



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider-Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Architecture

Année universitaire : 2019—2020

1^{ère} année master : Architecture

Matière : Equipement II Acoustique du bâtiment

Enseignant : Dr MEZERDI Toufik

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DES SONS ET DES BRUITS

Cour N°03: Son et onde sonore

Cour N°02: son et onde sonore





Cour N°02: son et onde sonore



2

Cour N° 02

Plan du cour

- 1 Théorie de l'acoustique
 - 1 1 Notions clés des la théorie de l'acoustique
 - 1 2 Définition de l'Acoustique
 - 1 3 Définition du son
- 2 Le son
 - 2 1 Origine du son
 - 2 2 L'onde sonore
 - 2 2 1 Les types d'ondes
 - 2 2 2 Formation d'une onde acoustique
 - 2 2 3 Propagation du son
 - 3 Equation de propagation du son
 - 3 1 Principe fondamentale de la dynamique
 - 3 2 Loi de conservation de l'énergie
- Références bibliographiques

2



1. Théorie de L'Acoustique

La théorie du son ou L'acoustique (terme forgé a partir du verbe grec (akouô),qui signifie « écouter » par Joseph Sauveur, vers 1700)

1. 1 Notions clés de la théorie de L'Acoustique

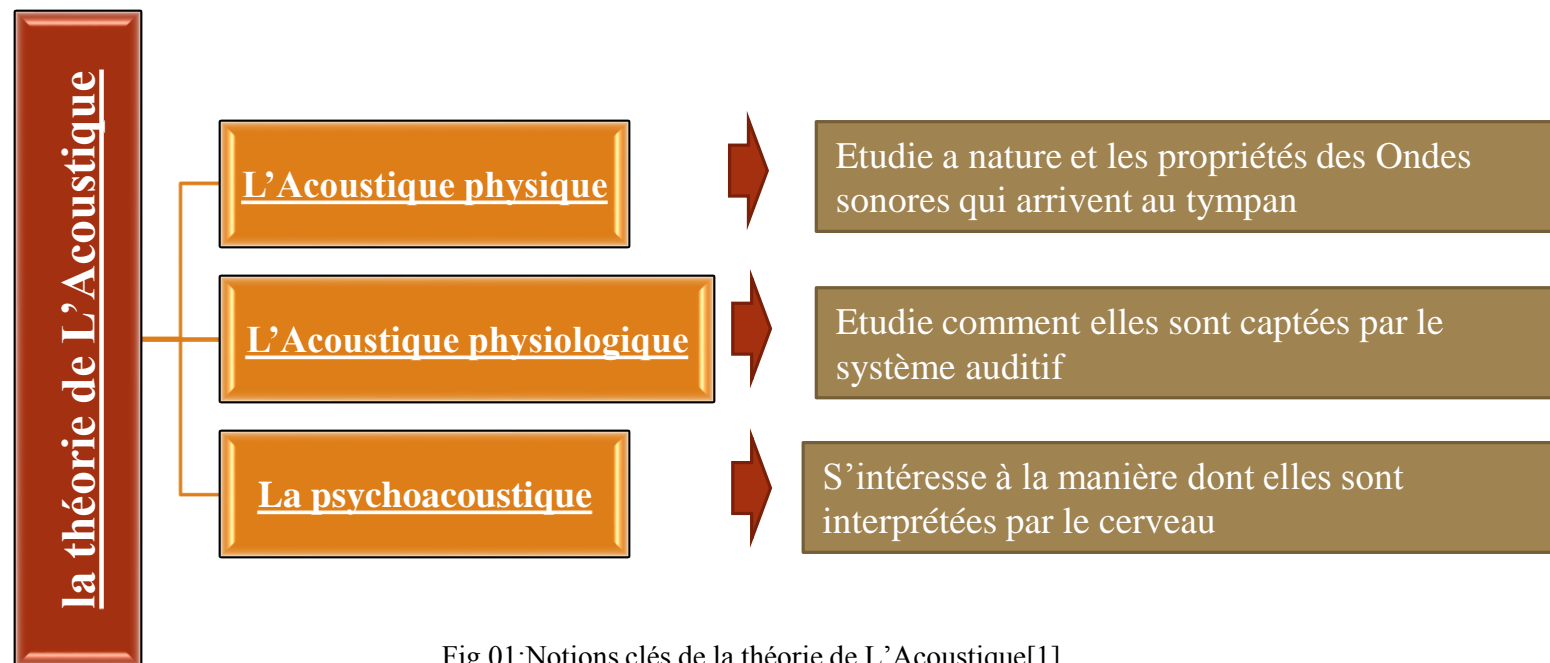


Fig 01:Notions clés de la théorie de L'Acoustique[1]



1 2 . Définition de L'Acoustique

L'acoustique est le domaine de la science qui a pour objet d'étudier les problème physique ,physiologique ,et psychologique lié a l'émission , la propagation et la réception des son et des bruits [2] L'acoustique a des applications dans de nombreux domaines des sciences de l'ingénieur, mais aussi dans les sciences de la vie et de la terre, les sciences de la santé ainsi que dans les sciences humaines et sociales (Fig 02,03).

