

# Chapitre I

## L'ACOUSTIQUE ET SES APPLICATIONS

### 1. LES GRANDS DOMAINES DE L'ACOUSTIQUE

La diversité des métiers et des activités qui relèvent de l'acoustique (au sens large) rend très difficile de définir la notion même de domaine de l'acoustique, de proposer une classification de ces domaines, d'arrêter une liste des domaines de l'ingénierie attachés à l'acoustique, de répertorier les secteurs spécialisés relevant de l'acoustique... La figure 1.1 présente une vue synoptique très schématique, sur ce qu'il est convenu ici d'appeler "**les domaines de l'acoustique**", montrant une certaine classification, à plusieurs niveaux, qui a le mérite de la simplicité mais qui est de ce fait réductrice.

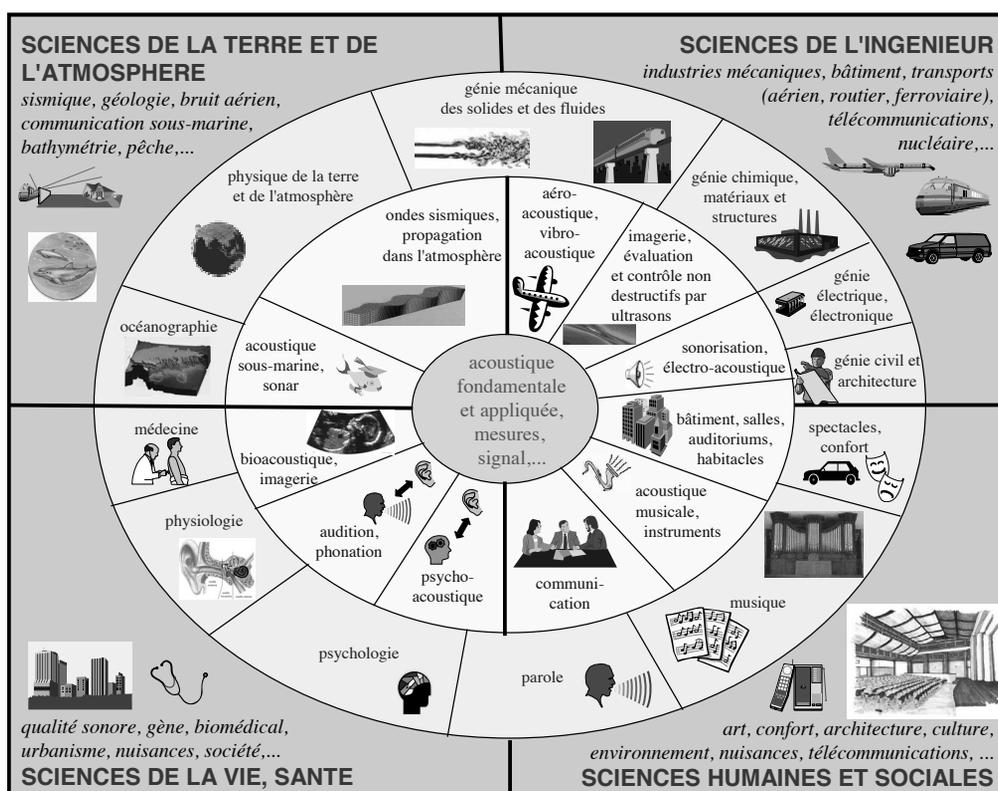


Figure 1.1 : Vue synoptique des domaines de l'acoustique : les quatre champs d'activités, les domaines de l'ingénierie, les secteurs spécialisés (de l'extérieur vers le centre).

Adapté du diagramme de R.B. Lindsay, *J. Acoust. Soc. Am.*, 36, (1964) par Michel Bruneau, Pr., et Catherine Potel, Pr., Société Française d'Acoustique

Science du son, l'acoustique en étudie la production, la transmission, la détection et les effets. La notion de son n'est pas attachée uniquement aux phénomènes aériens responsables de la sensation auditive, mais aussi à tous les autres phénomènes qui sont gouvernés par des principes physiques analogues. C'est ainsi que les perturbations trop "graves" (infrasons) ou trop "aiguës" (ultrasons) pour être perçues par l'oreille humaine sont appelées "sons" et que l'on parle de propagation acoustique sous-marine, de propagation acoustique dans les solides (vibrations), etc... L'acoustique se distingue de l'optique et des ondes radioélectriques parce que le son est un mouvement ondulatoire mécanique et non une onde électromagnétique.

