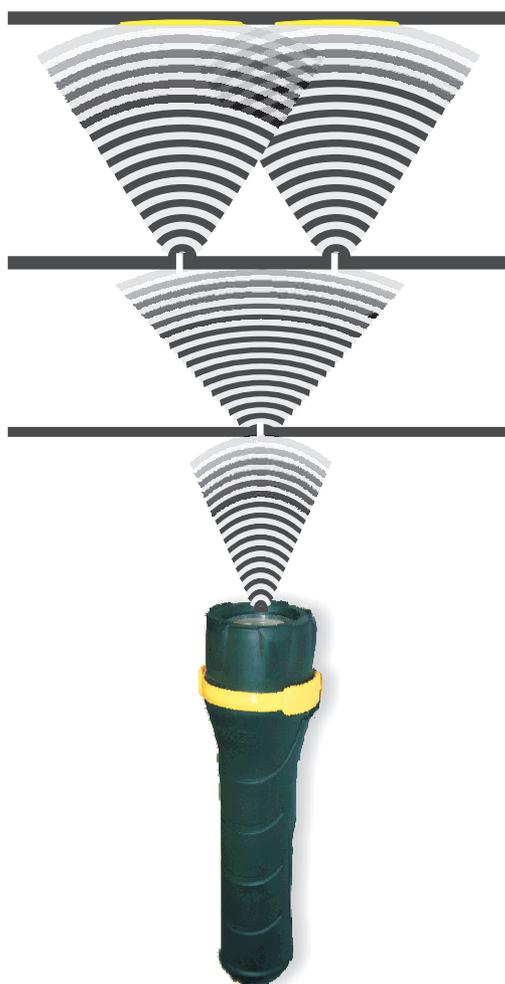
## Que s'est-il passé ?

Si le faisceau se divise en deux lorsqu'il passe à travers les fentes, combien de fines rayures espères-tu voir projetées sur le mur ?  
Combien en vois-tu réellement ?

## Explique

Sur le mur, tu verras un ensemble de très fines bandes sombres et claires produites par l'interférence de la lumière. Éloigne et approche la lampe au papier : les rayures changeront de largeur selon la distance de la lampe, mais elles deviendront également plus claires ou plus floues. Contrairement à ce qui se passe dans l'eau, les bandes sombres indiquent une interférence destructive, tandis que les bandes claires indiquent une interférence constructive. Le fait qu'il y ait plusieurs bandes au lieu de deux montre que la lumière se comporte comme une onde.





Dans l'expérience classique à double fente de Young, deux feuilles sont utilisées, la première avec une seule fente et la seconde avec deux. Dans l'image projetée, on peut voir les bandes claires et sombres produites par l'interférence des deux ondes qui passent la deuxième feuille.

# BULLES COLORÉES

Penses-tu que l'interférence a quelque chose à voir avec les bulles de savon ? Tu as sûrement remarqué qu'elles montrent plusieurs couleurs sur leur surface. Tu sais pourquoi ? Faisons une expérience pour le savoir.

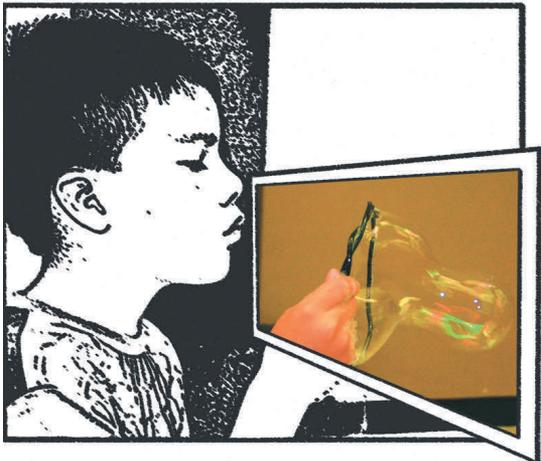
## Expérience 5

### Matériaux

- Un récipient.
- De l'eau.
- Savon en poudre ou liquide.
- Fil de fer.
- Sucre ou glycérine