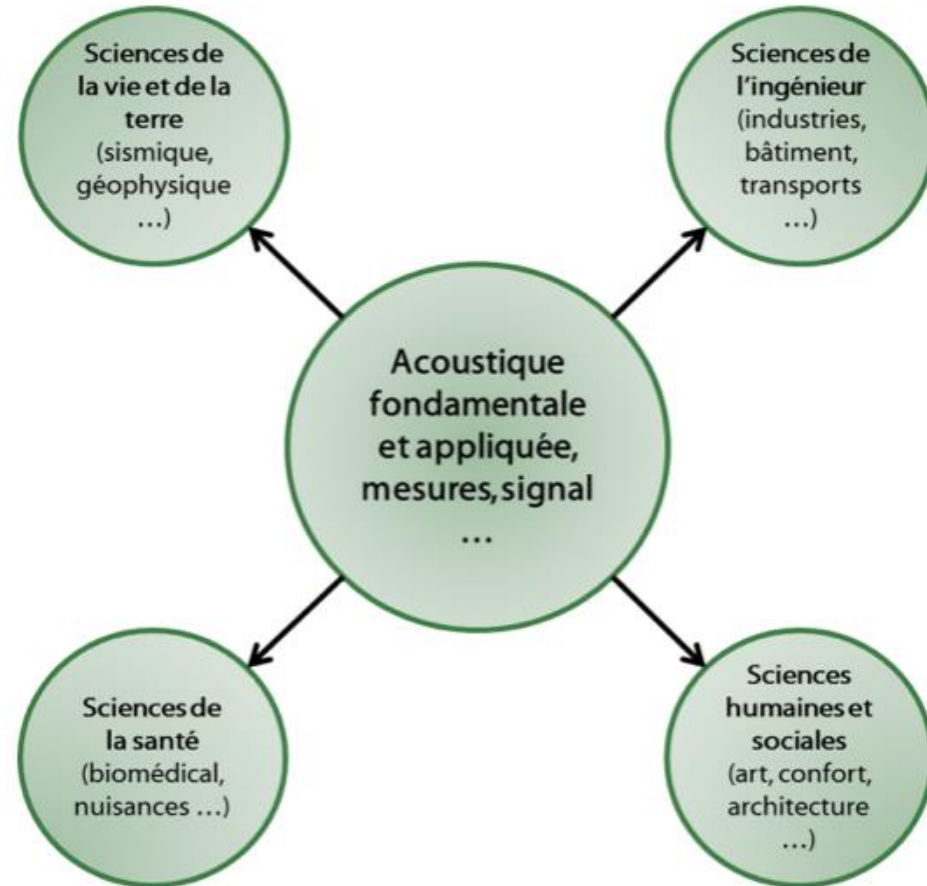


Fig 02: Domaines d'applications de l'acoustique (Source: [http://asm-acoustics .be/fr/notions-acoustiques/acoustique](http://asm-acoustics.be/fr/notions-acoustiques/acoustique)



