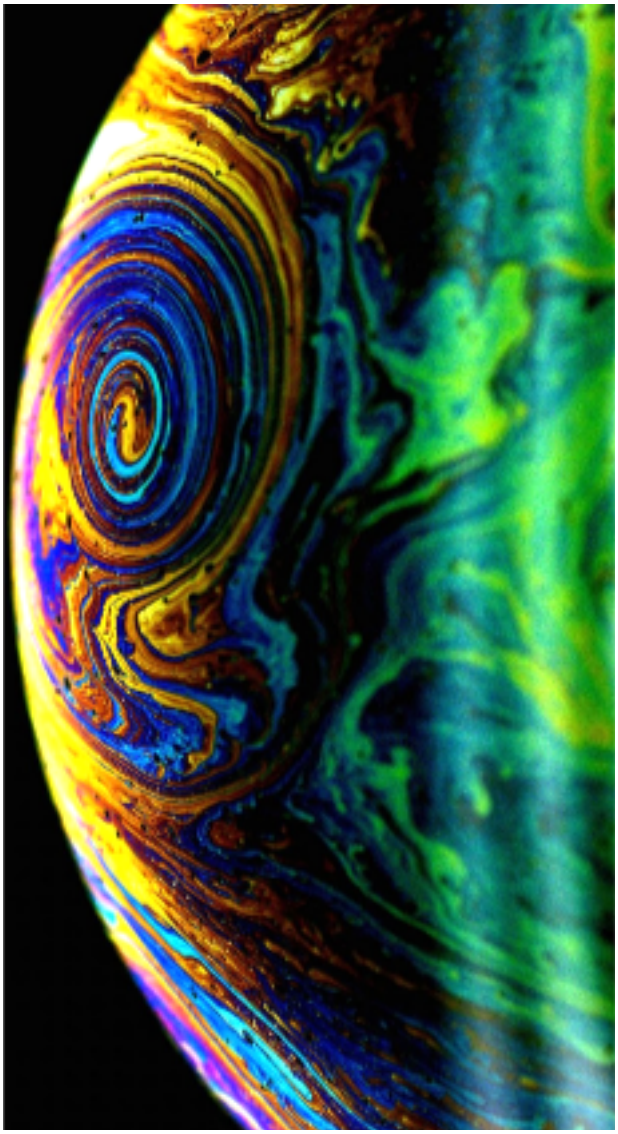
Brossier Ropital Anna
Pouilly Manon
Viallon Léa

Écouter avec les yeux

Projet du Lycée Germaine Tillion (Sain Bel 69210)



Comment une onde sonore invisible à l'oeil nu peut-elle se matérialiser quand elle traverse un film savonneux ?

Résumé

Ecouter de la musique nous semble naturel mais voir de la musique est beaucoup moins évident. Un simple film de savon nous permet de visualiser les sons.

En effet, des figures spectaculaires se forment sur la bulle de savon lorsqu'elle est soumise à une onde sonore. Ainsi, à travers ces différentes formes hautes en couleur il est également possible de discerner la musique d'un autre point de vu, à travers nos yeux et non notre ouïe.

A partir de différents articles et de thèses, nous avons réalisé un dispositif composé d'un haut-parleur et d'un tube au bout duquel est déposé un film de savon. A certaines fréquences, ils se forment de magnifiques structures dynamiques comme des vortex et des irisations. Ces phénomènes sont expliqués par la résonance du tube choisi mais aussi les interférences lumineuses.

Pourquoi ne pas imaginer un système de tubes permettant d'accorder une guitare… ? Ce dispositif ne permet il pas également de « voir » la musique pour les malentendants grâce aux mouvements se formant sur le film savonneux... ?

Introduction

Baudelaire, dans son poème “Correspondances” tiré des *Fleurs du Mal* écrivait *“Les couleurs et les sons se répondent”*. Or, bien que ces synesthésies puissent paraître de prime abord absurdes ou poétiques, elles sont pourtant véridiques. C’est ce que nous allons tâcher de démontrer grâce à un film savonneux qui réagit à la musique. Tout cela est uniquement dû à des procédés physiques comme la propagation acoustique, les interférences lumineuses et les propriétés statiques et dynamiques de la bulle de savon, qui ne sont, en aucun cas aléatoires.

Nous allons donc tenter de révéler comment une onde sonore invisible à l’oeil nu peut se matérialiser quand elle traverse un film savonneux.

Tout d’abord, nous allons observer comment les mouvements des couleurs apparaissent et comment des vortex se forment sur le film savonneux. Ensuite, nous étudierons les qualités physiques des ondes de surfaces, en réalisant les calculs expérimentaux nécessaires. Finalement, nous tâcherons d’accorder un instrument, non plus à l’oreille, mais à l’oeil grâce aux ondes capillaires.

> “Les couleurs et les sons se répondent.” – Baudelaire

Sommaire

Résumé **2**

Introduction **3**

Sommaire **4**

I- La musique tout en couleur **5**

Qu’est ce qu’une onde sonore ? 5

Qu’est-ce qu’un son musical ? 6

Qu’est-ce que l’intensité sonore ? 7

Comment peut-on voir la musique? 7

Le montage expérimental 7

La formation de la bulle 8

Les caractéristiques du film savonneux 9

L’apparition des couleurs sur le film savonneux 10

II- Les ondes de surface **12**

Qu’est ce qu’une onde capillaire ? 12

Les ondes stationnaires 13

Les fréquences de résonance 14

Calculs expérimentaux 14

III- Vérifier l’accord d’un instrument avec les yeux **17**

Conclusion **19**

Remerciements **19**

Sitographie et bibliographie **20**

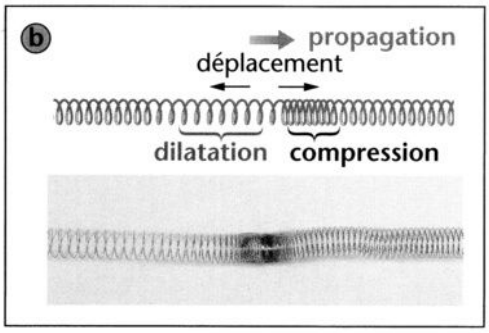
I- La musique tout en couleur

Qu'est ce qu'une onde sonore ?

