

# COMPORTEMENT ACOUSTIQUE

L'acoustique est la science physique et physiologique de l'émission, de la propagation et de la réception des sons. Si les premières connaissances en la matière sont déjà anciennes, les lois établissant le caractère vibratoire des ondes sonores ne datent que du XVII<sup>e</sup> siècle.

Le développement des nuisances sonores en milieu urbain et la sensibilité croissante du public à ce problème ont conduit à une augmentation des exigences de qualité acoustique des constructions.

Le bruit est un assemblage de sons désagréables et indésirables. Il affecte immédiatement l'oreille, mais à long terme, il peut avoir des conséquences sur le comportement humain.

Le bruit dans l'environnement et dans l'habitat est une préoccupation majeure pour la population. Pour réduire les bruits, une des solutions est l'utilisation des matériaux absorbants acoustiques passifs, comme les mousses, les laines de verres ou de roche. Les matériaux bétons légers offrent aussi des propriétés absorbantes. Cependant, la maîtrise des comportements acoustiques de ces matériaux, à partir de leur dimensionnement, n'est pas totalement acquise.

L'objectif principal de cette étude est de mesurer les propriétés d'absorption acoustique des bétons légers de pouzzolanes naturelles.

---

La qualité acoustique d'une construction dépend de la maîtrise de la propagation du bruit. Elle englobe deux notions :

- ✓ L'isolation acoustique, c'est-à-dire la capacité des éléments de construction à limiter la propagation du bruit. Elle s'exprime en dB ;

- ✓ L'absorption acoustique, c'est-à-dire la capacité d'un produit à absorber une certaine quantité d'énergie sonore (elle s'exprime en  $\alpha$  Sabine, pour des valeurs comprises entre 0 et 1).

Le confort acoustique d'un local se caractérise par la durée de réverbération T qui varie en fonction du coefficient d'absorption des produits utilisés.

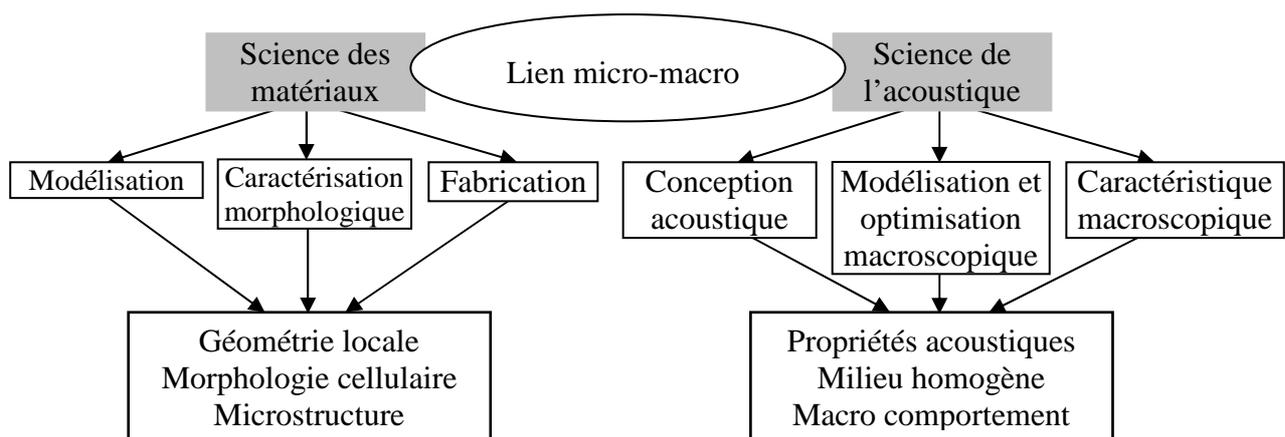


Figure n°10 : Problématique de l'acoustique des matériaux poreux

À l'échelle de la géométrie locale du matériau poreux, pour des géométries simples (feuillet, cylindres) des relations mathématiques relient la microstructure aux propriétés macroscopiques. Et c'est d'ailleurs de ces relations que dérivent les modèles macroscopiques