Cour N°02: son et onde sonore

5

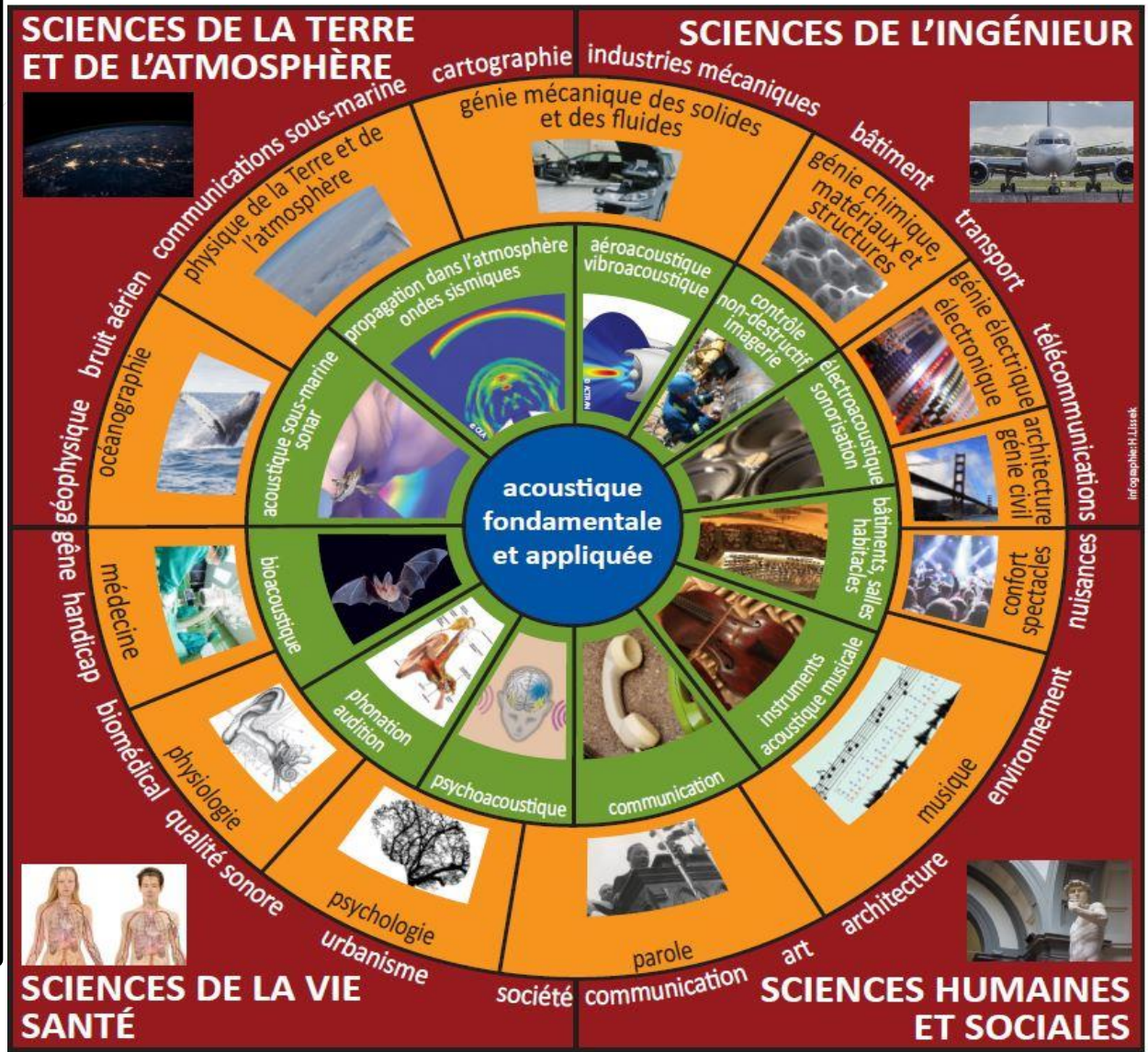


Fig 03: disciplines associées à l'acoustique. Le premier anneau à partir du centre contient les subdivisions traditionnelles de l'acoustique et l'anneau extérieur les noms des champs artistiques et techniques qu'elle couvre [3] .



1 3. Définitions du son

Un son. correspond à tout phénomène provoquant une sensation auditive (c'est-à dire pouvant être perçu par l'oreille). Cette sensation est créée par un mouvement vibratoire dans un milieu comme l'air. Cependant, le son peut se propager dans l'eau (on parle d'acoustique sous marine) et dans les solides (par exemple, dans les rails de chemin de fer) [4]

Le son correspond à une vibration d'un milieu mécanique (fluide, solide) qui se propage dans le temps et dans l'espace avec une célérité c , dépendant du milieu de propagation. Il est produit par une source sonore (membrane de haut-parleur, voix, instrument de musique, frottement, etc.) et, à la différence de la lumière, sa propagation nécessite un milieu matériel [5].

Le son est la sensation auditive engendrée par une onde acoustique qui se propage dans un milieu. L'onde acoustique résulte d'une vibration de l'air due à une suite de pression et de dépression. Tout son résulte de la vibration d'un corps [6].



1 4 Origine du son

Tout organe mécanique en état de vibration donne naissance ,par l'intermédiaire de son enveloppe à une onde acoustique Les particules fluides ,en contact avec l'enveloppe ,sont alors soumises du fait de leur élasticité alternativement à des compressions Et des dépression , de part l'inertie du milieu environnant ,ces perturbations de pression se transmettent de proche en proche dans le Milieu à une vitesse C appelée célérité du son qui dans le de l'air est :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_{atm}}{\rho_0}} \quad \text{où} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4 : \quad \text{coefficient isentropique}$$

$P_{atm} = 10^5 \text{ Pa} :$ pression atmosphérique
 $\rho_0 :$ masse volumique de l'air (kg/m³) (fonction de la température)

l'élasticité du milieu de propagation produit sur l'élément fluide déplacé une force tendant à le ramener à sa position D'équilibre ,de sorte que la propagation s'effectue sans transfert de matière La vibration des particules autour de leur position D'équilibre est appelée vitesse particulière v (t) fonction du temps Les ondes se propageant dans une direction donnée sont telles que la vitesse particulière en un point est colinéaire à la direction de propagation de l'onde on parle dans ce cas d'ondes longitudinales Cette onde sonore se propage dans toutes les directions de l'espace entourant la source On appellera surface d'onde La surface dont tous les points sont dans un même état vibratoire [7]



À l'origine d'un son, il y a donc un mouvement et, pour effectuer un mouvement, il faut dépenser de l'énergie. En d'autres termes, lorsqu'on entend un son, il s'est produit – ou il est en train de se produire – un événement, proche ou distant, dont l'onde sonore porte la trace matérielle jusqu'à nos oreilles. [8]

2. L'onde sonore

Une onde sonore est la propagation de proche en proche d'une perturbation caractérisée par une vibration des molécules du milieu autour de leurs positions d'équilibre (ou état de repos). En effet, suite à une perturbation, créée à l'origine par une source mécanique, les molécules subissent de faibles variations de pression (pression acoustique) ; elles s'entrechoquent entre elles pour transmettre la déformation (perturbation) subissant ainsi de micro-déplacements. Ces molécules reviennent à leur position initiale une fois la perturbation passée ; c'est une propagation d'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière (Fig 04)