Une onde sonore est une onde mécanique progressive. Une onde mécanique progressive est la propagation d'une perturbation de proche en proche avec transport d'énergie mais sans transport de matière. Elle a besoin nécessairement d'un milieu matériel pour se propager.

Les ondes sonores se propagent dans toutes les directions de l'espace, on parle ainsi d'onde à trois dimensions.

Dans les conditions normales de température et de pression la vitesse du son dans l'air est d'environ 340 $m.s^{-1}$.

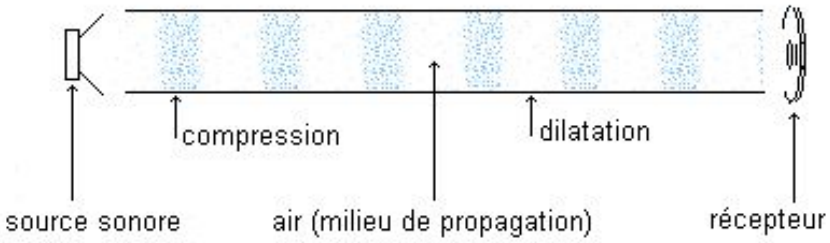


Schématisation de la formation d'une onde longitudinale le long d'un ressort

Source : manuel de terminale S nathan

L'onde sonore est caractérisée par une onde longitudinale. En effet, la direction du mouvement des éléments du milieu (air..) est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

Les ondes sonores se propagent par suite de compression et de dilatation du milieu de propagation (air…).

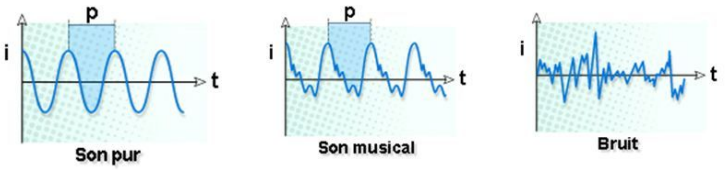


Mouvement d'un milieu lors de la propagation d'une onde sonore

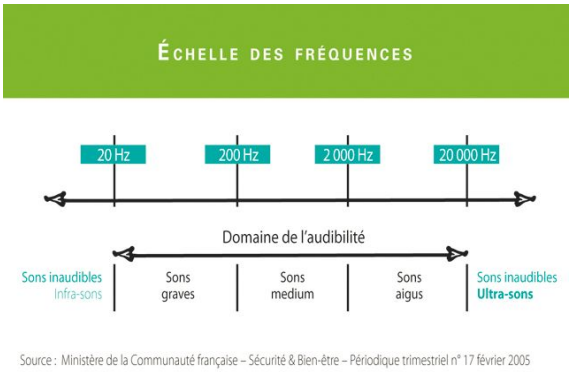
Source : https://propagationduson.weebly.com/

Qu'est-ce qu'un son musical ?

En physique, on dit que l'oreille humaine distingue soit le son (caractérisé par une courbe périodique), soit le bruit (matérialisé par une courbe non périodique). Ainsi, un son musical est une sensation auditive due aux vibrations du milieu de propagation de l'onde acoustique par une suite de compressions et de dilatations.



http://www.iurc.montp.inserm.fr/cric/audition/



Source : Ministère de la Communauté française – Sécurité & Bien-être – Périodique trimestriel n° 17 février 2005

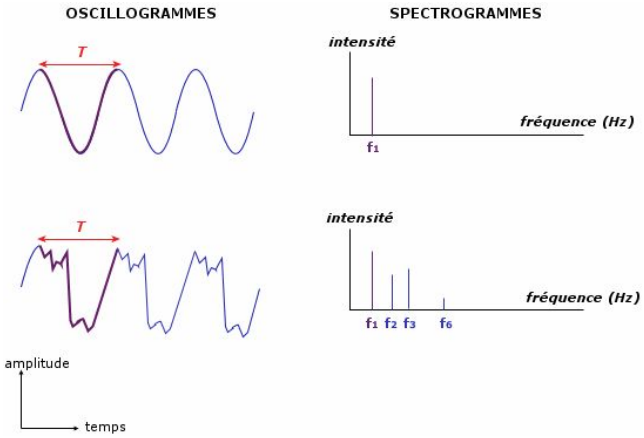
Le domaine de fréquence des ondes sonores perceptible par l'être humain est compris entre 20 et 20 000 Hertz.

Les sons de petites fréquences sont graves, ceux de fréquence élevées sont aigus.

Un son est caractérisé par sa hauteur, c'est à dire la fréquence de l'onde sonore et donc de son fondamental.

Le son est dit pur quand il a une courbe représentative qui est sinusoïdale, c'est à dire qu'il n'a pas d'harmoniques mais seulement un fondamental.

A l'inverse, la voix et les instruments de musique, produisent des ondes également périodiques mais non sinusoïdales. Le son est alors dit complexe, il correspond à la superposition de plusieurs ondes sinusoïdales.



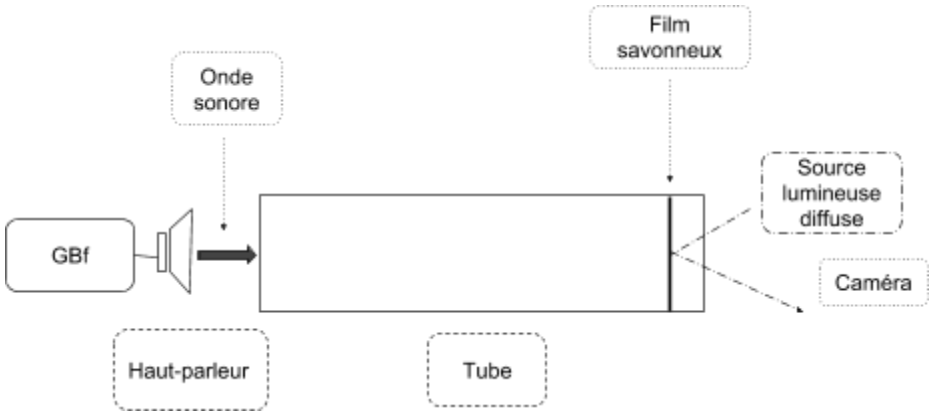
Oscillogrammes et spectrogrammes d'un son pur(haut) et d'un son complexe(bas)
Source : http://www.maxicours.com

Un spectrogramme (document ci-dessus) fait apparaître les fréquences des harmoniques avec leur amplitude relative ce qui constitue son timbre du son.