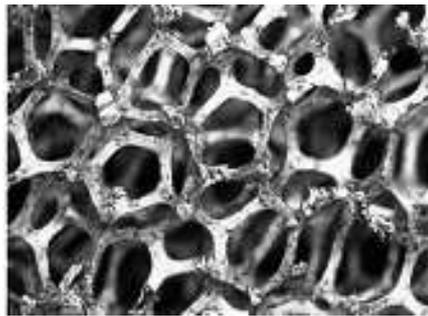
dominants. Mais dès qu'il s'agit de microstructures complexes telles que celles des pouzzolanes, les expressions sont imprécises ou inexistantes. Ce constat conduit à illustrer la problématique scientifique des matériaux poreux par la figure 10, ci-dessus.

Il apparaît que la science locale des matériaux réels (côté gauche) est ignorée de la science de l'acoustique (côté droit), qui fonctionne par conséquent aujourd'hui en vase clos. C'est grâce aux percées scientifiques récentes permettant d'accéder à la géométrie locale tridimensionnelle des matériaux qu'une approche microstructurale est aujourd'hui possible. Il s'agit par conséquent au cours de ce programme de recherche, de saisir une opportunité qui pourrait améliorer notre compréhension des phénomènes acoustiques en définissant la problématique suivante: Comment déterminer les propriétés acoustiques à l'échelle locale du matériau poreux réel ?

Au niveau de la fabrication des matériaux poreux, c'est la morphologie qui est contrôlée (côté gauche), tandis qu'au niveau acoustique, ce sont les paramètres acoustiques qui sont mesurés (côté droit), Figure n°10.

### **Principales caractéristiques des matériaux absorbants**

Les matériaux absorbants acoustiques sont des matériaux poreux dont les pores sont interconnectés et ouverts. L'intérieur des pores est rempli d'air. Ils agissent en dissipant l'énergie acoustique de l'onde incidence en chaleur dans la structure du matériau.



*Figure n°11: Exemple typique de structure d'un matériau acoustique [29]*

## **I.2. Les aspects techniques du son**

Le son est une sensation auditive provoquée par une onde acoustique. D'un point de vue physique, c'est une vibration se propageant dans un milieu matériel, d'un point de vue physiologique, c'est un signal perçu par le sens de l'ouïe. Le son, c'est donc ce que l'oreille perçoit de la vibration d'un corps. Généralement, il se propage sous la forme d'une onde dans l'air jusqu'à notre oreille, mais il se transmet aussi dans les liquides et dans les corps solides. Cet ébranlement de la matière se caractérise par une variation de pression se propageant de proche en proche. Plus la pression acoustique est grande, plus le volume sonore est important

### **I.2.1. Fréquence**

C'est le nombre de fois qu'un phénomène se reproduit dans une seconde (dans notre cas, le nombre d'oscillations par seconde). La fréquence s'exprime en hertz (Hz). Les multiples sont : le kilohertz (kHz), le mégahertz (MHz), le gigahertz (GHz).

Quand on veut caractériser un son selon son contenu fréquentiel, on distingue généralement dans un premier temps :

***1.2.1.1. Le son pur***

Son sinusoïdal caractérisé par sa fréquence d'oscillation. (Ex : la du diapason, son sinusoïdal généré par un haut-parleur alimenté par un Générateur Basse Fréquence...). Un son pur de fréquence basse paraîtra plus grave qu'un son pur de fréquence plus élevée.

***1.2.1.2. Le son complexe harmonique***

C'est une superposition de sons purs dont les fréquences sont multiples d'une fréquence appelée fréquence fondamentale (Exemple : voyelle « a », son d'instrument de musique.)

***1.2.1.3. Le son complexe inharmonique***

C'est une superposition de sons purs dont les fréquences n'ont pas de lien entre elles.

***1.2.1.4. Le bruit***

Il correspond à une variation «aléatoire » de la pression acoustique. (Ex : Bruit blanc, bruit rose.)

