

HISTOIRES D'ONDES

ÉDITION 2019



HISTOIRES D'ONDES

INTRODUCTION	6
ONDES STATIONNAIRES & RÉSONANCES	12
ACOUSTIQUE	18
LA LUMIÈRE	36
EXPÉRIENCES DE HERTZ	50

Chers professeurs,

Abordées à la fin des études secondaires, les ondes font partie de notre quotidien et même de notre vocabulaire. Ne dit-on pas « être sur la même longueur d'onde », n'utilise-t-on pas quotidiennement un « four à micro-ondes », n'écoute-t-on pas des « émissions sur les ondes »... ?

L'exposition *Histoires d'Ondes* a à cœur d'illustrer par l'expérience une large panoplie de phénomènes ondulatoires. Elle ambitionne de faire vibrer ses visiteurs et même de les mettre en résonance avec les différents phénomènes étudiés !

Histoires d'Ondes est le fruit d'un travail collaboratif initié il y a plus de vingt ans par des physiciens et des techniciens passionnés par le partage des connaissances. Cette exposition a aussi évolué grâce à la contribution des enseignants et des élèves qui ont nourri la réflexion de par leurs questions et leurs réactions lors des innombrables visites guidées. Que tous en soient ici remerciés.

Ce petit cahier a pour objectif de tenir lieu d'aide-mémoire pour les enseignants qui sont venus assister avec leurs élèves à une des visites guidées. Il ne s'agit donc pas d'un cours mais bien d'un recueil des expériences majeures présentées et des grandes idées qui les sous-tendent.

Nous vous en souhaitons bonne lecture !

L'équipe de SciTech²



La machine à ondes
(tiges métalliques)

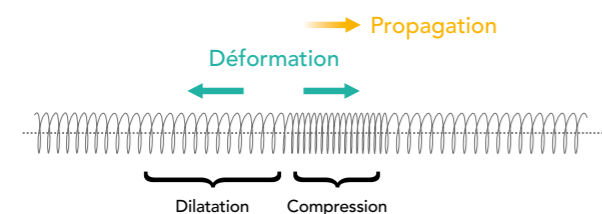
INTRODUCTION

Les ondes longitudinales

Un long ressort (comme les gadgets appelés *Slinky* qui descendent les escaliers) est parfait pour illustrer ce type d'ondes.

Le ressort est maintenu horizontalement et légèrement tendu par deux personnes. L'une de ces personnes rapproche un certain nombre de spires les unes des autres et les libère ensuite.

La déformation (la *compression* des spires) une fois libérée se propage dans la direction du ressort. Les spires oscillent légèrement – de gauche à droite, de droite à gauche – autour de leur position d'équilibre. Les spires ne se déplacent pas le long du ressort, elles restent dans la zone de leur position d'équilibre. Par contre, la déformation, elle, se propage le long du ressort. Une onde est un *transport d'énergie*, pas de matière. La déformation et la propagation sont parallèles, il s'agit d'une *onde longitudinale* :



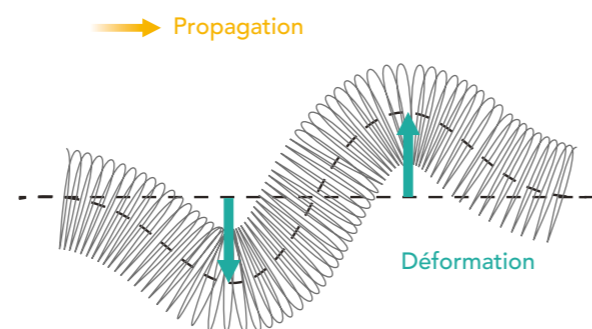
Dans notre quotidien, le son est un exemple d'onde longitudinale.

Les ondes transversales

Ce même ressort, toujours tendu par les deux expérimentateurs, mais agité, cette fois, de haut en bas par l'un d'eux, permet de montrer des *ondes*

transversales. De nouveau, les spires oscillent (de haut en bas, de bas en haut) autour de leur position d'équilibre mais ne se déplacent pas avec la perturbation.

Cette fois, la déformation (verticale) est perpendiculaire à sa propagation (horizontale), l'onde est transversale. Une onde, est un *transport d'énergie*, pas de matière.



Les vagues en haute mer et la vibration des cordes d'un instrument de musique sont des exemples d'ondes transversales ; la lumière est aussi une onde transversale.

Les ondes de torsion

Machine à ondes à anneaux

Les ondes de torsion sont des variantes des ondes transversales pour lesquelles les perturbations sont des déplacements angulaires par torsion (torsion de l'extrémité d'un câble, par exemple).

La machine à onde est constituée d'anneaux reliés entre eux par un élastique (invisible mais passant au centre de chaque anneau). Il est possible de

Cette première partie de la visite permet d'aborder ou de rappeler les concepts de base des phénomènes ondulatoires, comme les notions d'onde périodique longitudinale ou transversale, celles de longueur d'onde, de période ou encore de fréquence.

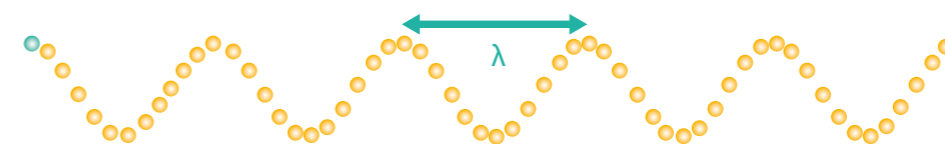
faire tourner le premier anneau autour de son centre et de l'écartier, par conséquent, de sa position d'équilibre.

Cette rotation tord l'élastique qui est solidaire de l'anneau. Cette torsion de l'élastique se propage le long de celui-ci. Cette propagation de la torsion est visible grâce à la rotation des anneaux successifs.



Le matériel utilisé permet d'observer la réflexion de la torsion qui atteint l'extrémité de la machine et rebondit vers le premier anneau. Deux cas peuvent être étudiés, celui où l'extrémité est laissée libre de se mouvoir et celui où l'extrémité est fixe.

Le dispositif permet également de figer l'ensemble des spires à n'importe quel moment (comme une photo). Lorsque l'on fige une onde périodique qui se propage dans la machine, la notion de longueur d'onde devient particulièrement claire : la longueur d'onde (λ) est la distance séparant des points consécutifs dans le même état de vibration.



Onde : périodicité dans l'espace

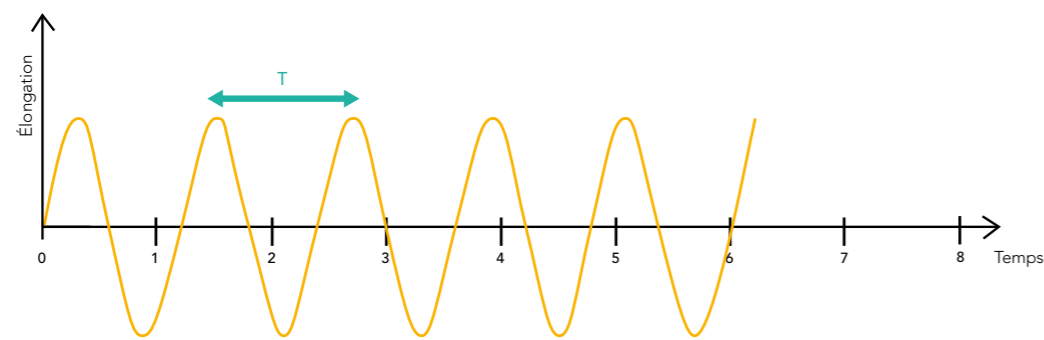
Dans le cas étudié ici, l'onde sera représentée mathématiquement par une fonction sinusoïdale. Rappelons qu'une onde peut être périodique sans forcément être sinusoïdale. La valeur maximale de l'*élongation* – distance d'un point à sa position d'équilibre – est appelée *amplitude*.

Par ailleurs, une observation de l'élongation – mouvement vertical de haut en bas, de bas en haut – d'une pastille de la machine à ondes représentée en fonction du temps est aussi sinusoïdale.

La période (T) est la durée nécessaire à l'onde pour parcourir une distance égale à sa longueur d'onde. L'inverse de la période est la fréquence notée f . La fréquence représente la cadence, le nombre d'oscillations réalisées par unité de temps.

Ces grandeurs sont liées à la vitesse de propagation de l'onde par la relation :

$$v = \lambda/T = \lambda \cdot f$$



Mouvement sinusoïdal d'une pastille d'un anneau en fonction du temps

Machine à ondes à tiges

Une deuxième machine à ondes, constituée cette fois par deux séries de tiges métalliques parallèles, de longueurs différentes et reliées entre elles par un câble métallique fixé au centre des tiges, permet de créer elle aussi des ondes de torsion. Ce dispositif présente le grand avantage de montrer les phénomènes à l'œuvre lors des changements de milieu.

Le principe est le même : une des tiges, écartée de sa position d'équilibre, transmet un mouvement de torsion dans le câble. Cette torsion se transmet de proche en proche, entraînant la rotation des autres tiges les unes après les autres. La perturbation se propage jusqu'à la dernière tige qui permet à l'onde de rebondir et de repartir dans l'autre sens.

Il est alors intéressant de constater qu'une même onde incidente imposée, par exemple, dans la partie « tiges courtes » va produire, à la jonction des deux parties, deux ondes différentes. Une partie de

l'onde incidente va en effet se transmettre dans la partie « tiges longues » avec une vitesse de propagation différente – plus petite – tandis que l'autre partie va se réfléchir et repartir dans la partie « tiges courtes ». Une réflexion a lieu aussi pour la partie transmise à l'extrémité de la machine, etc.



Ondes transmises – Ondes réfléchies

La transmission-réflexion est un phénomène très courant, qui se produit aussi pour les ondes électromagnétiques. En particulier, c'est ce phénomène qui explique que lorsque nous nous trouvons devant une vitre transparente, nous pouvons observer notre image sur la vitre : la lumière diffusée par notre visage se réfléchit sur le verre et revient vers nous. De même, une personne située de l'autre côté de la vitre peut nous voir au travers de cette vitre : cette personne reçoit la partie de la lumière émise par notre visage transmise au travers de la vitre.

Les scientifiques peuvent aussi accéder à la structure des sous-sols en étudiant ces différentes réflexions et transmissions. Ainsi, en connaissant l'instant d'émission et la vitesse de propagation des ondes radio émises (vitesse de la lumière) dans les différents matériaux, il a, par exemple, été possible de repérer d'énormes quantités de glace dans le sous-sol de Mars.