Comment peut-on voir la musique?

Le montage expérimental

Notre expérience consiste à “voir la musique”, c’est à dire à distinguer un changement de disposition des figures colorées sur le film savonneux en réaction aux différentes ondes sonores créées par le GBF à la sortie d’un tuyau sonore.

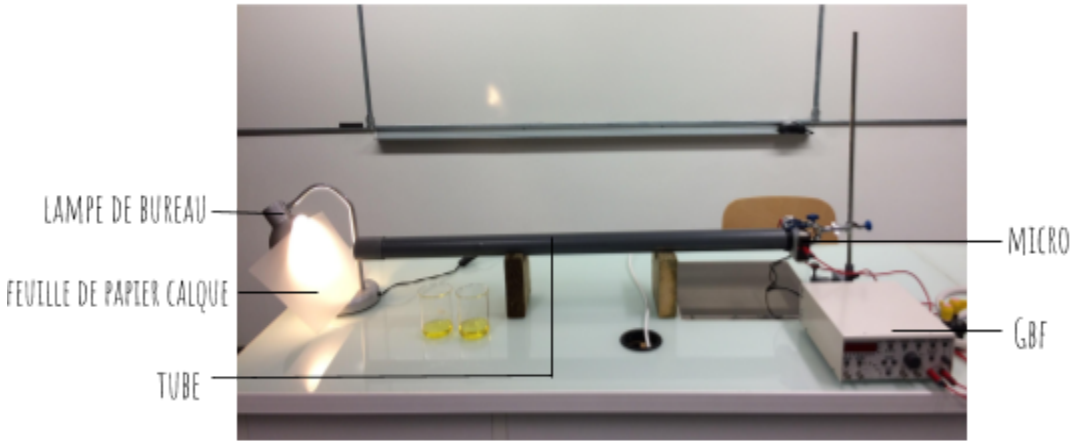


Le montage expérimental est composé d’un GBF alimentant un haut parleur. On impose une tension sinusoïdale dont l’amplitude et la fréquence sont réglables ce qui permet de moduler les caractéristiques du son.

On dispose au bout d’un tube en PVC opaque d’une longueur de 1,05m et d’un diamètre de 50mm un film savonneux. La longueur que nous avons choisie pour le tube nous permet de travailler avec des fréquences audibles sans être trop désagréables à entendre.

L’extrémité du tuyau sera fermée par un film savonneux permettant l’apparition de couleurs interférentielles. Le film savonneux doit être à la fois assez solide pour pouvoir tenir au moins 5 minutes sans éclater et assez fin pour pouvoir distinguer les différentes nuances de couleurs.

MONTAGE DE L’EXPÉRIENCE



La formation de la bulle

Après plusieurs tentatives, nous avons finalement trouvé la recette adéquate, à laisser reposer 3 à 4 heures avant l'utilisation, composée de :

-10ml d'eau distillée : représentant le solvant
-10g de sucre
-20ml de liquide vaisselle professionnel (GEM) : le tensioactif
-60ml de glycérine

Un savon est constitué d'espèces chimiques ayant un double comportement hydrophile et hydrophobe. On parle **d'espèces amphiphiles**. Les molécules de savons sont de la forme *R-COO-Na* sous leur forme solide, où *R* désigne une **chaîne carbonée linéaire** comportant habituellement un grand nombre d'atomes de carbone (queue hydrophobe) et une partie polaire *COO-Na* (tête hydrophile).

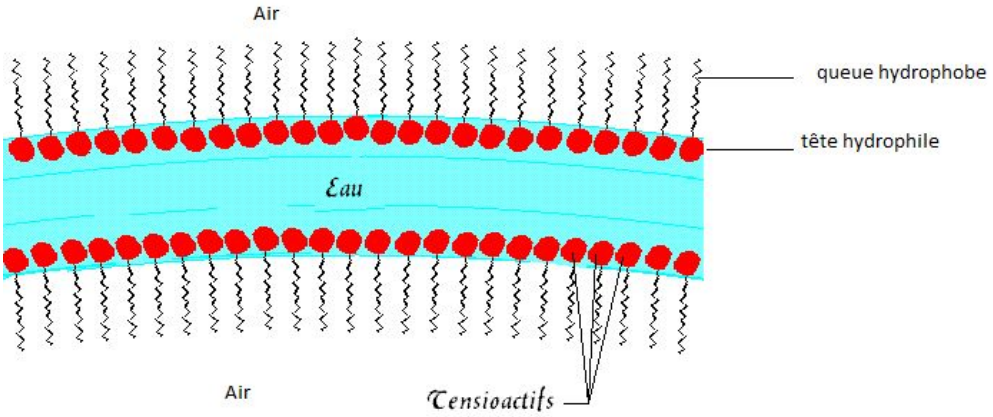
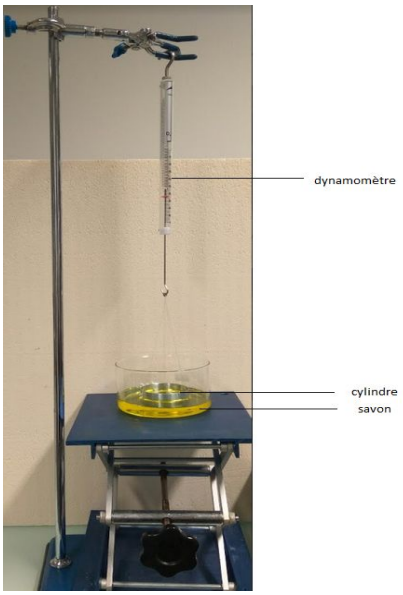


Schéma de la membrane d'une bulle de savon

La présence d'un tensioactif permet de baisser la tension superficielle de l'eau, ce qui permet au film **d'étendre sa surface**. Cela explique la formation de **bulles** avec de l'eau savonneuse. La paroi de la bulle est constituée d'une double couche de tensioactifs, emprisonnant un mince filet d'eau. Les liaisons basses-énergies intermoléculaires (hydrogène et Van der Waals) assurent à la structure une certaine cohésion, au moins pendant un temps.

Dans la recette, la présence de glycérine et de sucre permet d'optimiser la stabilité du film grâce aux multiples interactions électrostatiques et à une viscosité plus importante.