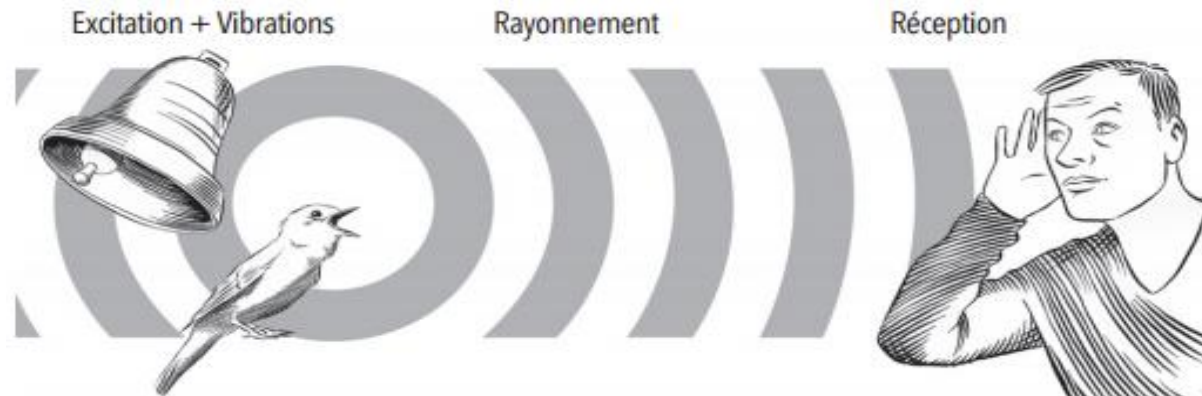


Fig 04: De l'excitation à la réception d'un son [8]



On rencontre deux sortes d'ondes :

- **Les ondes de vibrations mécaniques**, qui se propagent dans les milieux élastiques (cordes, solides, liquides, gaz), mais *ne se propagent pas dans le vide*. Les ondes sonores font parties de cette famille dans la limite où leurs fréquences restent dans le domaine audible (16 Hz, 20000 Hz).
- **Les ondes électromagnétiques** (ondes hertziennes, ondes lumineuses, rayons X ...) qui se propagent parfaitement dans le vide et se propagent dans les milieux en y étant plus ou moins absorbées. Les ondes électromagnétiques ne seront pas développées, mais ils faut savoir qu'elles peuvent être utiliser pour transporter des ondes sonores (Radio diffusion, Télévision ...)

2.1 Formation d'une onde acoustique

La propagation de l'onde acoustique correspond à un déplacement des zones comprimées et dilatées et non à un déplacement de particules matérielles: celles-ci sont uniquement mises en vibration autour de leur position d'équilibre(Fig 05)

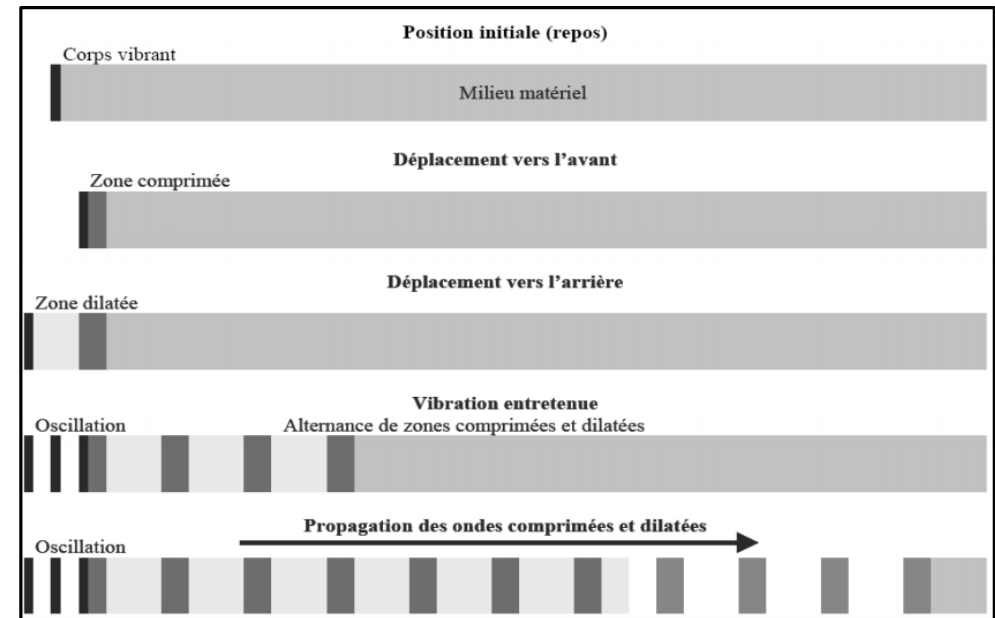


Fig 05 : Formation d'une onde acoustique (Source:<http://www.claudegabriel.be/Acoustique.html>)



Une onde est invisible. Elle ne peut donc pas se représenter matériellement. Cependant, certains phénomènes témoignent de la présence de ces ondes. C'est le phénomène de propagation. Il suffit de jeter une pierre dans l'eau pour voir apparaître des ondes. Fig 06



Fig 06: Phénomène de propagation des ondes sur l'eau (Source: <http://tpewifilifi.e-monsite.com/pages/les-ondes-radio-des-ondes-electromagnetiques.html>)