L'immense étendue du champ d'intérêt de l'acoustique provient de causes variées. D'abord nous subissons la nature omniprésente du rayonnement mécanique généré par des causes naturelles et par l'activité humaine ; à cette émission sont associées les notions de sensation auditive, de voix humaine, de communication par le canal sonore et toute une variété d'incidences psychologiques. Les domaines tels que la parole, la musique, l'enregistrement et la reproduction des sons, la téléphonie, l'amplification, l'audiologie, l'acoustique architecturale, le contrôle acoustique sont intimement liés à la sensation auditive. Mais le son est aussi un moyen de transport de l'information qui ne fait pas toujours référence à l'oreille humaine ; la communication sous-marine, affectée par les propriétés complexes du milieu de transmission, est le domaine d'étude de prédilection de cet aspect du phénomène sonore. Par ailleurs, un vaste champ d'applications, en recherche fondamentale et en technologie, exploite le fait que la perturbation sonore transmise porte la signature du milieu dans lequel elle se propage et qu'elle contient en conséquence des informations sur ce milieu, ses hétérogénéités, son anisotropie ; un exemple d'application largement répandu de nos jours est celui de la médecine avec l'échographie. Enfin, les effets du son sur les substances et les corps avec lesquels il interagit ouvrent encore un terrain de recherches et d'applications dans de nombreux domaines de la science moderne.

C'est ainsi que le diagramme de la figure 1.1 donne quelques indications sur l'étendue de l'acoustique et des disciplines auxquelles elle est associée. Le premier anneau à partir du centre contient les subdivisions traditionnelles de l'acoustique et l'anneau extérieur les noms des champs artistiques et techniques qu'elle couvre. Ce schéma résume les courants du savoir et de la technologie en acoustique, sans faire référence aux principes et phénomènes physiques, théories, modèles et méthodes auxquels se réfèrent ces disciplines (acoustique linéaire et non linéaire, théorie des rayons, propagation en milieu inhomogène, diffusion, diffraction, relaxation, phénomènes viscothermiques, ...).

Nota Bene. Les commentaires qui précèdent, comme les éléments d'histoire présentés dans le paragraphe qui suit, sont extraits d'ouvrages encyclopédiques (en particulier l'*Encyclopedia Universalis*), de revues diverses (dont *Pour la Science* n° 253) et de sites web, et plus particulièrement :

<http://www.chronomath.com/>

<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/BiogIndex.html>

## 2. ELEMENTS D'HISTOIRE DE L'ACOUSTIQUE

"On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire."

Auguste Comte (1798-1857),  
*Cours de philosophie positive*,  
1830-1842



### 2.1. Quelques millénaires avant Jésus-Christ

Même si les premières études sur les phénomènes acoustiques remontent au VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C., avec l'école Pythagoricienne, les découvertes faites dans des grottes montrent que, quelques millénaires avant J.-C., les hommes préhistoriques s'intéressaient déjà à l'acoustique. Quelques traces de divers instruments pouvant produire des sons ont ainsi été découvertes, les hommes du Paléolithique ayant laissé des instruments émetteurs de signal sonore (les phalanges sifflantes, voir figure 1.2), ou des instruments de musique (la flûte, par exemple).



Figure 1.2 : Phalanges de renne percées. Parmi les nombreux ossements et les reliefs alimentaires des hommes du Paléolithique, les phalanges de renne percées constituent des sifflets. Les plus anciennes ont environ 100 000 ans.