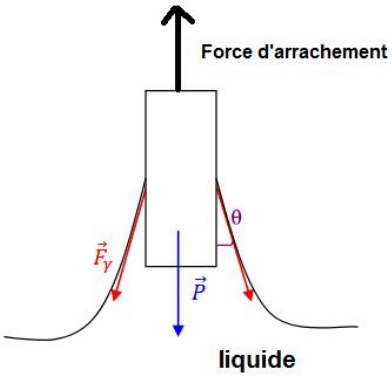
Les caractéristiques du film de savon



- **La tension superficielle :**

Nous avons mesuré la tension superficielle de notre liquide avec une balance d'arrachement.

On cherche la valeur de la force d'arrachement F d'un anneau initialement immergé dans le liquide. Cet anneau est, dans l'air, soumis à son poids Fi. La valeur de la tension de surface est alors donnée par la formule :



$$\gamma = \frac{F - Fi}{4r\pi}$$

Le rayon de l'anneau est donné à r = 30mm, F et Fi mesurées plusieurs fois de suite.
Suite à différents essais, nous avons déterminé une tension superficielle de γ = (35 +/- 4) mN/m

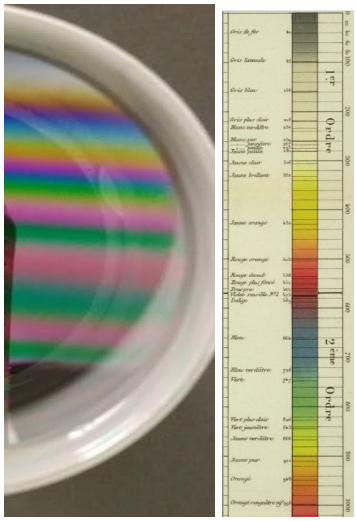
- **L'épaisseur de la bulle :**

Pour déterminer une estimation de l'épaisseur du film savonneux, nous avons utilisé l'échelle de couleur de Newton-Levy.

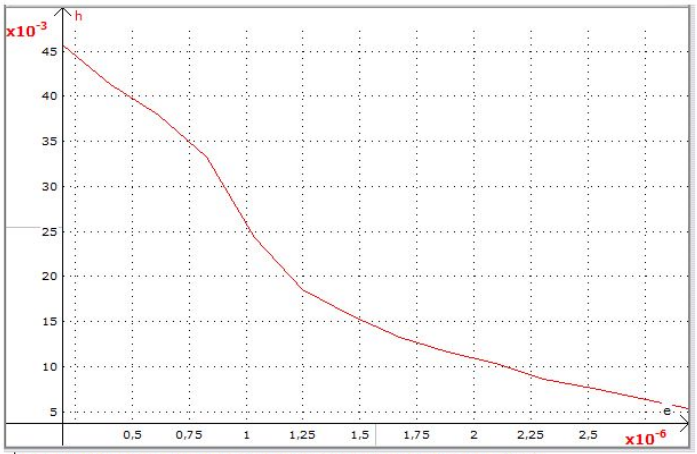
Le haut de la bulle commence à noircir, juste avant son éclatement ce qui correspond à une épaisseur quasi-nulle. A partir de là; la succession des couleurs permet de déterminer la différence de marche δ=2ne par lecture sur l'échelle.

L'indice de réfraction du milieu est estimé à environ 1,3 (celui de l'eau) ce qui permet de déduire le profil d'épaisseur du film savonneux (document suivant).

Nous utiliserons, dans la suite des calculs, une épaisseur de film correspondant au milieu de la bulle de e = 0,8µm



Echelle de Newton-Levy



Hauteur (en mètre) en fonction de l'épaisseur de la bulle (en mètre)

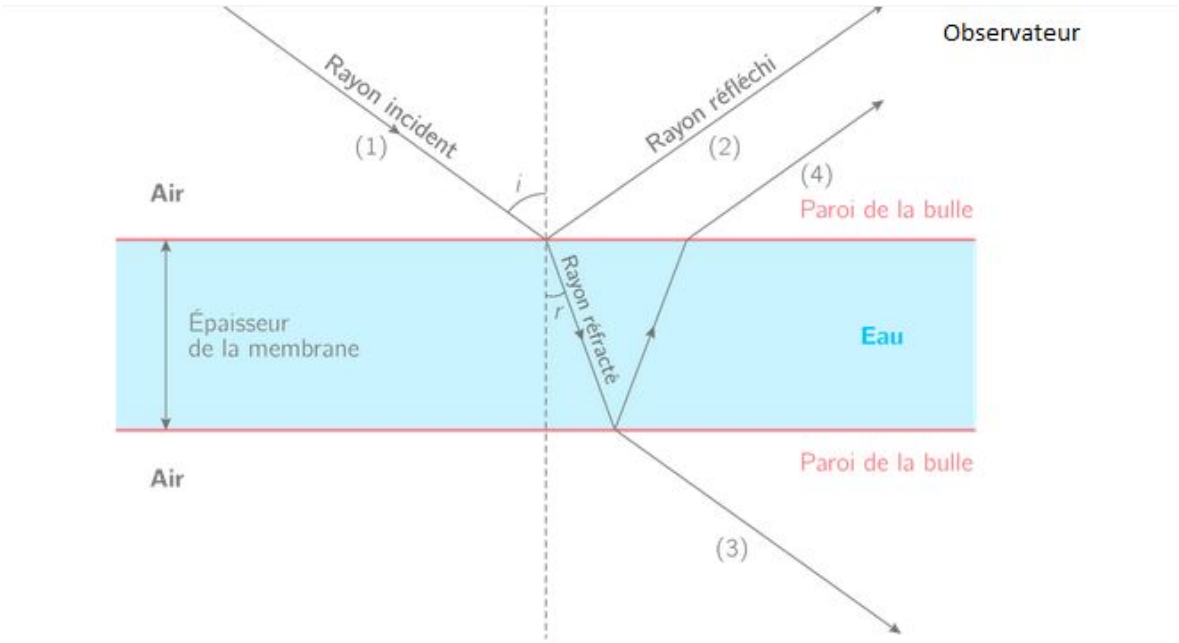
L'apparition des couleurs sur le film savonneux

Une partie de la lumière incidente sur la bulle est réfractée dans l'épaisseur du film et une autre partie est réfléchie à sa surface.