L'onde sonore se distingue de l'onde lumineuse dans le sens où elle nécessite de la matière pour se propager, alors que l'onde lumineuse, portée par des photons, peut se déplacer même dans le vide. (<https://sites.google.com/site/tpe1ssaintmichelle/son/i>) Fig 07

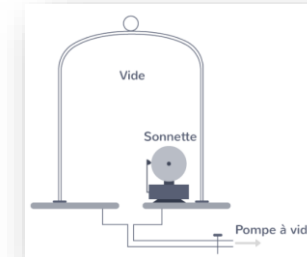


Fig 07: une sonnette dans une cloche dans laquelle le vide a été fait (Source: <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/lemission-dun-son/49898>)

Une onde acoustique est un phénomène qui peut se produire dans d'autres milieux que l'air. L'oreille entend les sons résultant d'une onde acoustique se propageant dans l'air. Afin d'entendre quelqu'un situé derrière un mur, cette onde acoustique traverse d'abord la couche d'air entre la personne et le mur, puis le mur (solide) puis la couche d'air entre le mur et l'auditeur. Fig 08

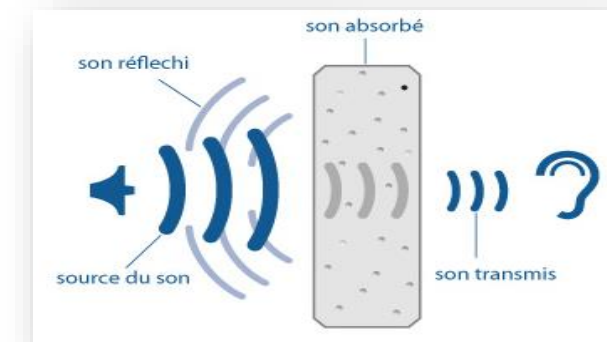


Fig 08: propagation solide <https://www.cellumat.fr/atouts/une-isolation-acoustique-remarquable-avec-nos-blocs-de-b%C3%A9ton-cellulaire>



2.2 Propagation du son

Le **son** est une vibration mécanique : pour **se propager**, il a besoin d'un support matériel susceptible de **se déformer** à **son** passage. Dans un fluide compressible, le plus souvent l'air, cette propagation **se** fait sous forme d'une variation de **pression** créée par la source sonore (Fig 09)