### Procédure

1. Mélange deux cuillères à soupe de savon et deux de sucre (ou glycérine) dans un verre d'eau.
2. Avec le fil, fabrique une figure simple (cercle, carré ou triangle).
3. Place cette figure du fil métallique dans le récipient et secoue-la un peu en vérifiant que le savon adhère au fil.
4. Prends le fil et déplace-le lentement devant toi jusqu'à ce que tu vois la pellicule de savon, sur laquelle tu pourras voir plusieurs franges colorées.



## Que s'est-il passé ?

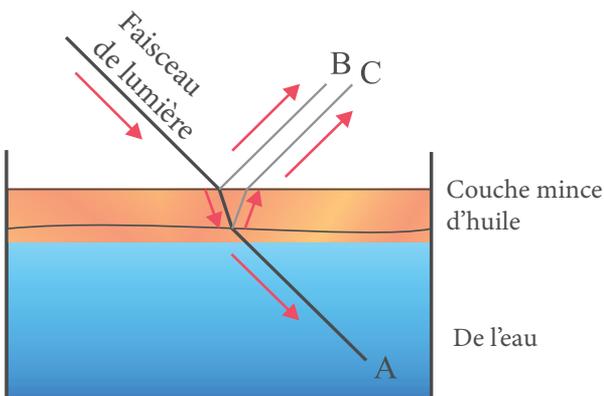
Les franges de couleur visibles sur le film de savon apparaissent plus clairement lorsque tu trouves le bon angle de réflexion entre les rayons lumineux et la pellicule de savon. Cela te prendra un peu de temps pour trouver le meilleur angle d'observation de ces franges.

## Détails

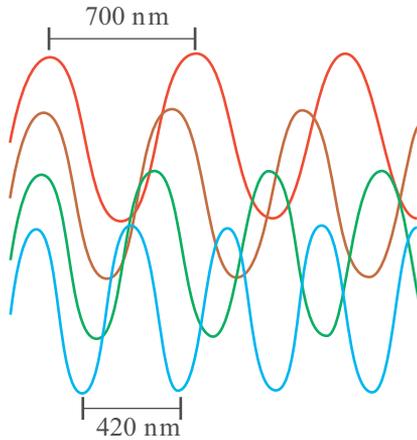
Pour que l'expérience se déroule bien, l'eau doit contenir suffisamment de savon et produire de nombreuses bulles. Le sucre et la glycérine servent à rendre les bulles plus résistantes. Pour plus d'efficacité, laisse l'eau savonneuse reposer pendant quelques minutes. Si le fil n'est pas bien fermé, la pellicule de savon ne se formera pas.

## Explique

Lorsque la lumière passe d'un milieu (l'air) à un autre (la pellicule de savon), deux phénomènes se produisent : une réfraction, ce qui signifie que sa direction est légèrement déviée ; et une réflexion, ce qui signifie que la lumière est réfléchi (comme dans un miroir) sur les surfaces extérieure et intérieure du film de savon. Lorsque cela se produit, les deux ondes réfléchies interfèrent (B et C sur la figure). L'onde C est retardée par rapport à l'onde B, en fonction de l'épaisseur de la pellicule de savon. Pour certaines longueurs d'onde, ce retard représente une interférence constructive, pour d'autres destructive.



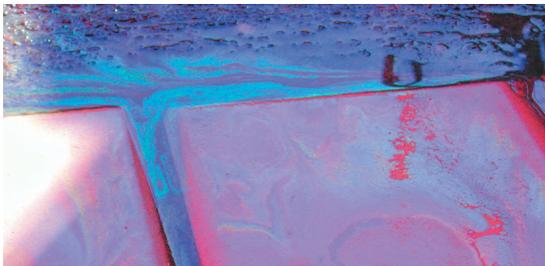
La couleur que tu vois est celle qui correspond à la longueur d'onde résultant de l'interférence. La lumière rouge a une longueur d'onde très petite, d'environ 760 nm, alors que la lumière violette a une longueur d'onde encore plus petite (d'environ 400 nm).