Les hommes de Cro-magnon utilisaient, semble-t-il, les propriétés de résonance acoustique et les phénomènes d'échos spécifiques des couloirs de grottes pour y tenir des assemblées qui pratiquaient le chant et la musique. Des études ont permis de confirmer les corrélations entre phénomènes acoustiques privilégiés (résonance, transmission) et certaines marques laissées par l'homme préhistorique sur les parois : les hommes de Cro-Magnon remarquent en effet des particularités sonores des grottes qu'ils ornent. Certaines particularités sont ainsi indiquées par des signes picturaux ou coïncident avec des oeuvres pariétales. Les deux exemples suivants illustrent les propos qui précèdent.

i) Deux points rouges situés en diagonale d'une salle de grotte sont relatifs à un effet de galerie à échos : par réflexions multiples, le son longe la voûte dans une direction précise. Ce phénomène sera utilisé quelques siècles après J.-C. pour écouter la confession des lépreux sans avoir à être proche d'eux.

ii) La figure 1.3 présente deux grottes successives disposées de telle manière que la grotte 2 n'est pas visible depuis la grotte 1, le passage de l'une à l'autre grotte se faisant par une sorte de couloir. A hauteur d'homme, une cavité (faisant office de résonateur de Helmholtz) est taillée dans la grotte 2. Ce résonateur de Helmholtz est accordé à environ 80 Hz, ce qui correspond au premier sous-harmonique de la voix normale d'un homme (dont la fréquence fondamentale est environ égale à 160 Hz). Par suite, la composante de fréquence 80 Hz d'une source acoustique située au voisinage immédiat du résonateur (telle la voix humaine) se

trouve amplifiée de manière importante (jusqu'à 15 dB) ; la composante grave de la voix est alors très importante, et, par suite, le son entendu dans la première grotte ne rappelle plus des voix humaines connues, et laisse la porte ouverte à toute interprétation.... Il convient à ce sujet de noter qu'un résonateur de Helmholtz n'amplifie pas le son, mais modifie l'impédance de rayonnement de la bouche, cette dernière fournissant l'énergie sonore.

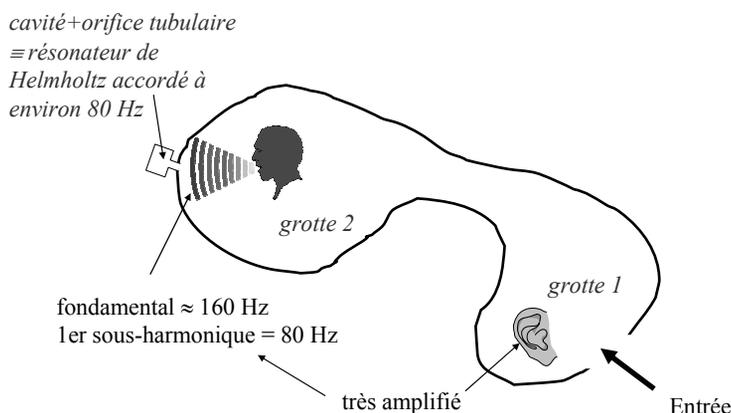


Figure 1.3 : Vue du dessus des deux grottes (voir texte) et du résonateur amplifiant la composante grave d'une voix humaine, si le locuteur est proche du résonateur (modification de l'impédance de rayonnement du locuteur)

## 2.2. Quelques siècles avant Jésus-Christ

L'intérêt porté par l'homme aux phénomènes sonores remonte donc à la nuit des temps, mais cet intérêt ne fut pas dès l'origine d'ordre scientifique. Les premières recherches concernant les phénomènes sonores datent du VI<sup>ème</sup> siècle avant l'ère chrétienne, époque à laquelle l'école pythagoricienne se pencha sur le fonctionnement des cordes vibrantes et construisit une échelle musicale. Par la suite, des réflexions et des observations visant à découvrir la nature du phénomène sonore se sont déroulées sur plusieurs siècles. L'idée que le son est un phénomène de nature ondulatoire naquit de l'observation des ondes à la surface de l'eau (la notion d'onde pouvant être définie de façon rudimentaire comme une perturbation oscillatoire qui se propage à partir d'une source). L'éventualité que le son possède un tel comportement fut énoncée notamment par le philosophe grec Chrysippe (III<sup>ème</sup> s. av. J.-C.), par l'architecte et ingénieur romain Vitruve (1<sup>er</sup> s. av. J.-C.) et par le philosophe romain Boèce (V<sup>ème</sup> s. apr. J.-C.). L'interprétation ondulatoire prit corps également dans les réflexions du grec Aristote (IV<sup>ème</sup> s. av. J.-C.) qui énonça la génération du mouvement sonore de l'air par une source "poussant vers l'avant l'air contigu de telle manière que le son voyage..."