Les deux rayons sortants (2 et 4 sur le schéma), vont entraîner une irisation car ils n'ont pas parcouru la même distance (notion de différence de marche δ).

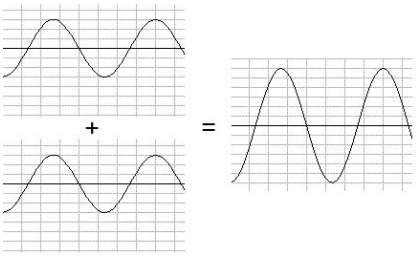
Cette différence correspond à un aller-retour dans l'épaisseur e de la membrane (le rayon 4 a parcouru une plus grande distance que le rayon 2).

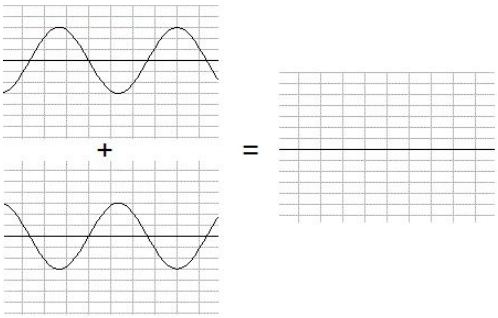
$\boldsymbol{\delta}$ **=** d4 - d2 = **2ne** avec n l'indice de réfraction du milieu.



Deux ondes (rayons 2 et 4) provenant d'une même source et ayant la même fréquence (ondes cohérentes) interfèrent; c'est à dire que l'observateur perçoit la superposition de ces deux ondes. Deux cas extrêmes sont possibles :

● Interférences constructives si elles sont en phases. L'amplitude de la résultante est alors maximale. Les interférences sont constructives si $\delta = k \times \lambda$ (avec k appartient à $\mathbb{Z}$) : la différence de marche correspond à un nombre entier de longueur d'onde.





● Interférences destructives si elles sont en opposition de phase. L'amplitude de la résultante est alors minimale.Les interférences sont destructives si $\delta = (2k+1) \times \lambda/2$: la différence de marche correspond à un multiple impair d'une demi longueur d'onde.

Pour que des interférences aient lieu dans le domaine du visible (400nm-800nm) et que des couleurs apparaissent, il faut que la différence de marche soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

Par conséquent, l'épaisseur du film de savon ($e = \delta/2n$) doit lui aussi être de l'ordre de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

L'écoulement dans le film savonneux (phénomène de drainage) fait que l'épaisseur n'est pas la même sur toute la surface du film. Les franges colorées n'auront donc pas la même largeur sur toute la figure d'interférence. (voir photo suivante).

Source : cnrs

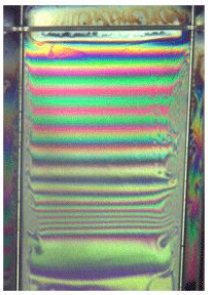
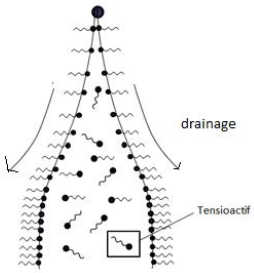
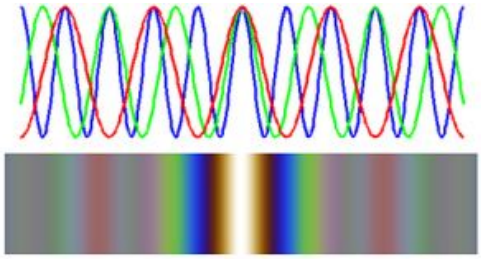


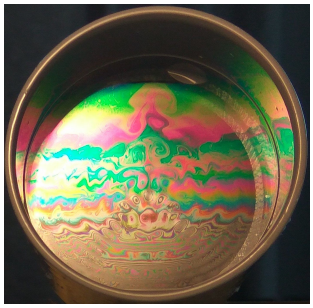
Photo du film de savon



Vue de profil du film de savon



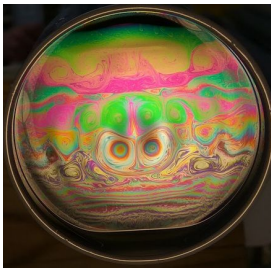
Chaque radiation crée une figure d'inférence. La superposition des différentes figures d'interférences correspond à l'irisation.



Au cours de notre expérimentation, nous avons alors remarqué que les couleurs présentes sur la bulle de savon formaient des vortex sur certaines fréquences uniquement. Par exemple la musique de queen *Don't stop me now* ou bien celle du groupe ACDC *Back in black* ont les fréquences qui permettent de faire apparaître des vortex.

Photo de la naissance de vortex

Lorsque certaines conditions sont respectées, on remarque la création de tourbillons visibles grâce aux couleurs sur le plan du film de savon, ce sont les vortex. Ils résultent de l'impact d'un jet d'air sur le film savonneux. Ce jet d'air est en incidence normale par rapport au plan du film. L'écoulement de l'air se fait par la tangente au film et entraîne du liquide présent vers l'interface liquide-gaz qui se trouve loin du point d'impact du jet d'air. Cet écoulement est donc différent au niveau du point d'impact. Les tensioactifs constituant l'interface sont entrainés et ils créent un gradient (c'est-à-dire une différence) de tension de surface. Par la suite un contre-écoulement du liquide arrive au niveau du point d'impact du jet d'air peu de temps après la mise en place du gradient de tension de surface. Les vortex observés naissent de ces écoulements de directions opposées.



II- Les ondes de surface

Lorsqu'on modifie la fréquence du GBF, on remarque que certaines fréquences sont amplifiées et qu'il apparaît sur la bulle de savon des ondes de surface concentriques.

Qu'est ce qu'une onde capillaire ?

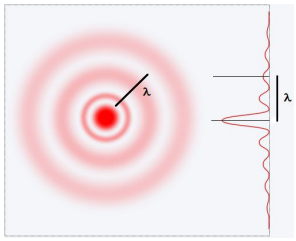
Une onde capillaire est une onde élastique qui se propage uniquement à la surface d'un matériau élastique, le film savonneux.