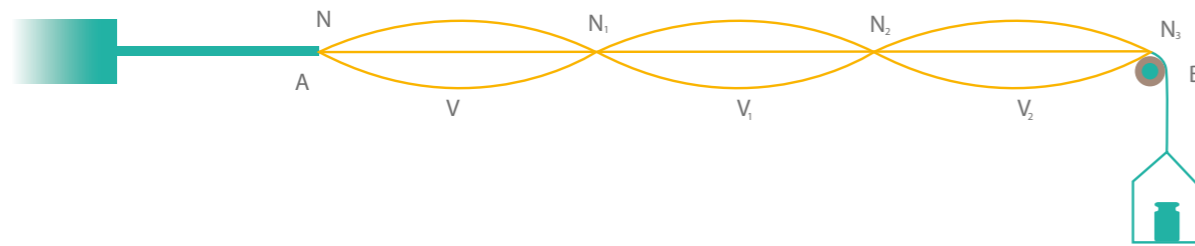
Les figures de Chladni

ONDES STATIONNAIRES & RÉSONANCES

La corde vibrante

Ondes stationnaires à une dimension

Il est relativement difficile d'imposer manuellement à un système une cadence qui soit régulière. Par contre, il est aisé de l'imposer avec un dispositif électrique : dans notre expérience, la membrane d'un haut-parleur va imposer sa fréquence de vibration à une tige métallique qui lui est solidaire. Une des extrémités d'une corde est reliée à cette tige ; l'autre est maintenue fixe (ici par une petite masse) :

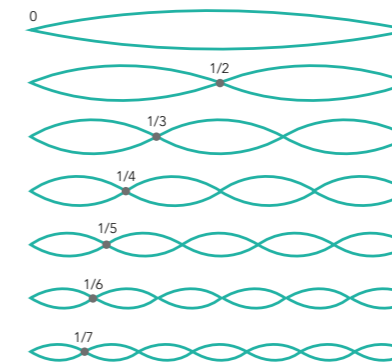


Pour la plupart des fréquences imposées à la tige, la corde oscille de manière désordonnée, instable et aucune figure périodique ne peut s'y installer. Par contre, pour certaines fréquences bien particulières – *fréquences de résonance* –, la corde dessine des figures stables (voir dessin ci-dessus). La figure obtenue représente ce que l'on appelle une *onde stationnaire*. On parle d'onde stationnaire¹ lorsque le mouvement s'est généralisé à tout le support et qu'il ne se modifie plus.

Dans ces conditions, une description globale en termes de propagation cesse d'être évidente ; mais

Résonance et ondes stationnaires : deux phénomènes intimement liés, illustrés ici à une, deux et trois dimensions grâce notamment à une corde vibrante, aux célèbres figures de Chladni et au four à micro-ondes.

on peut décrire l'onde stationnaire comme étant la superposition de deux ondes qui se propagent. La première se propage dans le sens de propagation de la première déformation – l'onde incidente – et la deuxième dans le sens opposé – l'onde réfléchiée².



Dans notre système, les deux extrémités de la corde peuvent être considérées comme fixes, ces deux extrémités correspondent donc à des endroits où la corde ne bouge pratiquement pas. On appelle ces endroits des *nœuds de vibration*. Cette constatation impose que la longueur du support soit donc un nombre entier de fois la demi-longueur d'onde (par définition de la longueur d'onde).

Les points dont l'élongation est maximale sont appelés les *ventres de vibration*. L'élongation maximale est appelée *amplitude*.

De part et d'autre d'un nœud, les points vibrent dans des directions opposées.

Les fréquences de résonance sont propres à chaque système. Dans le cas de la corde, elles dépendent de sa longueur, de sa tension, de sa nature. La corde vibrante est le siège d'ondes stationnaires à une dimension. C'est-à-dire que l'onde se propage dans une direction, à savoir celle de la corde.

La fréquence qui donne naissance à la première onde stationnaire (un ventre) est qualifiée de *première harmonique* ; la deuxième (deux ventres) est la *deuxième harmonique*, la troisième est la *troisième harmonique*, etc.

¹ Parler d'onde « stationnaire » ne veut donc pas dire que les différents points du support ne bougent pas. Stationnaire signifie que la forme de l'onde reste figée dans le temps. L'onde semble ne plus progresser dans le milieu, elle donne l'impression de « faire du surplace ».

² En réalité, l'onde stationnaire est le résultat de la superposition d'un grand nombre d'ondes, puisqu'une onde incidente se réfléchit plusieurs fois dans le système, en s'amortissant progressivement.

Les figures de Chladni

Ondes stationnaires à deux dimensions

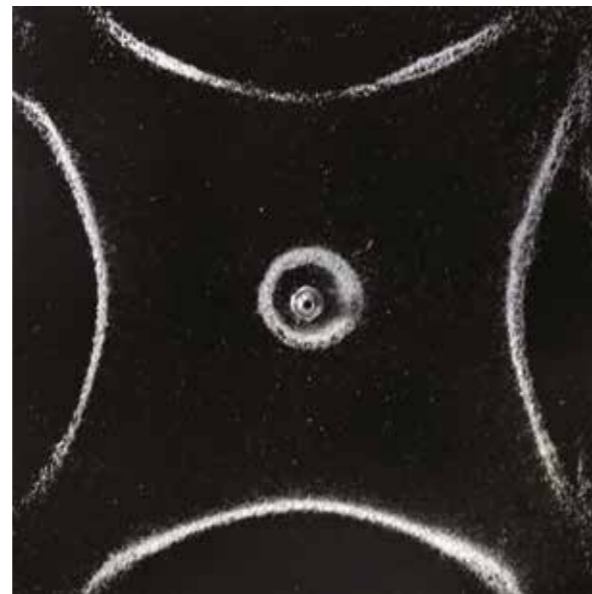
Il est aussi possible d'observer des ondes stationnaires à deux dimensions. Une plaque horizontale, dont la surface a été préalablement saupoudrée uniformément de sable, est solidarisée avec la membrane d'un haut-parleur dont on peut régler finement la fréquence de vibration via une tige fixée en son centre. Une fois le haut-parleur en fonction, la plaque se met à vibrer verticalement. Pour certaines fréquences de vibration – fréquences de résonance de la plaque –, les grains de sable dessinent des figures stables sur la plaque!

À ces fréquences particulières, propres à la plaque, la superposition des ondes incidentes issues du centre de la plaque – et des ondes réfléchies – renvoyées par les bords de la plaque –, donne naissance à des ondes stationnaires. Ce régime particulier de vibration fait donc apparaître sur la plaque des nœuds et des ventres de vibration.

Les grains de sable qui se trouvent à des endroits qui vibrent sont éjectés et retombent à d'autres endroits. Si ces endroits vibrent aussi, les grains sautent à nouveau ; s'ils ne vibrent pas, les grains s'y déposent et s'y accumulent : les figures observées sur la plaque correspondent donc aux nœuds de vibration et permettent de visualiser les *lignes nodales* de l'onde stationnaire à deux dimensions. Plus les fréquences de résonance sont élevées, plus la distance entre les nœuds et

les ventres diminue et plus les figures observées deviennent complexes.

La forme des lignes nodales dépend de la symétrie de la plaque. Des plaques de formes différentes (carrées, triangulaires, forme d'un violon...) présenteront des lignes nodales de formes différentes.



Le four à micro-ondes

Ondes stationnaires à trois dimensions

Pourquoi doit-on utiliser un plateau tournant dans un four à micro-ondes ?

Le four à micro-ondes utilise une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est de l'ordre de 12 cm. Sa fréquence permet à son champ électrique de faire vibrer les molécules d'eau, de nature dipolaire ; cette vibration des molécules d'eau est à l'origine de l'augmentation de température.

Pour optimiser l'amplitude moyenne de vibration, le système assure l'installation d'une onde stationnaire à trois dimensions. Par contre, si les ventres de vibration assurent une vibration efficace, au niveau des nœuds, inévitables, les molécules d'eau ne vibrent pas. Dès lors, un plat de pâtes placé dans un four à micro-ondes sans plateau tournant pour y être réchauffé présenterait des zones chaudes et des zones froides... le plateau tournant assure que chaque portion du plat passe par des ventres de vibration.

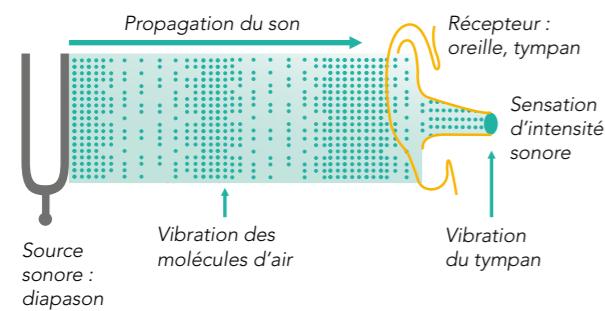


La non-propagation du son dans le vide

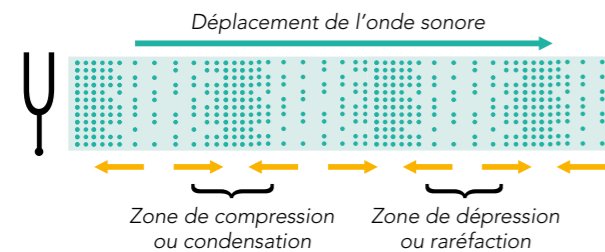
ACOUSTIQUE

Vibration du diapason

La branche d'un diapason frappée avec un petit marteau en caoutchouc se met à vibrer, entraînant ainsi tout le diapason dans ce mouvement de vibration. Cette vibration du diapason met l'air environnant en vibration également. Cette vibration se propage de proche en proche dans l'air pour finalement arriver à notre tympan.



La figure ci-dessous représente un instantané de la distribution des molécules d'air à proximité d'un diapason mis en vibration : suite au mouvement des tiges du diapason, l'air ambiant est localement comprimé. Cette compression se déplace et finit par atteindre l'oreille. Ce sont ces zones de compression/dépression qui se déplacent mais pas les molécules d'air qui vibrent toujours localement autour de leur position d'équilibre.



La vibration du diapason, invisible à l'œil nu, peut être mise en évidence en utilisant un petit pendule (réalisé avec une balle de ping-pong, par exemple). Le pendule est placé de telle manière que la balle qui y est accrochée soit accolée à l'extrémité libre d'une branche du diapason. Dès que les branches du diapason se mettent à vibrer, le pendule se met à osciller de manière impressionnante!



L'expérience peut aussi être prolongée en jouant avec deux diapasons identiques, afin de montrer que la vibration du premier permet de mettre en vibration le second. Cette transmission peut être rendue plus spectaculaire grâce au petit pendule. Un simple cavalier ajouté à l'un des diapasons suffit à faire disparaître la résonance! L'expérience est décrite plus loin en détail.

Comment générer des ondes sonores ? Comment se propagent-elles ? Comment peuvent-elles interférer ? Que se passe-t-il si la source sonore est en mouvement ? Et si l'expérimentateur se déplace par rapport à la source ?

Tuyaux d'orgue

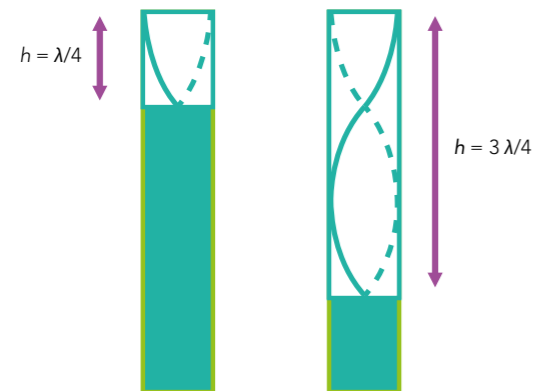
Quatre verres à pied de laboratoire contiennent des colonnes d'eaux colorées de hauteurs différentes. Un diapason préalablement frappé est ensuite amené au-dessus de chacune de ces colonnes. Le son émis par ce diapason est amplifié par certaines de ces colonnes et pas par d'autres.