**I.2.2. Période**

L'inverse de la fréquence est la période T (Durée après laquelle le signal se reproduit identique à lui même à une position donnée). Elle s'exprime en secondes (s).

**I.2.3. Longueur d'onde  $\lambda$** 

C'est la distance au bout de laquelle le signal se reproduit identique à lui même à un instant donné. Elle s'exprime en mètres (m). La relation entre longueur d'onde et période fait intervenir la célérité c.  $\lambda = c \cdot T$ .

**I.3. Nature physique de l'onde acoustique**

Une onde, c'est une perturbation qui se propage dans un milieu. L'onde provoquée par la chute d'une goutte d'eau (figure ci-dessous) [30] illustre l'aspect d'une onde mécanique et sa propagation dans un milieu matériel. Les caractéristiques des ondes acoustiques dans l'air sont toutefois différentes quant à la vitesse de propagation, la fréquence, l'amplitude et la longueur d'onde.



*Figure n°12 : Propagation d'une onde*

L'oreille humaine est sensible aux ondes dont la fréquence est comprise entre 20 et 16000Hz [31]. On définit alors trois domaines de fréquences :

- 20 à 400 Hz : graves  $\rightarrow \lambda$  compris entre 0,85 et 17m ;
- 400 à 2000 Hz : moyennes  $\rightarrow \lambda$  compris entre 0,17m et 0,85m ;

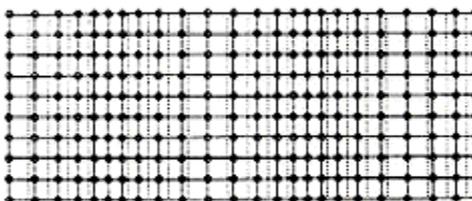
- Au-delà de 2000 Hz : aiguës  $\rightarrow \lambda$  inférieur à 0,17m.

On notera que la perception d'un son par l'oreille humaine ne dépend pas seulement de l'énergie mise en jeu par la source sonore et de la distance à laquelle cette dernière se trouve par rapport à l'auditeur, mais encore de la fréquence du son, c'est-à-dire, du caractère grave ou aigu du son.

Pour améliorer l'atténuation de bruits qui parviennent de l'extérieur par voie aérienne, il convient en général d'augmenter la masse de l'enveloppe du bâtiment (béton en lieu et place du bois, entre autres).

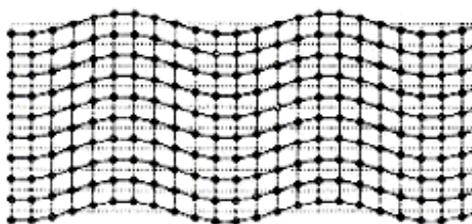
On distingue différents types d'onde acoustique en fonction du milieu de propagation :

- Dans les milieux fluides (air, eau) : on trouve presque uniquement des ondes longitudinales de compression-dilatation [32]. Il faut que le milieu en question soit compressible ;



*Figure n°13: Onde longitudinale*

- Dans les milieux solides : on trouve en plus des ondes longitudinales (de compression-dilatation), des ondes transversales (induites par des contraintes de cisaillement), ondes de torsion [31].



*Figure n°14: Onde transversale*

La vitesse des ondes de volume est une fonction des modules élastiques et de la masse volumique.

$$\rho V_L^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\rho V_T^2 = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

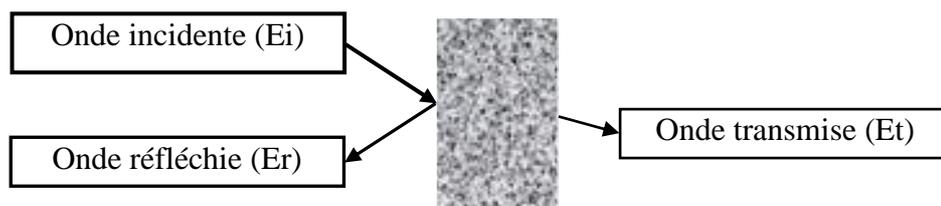
Les ondes longitudinales ont une oscillation parallèle à la direction de propagation, et les ondes transversales perpendiculaire à la direction de propagation. La vitesse des ondes transversales est généralement une fois et demie plus faible que celle des ondes longitudinales.