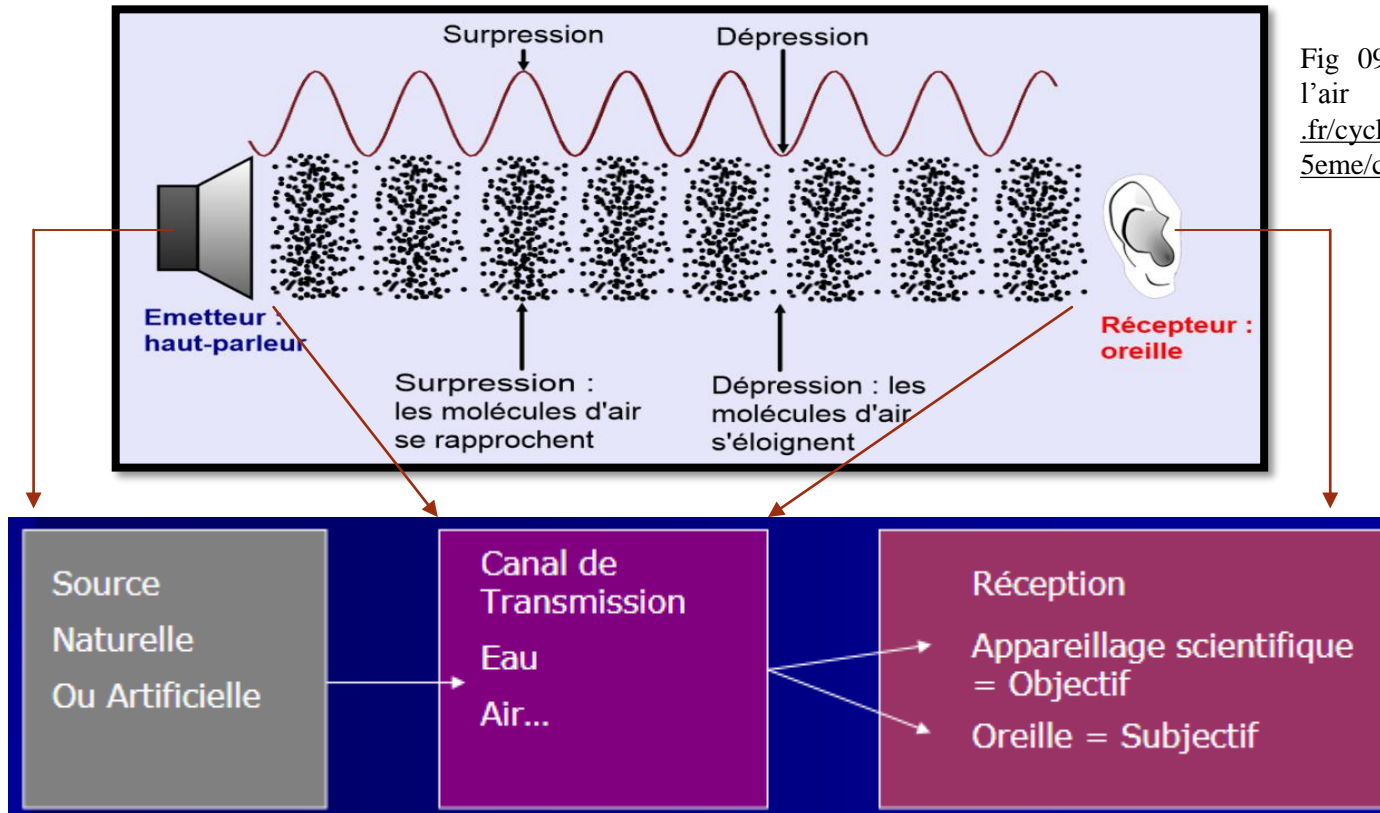


Fig 09: Propagation du son dans l'air (Source: <http://pccollege.fr/cycle-4/cycle-4-classe-de-5eme/chapitre-ix-le-son/>)



Une onde acoustique se propage dans l'air sur une certaine distance, appelée distance de propagation. En effet, l'onde est amortie au fur et à mesure de son parcours dans le milieu.

Les ondes acoustiques dans l'air sont des ondes longitudinales, contrairement aux vagues qui sont des ondes transversales (Fig 10,11)

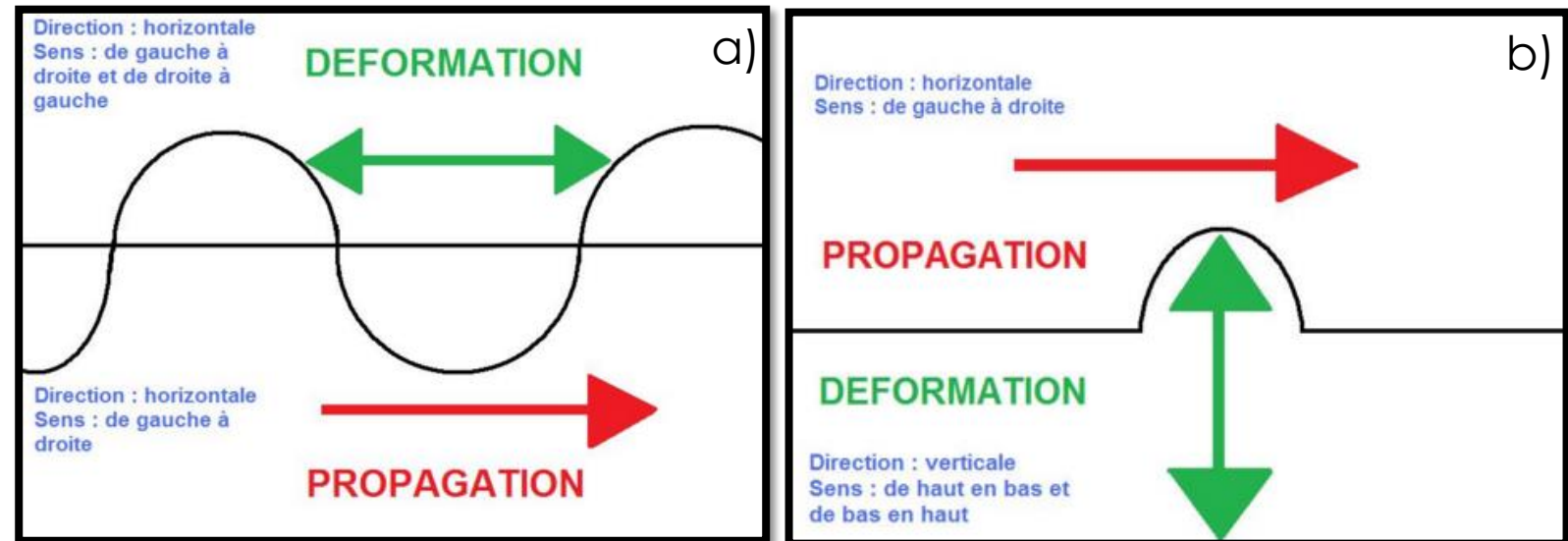


Fig 10: onde longitudinale (a) onde transversale (b) (Source: <https://tpechavesourisultrasons.wordpress.com/2014/01/06/a-generalites-sur-le-ondes/>)



Ondes longitudinales: Une onde est dite longitudinale si la déformation du milieu matériel qu'elle provoque est parallèle à la direction de la propagation de la perturbation. Par exemple l'onde qui se propage dans un ressort

Onde transversales : Une onde est dite transversale lorsque la déformation du milieu provoqué par l'émission de l'onde est perpendiculaire à la direction de la propagation de la perturbation par exemple propagation 'une onde transversale le long d'une corde