La couleur dépend de la longueur d'onde

## Applique-le à ta vie

Tu as sûrement vu dans la rue des flaques d'eau sur lesquelles tu as pu remarquer des bandes colorées à leur surface. Cela se produit lorsqu'il y a une pellicule d'huile de voiture brûlée qui flotte sur l'eau. La même chose qui s'est passée avec la lumière blanche et la pellicule de savon, se passe avec l'huile. Si tu verses de l'huile dans un verre d'eau, la décomposition de la lumière ne sera pas appréciée car la pellicule d'huile est trop épaisse pour provoquer ce phénomène. Lorsque l'épaisseur de la pellicule diminue pour devenir équivalente à la longueur d'onde de la lumière, alors l'interférence se produit.



# BAS, ÉCHARPES ET LUMIÈRE

Une autre façon de voir les interférences de la lumière consiste à utiliser d'autres éléments que tu peux trouver chez toi, par exemple des écharpes et des bas.

## Expérience 6

### Matériaux

- Bas de femme (noir ou marron) ou une écharpe de soie.
- Une lampe blanche.

### Procédure

Étire le bas (ou l'écharpe) avec tes mains près de ton visage et dirige-le vers la source de lumière. Tu te rendras compte que lorsque tu regardes au milieu, tu observeras plusieurs cercles de couleurs concentriques.

### Que s'est-il passé ?

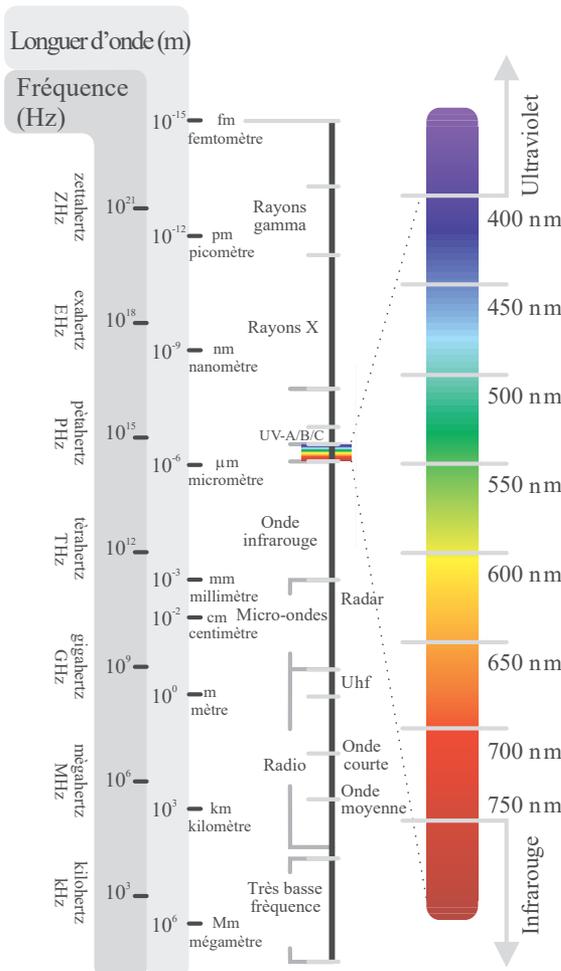
Les fils du bas ou de l'écharpe sont très minces, et la distance qui les sépare est si courte que cela facilite la diffraction de la lumière. La diffraction se produit lorsqu'une onde entoure la fin d'un obstacle. Les rayons qui interfèrent entre eux produisent l'interférence constructive et destructive qui donne naissance au cercle de couleurs.



# ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LA VIE QUOTIDIENNE ET LA NATURE

Les ondes électromagnétiques sont un autre type d'énergie en mouvement : elles n'ont pas besoin d'un milieu pour se propager, elles sont invisibles et se déplacent à peu près à la vitesse de la lumière. Elles sont très similaires les unes aux autres et diffèrent par leur gamme de fréquence (ou longueur d'onde).

La partie du spectre des ondes électromagnétiques que nous trouvons couramment est celle représentée sur la figure. Les intervalles de longueur d'onde approximatifs et leur fréquence y sont indiqués.



Spctre électromagnétique

L'être humain ne perçoit qu'un très petit segment du spectre électromagnétique. Cet intervalle est appelé intervalle visible de la lumière et nous percevons ses différentes longueurs d'onde comme des couleurs (voir la figure ci-dessus).

Les ondes électromagnétiques sont actuellement utilisées dans les télécommunications, comme les transmissions de radio, de télévision et de téléphonie cellulaire. Elles ont également une grande application en médecine : tel est le cas des rayons X, des rayons ultraviolets, des rayons gamma ou le rayon laser.

Les ondes électromagnétiques voyagent dans l'air à la vitesse de la lumière. Nous avons mentionné précédemment que si la fréquence augmente la longueur d'onde diminue, de sorte que les ondes de longueur d'onde plus courte ont une fréquence plus élevée. Pour te donner une idée de la relation qui existe entre elles, nous en donnons quelques exemples : les ondes transmises par la radio AM ont une longueur de plusieurs centaines de kilomètres et une fréquence de plusieurs centaines de milliers de cycles par seconde (de 500 à 1 600 kilohertz); par contre, la radio FM fonctionne avec des ondes d'une longueur de plusieurs dizaines de mètres et une fréquence de plusieurs millions de cycles par seconde (à partir de 88 à 108 MHz, mégahertz). Dans le cas du micro-ondes, il génère des ondes de quelques millimètres à centimètres de long, avec des fréquences plus élevées, avec plusieurs centaines de millions de cycles par seconde. Il existe de nombreux systèmes de communication fonctionnant avec les satellites. Ils fonctionnent généralement à des fréquences de milliards de cycles par seconde (GHz, gigahertz), leur longueur d'onde variant de quelques centimètres à quelques millimètres.

Pour éviter les interférences entre tous ces systèmes de communication basés sur les ondes électromagnétiques, chaque gouvernement, conformément aux conventions internationales, veille à ce que chaque service de radiotélécommunication (stations de radio, télévision, radionavigation, radiolocalisation, radionavigation aéronautique ou services de téléphonie cellulaire) transmette dans une certaine gamme de fréquences. Le fait que chaque appareil ou station de réception ne détecte que les ondes de la fréquence qui lui est attribuée évite la plupart des interférences.

# TROIS TYPES D'ONDES

## Expérience 7

Cette expérience te permettra de visualiser le comportement différent des ondes élastiques (qui se propagent dans les solides), acoustiques (qui se propagent dans l'air) et électromagnétiques (qui n'ont pas besoin de milieu pour se propager).

### Matériaux

- Réveil numérique.
- Pot en verre.

### Procédure

1. Place le réveil à l'intérieur du pot sur une table.
2. Programme-le pour sonner dans une ou deux minutes. Lorsqu'il sonne, tu peux voir les effets suivants :
  - À tout moment, tu verras les chiffres du réveil (ondes électromagnétiques) car la lumière se propage sans problème dans l'air.
  - Lorsque l'alarme sonne, une partie de son énergie sera transmise sous forme d'ondes sonores dans l'air et sera en grande partie absorbée par le pot en verre, raison pour laquelle tu entendras le son atténué.
  - Lorsque le réveil sonne, il vibre et tapote la table sur laquelle il est posé. Ainsi, une autre partie de son énergie sera transmise sous forme d'ondes élastiques.