La propagation des ondes de surface, que ce soit pour des courtes ou des grandes longueurs d'ondes, est soumise à la tension superficielle. Cette tension superficielle est négligeable pour les grandes longueurs d'ondes. En revanche, pour les courtes longueurs d'ondes (de l'ordre du centimètre et une amplitude de l'ordre du millimètre), la tension superficielle domine la propagation des ondes de surface et engendre la création d'ondes appelées rides capillaires.

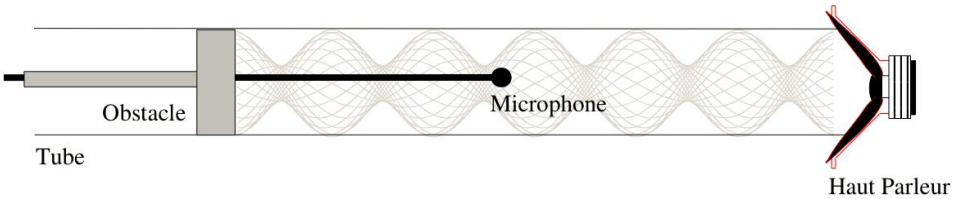
Générées sous la force acoustique et par les vibrations de l'air dans le tube qui imposent un mouvement transversal, l'onde capillaire est une onde vibratoire transversale qui se propage le long de la membrane liquide du film savonneux.

Les ondes se reflètent aux limites du film et en son centre.

En raison de la symétrie axiale du tube, ceci conduit à l'apparition de cercles concentriques correspondants à une onde stationnaire. La fonction de cette onde correspond au profil de Bessel :



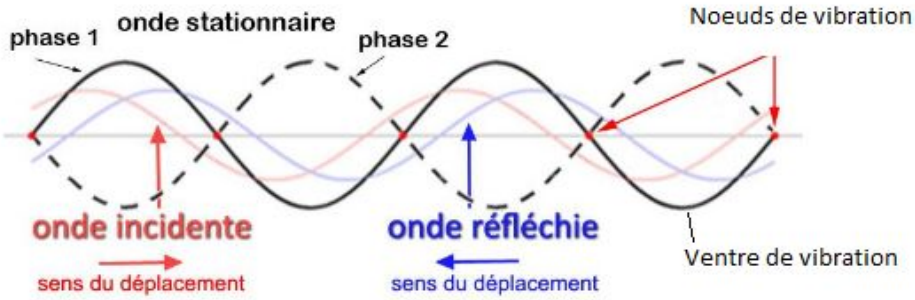
Ces ondes capillaires apparaissent de manière amplifiée pour certaines fréquences, appelées fréquence de résonance du tuyau, que nous allons mettre en évidence à l'aide du dispositif de Kundt. Le tube de kundt, nommé par son inventeur August Kundt, est également appelé appareil à ondes stationnaires. C'est un simple tube en plexiglas qui peut être ouvert (comme dans nos expériences) ou fermé, long ou court. Ce dispositif expérimental permet de mettre en évidence les ondes stationnaires sonores dans un tube rempli d'air.



Les ondes stationnaires

L'onde issue du haut-parleur et celle réfléchie à l'extrémité se superposent et forment une onde stationnaire.

L'onde stationnaire est la superposition de deux ondes progressives de même fréquence mais de sens de propagation opposés dans le même milieu physique : l'air. La propagation simultanée de plusieurs ondes forme alors une figure dont certains éléments sont fixes dans le temps. Ainsi, au lieu de voir une onde qui se propage, on constate une vibration stationnaire mais d'intensité différente, en chaque point observé. Les points d'amplitude maximale sont les ventres de vibration et les points fixes sont les noeuds de vibration.

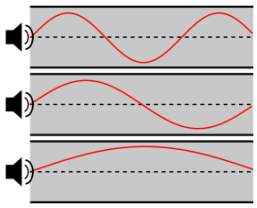


Les fréquences de résonance

Seules certaines fréquences permettent d'observer le phénomène de résonance. Nous avons cherché à déterminer ses fréquences en recherchant l'apparition des ondes capillaires sur la bulle. Nous avons obtenu les valeurs suivantes :

Valeurs expérimentales de f (GBF)	470 Hz	627 Hz	787 Hz	939 Hz

Notre première fréquence de résonance mesurable dans de bonnes conditions correspond à la 3ème harmonique.

	$L = 3\frac{\lambda}{2}$	$f3 = \frac{v}{\lambda} = \frac{3v}{2L}$
	$L = \lambda$	$f2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{2v}{2L}$
	$L = \frac{\lambda}{2}$	$f1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$

Ainsi, les fréquence de résonance correspondent à $f_n = n \times \frac{v}{2L}$ où n est un nombre entier naturel, v est la vitesse de propagation de l'onde mécanique, L la longueur.

Dans les conditions de température (23°C) et de pression v = 343 m/s

Valeur théorique de résonance	$f1 = \frac{343}{2\times1.05} = 163$ Hz	327 Hz	**490 Hz**	**653 Hz**	**816 Hz**	**980 Hz**

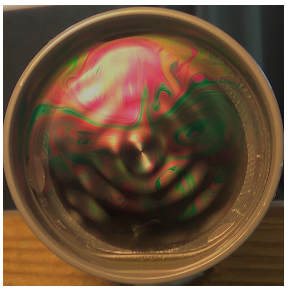
Nous remarquons que les valeurs théoriques ne correspondent pas totalement à nos mesures. Nous avons essayé d'identifier la cause ci-dessous.

Calculs expérimentaux

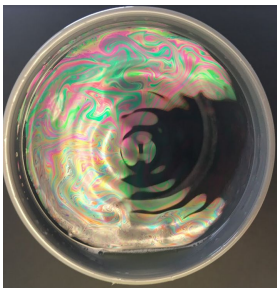
A l'aide d'un logiciel appelé SalsaJ (qui permet des mesures sur photo à l'échelle), nous avons pu déterminer la longueur d'onde associée à une fréquence de résonance : en effet il existe un lien entre les ondes capillaires (leur longueur d'onde) et la fréquence de résonance.
Pour se faire nous avons suivi le protocole suivant:

- Nous avons d'abord pris plusieurs photographies des ondes capillaires à la surface de la bulle.
- Tracer à l'aide du logiciel un trait pour représenter le diamètre du tube d'une longueur de 50mm. Il s'agit de l'échelle.