L'amplification est-elle liée à la hauteur du liquide ? En fait, c'est la hauteur de la colonne d'air qui intervient, en permettant ou non l'instauration d'une onde stationnaire. L'amplification sonore provient de l'existence d'un ventre de vibration à la sortie du verre. En fait, les ondes émises par le diapason se réfléchissent à la surface



de l'eau et se superposent aux ondes incidentes. Si une onde stationnaire se forme, elle doit dans tous les cas compter un nœud au niveau de la surface de l'eau – extrémité fermée – et un ventre au niveau de la partie supérieure du verre. Le son est donc amplifié si la hauteur de la colonne d'air est telle qu'elle impose un ventre de vibration à la sortie du verre – extrémité ouverte. Cette situation a lieu si la hauteur de la colonne d'air vaut $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, etc.

À partir de cette même expérience, il est aussi possible de procéder autrement et de calculer la vitesse de propagation du son dans l'air. En effet, en connaissant la fréquence de vibration du diapason (ici : $f = 440$ Hz) et en mesurant $\lambda/4$, la vitesse de déplacement du son dans l'air se calcule aisément : $v = \lambda f$, soit 340m/s.



Les orgues constituent un bel exemple d'exploitation de ce phénomène d'amplification sonore par une colonne d'air.

Diapasons et caisses de résonance

L'expérience précédente permet de constater qu'une colonne d'air permet d'amplifier un son qui correspond à une de ses fréquences propres. Le verre à pied constituait donc une caisse de résonance en verre. Cette fois, nous allons utiliser une caisse de résonance en bois. On constatera que pour un diapason donné, la longueur de la caisse de résonance en bois correspond à la hauteur de la colonne d'air dans le tube en verre.

- Un diapason est souvent monté sur une caisse de résonance de forme parallélépipédique. C'est le cas ici. Lorsque l'on frappe sur un



diapason, il émet un son *pur*, mais d'intensité très faible. Dès que le diapason en vibration est mis en contact avec la caisse de résonance adaptée, on entend une spectaculaire amplification : une onde stationnaire s'est installée dans la caisse en bois. Cette onde est caractérisée par un nœud sur la petite face en bois et par un ventre au niveau de la face ouverte.

- Deux diapasons identiques montés respectivement sur leur caisse de résonance sont placés l'un en face de l'autre (ouverture vers ouverture). L'un des deux diapasons est mis en vibration. Lorsque la vibration de ce diapason est arrêtée en touchant du doigt une des branches, le son subsiste ! Le son provient en réalité de l'autre diapason qui s'est mis à vibrer. En effet, les deux diapasons, étant identiques, possèdent la même

fréquence propre, c'est-à-dire la même fréquence de résonance. L'énergie fournie par le premier diapason est reçue parfaitement par le deuxième diapason qui se met alors à vibrer. Le premier diapason joue le rôle *d'excitateur*, tandis que le second joue le rôle de *résonateur*.



- Par contre, un cavalier (une petite masse supplémentaire) fixé sur une branche de l'un des deux diapasons, en modifie la fréquence propre. Même déposé sur une caisse qui lui serait adaptée, ce « nouveau » diapason n'entrera pas en résonance et le son disparaîtra avec l'arrêt du premier diapason.



Le verre de la Castafiore



Peut-on réellement casser un verre en chantant ? La Castafiore pourrait-elle faire exploser les vitres du château de Moulinsart par le seul son de sa voix ?

L'expérience des verres chantants est largement connue : il est en effet possible de faire « chanter » un verre contenant un liquide en humectant un doigt et en suivant le bord du verre en le frottant. Ce son est harmonieux. En frappant légèrement le verre avec le bord d'un ongle, il est aussi

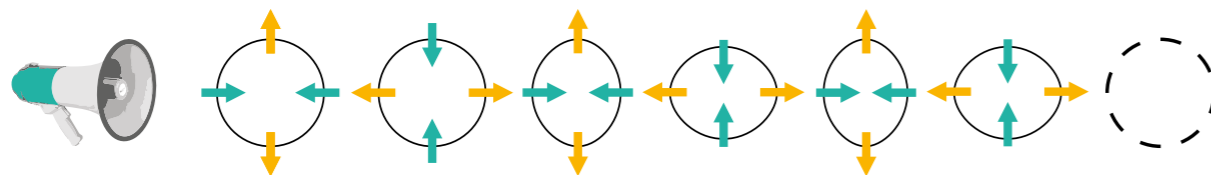
possible de produire un son. Ces deux sons émis sont propres au verre utilisé et à la manière dont il est rempli. La fréquence de ces sons correspond exactement à la fréquence de résonance de ce verre.

L'expérience proposée dans l'exposition se fait à plus grande échelle : avec un vase ! La fréquence de résonance du vase est déterminée³ et ensuite imposée au vase par l'intermédiaire d'un générateur à fréquence ajustable. L'objectif est de battre en brèche l'idée reçue selon laquelle seuls des sons aigus peuvent faire vibrer et casser le verre !

On soumet le vase à des sons de différentes fréquences. Les élèves constatent alors que des sons très aigus - ou très graves - ne produisent aucun effet sur le vase.

Au passage, l'expérience permet d'illustrer la gamme du spectre sonore audible par l'Homme. Ce n'est que lorsque le vase est soumis au son que lui-même émet, par exemple, lorsqu'il est frappé, qu'il se met à vibrer de manière très impressionnante ! L'éclairage du vase avec un stroboscope met en évidence ses déformations spectaculaires.

Déformations successives du vase vues de haut



Certains endroits du bord restent fixes (nœuds de vibration) et d'autres vibrent avec une grande amplitude (ventres de vibration). Un léger décalage en fréquence – ne serait-ce que de un hertz – au niveau du générateur fait disparaître le phénomène et cela même avec un amplificateur puissant !

Une fois la source extérieure coupée, le verre continue à émettre un son pendant un court moment. Ce son s'atténue avec l'amortissement de la vibration des parois du vase.

Si la source émettrice était suffisamment puissante (mais de même fréquence !), il serait possible de briser le vase : l'amplitude des ventres augmenterait, le verre ne pourrait plus résister aux contraintes et finirait par se briser.

La voix humaine serait-elle capable d'un tel exploit ? A priori, un bon chanteur pourrait se caler sur la bonne fréquence. Mais de par son mécanisme de production, la voix humaine n'est pas monochromatique. Dès lors, même si le chanteur émet la bonne fréquence, sa puissance sonore est répartie automatiquement sur plusieurs fréquences, ce qui limite l'énergie envoyée à la fréquence de résonance du verre. Par contre, si la voix était amplifiée par un micro...

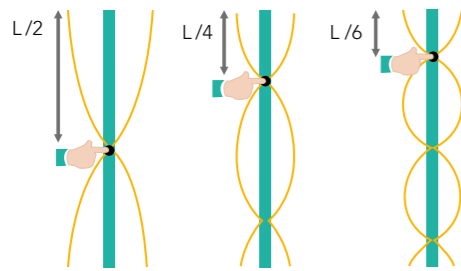
Les tiges chantantes

Il est possible de faire vibrer une tige en aluminium, creuse ou pleine, en frappant une de ses extrémités avec un petit marteau. Suivant l'endroit où l'on place les doigts pour tenir la tige, celle-ci émet un son ou au contraire reste silencieuse.

Tenir la tige impose à cet endroit la présence d'un nœud de vibration. Maintenu en son centre et frappée, la tige se met à vibrer de façon très complexe. De nombreuses vibrations de fréquences différentes sont générées. Celle qui subsistera sera celle qui permet à une onde stationnaire de s'installer. Avec un nœud au centre de la tige et des ventres aux deux extrémités libres, on obtient ainsi un son de fréquence la plus basse possible pour cette tige : c'est la fréquence fondamentale.

Maintenue au quart de sa longueur, cette même tige émet aussi toute une gamme de fréquences mais la fréquence qui persistera plus longtemps est cette fois celle qui correspond à la deuxième harmonique : toujours deux ventres aux extrémités, mais aussi deux nœuds sur la tige. Au sixième de la longueur, c'est la troisième harmonique qui est émise. Au huitième de la longueur, c'est la quatrième harmonique qui sera produite, etc.

³ Il est désormais possible de trouver sur Internet des logiciels gratuits qui permettent de réaliser ce type d'analyse (analyse de Fourier) et de générer ensuite le son de fréquence déterminée.



Il est aussi possible d'estimer rapidement la valeur de la fréquence du son émis : la tige utilisée ici mesure environ 1,80 m et la vitesse de propagation du son dans l'aluminium est de l'ordre de 5500 m/s, la fréquence fondamentale est donc d'environ 1500 Hz.

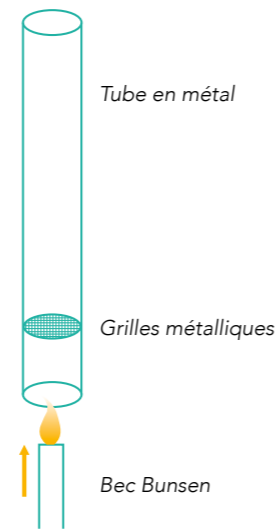
Par contre, maintenue à des endroits qui ne permettent pas l'instauration d'ondes stationnaires, la tige ne résonne pas. Il est à noter que certaines tiges ne réagissent pas de cette façon : la réalité est toujours plus compliquée que la théorie.

Le tube de Rijke

Cette curieuse expérience constitue un exemple de physique non linéaire, un sujet qui sort – dans ses détails – du cadre de l'enseignement secondaire, mais qui permet d'assister à un spectaculaire phénomène de résonance dont les grandes lignes peuvent être comprises et appréciées par les élèves.

Dans un premier temps, un tube en métal est maintenu en position verticale au-dessus de la flamme d'un bec Bunsen. Tant que le tube est ainsi chauffé, il ne se passe rien de particulier. Par

contre, lorsque qu'il est éloigné de cette flamme, le tube émet alors un son puissant et durable! Ce son disparaît si le tube est replacé au-dessus de la flamme, basculé horizontalement ou posé verticalement sur une table. Le son réapparaît ensuite dès que le tube est remis en position verticale. Après un certain temps, le son s'atténue et disparaît définitivement.



Comprendre comment ce son est généré est complexe. Toutefois, il est possible d'en dégager une amorce de réponse. Il faut tout d'abord savoir que trois grilles métalliques ont été introduites dans le tube, à une hauteur bien spécifique, trouvée non pas par calcul, mais bien par tâtonnements successifs. Il en est de même pour le nombre de grilles : l'expérience ne fonctionne pas avec une ou deux grilles, mais bien avec trois!

On peut supposer que lorsque le tube est placé au-dessus de la flamme du bec Bunsen, les grilles s'échauffent, chauffant à leur tour l'air qui est en contact avec elles. Cet air chauffé monte dans le tube. Un appel d'air se produit : de l'air froid pénètre dans le tube par le bas et se réchauffe grâce à la flamme, etc.