Si le pot ne contient pas d'air et que le réveil sonne, on verra le réveil, le son disparaîtra, mais tu sentiras toujours la vibration sur la table. Si tu pointes le réveil avec un rayon laser (onde électromagnétique), tu pourras vérifier qu'elle se propage en absence de milieu tel que l'air. Enfin, si tu répètes le cas précédent en suspendant le réveil avec un fil du haut du pot de verre pour qu'il ne touche pas la table, tu continueras à voir le réveil, mais le son et les vibrations de la table disparaîtront.



## QUELQUES CONTRIBUTIONS DE THOMAS YOUNG (1773-1829)

Thomas Young était un scientifique dit universel pour ses contributions dans différents domaines de la connaissance. Son intérêt pour la recherche couvrait des champs de la connaissance aussi différents que la physique, la physiologie médicale et l'égyptologie. Young est né le 13 juin 1773 en Angleterre. Il a étudié la médecine aux universités de Londres, Edimbourg, Göttingen et Cambridge. Il a étudié le fonctionnement de l'œil humain et mis en place trois types de récepteurs, chacun étant sensible à chacune des couleurs primaires. Il a également découvert comment la courbure du cristallin changeait pour focaliser les objets à différentes distances. En 1801, il découvrit la cause de l'astigmatisme et commença à s'intéresser à l'optique.

En 1803, Young a réalisé l'une de ses expériences les plus célèbres, qui porte son nom. En 1807, Young a présenté la théorie de la vision des couleurs connue sous le nom de Young-Helmholtz. Il a relancé la théorie de la lumière de Huygens et, à travers plusieurs expériences, a démontré les phénomènes de dispersion et de réfraction. Dans d'autres études de physique, il analysa la tension superficielle des liquides et l'élasticité des solides. À partir de cette dernière, il calcula un coefficient d'élasticité pour plusieurs matériaux, appelé plus tard module de Young.

En 1820, Thomas Young détermina la longueur d'onde des composants de la lumière. Il a été le premier à montrer que la lumière change de vitesse lorsqu'elle passe à travers des milieux plus denses. En plus de son intérêt pour la physique, Young avait d'autres passions, tout comme l'égyptologie : il fut l'un des premiers à déchiffrer et à interpréter les hiéroglyphes de plusieurs papyrus.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les spécialistes qui ont considérablement amélioré ce texte grâce à leurs observations. Bernardino Barrientos, Manuel Lozano Leyva, Rafael Alberto Méndez Sánchez, Gil Bor, Carlos Mendoza et Ángel F. Nieto Samaniego ont vérifié que les concepts théoriques du manuscrit étaient corrects. María Elena Estrello a corrigé le style. Juan José Martínez, Ofelia Teja, Matías Santiago Alaniz, Patricia Alaniz, Karina et Daniel Gómez ont confirmé que les expériences pouvaient être facilement reproduites

## À PROPOS DES AUTEURS

### **Juan Martín Gómez González**

Il est chercheur au Centre de Géosciences de l'Université Nationale Autonome du Mexique, à Juriquilla, Querétaro. Il est diplômé de la Faculté d'Ingénierie de l'UNAM. Il a obtenu son doctorat en sismologie à l'Université Paris VII, France. Il est actuellement professeur du troisième cycle en Sciences de la Terre à l'UNAM et membre du Système National de Chercheurs. Il a publié plusieurs articles sur la modélisation des ondes sismiques, ainsi que sur la génération et l'évolution de la source sismique. Il effectue également une surveillance sismique à La Mesa et l'Altiplano Central, pour trouver et comprendre l'origine de la sismicité dans ces régions du Mexique.

### **Susana A. Alaniz Álvarez**

Chercheuse au Centre de Géosciences de l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM). Elle a eu son doctorat en Sciences de la Terre en 1996. Elle est membre de l'Académie des Sciences du Mexique de l'Académie d'Ingénierie. Elle effectue des recherches sur la déformation de la croûte supérieure et ses relations avec le volcanisme. Elle a le niveau III du Système National des Chercheurs. Elle donne le cours de Géologie Structurale dans le programme de troisième cycle en Sciences de la Terre de l'UNAM et a été éditrice en chef de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. En 2004, elle a reçu le prix Juana Ramírez de Asbaje de l'UNAM.