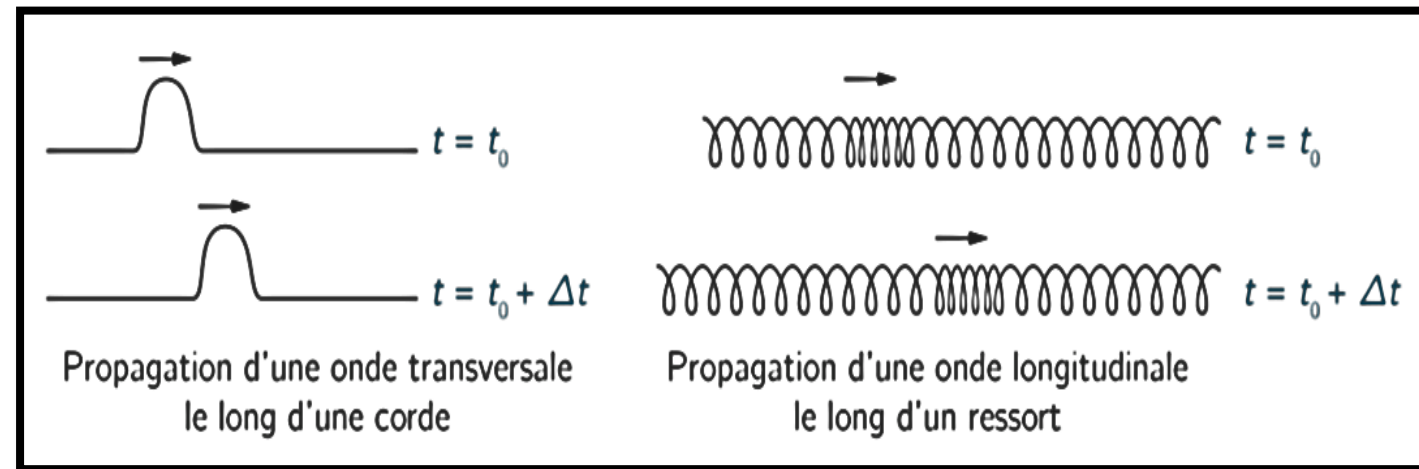


Fig 11: exemple d'onde transversale et longitudinale (Source : <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/caracteristiques-des-ondes/22485>)



3. Equation de propagation d'onde

En tout point du volume d'air soumis au rayonnement vibratoire d'une source , la pression acoustique ou la vitesse particulaire sont dépendantes à la fois des coordonnées du point et du temps .

La propagation sonore est régie par une équation aux dérivées partielles.

Considérons un volume d'air élémentaire $\Delta V_0 = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ perturbé par une onde de pression plane $p(x,t)$ se propageant vers le x positifs (figure 1.8)

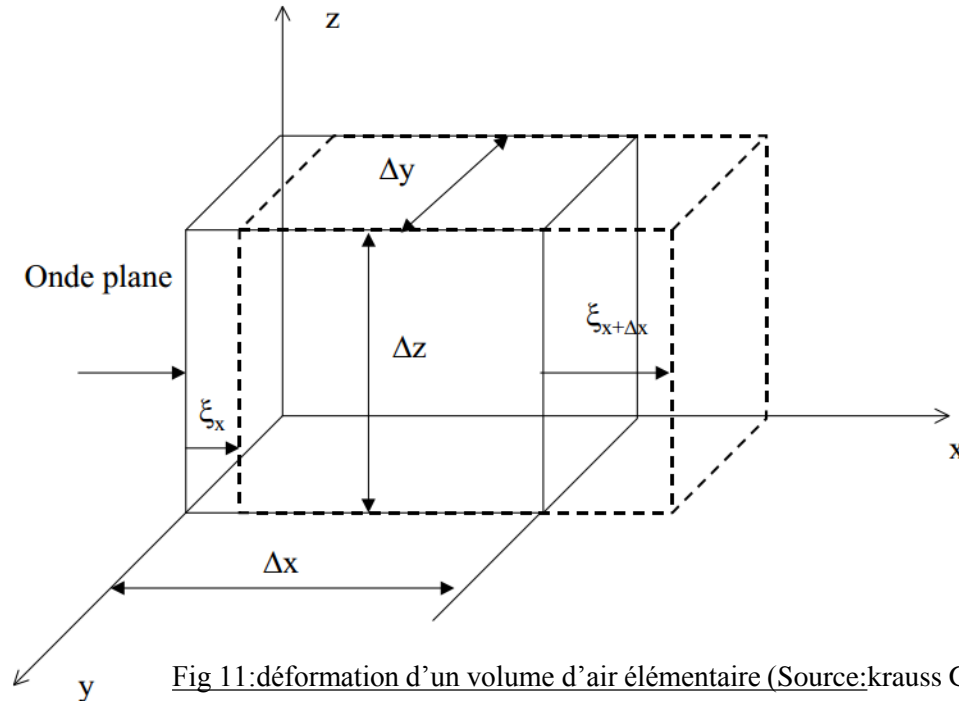


Fig 11: déformation d'un volume d'air élémentaire (Source: krauss G, yezou R, kuznik F "cours acoustique du bâtiment INSA Lyon (.2009/2010)



A un instant t donné s'exerce sur les frontières x et x+Δx respectivement les pressions p(x,t) et p(x+Δx ,t).Ce gradient de pression crée un déplacement des 2 frontières notés respectivement ξ_x et ξ_{x+Δx} se traduisant par une déformation du volume . Il s'en suit une vibration particulière de vitesse v (t).