Par contre, lorsque le tube est éloigné de la flamme et maintenu vertical, l'air qui monte depuis le bas pour remplacer celui qui s'échappe vers le haut est froid, de sorte qu'il refroidit légèrement la surface du treillis, freinant le mouvement de convection.

La chaleur accumulée à l'intérieur des grilles atteint ensuite la surface, réchauffe l'air, réactivant la convection. Nouvel appel d'air froid qui ralentit la convection. La succession de ces phases convection/pas de convection produit une vibration très complexe des grilles, qui génère une multitude de sons de fréquences différentes. Le puissant son que l'on entend est celui dont la fréquence correspond à la fréquence fondamentale du tube.

Si le tube est placé horizontalement, l'air chaud ne parcourt plus le tube suivant sa longueur (il n'y a plus de phénomène de tirage comme dans une cheminée). Les grilles ne sont plus soumises au cycle de convection périodique. Elles n'ont donc aucune raison de vibrer, aucun son n'est dès lors émis. Il en est de même si on obstrue l'une des deux extrémités du tube ou si l'on maintient le tube au-dessus de la flamme (l'air qui monte est chaud en permanence et ne refroidit plus la surface du métal).

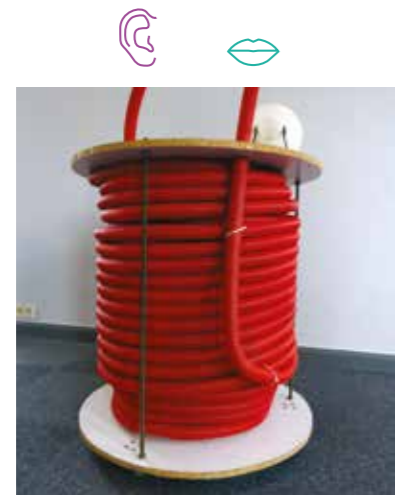
Ce tube de Rijke est un objet très utilisé par les ingénieurs et les physiciens, tant pour lutter contre certains bruits parasites dans les avions que pour modéliser le fonctionnement de certains types d'étoiles variables!

Il existe de très nombreux exemples d'objets qui se mettent en résonance dans notre vie courante. Certains sont ludiques ou artistiques : la balançoire de notre enfance, les instruments de musique. D'autres sont naturels : la résonance des marées ou la résonance orbitale en astronomie. Certains sont utiles comme la résonance dans les circuits électriques. D'autres peuvent provoquer des catastrophes : boulons dans les tuyères d'avion qui, en vibrant, finiraient pas se dévisser ; passerelles qui finiraient par casser, ou buildings qui, soumis à des séismes potentiels, finiraient par s'écrouler⁴.

⁴ Dans le but d'éviter ce genre de catastrophes, de gros blocs de béton, de plusieurs tonnes et prévus pour osciller de manière déphasée par rapport au bâtiment, peuvent être installés en haut de ces édifices.

Vitesse du son dans l'air

Il est possible d'estimer l'ordre de grandeur de la vitesse du son dans l'air en utilisant un dispositif extrêmement simple... mais un peu encombrant! Un tuyau de 100 m de long est enroulé sur lui-même et forme ainsi une grosse bobine. Pour déterminer la vitesse du son dans l'air il suffit d'émettre à une de ses extrémités un son bref – typiquement un « bouh » – et suffisamment puissant et d'estimer la durée nécessaire pour l'entendre, à l'autre extrémité.



La mesure peut être réalisée précisément avec un micro et un logiciel adapté, cette durée est de un tiers de seconde. Il est donc facile de déterminer la vitesse à laquelle se propage le son dans l'air : $v \cong 100/(1/3) = 300 \text{ m/s}$. Ce qui est le bon ordre de grandeur puisque $v_{\text{son ds l'air}} = 340 \text{ m/s}$.

Propagation du son dans l'hélium

Que se passe-t-il si le milieu, l'air, est remplacé par un autre gaz, par de l'hélium, par exemple ?

Il est bien connu qu'après avoir inhalé de l'hélium, notre voix est déformée et ressemble plus à une voix de « canard » qu'à une voix humaine, les sons étant en moyenne bien plus aigus.

Manifestement, le mécanisme qui génère la parole a subi une modification, mais à quel niveau ? L'inhalation de l'hélium n'a pas modifié la façon dont vibrent les cordes vocales. Pour rappel, ces cordes vocales ne sont pas du tout des cordes, mais bien des membranes qui vibrent de façon très complexe. Le son généré par ces membranes sous l'effet du passage de l'air produit une multitude de sons de fréquences diverses. Quoique l'on puisse dire ou chanter, dans l'air ou dans l'hélium, la gamme des fréquences émises n'est pas modifiée. Certains de ces sons seront ensuite amplifiés lors du passage dans le pharynx et la cavité buccale, qui constitue une caisse de résonance à géométrie variable. Suivant les sons que nous voulons choisir dans la gamme des sons émis, nous modifions la forme de la bouche, permettant ainsi de sélectionner tel ou tel type de sons.

Lorsque l'air est remplacé par de l'hélium, la géométrie de la bouche n'est pas modifiée : ce seront donc toujours les mêmes longueurs d'ondes qui seront amplifiées (la position des nœuds et des ventres n'a pas changé). Par contre, comme la vitesse du son est plus élevée dans l'hélium, une

longueur d'onde donnée correspond dans ce milieu à une fréquence plus élevée. Nos oreilles perçoivent donc des sons plus aigus!



Remarques concernant la sécurité de cette expérience :

- Il n'y a pas de réaction chimique entre l'hélium et l'organisme. Par contre, il faut se méfier de cette expérience : les poumons étant gonflés, aucune sensation de douleur n'est ressentie par l'expérimentateur. Pourtant, le corps n'est plus alimenté en oxygène, ce qui peut causer certains désagréments si l'expérience perdure un peu trop.

- Inhaler du hexafluorure de soufre permettrait d'obtenir cette fois une voix plus grave mais cette opération est dangereuse car ce gaz, plus dense que l'air, resterait bloqué dans le fond des poumons. Sans oublier que la fourniture de ce type de gaz n'exclut pas la présence d'impuretés ou de substances toxiques dans la bonbonne.

- Inhaler de l'hydrogène est tout à fait hors de question, ce gaz étant des plus dangereux!

Les lentilles acoustiques

L'expérience proposée ici est la suivante : un haut-parleur émet un son de fréquence d'environ 3000 Hz, ce son est capté par un micro relié à un oscilloscope ou à un quelconque dispositif capable de mesurer l'intensité du son perçu.

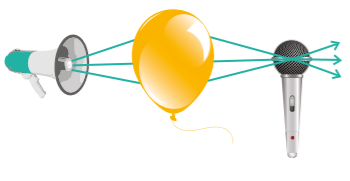
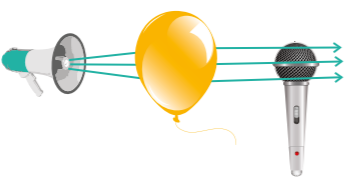
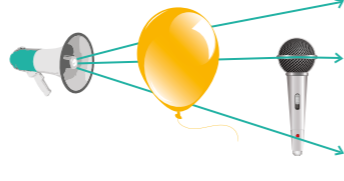
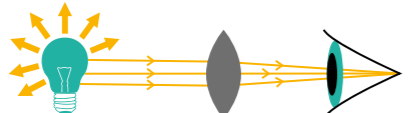
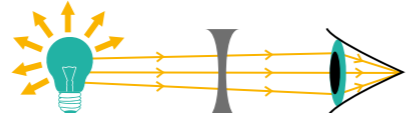
La première partie de l'expérience consiste à mesurer l'intensité du signal obtenu lorsque le son se propage uniquement dans l'air. Ensuite, un ballon rempli d'air est

intercalé entre le haut-parleur et le micro. Quelle que soit la position du micro, le signal relevé ne varie pratiquement pas par rapport à la situation sans ballon. On peut donc considérer que l'enveloppe du ballon n'a pas d'influence sur la propagation du son : le son se propage au travers du ballon comme s'il n'existait pas.

Ce ballon est ensuite remplacé par un ballon rempli de CO_2 . Curieusement, le son mesuré est désormais plus intense, alors que la source sonore n'a en rien été modifiée.

Par contre, lorsqu'un ballon rempli d'hélium est intercalé entre le haut-parleur et le micro, l'intensité du son est plus faible qu'avec le ballon rempli d'air.

Ces phénomènes s'expliquent par le fait que les vitesses de propagation du son étant différentes suivant le gaz traversé, la réfraction se produit différemment d'un gaz à l'autre.

Lentilles sonores		
Déplacement du son dans le CO_2	Déplacement du son dans l'air	Déplacement du son dans He
		
$v_{\text{son}} \cong 260 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_{\text{son}} \cong 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$v_{\text{son}} \cong 960 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Le ballon gonflé avec du CO_2 réfracte le son comme le ferait une lentille convergente lorsqu'elle réfracte la lumière.		Le ballon gonflé avec de l'He réfracte le son comme le ferait une lentille divergente lorsqu'elle réfracte la lumière.
Rappel : les lentilles optiques		
		

Il est possible de comparer⁵ l'influence de ces ballons remplis de gaz sur la propagation du son à celle qu'ont les lentilles optiques qui, suivant leur forme, font converger ou diverger un faisceau lumineux incident.

Le ballon rempli de CO_2 se comporte avec le son comme une lentille convergente : courbure semblable du ballon et de la lentille, vitesse de propagation du son inférieure dans le CO_2 et vitesse de propagation de la lumière inférieure dans la lentille optique. Le ballon rempli d'He se comporte comme une lentille divergente !

Propagation du son dans le vide

Le son constitue l'archétype même d'une onde mécanique : une perturbation d'un milieu, qui se propage dans ce milieu. Un son peut ainsi se propager dans différents types de gaz, dans des solides, etc. Que se passe-t-il si aucun milieu n'est présent ? Par définition, la notion de perturbation d'un milieu n'a pas de sens si aucun milieu n'est présent. Ce que permet de vérifier l'expérience...

On place un réveil, sonnerie en action, à l'intérieur d'une cloche à vide. Au départ, même si le son du réveil est atténué par l'épaisseur du verre, le son est toujours bien audible. Après avoir

réalisé le vide dans l'enceinte, plus aucun son ne parvient aux oreilles des observateurs... alors que le réveil demeure lui toujours bien visible ! Cette simple constatation laisse présager un comportement très particulier de la lumière.

Exit donc les fabuleuses et tonitruantes explosions de vaisseaux spatiaux de bon nombre de films de science-fiction ! Le son ne peut pas exister dans le vide.



⁵ Cette comparaison a ses limites puisque la forme du ballon ne correspond pas à la forme d'une lentille mince.

Le trombone

Un haut-parleur – en haut à gauche sur le schéma ci-dessous – a été fixé de manière à envoyer un son à l’intérieur d’un tuyau en plastique qui forme un circuit rectangulaire fermé. La partie basse du circuit peut coulisser (cf. partie hachurée).

Le haut-parleur est alimenté par un générateur (non représenté) qui lui permet d’émettre un son « monochromatique ».

Une partie du son émis se propage dans la branche supérieure du circuit – de longueur fixe –, tandis que l’autre partie passe par la branche inférieure, de longueur ajustable.