La courbe mathématique d'une onde permet de décrire l'évolution de la perturbation du milieu de propagation : elle représente la variation de la grandeur physique considérée, l'élongation, en fonction du temps. Cette variation est associée à un apport d'énergie. L'onde véhicule ainsi une information et de l'énergie en provenance de la source, modifiées par le(s) milieu(x) de transmission entre la source et le récepteur. Cette information est de nature différente selon le type d'onde. Quand une vibration est entretenue à l'identique, la perturbation se répète de façon cyclique sous la forme d'un train d'ondes successives. Les variations d'une onde périodique entretenue peuvent être représentées par une ligne sinusoïdale et il suffit de connaître la période pour définir toute la courbe.

On s'intéressera plus particulièrement dans la présente thèse à la propagation du son dans l'air (transmission aérienne) et dans les bétons pour les problèmes d'acoustique du bâtiment (transmission solidienne).

#### **I.4. Isolation et correction acoustique**

La propagation du son est perturbée lorsque des obstacles se dressent sur son passage. L'onde incidente génère une onde réfléchiée sur la surface du matériau et une onde transmise au travers de celui-ci.



*Figure n°15 : Comportement d'une onde en incidence oblique à la surface d'un matériau*

L'absorption des ondes sonores est utilisée pour insonoriser une pièce. Pour cela, il est préférable de recouvrir les murs de matières déformables ou tendres. L'onde sonore étant une onde de pression, elle va être amortie lors de la rencontre avec un obstacle mou et l'amplitude de l'onde réfléchiée sera considérablement plus petite que celle de l'onde incidente. D'une manière générale, les corps mous ou poreux amortissent l'onde et conduisent mal le son. (Laine de verre, coton). A l'inverse, les matières élastiques ou dures les propagent facilement (air, eau, bois, acier).

On parle d'isolation acoustique lorsque l'énergie transmise devient négligeable devant les autres composantes. Ceci se produit lorsqu'on désire limiter la propagation du son de part et d'autre d'un obstacle. Pour ce faire, on utilise des matériaux de forte inertie, que l'onde incidente ne peut pas mettre en mouvement. Il n'y a donc pas d'onde transmise par effets vibratoires. Les bétons légers, comme leur nom l'indique, ne fonctionnent pas par cet effet de masse.

On parle de correction acoustique lorsqu'on cherche à réduire les nuisances du bruit émis dans le local que l'on cherche à traiter. Le but est de limiter la création d'ondes réfléchiées sur les parois de la pièce car elles interfèrent avec les ondes incidentes et gênent l'intelligibilité du discours (problème de l'écho). Des matériaux poreux sont alors employés car ils ont la faculté de dissiper une partie de l'énergie de l'onde incidente (phénomène d'absorption).

## **II. ABSORPTION ACOUSTIQUE**

La troisième façon d'agir sur les ondes acoustiques est l'absorption. Les matériaux amortissent les sons par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie suppose que les ondes puissent pénétrer dans le matériau et disposer d'un espace suffisant pour être amorties. Il faut donc une certaine perméabilité et une porosité ouverte importante.

Ce paragraphe constitue une base théorique des propriétés acoustiques des bétons légers. Les systèmes d'absorption simples utilisant les bétons légers sont actuellement utilisés en acoustique du bâtiment ou dans la conception des silencieux.

## **II.1. Théories et équations de la propagation acoustique dans les tubes fins**

Pour bien comprendre les expressions des coefficients d'absorptions acoustiques des bétons légers, nous présentons les principales étapes qui permettent l'élaboration de ce coefficient. Dans un premier temps, nous nous intéressons à la propagation acoustique dans les tubes fins et nous présentons les équations de base. Ces dernières sont ensuite résolues en faisant l'approximation pour des tubes de petite épaisseur. Le coefficient d'absorption d'une cavité est exprimé. De ce coefficient, le coefficient d'absorption acoustique du béton léger est déduit.

