

PROLOGUE

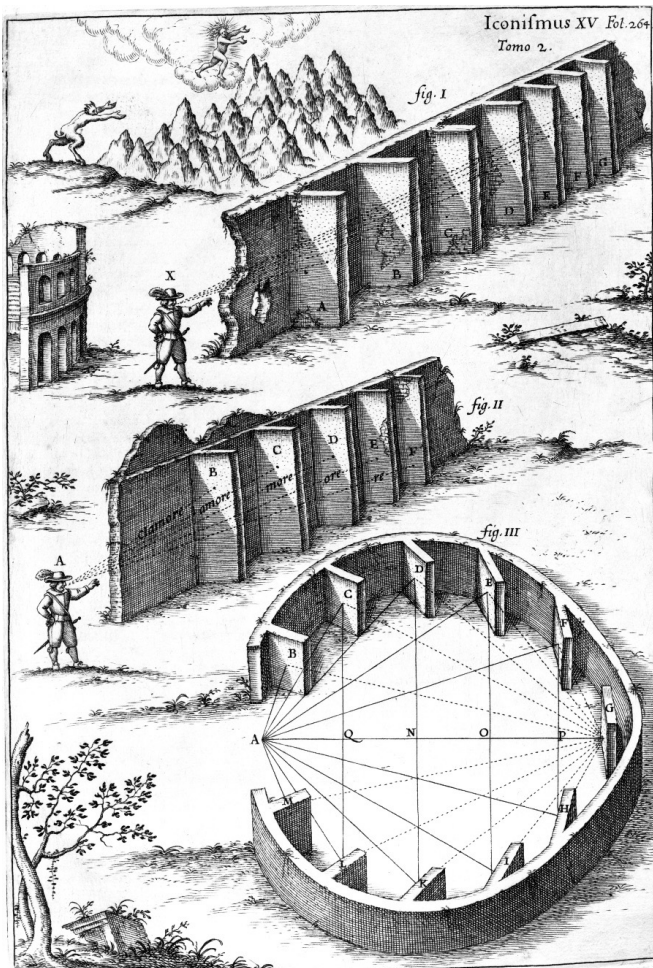


L'acoustique, entre science et art

Nous baignons dans les sons tout comme nous baignons dans la clarté du soleil. Mais si bien des peuples ont vénéré un dieu de la lumière, rares sont ceux qui ont éprouvé le besoin d'honorer un dieu du bruit, à moins que ce bruit ne fût musique.

Les premiers à s'intéresser à la physique du son furent les musiciens et les architectes. L'acoustique en tant que branche de la physique n'émergea véritablement qu'à la fin du XVII^e siècle, après que l'expérience eut établi que le son ne se propageait pas dans le vide. Forgé par le physicien Joseph Sauveur en 1700, d'après un mot grec signifiant « entendre », le vocable d'*acoustique* fut retenu par l'Académie des sciences de l'époque comme désignant une branche de la physique complémentaire de l'optique. L'ouïe n'était-elle pas avec la vue le plus important de nos sens ?

Si l'acoustique ne s'est pas signalée par des découvertes spectaculaires, des personnalités comme Newton, Galilée, Mach, Helmholtz ou Rayleigh s'y sont intéressées. À leur tour, elles ont apporté leur pierre à l'édifice, bientôt rejointes par les physiologistes et les médecins. Avec à la clé le développement de l'échographie et du sonar, la découverte des cristaux phononiques ou l'émergence de l'acoustique picoseconde.



Réflexions sonores vues par le père jésuite Athanasius Kircher

Extrait du traité d'acoustique *Musurgia Universalis* (1650)

LA PHYSIQUE DU SON

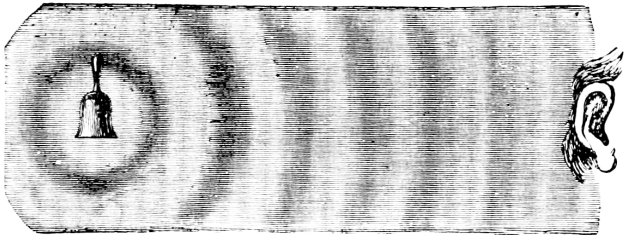


Les sons doivent être saisis au vol par les ailes pour qu'ils ne tombent pas dans les oreilles des sourds.

E. Ionesco

1. Qu'est-ce qu'un son ?

Le son fait partie des ondes mécaniques. Il naît de la mise en vibration d'un objet, corde de violon, membrane de haut-parleur, cloche, ou autre. L'air avoisinant subit des variations de pression qui, de proche en proche, se propagent jusqu'à l'oreille, mettant en mouvement le tympan. Pour avoir une idée du mécanisme de propagation d'une onde de compression, il suffit de se figurer un long ressort à boudin. En donnant, à l'une de ses extrémités, une impulsion parallèle à l'axe du ressort, on voit la zone de compression des spires se déplacer le long du ressort.