L’objectif de l’expérience est de mesurer l’intensité du son capté par le micro (en haut à droite sur le schéma) selon que l’on raccourcisse ou que l’on allonge le circuit. Ce micro relève l’intensité sonore totale issue de la superposition des sons provenant des deux branches du circuit. Le signal sonore est visualisé sur l’écran de l’oscilloscope.

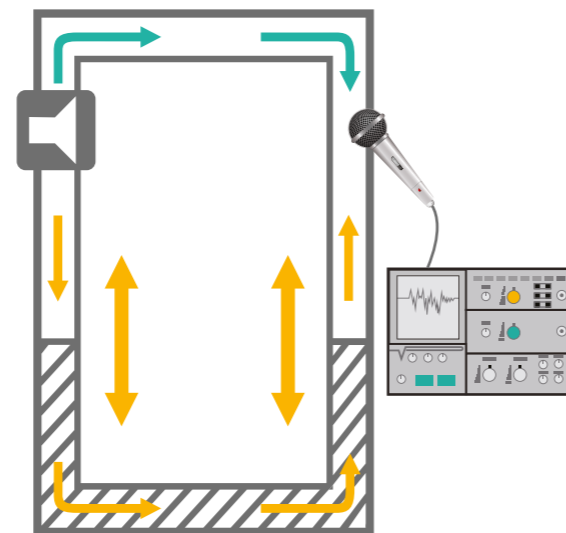
Contrairement à ce que pourrait laisser croire l’intuition, raccourcir ou allonger le trombone ne conduit pas à une simple diminution ou augmentation de l’intensité sonore mesurée. On observe en réalité, au fur et à mesure que le circuit est modifié, une succession de maxima et de minima sonores! Ce phénomène s’explique par la propriété que présentent deux ondes de même fréquence à pouvoir *interférer* entre elles.

Les deux ondes, qui ont commencé en phase leurs cheminements respectifs, parcourent dans le cir-

cuit des chemins différents. Lorsqu’elles se superposent au niveau du micro, elles sont en général déphasées l’une par rapport à l’autre. La valeur du déphasage dépend de la différence de chemins parcourus, que l’on contrôle en diminuant ou en allongeant le circuit.

Lorsque les deux ondes arrivent au niveau du micro en concordance de phase, la somme des deux ondes donne une onde d’amplitude double et donc d’intensité quadruple.

Par contre, lorsque les ondes se superposent alors qu’elles sont en opposition de phase, l’amplitude de l’onde résultante est nulle : il n’y a plus de son, le son a éteint le son! Dans la réalité des faits, on n’a jamais la disparition des deux sons incidents, mais un son nettement moins intense.



Interférence constructive	Interférence destructive
Ces dessins représentent l’évolution temporelle de l’élongation des deux ondes incidentes et de l’onde résultante détectée par le micro.	
À chaque instant, au niveau du micro, les deux ondes sont <i>en phase</i> . Leur superposition donne lieu à une <i>interférence constructive</i> .	À chaque instant, au niveau du micro, les deux ondes sont <i>en opposition de phases</i> . Leur superposition donne lieu à une <i>interférence destructive</i> .
La différence de chemins parcourus par les deux ondes incidentes vaut :	La différence de chemins parcourus par les deux ondes incidentes vaut :
$k \lambda$	$(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$

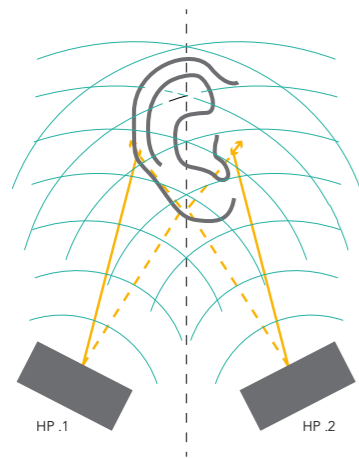
Il y a de l’interférence dans l’air!

Une autre manière de prendre conscience du phénomène d’interférence est de placer deux haut-parleurs à environ un mètre l’un de l’autre et de les alimenter par une même tension sinusoïdale, par exemple, 1000 Hz. Un observateur qui se déplace très légèrement – d’une vingtaine de centimètres seulement⁶ – entre les deux haut-parleurs peut détecter à l’oreille le phénomène d’interférence. À certains endroits, l’intensité du son apparaît plus faible (interférences destructives, les deux ondes se superposent alors qu’elles sont en opposition de phase) et à d’autres le son semble plus fort (interférences constructives, les deux ondes se renforcent, car elles se superposent en phase).

Que se passe-t-il si les haut-parleurs envoient un morceau de musique ?

⁶ Une fréquence de 1000 Hz correspond à une longueur d’onde λ de 34 cm (si $f=1000$ Hz, $v = \lambda f$ donc $\lambda = 340/1000 = 0,34$ m = 34 cm). Deux minima ou deux maxima d’interférence sont donc séparés de : $\lambda / 2 = 17$ cm.

On peut imaginer que des interférences se produisent pour certaines fréquences, mais ce phénomène est imperceptible car noyé dans la complexité spectrale d'un morceau de musique (les interférences ne se produisent qu'entre signaux de même fréquence!). En outre, le principe même de la stéréo est d'envoyer simultanément des signaux sonores de fréquences différentes à partir de haut-parleurs différents.



Une belle question abordée lors de la visite est la suivante : pourquoi les fréquences d'une même station de radio diffèrent-elles selon les régions ? Pourquoi la fréquence de PureFM à Bruxelles n'est-elle pas la même que la fréquence utilisée à Mons ?

Si les antennes de Mons et de Bruxelles émettaient un seul et même signal, l'automobiliste en itinérance entre ces deux villes passerait successivement par des zones où les deux ondes interfèrent destructivement et des zones où les ondes

interfèrent constructivement... de quoi justifier l'expression « il y a de l'interférence ». Pour éviter ce phénomène désagréable qui nuit à la qualité de la réception, les antennes d'une même station de radio émettent donc des signaux de fréquences différentes, rendant impossible toute interférence. Ceci explique pourquoi la plupart des autoradios sont équipés d'une fonction Radio Data System qui permet de continuer à capter une même station, alors que la fréquence du signal reçu change suivant les régions.

Ces phénomènes d'interférences sonores destructives peuvent par contre être très utiles. Ainsi des techniques sophistiquées permettent de produire des anti-sons qui annihilent – ou tout au moins réduisent – les nuisances sonores présentes comme, par exemple, dans certaines zones d'aéroports ou dans le tunnel des scanners par résonance magnétique.

L'effet Doppler

Nous l'avons déjà tous entendu, la fréquence d'un signal sonore diffère selon que la source s'approche ou s'éloigne de nous.

L'expérience proposée ici consiste à faire glisser rapidement une source sonore sur des fils tendus entre deux expérimentateurs, ou comment donner une seconde vie à un célèbre jeu de plage!

Les élèves se répartissent en deux groupes. Chaque groupe s'installe derrière l'un des deux expérimentateurs.

Après avoir pris soin d'écouter attentivement la fré-

quence de l'émetteur au repos, les élèves écoutent cette fois le son émis par la source en mouvement. Ils peuvent percevoir alors un son de fréquence différente de la fréquence de la source au repos. De plus, la fréquence perçue n'est pas la même selon que la source s'éloigne ou se rapproche.

Lorsque la source s'éloigne du lieu de perception, le son perçu est plus grave que le son émis par la source au repos ; la fréquence est alors plus petite que la fréquence au repos. La fréquence perçue ne dépend que de la fréquence du signal émis et de la vitesse d'éloignement de la source par rapport à l'observateur :

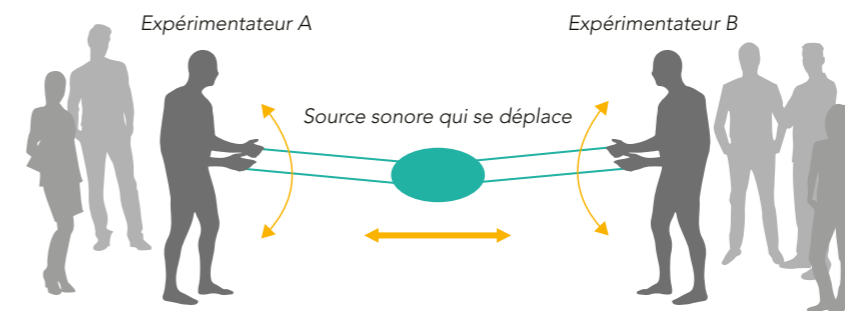
$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise source au repos}} \times v_{\text{son}} / (v_{\text{son}} + v_{\text{source}})$$

Par contre, lorsque la source se rapproche du lieu de perception, le son perçu est plus aigu que le son émis ; la fréquence perçue est alors supérieure à la fréquence émise :

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise source au repos}} \times v_{\text{son}} / (v_{\text{son}} - v_{\text{source}})$$

Hippolyte Fizeau découvre que cet effet – connu sous le nom de Doppler-Fizeau ou Doppler – s'applique aussi aux sources lumineuses. Le spectre lumineux recueilli est alors décalé vers le rouge si la source s'éloigne, vers le bleu si la source se rapproche.

L'effet Doppler est mis à profit dans de nombreuses applications lorsque l'on désire mesurer la vitesse d'un objet ou d'une substance : mesure de la vitesse des voitures grâce aux radars de contrôle routier, études de la circulation sanguine (débit, fuite, rétrécissement...) dans les vaisseaux, mouvements des parois cardiaques, étude de la rotation des planètes et des étoiles, détection des planètes extrasolaires, etc.



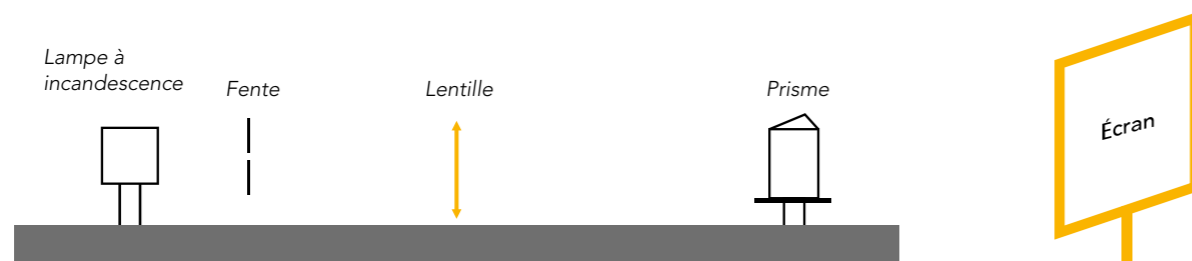


Expérience des sept miroirs

LA LUMIÈRE

Décomposition de la lumière émise par une lampe à incandescence – Spectre d'émission

Commençons par une expérience classique de l'optique géométrique qui nécessite peu de matériel : une lampe à incandescence joue le rôle du Soleil, une fente isole un fin faisceau longiligne (plus apte à être dispersé finement qu'un large faisceau circulaire), une lentille convergente rend le faisceau parallèle et un prisme disperse le faisceau lumineux. La tache lumineuse obtenue sur l'écran n'est plus une tache « blanche » comme celle produite par la lampe mais un continuum de couleurs, qui va du rouge au violet en passant par l'orange, le vert, le bleu... Il est intéressant de remarquer que le rouge est la couleur la moins déviée et le violet la plus déviée.⁷



La lumière qui vient du Soleil est dite *blanche*. Après avoir traversé un prisme, elle révèle aussi sa véritable nature : son *spectre* est continu, elle est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel ; notre œil distingue dans ce spectre les couleurs allant du rouge au violet. La gamme de longueurs d'onde auxquelles notre œil est sensible s'étend de 400 à 700 nm environ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).