## A PROPOS DES TRADUCTEURS

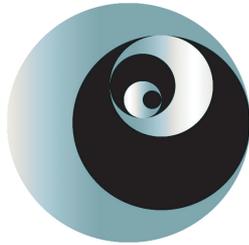
**Thierry Calmus** a obtenu son Doctorat en Géologie Structurale à l'Université Paris VI en 1983. Il est chercheur titulaire à l'Institut de Géologie de l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM), membre de l'Académie des Sciences Mexicaine ainsi que du Système National des Chercheurs (SNI), niveau II. Il a reçu le prix du Professeur de l'Année en 2017 attribué par l'Union Géophysique Mexicaine. Il a publié 60 articles scientifiques, dont un grand nombre sur la géologie et la tectonique du nord-ouest du Mexique. Il a été co-éditeur en chef de la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas de 2012 à 2016. Il est actuellement chef de la Station Régionale du Nord-Ouest de l'Institut de Géologie de la UNAM.

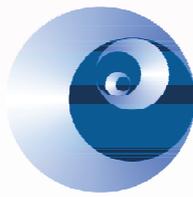
**Sandra Fuentes Vilchis** a obtenu sa licence en Littérature Française en 1986 et sa maîtrise en Littérature Comparée en 1993 à l'Université Nationale Autonome du Mexique, ainsi que son Diplôme en Traduction à l'Ambassade de France en 1989. Elle est professeure titulaire à l'École Nationale Préparatoire (ENP) et a été Responsable du Département de Français dans cette Institution. Elle participe à la Commission d'évaluation des professeurs de l'ENP. Elle a participé à plusieurs programmes PAPIME et INFOCAB de la UNAM.

**Paola Garcés** rédige actuellement son mémoire de maîtrise en Lettres Modernes à l'Université Nationale Autonome du Mexique. Elle a obtenu sa licence en Langue et Littérature françaises à la UNAM en 2009 et son diplôme comme professeur de français en 2004 attribué par la Commission de Langues Étrangères, UNAM. Elle est professeure titulaire à l'École Nationale Préparatoire de la UNAM. Elle a participé à des projets pour la diffusion du français en sciences de la vie et de la santé et à des projets sur l'enseignement bilingue concrètement avec les matières de Géographie et de Biologie.

Ce numéro bénéficie du soutien accordé par la DGAPA-UNAM aux projets: PE106919, dont le Dr Susana Alaniz Álvarez est responsable, et PE400216 «Langues étrangères dans la diffusion des sciences biologiques et de la san-té», dont Dr. Yadira Alma Hadassa Hernández Pérez.

Ce livret a été imprimé grâce a des fonds de la  
Coordination de la Recherche Scientifique de la UNAM  
et du projet  
PAPIME Pe106919





La série «Des expériences simples pour comprendre une planète compliquée» est basée sur la liste des plus belles expériences de l'histoire, publiée par le magazine Physics World en septembre 2002. Elles ont été choisies pour sa simplicité, son élégance et pour le changement qu'elles ont provoqué dans la pensée scientifique de son époque.

Chaque numéro de cette série est consacré à l'une de ces expériences. Notre objectif est de te faire comprendre, par des expérimentations, des phénomènes qui se produisent à la fois dans notre vie quotidienne et sur notre planète.

Ce numéro est consacré à l'expérience "Le pendule de Foucault".

Livrets de cette série :

1. La pression atmosphérique et la chute des corps.
2. La lumière et les couleurs.
3. EUREKA! Les continents et les océans flottent !
4. Le temps suspendu à un fil
- 5. La Terre et ses ondes**

La série complète peut être téléchargée sur le site:

<http://www.geociencias.unam.mx>

<https://sites.google.com/site/recursos4miradas/8>