Pour l'étude de la propagation acoustique dans les tubes rigides de moyens et grands diamètres, sur une certaine bande de fréquences, les effets visco-thermiques provoqués par la présence des parois sont négligés. L'épaisseur des couches limites visqueuses et thermiques est très petite devant les dimensions du tube (rayon). Les effets thermo-visqueux propres au fluide sont aussi négligeables. Pour l'étude de la propagation acoustique dans les tubes rigides de petits diamètres, les effets thermo-visqueux sur les parois ne sont plus négligeables lorsque les dimensions du tube approchent celles des couches limites visqueuses et thermiques. Il existe deux types d'effet :

### **II.1.1. Effet de viscosité :**

Cet effet est caractérisé par la vitesse tourbillonnaire du fluide proche des parois. Il est non négligeable uniquement dans la couche limite visqueuse [33]. L'épaisseur de cette couche limite dépend de la fréquence et des propriétés de viscosité du fluide de propagation :

$$d_{\text{visc}} = \sqrt{\frac{2\mu/\rho_o}{\omega}}$$

avec :

- $\omega$  : la pulsation,
- $\mu$  : la viscosité dynamique, et
- $\rho_o$  : la masse volumique du fluide de propagation.

Pour l'air, dans les conditions normales, ces épaisseurs sont comprises entre 0.5 et 0.015 mm pour les fréquences audibles 20 Hz- 20 kHz.

### **II.1.2. Effet de conduction thermique :**

Cet effet est caractérisé par la vitesse laminaire entropique du fluide proche des parois, il est non négligeable uniquement dans la couche limite thermique. L'épaisseur de cette couche limite est donnée par :

$$d_{\text{therm}} = \left( \frac{K}{(\rho_o C_v) \omega} \right)^{1/2}$$

où :

- $K$  : coefficient de conductivité thermique,
- $C_v$  : capacité calorifique à volume.

Pour l'air dans les conditions normales, ces épaisseurs sont comprises entre 0.58 mm et 0.02 mm pour les fréquences audibles 20 Hz- 20 kHz.[34]

Une solution exacte au problème de propagation dans les tuyaux de diamètres arbitraires, prenant en compte les effets visqueux et les transferts de température, a été proposée au milieu du 19<sup>e</sup> siècle par Kirchhoff (1868). Les travaux menés sur ces équations ont simplifié leur notation et leur résolution pour des configurations particulières. Zwikker et Kosten (1949) [35] ont traité séparément les effets visqueux et les effets de conduction thermique, ils ont pour cela exprimé une densité de fluide complexe. Leur approche analytique n'était valide que pour les « basses » et les « hautes » fréquences, la bande de fréquence intermédiaire n'était pas traitée. Tijdeman (1975) [36] a étudié de plus près cette approche analytique et l'a comparée à une étude numérique des équations de Kirchhoff. Il a trouvé une bonne comparaison entre ces 2 approches dans ces plages de fréquences. Stinson (1991) [37] a constaté que les solutions analytiques de Kirchhoff étaient généralement justes pour toutes les fréquences acoustiques, mais qu'elles étaient difficiles d'utilisation, il a proposé à partir de la base d'équations trouvées par Kirchhoff, des approximations simples trouvées numériquement. Il a ainsi déterminé des solutions approchées applicables. La comparaison de son approche avec les solutions de Zwikker pour certaines bandes de fréquences s'est avérée bonne, ainsi que la comparaison avec le modèle numérique basé sur les équations de Kirchhoff.