Décomposition et recombinaison de la lumière blanche, spectres continus ou discontinus, interférences lumineuses, fluorescence, phosphorescence, polarisation : à la découverte des secrets les plus intimes de la lumière.

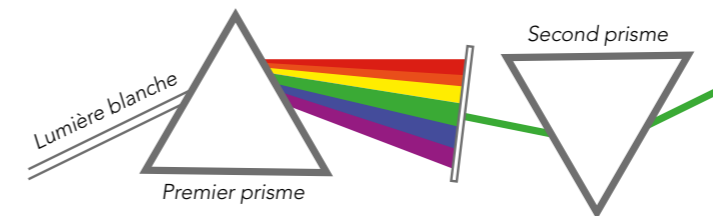
Le spectre de la lumière émise par une lampe à filament est aussi continu. C'est le propre du spectre d'un corps dense chauffé. Ce spectre se rapproche du spectre théorique du corps noir, dont les caractéristiques ne dépendent que de la température.

On parle dans tous ces cas d'un spectre d'émission : les zones et les raies lumineuses présentes dans le spectre correspondent à de la lumière émise par la source.

Les différentes couleurs du spectre sont simples

Que se passe-t-il si une seule composante de la lumière blanche dispersée par un prisme est à son tour envoyée sur un second prisme ?

L'expérience montre qu'à la sortie du second prisme cette composante est à nouveau déviée mais n'est ni dispersée - la lumière verte n'est pas dispersée en davantage de couleurs - ni modifiée - la couleur verte ressort toujours verte et cela quelles que soient la position et l'orientation du deuxième prisme.



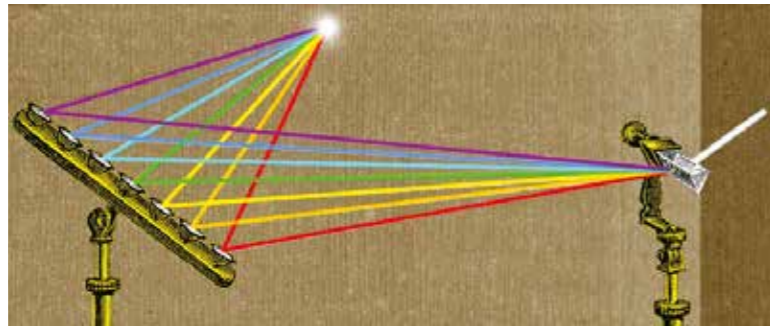
Cette expérience a été réalisée la première fois par Newton qui l'a baptisée *l'expérience cruciale*, car elle lui a permis de réellement comprendre la nature de la dispersion et de la réfraction. Newton comprend que chaque couleur est caractérisée par sa propre « réfrangibilité », que le Soleil émet des rayons de différentes réfrangibilités et qu'une fois dispersés, les rayons de couleurs obtenus constituent des rayons de « lumière simple ». Newton qualifie ces trois constatations de *propositions immortelles*. Cette façon de voir la lumière permet d'une certaine manière, pour la première fois, d'associer un nombre à chaque couleur, un indice de réfraction (dépendant du milieu traversé). Rappelons que contrairement à l'idée reçue, il y a bien plus que sept couleurs dans l'arc-en-ciel, puisque le Soleil nous envoie tout un continuum de couleurs. Il semble que ce soit aussi Newton qui ait contribué à associer ce nombre 7 aux couleurs de l'arc-en-ciel.

⁷ Il est aussi intéressant de remarquer que la déviation se fait toujours vers la base du prisme.

La recomposition de la lumière blanche à partir de sept de ses composantes

Est-il possible de faire l'inverse, reconstituer une lumière blanche à partir de ses différentes composantes ? Si la manipulation est très parlante, sa mise au point demande une bonne dose de patience.

Un prisme disperse la lumière blanche issue d'une source puissante (ici la lampe d'un projecteur dia).



Il s'agit alors de renvoyer, précisément au même endroit d'un écran, via des petits miroirs convenablement orientés un maximum de couleurs différentes (ici le dispositif présente 7 miroirs). Comme le montre l'expérience, la somme de toutes ces couleurs produit une tache blanche sur l'écran.



Réflexion de la lumière sur les miroirs.

Spectres discrets d'émission

Tous les spectres d'émission sont-ils continus ?

L'expérience est réalisée grâce à des tubes de Plücker, tubes en verre qui renferment du gaz à basse pression.



La dispersion de la lumière peut être réalisée soit via un prisme, soit via un réseau de diffraction. Il est ainsi possible d'observer le spectre de l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le néon, etc.

Le spectre correspondant à la lumière émise par un gaz ionisé (*plasma*, chaud ou froid), ne présente pas de continuum, mais bien un nombre fini de couleurs bien distinctes, des raies. Chaque raie constitue l'image de la fente d'entrée dans une couleur bien précise. Ce spectre non continu est qualifié de *discret*.

Chaque gaz est caractérisé par un spectre caractéristique, son « code-barres » en quelque sorte. La découverte de cette propriété a révolutionné la science et les techniques, car elle permet d'analyser à distance la composition de toute une série de milieux !

Quelques spectres d'émission :

Néon



Hydrogène

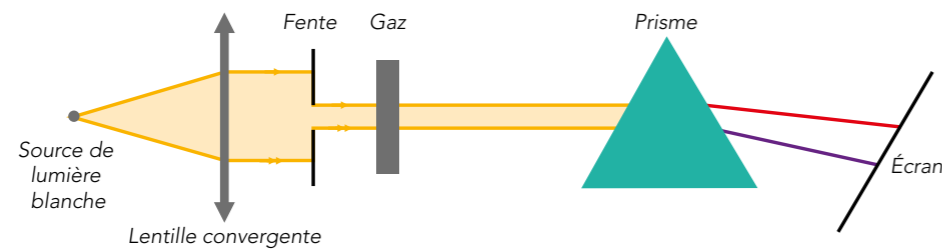


Hélium



Spectres d'absorption

Une expérience riche en enseignement et facile à réaliser consiste à disperser la lumière du jour (émise par le Soleil).

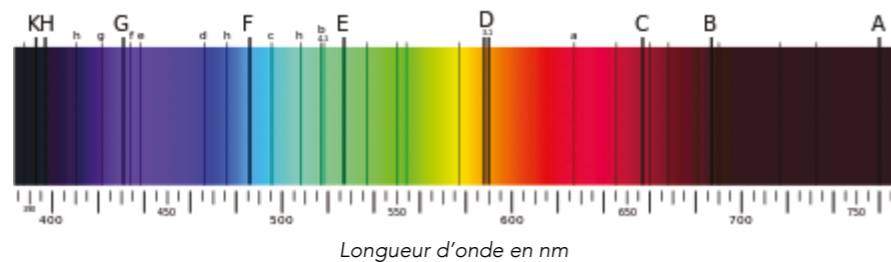


Le spectre recueilli est continu mais, observé avec un spectroscopie de qualité, ce spectre présente aussi toute une série des raies noires superposées au spectre continu, les raies de Fraunhofer!

Ces raies noires signifient que certaines couleurs du spectre continu ont disparu... Un milieu a dû absorber ces lumières spécifiques.

Le développement de la spectroscopie a permis de comprendre que si un gaz peut dans certaines conditions émettre un spectre discret, il peut aussi, s'il est éclairé par de la lumière présentant un spectre continu, absorber les mêmes couleurs que celles présentes dans son spectre d'émission. On peut ainsi obtenir un spectre d'absorption.

La simple inspection du spectre solaire permet donc de comprendre que notre étoile est constituée d'un cœur dense, chaud, à l'origine du spectre continu, enveloppé d'une atmosphère ténue, qui absorbe certaines des couleurs émises par le Soleil, expliquant ainsi la présence ces raies d'absorption.



Quelques spectres d'absorption :
Néon



Hydrogène



Hélium

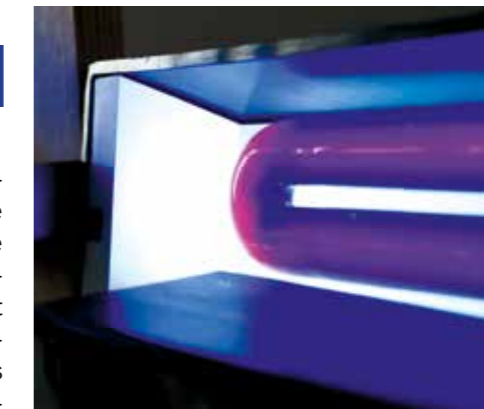


Peut-il se passer un phénomène particulier lorsque l'on éclaire certains objets ou certaines matières avec une lumière ultraviolette ?

Si l'ultraviolet n'est pas directement visible par nos yeux, ses effets ne manquent en effet pas de se manifester dans notre quotidien!

De la lumière invisible ?

Peu après 1800, William Hershel découvre qu'un thermomètre déplacé le long du spectre solaire, du violet vers le bleu, s'échauffe progressivement, phénomène qui venait aussi d'être découvert par l'abbé Rochon. Mais il découvre surtout que l'échauffement se poursuit après le rouge : le rayonnement infrarouge venait d'être découvert. Hippolyte Fizeau et d'autres montreront que ce rayonnement possède exactement les mêmes propriétés que celles de la lumière visible.



Une autre lumière invisible est aussi découverte à la même période, mais à l'autre extrémité du spectre solaire : Johan Ritter constate l'existence de « rayons chimiques », capables de noircir des sels de nitrate d'argent. Ces rayons ont été rebaptisés depuis lumière ultraviolette.

Quelques belles expériences de fluorescence peuvent ainsi être réalisées assez facilement. Il suffit d'utiliser une lampe UV (comme celles utilisées par les philatélistes, les banques, etc.) et d'éclairer, par exemple, un soda bien connu, le Schweppes Tonic, qui contient de la quinine. Éclairé en UV, le soda émet alors une fantomatique lumière bleue, très intense. On dit que ce liquide « fluoresce » dans le bleu.

Éclairées en lumière ultraviolette, certaines substances réagissent donc de manière spectaculaire, en réémettant immédiatement de la lumière visible – on parle de fluorescence. De la lumière de haute fréquence et donc de plus grande énergie, est convertie en lumière de plus basse fréquence et d'énergie moindre.



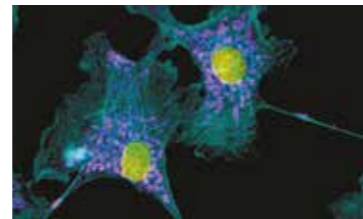
Une autre substance qui fluoresce de manière spectaculaire est la chlorophylle, à l'origine de la couleur verte des plantes. On peut l'extraire relativement facilement des feuilles d'épinards.