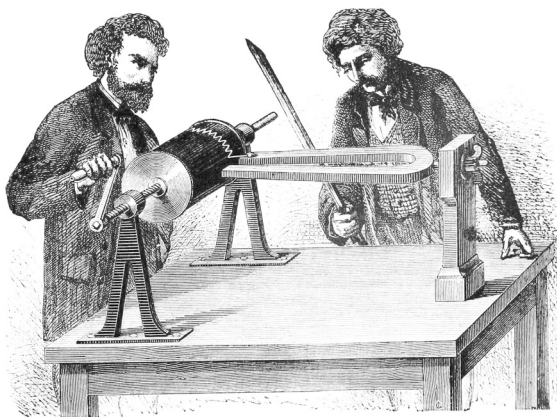
Ondes sonores

Les bruits se distinguent des sons par la nature chaotique des vibrations et leur absence de caractère musical.

2. Qu'est-ce qui différencie un son grave d'un son aigu ?

La différence se situe au niveau du nombre de vibrations par seconde, autrement dit de la fréquence, qui détermine la hauteur du son. Plus la source sonore vibre rapidement, plus le son est aigu. Plus elle vibre lentement, plus le son est grave.

Les physiciens mesurent les fréquences en hertz (Hz) : une fréquence de 100 Hz correspond à 100 vibrations par seconde. L'oreille humaine perçoit généralement des fréquences allant d'une quinzaine de hertz à une vingtaine de milliers de hertz. Les fréquences inférieures à 15 Hz correspondent aux infrasons tandis que les fréquences supérieures à 20 000 Hz appartiennent aux domaines des ultrasons. Des animaux comme les chiens, les dauphins ou les chauves-souris perçoivent les ultrasons.



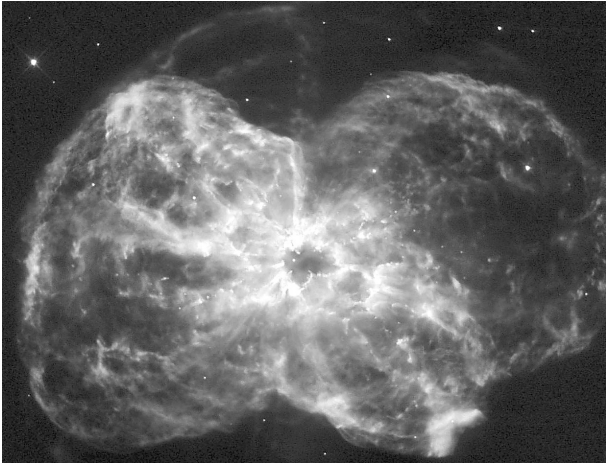
Enregistrement des vibrations d'un diapason

Le nombre de vibrations par seconde détermine la fréquence, c'est-à-dire la hauteur du son.

3. Les sons se propagent-ils dans le vide ?

Contrairement à la lumière, le son ne se propage pas dans le vide. Il lui faut un support matériel, gaz, liquide ou solide, qui transmet les vibrations de l'émetteur au récepteur. Sur la Lune, qui n'a pas d'atmosphère, il est impossible de

communiquer par la voix. Et, dans les films de science-fiction, rien de moins réaliste que ces vaisseaux spatiaux qui parcourent l'espace en vrombissant. Dans l'espace on n'entend ni explosion ni bruit d'armes laser. Quant aux étoiles, elles naissent et meurent en silence !



Explosion d'une étoile de la famille du Soleil

Les étoiles naissent et meurent en silence ©NASA/JPL.

4. La vitesse du son est-elle la même partout ?

Les Indiens collaient leur oreille contre le sol ou les rails en acier des chemins de fer pour savoir si des chevaux ou un train s'approchaient. La célérité du son dépend du milieu de propagation et de sa rigidité. Elle est moins élevée dans les gaz que dans les liquides, que dans les solides, le record étant détenu par le diamant avec une vitesse de plus de 15 000 mètres par seconde. En effet, les liquides et surtout les solides sont des milieux denses où les atomes, proches les uns des autres, interagissent fortement ce qui facilite la transmission des vibrations. Le son se propage plus vite dans un mur compact que dans l'air. Pour cette raison, la qualité d'un béton s'apprécie en mesurant la vitesse du son : plus elle est faible, plus le béton contient d'air.

La vitesse du son dépend aussi de l'inertie du milieu. Le son se propage plus vite dans les gaz légers que dans les gaz lourds. S'il voyage à peine plus vite dans l'azote que dans l'oxygène, dont les densités restent voisines, il va près de cinq fois plus vite dans l'hydrogène que dans le gaz carbonique. La température intervient également. Dans l'air sec, la vitesse du son, par ailleurs quasi indépendante de la pression et de la densité, est proportionnelle à la racine carrée de la température absolue et passe de 331,5 mètres par seconde à 0 °C à 346,3 mètres par seconde à 25 °C. Lorsque l'air est humide, la vitesse du son augmente légèrement, la vapeur d'eau étant un milieu plus favorable à la propagation du son. Dans l'eau de mer, la vitesse dépend à la fois de la salinité, de la température et de la profondeur.