### 2.2.1. L'école pythagoricienne, VI<sup>ème</sup> siècle avant Jésus-Christ

L'hypothèse que le son est une onde émise par le mouvement d'un corps puis transmise par un mouvement de l'air remonte ainsi aux Grecs. L'école pythagoricienne, dont la conception philosophique fondamentale prend pour base le principe de l'identité existant entre la structure du monde physique et celle des nombres, débouche ainsi sur les bases d'une vaste "Harmonie Universelle" : tout l'univers est musique. L'étude de l'acoustique se confond alors essentiellement avec celle de l'acoustique musicale ; les pythagoriciens parviennent à dégager la relation existant entre la longueur d'une corde vibrante et la hauteur du son émis, et à construire "mathématiquement" l'échelle musicale.



Pythagore de Samos  
(-570?/-500?,  
Astronome,  
philosophe,  
musicologue grec)

### 2.2.2. *L'acoustique des théâtres de plein air : Vitruve, VIème siècle avant Jésus-Christ*

Un autre domaine important de l'acoustique, celui de l'acoustique des grandes salles ou des théâtres de plein air, est également abordé par les Grecs et les Romains ; les architectes de l'antiquité semblent avoir compris quelques phénomènes quant à l'intelligibilité de la parole dans le cas des théâtres et quant à la réverbération dans le cas de salles faites pour la musique (odéons). En particulier, dans les arènes romaines (figure 1.4), les niches situées dans les gradins favorisent la diffusion et la réverbération (certaines en forme de récipients sont accordables avec de l'eau).

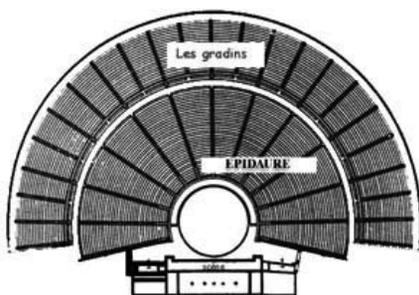


Figure 1.4 : Les arènes de Nîmes

L'architecte le plus célèbre est Vitruve ; son ouvrage consacré à l'architecture, "*De architecture*" (redécouvert en 1414), formé de dix livres, constitue la plus ancienne contribution sur le sujet. Tiré d'anciens traités hellénistiques, l'ouvrage, très complet, aborde des sujets divers, notamment l'ingénierie, les systèmes sanitaires, l'hydraulique, les vases acoustiques, etc... Selon la tradition grecque, les théâtres sont généralement appuyés contre une colline (figure 1.5), au contraire des théâtres romains qui sont appuyés sur des bases construites.



Vitruve Marcus Pollio, (-88? à -26?, architecte et ingénieur militaire romain)



a)



b)

Figure 1.5 : théâtre d'Epidaure, Grèce.

Les gradins sont séparés en deux groupes par un promenoir. L'orchestre, dalle de pierre réfléchissante, reste dégagé et joue le rôle d'un réflecteur de sons. Les réflexions s'ajoutant au son direct renforcent l'énergie transmise et par suite améliorent l'intelligibilité de la parole. Vitruve préconise l'usage de sortes de résonateurs accordés et répartis sur deux octaves. Enfin, le mur situé à l'arrière de la scène dans certains théâtres permet encore d'amplifier l'énergie sonore disponible pour les auditeurs tout en assurant une certaine diffusion par la présence de niches, colonnes, statues, ...

### 2.3. Un millénaire et demi plus tard

Un important résultat expérimental, suggéré par les conclusions auxquelles aboutirent les réflexions menées au cours des dix-sept premiers siècles de notre ère et à la suite des Anciens depuis Pythagore, est que le mouvement de l'air, généré par un corps dont la vibration est la source d'un son musical pur, est également vibratoire et de même fréquence que le mouvement du corps lui-même. L'histoire de cette découverte est jumelée avec le développement des lois de fréquences naturelles des cordes vibrantes et de l'interprétation des consonances musicales.