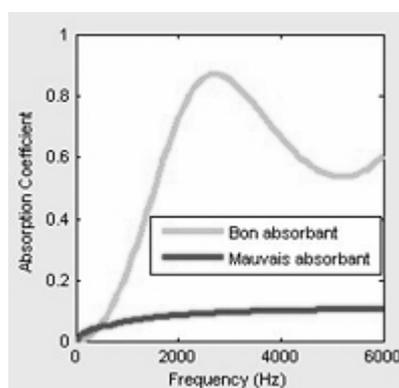
## II.2. Mécanismes

L'absorption acoustique prend effet à l'interface entre deux milieux : l'air de la salle et un matériau qui accumule de l'énergie. Dans la pratique, on rencontre deux types de matériaux absorbants dont les mécanismes intrinsèques sont bien distincts [29] :

1. Ceux pour lesquels l'interface reste fixe. Leurs porosités sont le siège d'une dissipation de l'énergie par frottement de l'air avec la structure rigide du matériau.
2. Ceux pour lesquels l'interface est « imperméable » et bouge sous l'effet de la pression de l'onde acoustique. Le prototype d'un tel matériau est le système (masse ressort) qui peut se décrire aussi comme un filtre résonnant ou résonateur.

**Tableau n°03 : Propriétés typiques d'un bon et d'un mauvais matériau acoustique [29]**

Matériau Name	Bon absorbant sonore	Matériau Name	Mauvais absorbant sonore
Open Porosity	0.96	Open Porosity	0.7
Tortuosity	2	Tortuosity	3.2
Viscous Length (m)	100	Viscous Length (m)	1200
Thermal Length (m)	200	Thermal Length (m)	2000



**Figure n°16 :** Courbe d'absorptions calculées pour les matériaux listés tableau n°03

La résistance au passage de l'air du mauvais matériau est beaucoup plus élevée que celle du bon. De même, les longueurs de pore caractéristiques sont de l'ordre de 100 $\mu$ m pour les bons absorbants, et dix fois plus grande pour les mauvais matériaux.

Les matériaux tels que décrits plus haut présentent des comportements globaux. Certains matériaux, tels les bétons légers, vont présenter une réaction plus locale.

### **II.3. Matériaux poreux pour l'absorption acoustique**

Le matériau poreux constitue des cavités très petites, pleines d'air et communiquent entre elles. Une onde acoustique frappant la surface d'un tel matériau est peu réfléchi, pénétrant et se dissipant presque intégralement dans le matériau. Les volumes étant faibles, n'agissent que sur les faibles longueurs d'ondes. Il y a un compromis à trouver entre l'épaisseur et la porosité.

#### **II.3.1. Principaux problèmes**

Selon l'A.F.N.O.R (Association Française de Normalisation), « Est bruit toute sensation désagréable ou gênante, tout phénomène acoustique produisant cette sensation, tous son ayant un caractère aléatoire qui n'a pas de composante définie »

Avant de chercher les caractéristiques des bétons légers de pouzzolanes, voyons d'abord les principaux chemins de propagation d'un bruit.

La pratique montre que les chemins principaux à surveiller dans une analyse acoustique sont :

- les transmissions directes par gaine d'appartement à appartement,
- les transmissions directes par paroi entre appartements mitoyens,
- les transmissions indirectes propagées par ossature, canalisation,
- les bruits d'impact,
- les transmissions directes par ouverture entre l'extérieur et l'appartement au niveau des façades.

La pratique montre aussi que les critères d'isolement sont demandés en premier par les occupants, sous une forme indirecte d'intelligibilité : ils ne veulent pas saisir le sens des conversations provenant des appartements mitoyens craignant d'être eux-mêmes entendus.

Rapporté à ses occupants, le problème est double :

- intelligibilité dans les locaux habités aux heures où doivent se produire des conversations ou une écoute d'appareil électroacoustique.
- intimité, c'est-à-dire : isolement des logements notamment pendant les périodes de repos et de sommeil pour chaque individu.