Vitesse du son dans l'air sec

Température	-40 °C	-20 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C
Célérité (m/s)	307	319	331	337	343	349	355	366	377	387

Une augmentation de température de 1 °C se traduit par une augmentation de la vitesse du son d'environ 0,6 m/s.

Vitesse du son dans l'air humide

Température	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0 % d'humidité	331,45 m/s	337,46 m/s	343,36 m/s	349,15 m/s
50 % d'humidité	331,6 m/s	337,78 m/s	343,99 m/s	350,31 m/s
100 % d'humidité	331,76 m/s	338,1 m/s	344,61 m/s	351,47 m/s

La vitesse du son augmente légèrement lorsque l'air contient de la vapeur d'eau.

5. Tous les sons voyagent-ils à la même vitesse ?

L'écoute d'une symphonie ou d'un concerto, ou tout simplement d'une conversation, serait insupportable si les sons ne se propageaient pas tous à la même vitesse.

La vitesse du son n'a rien à voir avec la vitesse d'un projectile lancé plus ou moins fort. « Que le son se fasse par une grande machine, telle qu'un canon, ou par une petite, telle qu'un mousquet, la vitesse reste la même », notait le philosophe et physicien français Pierre Gassendi dès la première moitié du XVII^e siècle.

Dans un milieu donné, qu'ils soient faibles ou forts, aigus ou graves, tous les sons voyagent à la même vitesse, à moins que leurs fréquences ne dépassent le milliard de hertz, ou que leur intensité ne soit exceptionnellement élevée,

comme dans le cas du tonnerre. Les graves accusent alors un léger retard sur les aigus, perceptible aux grondements sourds et tardifs qui prolongent le phénomène.

6. Qu'est-ce que la longueur d'onde d'un son ?

Une pierre lancée dans un étang produit des cercles concentriques qui, en se dessinant à la surface de l'eau, traduisent la propagation d'une onde. La longueur d'onde correspond à la distance séparant deux crêtes, ou deux creux, successifs.



Ondes à la surface de l'eau

La longueur d'onde correspond à la distance entre deux cercles successifs.

L'image de cercles en trois dimensions, proposée par les stoïciens environ deux siècles avant notre ère, pour expliquer la propagation du son dans l'atmosphère, a été reprise par la suite par de nombreux philosophes, devenant un modèle de référence jusqu'au XVII^e siècle. Bien qu'erroné, il a l'avantage de procurer une représentation concrète de la longueur d'onde. Celle-ci varie en sens contraire de la fréquence. La longueur d'onde est petite pour un son aigu, les vibrations sonores étant très rapprochées, et grande pour un son grave, les vibrations sonores étant plus espacées.

7. Pourquoi les sons graves portent-ils plus loin que les sons aigus ?

Une grosse cloche, au timbre grave, porte plus loin qu'un petit carillon. La viscosité de l'air et donc les phénomènes d'absorption augmentent en raison du carré de la fréquence. La dissipation d'énergie est donc plus importante dans les aigus.

La différence de portée entre les graves et les aigus est un phénomène à prendre en compte dans les concerts donnés en plein air. Afin d'éviter qu'un spectateur placé à trente mètres de la scène n'entende que les basses, on positionne à cette distance un haut-parleur qui n'émet que les aigus, avec un retard d'un dixième de seconde, pour compenser la différence entre les temps de propagation du son.

8. Qu'est-ce qu'un décibel ?

L'échelle des décibels (dB) rend compte des niveaux d'intensité sonore. Cette échelle est de nature logarithmique, à l'image de nos sensations. Des études réalisées au XIX^e siècle par le psychologue allemand Gustav Theodor Fechner, auteur de travaux sur la perception sonore, ont montré qu'entre un violon et dix violons jouant simultanément, avec la même force, nous gagnions autant en sensation sonore qu'entre dix et cent violons. L'échelle des décibels, qui fait augmenter le niveau sonore de 10 dB à chaque fois que l'intensité sonore est multipliée par dix, respecte cette propriété. Si un violoniste joue à un niveau de 60 dB, un orchestre composé de dix violonistes atteindra un niveau de 70 dB et un ensemble de cent instrumentistes parviendra à 80 dB. Quand la pression acoustique est faible, très peu de cellules auditives sont stimulées. Il suffit alors d'une légère augmentation de pression pour accroître considérablement le nombre de cellules excitées. Mais, lorsqu'un grand nombre d'entre elles le sont déjà, une pression bien plus élevée est nécessaire pour accroître la sensation sonore, comme si les cellules étaient de plus en plus saturées.

Dans l'air, l'échelle des décibels, dont l'origine correspond à l'intensité minimale audible à 1 000 Hz, fréquence qui altère le plus le son en téléphonie, se traduit aussi par une augmentation de 3 dB lorsque l'intensité sonore double. En conséquence, deux violonistes jouant de concert produiront 63 dB et non