Les principaux rôles dans cette découverte ont été joués par le Père Marin Mersenne (1588-1648), philosophe et scientifique français (né à Oizé près du Mans en Sarthe et moine de l'ordre des Minimes à Paris) souvent considéré comme le "père de l'acoustique", et par le célèbre physicien et astronome italien Galileo Galilée (1564-1642), dont les *Discours mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (1638) renferment les discussions sur la notion de fréquence les plus lucides de celles qui avaient été proposées jusqu'alors. L'acoustique, en relation avec le développement de la mécanique dont elle est, sous bien des aspects, une branche, était dorénavant détachée de l'art musical pour devenir une véritable science du phénomène sonore.



Galileo Galilée (1564-1642, physicien, astronome et ingénieur italien)

Proposée par Mersenne dans son *Harmonie universelle* (1637), la description de la première détermination absolue de la fréquence d'un son pur audible implique que l'auteur connaissait auparavant la valeur (1/2) du rapport des fréquences de deux cordes vibrantes émettant une note musicale et son octave. L'harmonie des deux notes perçues était alors explicable si le rapport des fréquences oscillatoires de l'air était aussi de 1/2. L'analogie avec les ondes à la surface de l'eau fut renforcée non seulement par l'idée selon laquelle le mouvement de l'air associé à un son musical est oscillatoire, mais aussi par le fait que le son se propage à une vitesse finie. Cette analogie fut également étayée par la connaissance de l'aptitude du son à contourner les obstacles, à diffuser dans toutes les directions à partir de la source, à interférer avec lui-même. Vint encore s'ajouter l'expérience de Robert Boyle (1660) sur le rayonnement sonore d'une petite horloge enfermée dans une cloche de verre où il fit un vide partiel, expérience qui montra la nécessité de la présence d'air pour la production et la transmission du bruit.



Marin Mersenne (1588-1648, moine français)

Cependant, le point de vue ondulatoire ne fut pas partagé par tout le monde. Le philosophe et mathématicien français Gassendi (1592 - 1655), par exemple, contemporain de Mersenne et de Galilée, affirma dans sa *Théorie Atomique* que le son était dû à un courant d'atomes émis par l'objet sonore ; célérité et fréquence du son étaient interprétées respectivement comme la vitesse des atomes et leur nombre émis par unité de temps...



Expérience de Robert Boyle (1627-1691)

Le conflit apparent entre théorie des rayons et théorie des ondes joua un rôle majeur dans l'histoire de la science soeur, l'optique, mais la théorie du son fut seulement développée comme une théorie ondulatoire. Le savant hollandais Christiaan Huygens (1629-1695), dans son *Traité de la lumière* publié en 1690, donna une explication globale des phénomènes sonores et lumineux ; il les interpréta tous deux comme



Pierre Gassendi (1592-1655, philosophe et mathématicien français)

étant dus à la propagation d'ondes longitudinales associées aux vibrations des molécules des corps élastiques dans le cas du son, et comme étant dus aux mouvements ondulatoires de l'éther, substrat hypothétique des phénomènes lumineux, dans le cas de la lumière.

La théorie mathématique de la propagation sonore a commencé avec Isaac Newton (1642-1727), célèbre mathématicien, physicien, astronome et philosophe anglais. Son oeuvre a été universellement reconnue d'une fécondité extrême. Les progrès substantiels dans le développement de la théorie de la propagation du son qui apparurent au XVIII<sup>e</sup> siècle avec le Suisse Léonard Euler (1707-1783), les Français Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) et Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) en témoignent. Durant cette époque, la physique du continu ou théorie des champs (dont le champ sonore) commença à accéder à sa structure mathématique définitive. Depuis lors, les théories, aussi complexes soient-elles, sont considérées pour la plus grande part comme des raffinements de celles qui datent de cette période.



*Joseph Louis Lagrange (Comte de-)  
(1736-1813, mathématicien français)*



*Jean le Rond d'Alembert (1717-1783,  
philosophe, mathématicien et physicien,  
français)*



*Christiaan Huygens  
(1629-1695,  
mathématicien et  
physicien hollandais)*



*Isaac Newton (1642-  
1727, physicien,  
philosophe,  
mathématicien  
anglais)*

Ces recherches à caractère mathématique, du XVIII<sup>e</sup> siècle, ont profondément marqué la progression de la connaissance en acoustique ; plus généralement, elles ont introduit les fondements théoriques qui permettent l'interprétation de l'ensemble des phénomènes de la physique classique. La conjonction de ces découvertes fondamentales et de l'apparition des méthodes et techniques expérimentales est à l'origine des multiples développements que connut l'acoustique au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Parmi ceux-ci, citons ceux qui permirent l'analyse des sons, la mesure de la vitesse de propagation des perturbations sonores et la visualisation des vibrations dans l'onde acoustique.