Il est évident que ces deux problèmes recouvrent les mêmes nécessités puisque le niveau de bruit qui perturbe le sommeil ou le repos perturbe aussi l'intelligibilité dans la mesure où il s'ajoute aux bruits intérieurs aux logements pour former le bruit résultant à l'intérieur des locaux habités. Cependant, on notera que l'intimité comporte la non intelligibilité par les voisins des conversations que l'on poursuit dans l'appartement concerné ou simplement le marquage des bruits émis, le bruit de fond intervient donc ce cas comme élément favorable.

##### ***II.3.1.1. Les sources de bruit***

On peut distinguer :

- Sources intérieures aux appartements :
  - ✓ bruits de conversation,
  - ✓ bruits ménagers (aspirateur...),

- ✓ bruits d'écoute électroacoustique,
  - ✓ bruits d'équipements immobiliers individuels (chaudière individuelle...).
- Sources extérieures aux appartements :
- ✓ bruits extérieurs du bâtiment (trafic, bruit de fond...),
  - ✓ bruits aériens des appartements mitoyens,
  - ✓ bruits d'impact des appartements mitoyens,
  - ✓ bruits des locaux collectifs d'immeubles,
  - ✓ bruits d'équipements collectifs (ascenseur, chaufferie...),
  - ✓ bruits émis dans les circulations communes (impact, aériens)

### ***II.3.1.2.Règles de qualité du logement***

En règle général et avant tout calcul, on peut lors de l'élaboration d'un projet de construction veiller à respecter les recommandations suivantes basées sur l'éloignement des sources de bruits.

- **Il est fortement déconseillé :**
  - de juxtaposer (ou superposer) la cuisine, la salle d'eau, le WC d'un appartement à une chambre d'un logement voisin,
  - de placer dans une chambre ou une salle de séjour des canalisations de fluides, ou des gaines contenant ces canalisations,
  - de fixer contre une paroi de chambre, à l'extérieur, des canalisations de fluides, vide-ordures ou équipements sanitaire, une gaine d'ascenseur,
  - de placer une chambre contre une montée d'escalier.
- **Il est déconseillé :**
  - de juxtaposer la cuisine et la chambre d'un même logement,
  - de juxtaposer le séjour et une chambre d'un même logement,
  - de placer une chambre contre une montée d'escalier.
- **Il est recommandé :**
  - de prévoir dans chaque logement un vestibule fermé de telle sorte que chaque pièce d'habitation soit séparée des circulations communes par au moins une porte, outre la porte palière.
  - de placer les chambres sur la façade la moins bruyante.
  - d'utiliser au mieux les éléments portants lourds et points de dilatation entre les parties d'un logement ou entre logements contigus.

## **II.3.2.Mesure des coefficients d'absorption et de réflexion**

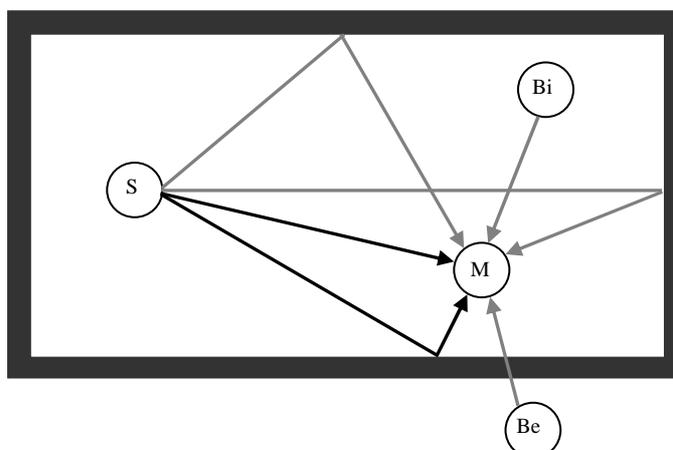
### ***II.3.2.1.Sources parasites***

L'opérateur est tenu d'emporter avec lui une source acoustique pour effectuer ses mesures. Mais rien ne dit que d'autres sources ne sont pas déjà présentes sur les lieux. Il peut s'agir d'équipements de natures diverses. On peut trouver à l'intérieur du local considéré, des éclairages, de l'appareillage informatique, une ventilation. Des bruits parasites peuvent aussi provenir de l'extérieur par transmission, comme des bruits d'équipements communs tels que les ascenseurs, des bruits de circulation dûs à la proximité d'un couloir, mais aussi de bruits d'origine extérieure à l'enveloppe même du bâtiment. En un point M du local, et en l'absence de source spécifique de mesure, le champ de pression peut se mettre sous la forme [38], où l'on dissocie bruit d'origine interne et bruit d'origine externe à l'enveloppe du local.