Si la chlorophylle est verte lorsqu'elle est éclairée par de la lumière blanche, elle devient par contre rose/bordeaux lorsqu'elle est éclairée en UV!



Des objets en verre d'urane – du verre dans lequel ont été injectés des oxydes d'uranium pour le teinter en vert – présentent également une magnifique fluorescence dans le vert.

Ce phénomène de fluorescence est aussi utilisé en microscopie (*microscopie par fluorescence*). Ainsi, les biologistes ciblent l'un ou l'autre élément des cellules (noyau, éléments du cytosquelette...) avec un marqueur fluorescent. L'échantillon est ensuite observé au microscope, sous lumière UV. La fluorescence permet alors de repérer immédiatement les zones recherchées!



La fluorescence est aussi à l'origine des spectaculaires couleurs des coraux : les coraux de faible profondeur possèdent des pigments qui les protègent

du rayonnement ultraviolet en convertissant cette lumière en lumière visible. Non éclairé par une lumière riche en UV, ce corail ne présenterait que des couleurs ternes.

Dès que la source d'ultraviolet est coupée, la fluorescence disparaît. Par contre, d'autres substances continuent d'émettre durant un certain temps ou avec retard – on parle alors de *phosphorescence*. Les petites étoiles en plastique adhésif dont on décore les murs ou les plafonds de chambres d'enfants ou encore les aiguilles de certaines montres ou réveils émettent de la lumière sous cette forme.

Et le « tube néon » ?

Si l'on observe à l'aide d'un petit spectroscopie un « tube néon » allumé, on constate que le spectre n'est pas celui du gaz néon : certains tubes montrent un spectre discret superposé à un spectre continu. Le premier spectre est celui des vapeurs ionisées de mercure enfermées dans le tube, qui émettent aussi de l'ultraviolet ; le second est celui de l'ensemble des couleurs réémises par fluorescence par la poudre blanche qui recouvre le tube, après absorption de l'UV. La fluorescence est donc utilisée pour convertir de la lumière présentant des longueurs d'onde non intéressantes, mais très énergétiques, en lumière plus agréable pour l'œil humain. L'objectif des développeurs d'éclairage étant de produire de la lumière qui se rapproche le plus de la lumière blanche. Ce type d'éclairage porte donc bien son nom officiel de tube fluorescent! L'appellation « tube néon » remonte à l'origine de l'éclairage par tube, où du néon était utilisé.

Les guides d'ondes

Le principe de fonctionnement du guide d'ondes est basé sur le phénomène de réflexion totale.

Un faisceau lumineux qui atteint la surface de séparation entre deux milieux différents se scinde en deux autres faisceaux : l'un se réfléchit sur cette surface, l'autre se réfracte en la traversant, c'est le propre de toutes les ondes. Il est cependant possible, dans certains cas, d'optimiser la réflexion afin de confiner la lumière dans le milieu et ainsi la guider exactement jusqu'à l'endroit où l'on souhaite l'amener. Cela est possible si la lumière arrive sous une incidence suffisamment grande à la surface de séparation entre un milieu plus réfringent et un milieu moins réfringent : dans ce cas la lumière ne subit aucune réfraction mais uniquement de la réflexion.

Si on envoie de la lumière dans un milieu lui-même plongé dans un milieu moins réfringent, alors, suite aux réflexions totales successives, cette lumière se déplace, à l'intérieur du premier milieu, qualifié de guide d'ondes. C'est le principe de la fibre optique.



Les applications des fibres optiques sont nombreuses :

- Les fibres optiques sont utilisées dans les télécommunications pour la transmission d'informations téléphoniques, d'images ou de données. Une fibre optique peut transporter jusqu'à 300 000 communications simultanées, avec énormément d'avantages par rapport aux traditionnels câbles électriques. Ces fibres sont utilisées pour les réseaux à haut débit avec une atténuation très faible.

- Les fibres optiques sont aussi utilisées en médecine pour diagnostiquer des problèmes de

santé. L'endoscope est constitué d'une première fibre optique qui transporte de la lumière, cette lumière est réfléchiée par les organes in situ. Cette lumière réfléchiée est ensuite captée par une autre fibre optique qui la transporte jusqu'au système d'imagerie vidéo.

- Elles permettent aussi de traiter certaines maladies : la lumière transportée est alors celle d'un faisceau laser qui, par effet thermique, peut pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine... Ces interventions sont peu invasives et ne nécessitent plus d'anesthésie générale.

- Les fibres optiques sont également utilisées pour effectuer des mesures : soumises à des variations de pression ou de températures et des contraintes, ces fibres optiques vont se déformer et donc propager la lumière différemment. Elles constituent ainsi des capteurs petits, précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

- Les fibres optiques sont largement employées aussi dans le domaine de l'éclairage : balisage, décoration, signalisation routière...

Polarisation de la lumière

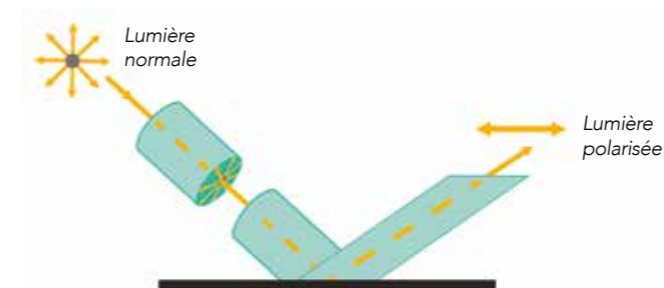
La polarisation de la lumière – et des ondes électromagnétiques en général – trouve des applications dans de nombreux domaines comme, par exemple, le cinéma en relief, la microscopie en lumière polarisée ou encore la *photoélasticité* : la lumière polarisée permet de visualiser assez facilement les zones de contraintes d'un matériau transparent !

Qu'est que la polarisation ?

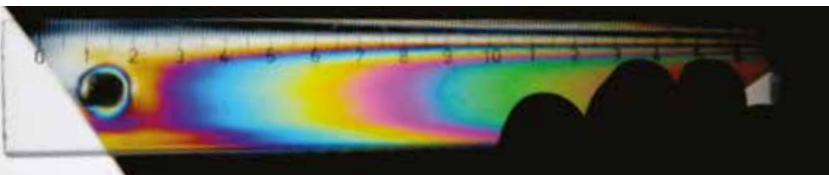
La lumière peut être vue comme une onde transversale (définie par une longueur d'onde, une fréquence d'oscillation et une vitesse de déplacement dépendant du milieu) caractérisée par un paramètre supplémentaire : la direction de son oscillation, appelée direction de polarisation. Une précision s'impose dès à présent : une onde lumineuse peut se voir comme la propagation de deux vecteurs oscillant perpendiculairement l'un par rapport à l'autre : le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} . Si on parle de polarisation, il faut donc spécifier de quel champ il s'agit. En général, dans la suite du texte, il s'agira du champ électrique \vec{E} .

La lumière qui provient directement du Soleil n'est pas polarisée, on y retrouve toutes les directions d'oscillation possibles. Par contre, dès qu'elle subit un processus de réflexion ou de diffusion, elle se polarise, partiellement ou totalement suivant les conditions. C'est le cas de la lumière réfléchiée par l'eau d'un lac, la neige, la carrosserie d'une voiture...

Il est difficile de dessiner les champs \vec{E} et \vec{B} dans toutes les directions. Le schéma ci-dessous représente, dans la partie de gauche, une onde plane non polarisée (oscillation de \vec{E} , par exemple) qui, après réflexion sur la surface horizontale, est polarisée horizontalement :

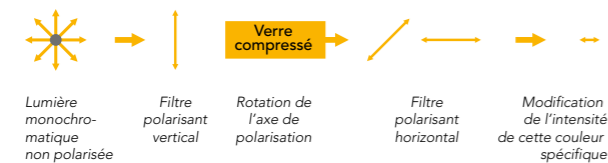


Pour étudier les contraintes auxquelles peut être soumis un objet transparent (ci-dessous, une latte trouée), il suffit d'éclairer cet objet avec une lumière polarisée (ici, un écran LCD) et de l'observer à travers un analyseur (un filtre qui ne laisse passer la lumière polarisée que lorsque la direction de polarisation de celle-ci est parallèle au polariseur).



On voit alors apparaître une étrange cartographie colorée des contraintes ! Dans le cas de la latte, on constate que le forage du trou a modifié la structure du matériau aux alentours. En fait, une zone sous contraintes mécaniques fait tourner la direction de polarisation de la lumière incidente, différemment suivant l'intensité et le type de contrainte mais aussi suivant la longueur d'onde de la lumière. Vues au travers de l'analyseur, certaines couleurs disparaissent : celles dont la direction de polarisation n'est plus compatible avec la direction de l'analyseur.

Application concrète : un opticien qui fabrique des lunettes est obligé d'insérer le verre dans le cercle métallique ou de le percer, pour le fixer à la monture. Ce verre, qui subit donc à certains endroits des modifications relativement importantes, se fragilise. Pour vérifier leur qualité, ces verres sont analysés de la sorte.



Le phénomène de photoélasticité s'invite parfois durant les déplacements en avion : en observant le paysage au travers du hublot avec des

lunettes polarisantes, on peut voir apparaître ses zones de contraintes ! Ce phénomène se produit lorsque le regard porte en direction d'un cours d'eau, d'un lac ou de la mer, sous certaines conditions. La lumière réfléchiée par ces plans d'eau peut parfois être fortement polarisée et permet de sonder le hublot de l'avion ; les lunettes polarisantes constituent alors l'analyseur !

Plus simplement, lorsque l'on regarde certains phares de voitures récents au travers de lunettes polarisantes, on voit aussi les contraintes apparaître.

Interférences lumineuses – Expérience de Michelson-Morley

Cette expérience, réalisée en 1881, constitue l'une des expériences les plus importantes jamais réalisées en physique. Albert Michelson – prix Nobel en 1907 – l'imagine pour prouver l'existence de l'éther, ce milieu hypothétique qui devait emplir tout l'Univers et qui était considéré comme le support nécessaire et indispensable à la propagation de la lumière. L'éther était aussi considéré par les physiciens comme le référentiel absolu.

Contre toute attente, l'expérience de Michelson montre que la réalité est tout autre : l'éther n'existe pas, la lumière n'a besoin d'aucun support pour se déplacer, on perd un candidat au référentiel absolu. Au cœur de cette expérience, le célèbre interféromètre qui permet, comme son nom l'indique, de faire interférer deux faisceaux lumineux ayant parcouru des chemins légèrement différents.

Dans le cadre de la visite d'*Histoires d'Ondes*, les élèves peuvent découvrir un interféromètre. L'ob-

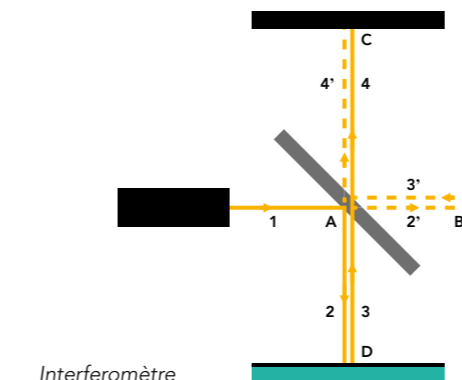
jectif n'est pas de l'utiliser pour reproduire l'expérience historique de Michelson et Morley, mais bien de s'en servir pour montrer, de façon très visuelle, que le phénomène d'interférence est aussi d'application pour les ondes lumineuses.