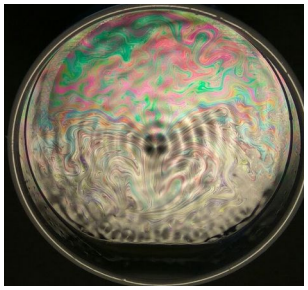
- Tracer un trait représentant une longueur d'onde ou plus.
- Cliquer sur liste pour avoir la dernière valeur correspondant à la longueur d'onde de f.



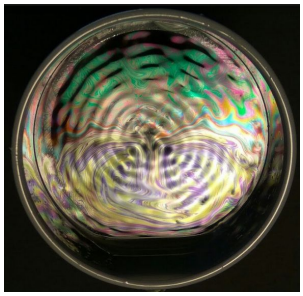
f=470 Hz



f=627 Hz



f= 787 Hz



f= 939 Hz

D'après la thèse (***Sound and vision : visualization of music with a soap film***) de Camille Gaulon (Doctorante en acoustique physique), la célérité v a pour formule l'équation suivante :

$$v = \lambda_f \times f \quad \text{soit} \quad f \times \lambda_f = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_{eau} \times e + \rho_{air} \times \frac{\lambda}{\pi}}} \quad \text{donc} \quad f = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_{eau} \times e + \rho_{air} \times \frac{\lambda}{\pi}}}}{\lambda_f}$$

Avec, dans les conditions de température et de pression,la tension superficielle γ = 35 mN/m = 35 $\times 10^{-3}$ N/m ; la densité de l'eau ρ_{eau} = 997 kg/m³; la densité de l'air ρ_{air} = 1,204 kg/m³ ; l'épaisseur du film e = 0,8 µm = 0,8 $\times 10^{-6}$ m.

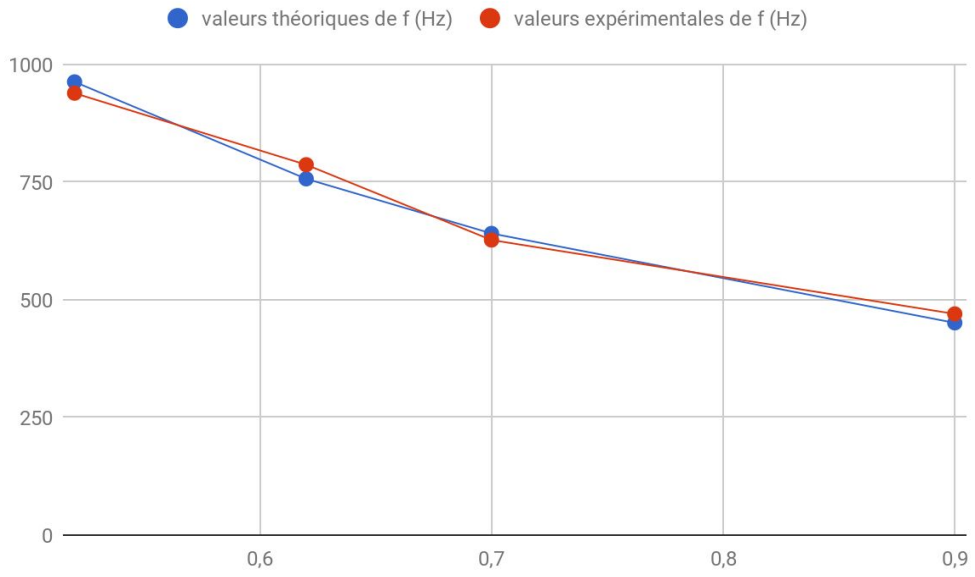
A partir des photos, nous avons mesuré une longueur d'onde de λ = 0,90 cm = 0,90.10 $^{-2}$ m pour 470 Hz trouvé avec le GBF.

$$f = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_{eau} \times e + \rho_{air} \times \frac{\lambda}{\pi}}}}{\lambda_f} = \sqrt{\frac{2 \times 35.10^{-3}}{997 \times 0{,}8.10^{-6} + 1.204 \times \frac{0{,}90.10^{-2}}{\pi}}} \div (0.90.10^{-2}) = 451 \text{ Hz}$$

Nous avons répété ce calcul pour les autres photos:

	λ = 0,90 cm	**λ = 0,70 cm**	**λ = 0,62 cm**	**λ = 0,52 cm**
Valeurs théoriques de f (utilisation de la formule)	451 Hz	641 Hz	757 Hz	963 Hz
Valeurs expérimentales de f (GBF)	470 Hz	627 Hz	787 Hz	939 Hz
Ecart relatif	4 %	2 %	4 %	3 %

Tracé de la fréquence en fonction de la longueur d'onde :



On observe une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et théoriques.

Nous avons échangé avec Camille Gaulon qui nous a orienté sur une amélioration de la formule des fréquences de résonance. En effet, il existe un facteur de correction C comme indiqué ci-dessous :

$$f_n = n \times \frac{v}{2(L+2C)}$$

Ici, n est un nombre entier naturel représentant l'harmonique de rang n, v = 343 m/s la célérité du son dans l'air, L la longueur du tube égale à 1.05m.

Cette relation permet de calculer la fréquence de résonance en prenant compte du facteur de correction C, en mètre, permettant de faire le lien entre les valeurs théoriques et les valeurs trouvées. Ce facteur de correction prend en compte, entre autres, le diamètre D du tuyau. La relation trouvée dans la littérature est C = 0,4D = 0,4 × 50 mm = 0,2 cm.

source : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_acoustique

Valeurs de f (GBF)	470 Hz	627 Hz	787 Hz	939 Hz
Fréquence de résonance sans correction : $f_n = n \times \frac{v}{2L}$	490 Hz	653 Hz	816 Hz	980 Hz
Valeurs théorique de f avec correction	$f_3 = \frac{3\times343}{2(1{,}05+2\times0.4\times0.050)}$ = 472 Hz	629 Hz	785 Hz	942 Hz

Nous remarquons que, grâce à ce facteur de correction, nous nous approchons des valeurs expérimentales trouvées.

Par la suite, nous pourrions réaliser la même expérience mais avec un tuyau de même diamètre mais de longueur différente pour vérifier que l'introduction de ce facteur de correction entraîne une meilleure prévision des valeurs des fréquences de résonance.

Cette démarche expérimentale nous a permis de montrer le lien entre la longueur d'onde d'une onde de surface et la fréquence d'un son dans le tuyau.