L'analyse des sons complexes a été effectuée expérimentalement par le physiologiste et physicien allemand, Hermann von Helmholtz (1821-1894) au moyen de résonateurs qui portent son nom. Il a montré qu'à tout son musical de hauteur donnée est associé un timbre qui résulte de la superposition au son fondamental d'une série d'harmoniques. Ce que Helmholtz déduisit d'expériences fait suite aux travaux sur la fréquence des sons du physicien français Félix Savart (1791-1841) et avait déjà été pressenti au XVIII<sup>e</sup> siècle par le célèbre musicien Jean-Philippe Rameau (1683-1764), puis, suivant une voie toute différente, par le mathématicien français Gaspard Monge (1746-1818). L'analyse mathématique de ces sons complexes repose sur les célèbres travaux du mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830), qui font toujours autorité.



*Hermann L. von Helmholtz  
(1821-1894, physiologiste et  
physicien allemand)*



*Fourier Jean-Baptiste  
Joseph, (1768-1830,  
physicien et statisticien  
français)*

La **vitesse de propagation du son** a fait l'objet de nombreuses mesures. A son époque, Mersenne proposa une valeur approchée ; mais les premières mesures fiables ont été effectuées dans un programme de l'Accademia del Cimento de Florence en 1660.

Différentes expériences ont été menées en Angleterre et en France, les plus célèbres restant celles du physicien et chimiste français Victor Regnault (1810-1878), effectuées vers 1860-1870 dans des tubes de longueurs allant jusqu'à 4900 mètres (égouts de Paris).



*Victor Regnault (1810-1878, physicien et chimiste français)*

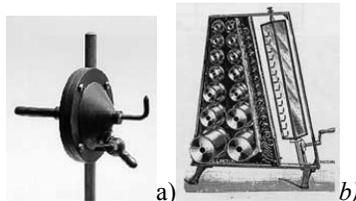
Concernant la propagation du son dans l'eau, les véritables pionniers de l'acoustique sous-marine sont, selon les spécialistes, le physicien Colladon et le mathématicien Sturm. C'est sur le Lac Léman (Genève), en 1826, qu'ils réalisent des expériences sur la propagation acoustique dans l'eau (figure 1.6) : les expérimentateurs se trouvent dans deux bateaux séparés de 13 km.

A l'un des bateaux est suspendue une cloche de bronze, frappée par un marteau articulé. Une lance à feu fixée au manche du marteau allume une masse de poudre à l'instant du coup sur la cloche. Dans l'autre bateau, l'expérimentateur porte un cornet acoustique dont le pavillon est dirigé vers l'autre bateau. L'expérience se déroule de nuit, de manière à ce que l'observateur muni du cornet acoustique voie la lueur de l'éclair.



*Figure 1.6 : Expériences faites en 1826 sur le lac de Genève par les physiciens Colladon et Sturm. Gravures en provenance de "Les phénomènes de la physique", par Amédée Guillemin, édition Hachette, Paris 1868.*

La visualisation des vibrations de l'onde acoustique a été proposée pour la première fois en 1862 par le physicien français d'origine allemande Karl Rudolf Koenig (1832-1901). Il inventa la capsule manométrique qui, excitée par une onde sonore, modulait le jet de gaz alimentant une flamme ; cette modulation se répercutait sur la hauteur de la flamme dont la projection au moyen de miroirs tournants donnait l'image de la perturbation acoustique.



*Capsule a) et analyseur b) manométriques de Koenig*

A l'aube du XX<sup>e</sup> siècle, le couronnement des recherches en acoustique a été marqué par l'oeuvre magistrale du savant anglais John William Strutt, lord Rayleigh (1842-1919), qui, notamment, synthétisa les connaissances acquises dans son traité *The theory of sound*, dont la première édition parut en 1877 (t. I) et 1885 (t. II). Les bases de l'acoustique étaient désormais posées.



*John William Strutt (Lord Rayleigh), (1842-1919, mathématicien et physicien anglais)*