Le fonctionnement de l'interféromètre est le suivant : la lumière (1) fournie par une source cohérente (ici un laser, à gauche sur le schéma) est séparée (en A) par la lame semi-transparente en deux faisceaux. Une partie (2) du faisceau incident se réfléchit sur cette même lame, arrive sur un miroir (en D), s'y réfléchit (3), traverse (4) la lame et forme un petit spot lumineux sur l'écran (en C). Simultanément, la deuxième partie du faisceau incident traverse (2') la lame, arrive sur le deuxième miroir (en B), s'y réfléchit (3'), se réfléchit en-

suite sur la lame (4') et forme à son tour un spot sur l'écran (aussi en C).

La superposition des spots lumineux formés par chacun des faisceaux (4) et (4') fait apparaître une figure d'interférences (succession de zones sombres et de zones lumineuses) dont la structure varie en fonction de la différence de chemins parcourus par ces deux faisceaux. Il est possible de modifier finement cette différence de chemins en déplaçant l'un des deux miroirs.

L'analogie avec les interférences sonores réalisées avec le trombone est aisée : les franges brillantes correspondent aux renforcements du son, là où se produisent des interférences constructives ; les franges sombres correspondent aux diminutions du son résultant, là où se produisent les interférences destructives.



Interferomètre



La ligne de Lecher

EXPÉRIENCES DE HERTZ

Ondes radio - Ligne de Lecher

L'objectif est ici de reproduire quelques-unes des expériences de Hertz. Rappelons qu'en 1886, Heinrich Rudolf Hertz est le premier à produire artificiellement une onde électromagnétique (radio) à des fins purement pédagogiques. La légende raconte qu'un de ses élèves lui aurait demandé si ce type d'ondes pourrait être d'une quelconque utilité. Hertz lui aurait répondu que non, que l'intérêt de l'expérience était de prouver le bien-fondé de la théorie de Maxwell!

L'émetteur permet de faire osciller 163 millions de fois par seconde les électrons de la tige métallique qui fait office d'antenne : les électrons de l'antenne étant accélérés, ils émettent une onde électromagnétique de fréquence 163 MHz et de longueur d'onde λ d'environ 1,84 m (puisque $\lambda = c/f$, où c est la vitesse de la lumière).

Les ondes électromagnétiques de cette fréquence ne sont pas décelables par le corps humain. Moyennant l'utilisation de détecteurs adaptés, il est toutefois possible non seulement de les détecter, mais aussi d'en étudier les propriétés essentielles. Il devient alors possible de comprendre notamment l'origine de l'appellation d'onde électromagnétique, en détectant les composantes électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} de l'onde radio.

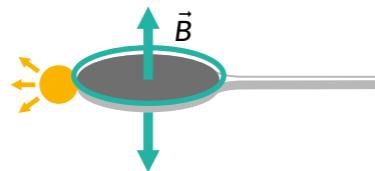
Une antenne rectiligne de même longueur que celle de l'antenne émettrice, reliée à un circuit électrique RLC muni d'une petite ampoule, permet d'étudier les propriétés électriques de l'onde radio.



Si l'antenne réceptrice est orientée parallèlement, même à quelques mètres, de l'antenne émettrice, l'ampoule s'allume... alors qu'elle n'est reliée à aucun générateur électrique! L'onde radio transporte donc de l'énergie, c'est le propre de toute onde et cette énergie met en mouvement les électrons qui se trouvent dans le matériau de l'antenne réceptrice.

Lorsque l'antenne réceptrice est orientée perpendiculairement à l'antenne d'émission, l'ampoule ne s'allume pas. Conclusion : si c'est bien le champ électrique emporté par l'onde radio qui met en mouvement les électrons de l'antenne de réception ($\vec{F} = q\vec{E}$), cela signifie que le champ électrique de l'onde radio est polarisé parallèlement à l'antenne émettrice.

Il est aussi possible de déceler la présence de la composante magnétique de ces ondes électromagnétiques. Il suffit pour cela d'utiliser comme détecteur une spire circulaire conductrice dotée elle aussi d'une petite ampoule.



À la fin du 19^e s., le physicien allemand H. R. Hertz réalise des expériences spectaculaires qui illustrent le bien-fondé de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell. *Histoires d'Ondes* permet de revisiter ces expériences fondamentales et ô combien surprenantes.

Comme cette spire n'est connectée à aucun générateur, la seule possibilité de voir l'ampoule s'allumer serait que la spire soit traversée par une variation de flux de champ magnétique. C'est le cas lorsque l'expérience est réalisée dans le proche voisinage de l'antenne émettrice. L'expérience montre que la composante magnétique est perpendiculaire à la composante électrique. Toutefois, le champ magnétique \vec{B} devient beaucoup plus difficilement détectable avec le matériel utilisé lorsque l'on éloigne l'antenne réceptrice.

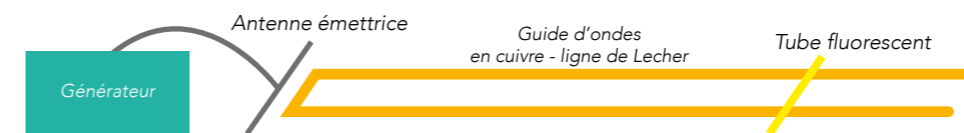
D'autres expériences peuvent aussi être menées avec ce matériel : réflexion, diffraction, réfraction, interférences, etc. L'onde radio présente toutes les propriétés des ondes classiques... si ce n'est le fait qu'elle ne nécessite aucun milieu pour se déplacer!

Le volet le plus spectaculaire des expériences de Hertz est celui qui consiste à créer une onde radio stationnaire via l'utilisation d'une ligne de Lecher.

Ce dispositif est constitué d'une ligne de cuivre en forme de U dont la longueur totale des bras du U est beaucoup plus grande que sa largeur. Cette longueur doit être choisie comme un multiple impair de la demi-longueur d'onde. La longueur de la ligne utilisée lors des démonstrations d'*Histoires d'Ondes* est de 4,60 m soit $5\lambda/2$.

La largeur du U, aussi petite soit-elle, est la clé de l'expérience, puisqu'elle est orientée parallèlement à l'antenne d'émission et donc à la direction d'oscillation du champ électrique. Ce champ exerce dès lors une force sur ses électrons, qui vont osciller avec une fréquence de 163 MHz, poussant tous les autres électrons de la ligne à osciller à la même fréquence. La longueur du système étant judicieusement choisie, on assiste à l'établissement d'une onde stationnaire de courant.

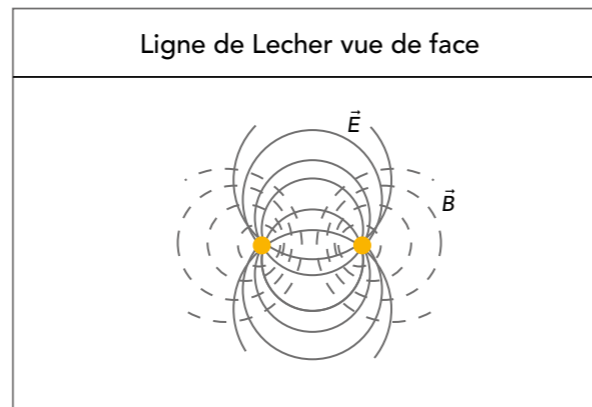
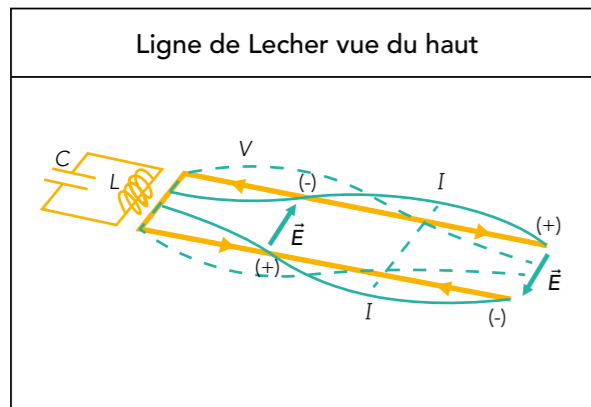
Un petit détecteur de champ électrique (une petite tige métallique surmontée d'une petite lampe) permet de constater qu'il existe à chaque instant une différence de potentiel entre les deux branches parallèles du U avec, à certains endroits, des ventres de champ électrique, à d'autres des nœuds.



Une façon très spectaculaire de les visualiser est de s'approcher de la ligne de Lecher en tenant dans sa main un tube fluorescent. Près d'un ventre de champ électrique, le tube s'allume comme par enchantement, alors qu'il n'est connecté à aucune source de tension!



Placé le long de la ligne, un grand tube fluorescent permet de visualiser deux nœuds consécutifs. La spire de cuivre permet également de détecter la présence de nœuds et de ventres du champ magnétique (chaque bras étant parcouru par un courant, il est entouré par des lignes de champ magnétique). Curiosité : les composantes électrique et magnétique sont en quadrature de phase : les ventres de l'une correspondent aux nœuds de l'autre.



HISTOIRES D'ONDES

HISTOIRES D'ONDES

Université de Mons,
SciTechLab
Rue de Houdain, 9
7000 Mons

Les expériences d'*Histoires d'Ondes* sont le fruit d'un travail collectif porté par plusieurs générations de physiciens désireux de partager leur passion avec les plus jeunes.

EXPOSITION

COMMISSAIRE
Soizic Mélin

COMMISSAIRE ADJOINT
Francesco Lo Bue

ASPECTS SCIENTIFIQUES
ET DIDACTIQUES
Pierre Gillis
Yves Gossuin
Francesco Lo Bue
Soizic Mélin

ASPECTS TECHNIQUES
Christophe Saussez

ANIMATEURS
Maxime Duménil
Yves Gossuin
Corentin Guyot
Daniel Henrard
Aline Hocq
Gwendolyn Lacroix
Francesco Lo Bue
Soizic Mélin
Claude Semay
Lam Vuong Quoc
Dominique Wynsberghe

LIVRET

RÉDACTION
Pierre Gillis
Jean-Claude Janssens
Francesco Lo Bue
Soizic Mélin
Dominique Wynsberghe

CONCEPTION GRAPHIQUE
& PHOTOGRAPHIE
Camille Bauvois

SOUTIEN FINANCIER
Direction générale
opérationnelle de
l'Économie, de
l'Emploi et de la
Recherche (DGO6) –
Service public de
Wallonie (SPW)
Université de Mons
(UMONS)

ÉDITEUR RESPONSABLE
Calogero Conti, Recteur
Université de Mons
20, place du Parc
7000 Mons
www.umons.ac.be

UMONS
Université de Mons

Sci Tech²
SCIENCE ET TECHNIQUE À L'UMONS



SCITECH²

Centre de diffusion des Sciences
et Techniques de l'UMONS

Tél : +32 65 37 38 41
scitech2@umons.ac.be