Nous nous sommes demandées si l'on pouvait utiliser ce phénomène dans un cas pratique : accorder un instrument de musique avec les yeux.

III- Vérifier l'accord d'un instrument avec les yeux

Mode opératoire :

On relie la guitare à un haut-parleur qui émet un son dans le tube précédent.
La longueur du tuyau doit correspondre aux conditions précédemment étudiées pour la fréquence de la note émise par la corde.

Dans notre cas, nous avons joué la note mi2 bémol, soit une fréquence de 156 Hz si la corde est accordée, car cette fréquence doit correspondre à une fréquence de résonance du tube.

Il apparaît alors sur le film de savon une onde capillaire.

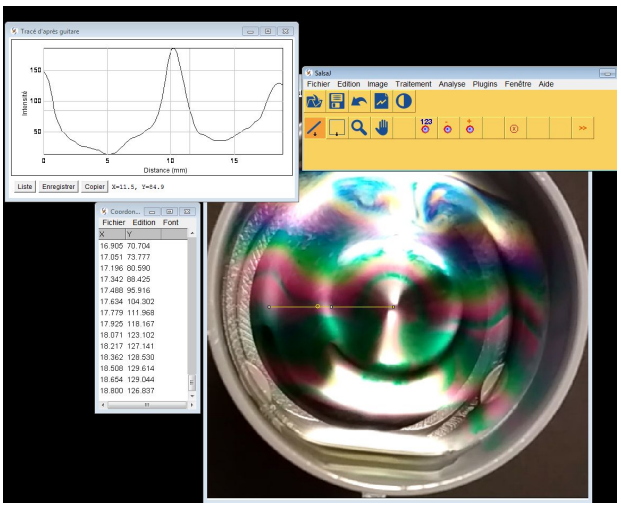
A l'aide du logiciel Salsa J, nous avons déterminé la longueur d'onde de cette onde de surface.

On trouve λ = 18,8 mm, donc par calcul de la fréquence :

$$f_{\text{inconnue}} = \sqrt{\frac{2\times35.10^{-3}}{997\times0{,}8.10^{-6}+1.204\times\frac{18{,}8.10^{-3}}{\pi}}} \div (1{,}88.10^{-2}) = 157 \text{ Hz}$$

soit une fréquence de 157 Hz.

L'écart relatif est donc de (157-156)/156 = 0,6 %



La fréquence théorique de l'harmonique de rang 1 pour notre tube est de 163 Hz qui correspond à une fréquence corrigé de 157 Hz soit la valeur du mi2 bémol.

Pour accorder les 6 cordes, il faut donc 6 tuyaux de longueurs différents mais de même diamètre. Chaque tuyau doit être dimensionné pour correspondre à la fréquence de la note émise par la corde accordée.

$$f_n = n \times \frac{v}{2(L+2C)} \quad \text{donc } L = \frac{v}{2f} - 2C$$

Cordes	Fréquences à vide en Hz	Longueur du tuyau en m
Mi	329,6	0,48
Si	246,9	0,65
Sol	196	0,83
Ré	146,8	1,13
La	110	1,51
Mi (grave)	82,4	2,04

Le dispositif nécessiterait donc 6 tuyaux de dimension allant de 48 cm à 2,04m. Ce qui semble délicat à utiliser… Mais nous pouvons toujours essayer!

Conclusion

Pour conclure, nous avons donc réussi à visualiser le son en observant la danse des vortex, des ondes capillaires mais aussi des figures d'interférences hautes en couleurs.

Nous avons remarqué que pour une fréquence appelée fréquence de résonance, il se forme une onde de surface d'où nous pouvons extraire une longueur d'onde nous permettant de remonter jusqu'à la fréquence du son.

Ces différents phénomènes physiques nous donne la possibilité d'imaginer un dispositif pour accorder une guitare.

Pour aller plus loin, notre ensemble expérimental peut être également utilisé pour les malentendants. En effet, pour eux le simple fait d'écouter de la musique leur est difficile d'accès. Cependant, à l'aide de notre dispositif, ils peuvent découvrir la musique d'une toute autre manière… à travers leurs yeux ! Ainsi, grâce aux propriétés d'iridescence de la bulle avec la danse des vortex et des ondes capillaires, ils éprouvent les sentiments et les émotions qui nous animent lors de l'écoute d'un morceau de musique.

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier Camille Gaulon, doctorante en acoustique physique, qui a répondu à nos multiples mails avec patience et gentillesse pour nous guider dans la réalisation de notre expérience.

Merci également à Madame Touron, professeur d'anglais qui nous a éclairé sur les passages ardus de la thèse de Camille Gaulon rédigée en anglais.

Nous remercions le personnel du laboratoire du Lycée Germaine Tillion et surtout Christine qui nous a apporté d'excellents conseils pour l'élaboration de cette expérience demandant une certaine préparation.

Nous adressons nos remerciements à l'ensemble du Comité d'organisation des sciences à l'école qui nous a donné l'opportunité de nous intéresser de manière différente à un phénomène physique.

Pour terminer, le plus important pour nous est d'exprimer notre gratitude la plus sincère à nos professeurs de Physique-Chimie du lycée Germaine Tillion, Madame Alleg et Monsieur Mathiotte pour tout le temps qu'ils nous ont accordé et l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée en nous accompagnant dans la réalisation de notre projet.

Toutes ces personnes ont contribué à faire de ce projet une expérience enrichissante et agréable.

Sitographie et bibliographie

https://propagationduson.weebly.com/
http://www.maxicours.com
https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01372309/file/these_final.pdf
https://www.youtube.com/watch?v=odJxJRAxdFU#t=37
http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article347
http://strock.pi.r2.3.14159.free.fr/Ast/Art/Echelle-Michel-Levy.html
http://rennes.udppc.asso.fr/IMG/pdf/dossier6.pdf
https://www.youtube.com/watch?v=A5ucWCM6j8g
Article de Camille Gaulon : *C. Gaulon et al., Sound and Vision: Visualization of music with a soap film, European Journal of Physics 38, 045804, (2017)*
Manuel de terminal S de Physique Chimie programme 2012 Edition Nathan
Cours de Physique de notre Lycée
Livre de Geneviève Laffont: Ces ondes qui nous transpercent