1.3.1. Principe fondamentale de la dynamique

Les lois de la dynamique des fluides et l'équation d'équilibre des forces qui s'exerce sur le volume d'air élémentaire conduit à l'expression :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \tag{1.4}$$

ρ₀ masse volumique de l'air (1.2kg/m³ à 20°C)

1.3.2. Loi de conservation de l'énergie

Les compressions et dépressions successives du milieu se traduisent par des variations de température que l'on peut considérer comme infinitésimales .On admet couramment l'adiabaticité des transformations représentée par la relation

$$P.(\Delta V)^\gamma =cte \tag{1.5}$$

avec P(t)=Patm+p(t) pression totale
Patm pression atmosphérique ≅ 10⁵ Pa

où sous forme différentielle



$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{d(\Delta V)}{\Delta V} = 0 \quad (1.6)$$

avec $\Delta V = \Delta V_0 + \tau$ où τ représente la variation de volume consécutive à l'onde acoustique ΔV_0 volume initial (en l'absence d'onde)

En considérant $p(t)$ et τ infiniment petit devant P_{atm} et ΔV_0 la relation (1.6) devient

$$\frac{1}{P_{atm}} \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\gamma}{\Delta V_0} \frac{\partial \tau}{\partial t} \quad (1.7)$$

$$\text{avec } \tau = (\xi_{x+\Delta x} - \xi_x) \Delta y \Delta z = \frac{\partial \xi}{\partial x} \Delta V_0$$

$$\text{soit } \frac{\partial \tau}{\partial t} = \Delta V_0 \frac{\partial v}{\partial x}$$

d'où

$$\frac{1}{P_{atm}} \frac{\partial p}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.8)$$

Les expressions (1.4) et (1.8) établissent les relations entre pression acoustique et vitesse particulaire en un point du domaine fluide .

Afin d'éliminer la fonction $v(x,t)$ de ces deux expressions on dérive/x la relation(1.4) et /t la relation (1.8).Par combinaison des 2 dérivations on aboutit à l'équation d'ondes

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma \cdot P_{atm}} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.9)$$



La quantité $\frac{\gamma P_{atm}}{\rho_0}$ à la dimension d'une vitesse au carré qui représente la célérité c des ondes

dans l'air $c = \sqrt{\frac{\gamma P_{atm}}{\rho_0}}$ (c=340m/s à 20°C)

Remarque

Par inversion des dérivées sur les relations (1.4) et (1.8) on élimine alors la fonction p(x,t) .On aboutit à l'équation en vitesse particulière identique à l'équation d'ondes en pression

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma P_{atm}} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Equation d'ondes en coordonnées cartésiennes :

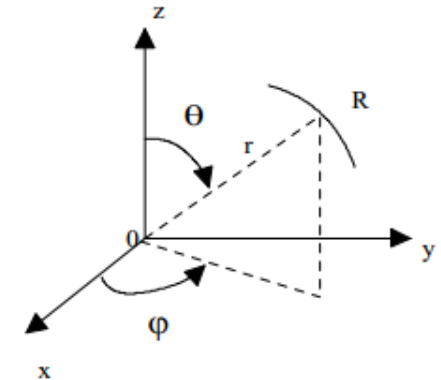
Dans un repère trirectangle(x,y,z) l'équation d'ondes est de la forme

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \text{ ou } \Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.10)$$

avec Δp : Laplacien

Equation d'ondes en coordonnées sphériques

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.11)$$



pour des ondes parfaitement sphériques la pression ne dépend que de r et



de t. L'équation d'ondes se réduit à

$$\boxed{\frac{\partial^2(p.r)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(p.r)}{\partial t^2}} \quad (1.12)$$

Cette équation d'ondes sphériques est à rapprocher de l'équation d'onde plane où la fonction $p(x,t)$ est remplacée par le produit $p(r,t).r$. En d'autres termes les solutions $p(x,t)$ sont analogues aux solutions $p(r,t).r$



Références bibliographiques

- [1] Claude, G.(2019) . Technique de l'image, première année du tronc commun et deuxième année en cinématographie .Consulté à l'adresse « <http://www.claudegabriel.be/Acoustique%20chapitre%201.pdf> » le 10/01/2020
- [2] Hamayon, L. (2013). *Réussir l'acoustique d'un bâtiment: conception architecturale, isolation et correction acoustiques*. Éd. le Moniteur.
- [3] Bruneau, A. M. (1983). Amplitude and phase measurements of vibrations of radiating surfaces in order to determine the emitted sound field. *Journal of the Audio Engineering Society*, 31(12), 907-913.
- [4] Guibert, E., Habault, D., Gautier, P. E., & Poisson, F. (2005). Psychomécanique appliquée à un système plaque/cavité.
- [5] Vilain, C., Pelorson, X., Hirschberg, A., Willems, J. F. H., & Marre, L. L. (2001). Study of the airflow through in-vitro oscillating pathological vocal folds. In *Second International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*.
- [6] Christophe Cloud Cours d'acoustique du bâtiment et de l'environnement - IUT GC - Université de La Rochelle
- [7] krauss G, yezou R, kuznik F(2009) cours acoustique du bâtiment.Consulté à l'adresse « <http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=166162&id2=0> » le 19/01/2020
- [8] Fürniss, S. (2016). Michèle CASTELLENGO: Ecoute musicale et acoustique. Paris: Eyrolles, 2015. *Cahiers d'ethnomusicologie. Anciennement Cahiers de musiques traditionnelles*, (29), 223-226.