$$P(t) = b_i(t) + b_e(t)$$

L'absorption acoustique des revêtements de parois et des objets se trouvant à l'intérieur d'un local contribue au confort acoustique. En effet, elle limite la réverbération due à

la multiplicité des échos renvoyés par les parois et les objets. Lorsque la réverbération du son est trop importante à l'intérieur du local, l'intelligibilité de la parole, la reproduction sonore deviennent difficiles et les sources de bruits gênantes sont renforcées.

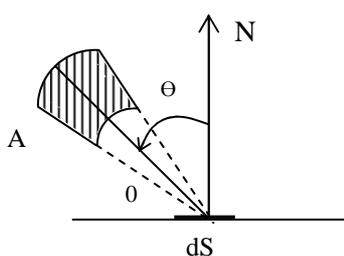


**Figure n°17**: dans un environnement non maîtrisé, comportant des sources parasites internes et externes, chemins de propagation multiples entre S et M en plus du chemin réfléchi. L'"utile" est représenté en noir, et le "nuisible" en gris.

L'importance du traitement en absorption acoustique est primordial dans de nombreux cas : salles destinées à recevoir du public, salles de réunion, bureaux, locaux industriels, etc... Les valeurs des coefficients d'absorption sont nécessaires aux architectes et acousticiens.

### II.3.2.2. Formule de SABINE

La durée d'audibilité d'un son est la même en tous les points d'une salle et ne dépend pas des positions relatives de la source et de l'auditeur, ni de celles des surfaces absorbantes et réfléchissantes. C'est à partir de telles considérations, en fait un peu arbitraire, que SABINE [39] a établi la formule qui porte son nom.



**Figure n°18** : Détermination de l'élément de volume

Considérons une surface  $dS$ . Elle reçoit de l'énergie de tous les points d'un hémisphère. Soit en particulier un volume  $dV$  situé en A dans une direction faisant l'angle  $\Theta$  avec la normale. Si  $\underline{E}$  est la densité d'énergie supposée uniforme, son énergie est  $E dV$ . A un certain moment, le son étant supposé se diffuser également dans toutes les directions, cette énergie est répartie sur une sphère de rayon  $r$  et la surface  $dS$  reçoit la quantité :

$$d_3W = \frac{E dV}{4\pi r^2} dS \cos \Theta$$

L'angle solide du cône d'ouverture  $\Theta$  vaut  $2\pi(1-\cos \Theta)$ . Sa différentielle est  $2\pi\sin\Theta d\Theta$  et cet angle correspond à un volume  $2\pi\sin\Theta d\Theta \cdot r^2 dr = dV$ .

La surface  $dS$  recevra donc de ce volume et en un temps  $dt$  égal à  $\frac{dr}{c}$ ,  $c$  étant la célérité du son :

$$d_3W = \frac{E dS}{4\pi r^2} 2\pi r^2 \sin\Theta \cos\Theta d\Theta \cdot c dt$$

$$d_2W = \frac{c E dS}{2} \sin\Theta d(\sin\Theta) \cdot dt$$

Si nous intégrons de 0 à  $\frac{\pi}{2}$ , nous obtiendrons  $d_2W = \frac{c E}{4} dS dt$

Supposons maintenant qu'il y ait dans une salle fermée une source de son de puissance  $P$  et que le coefficient moyen d'absorption des surfaces dont la somme est  $S$  soit  $\alpha$ , l'augmentation d'énergie de la salle de volume  $V$  en un temps  $dt$  sera de :

$$V dE = P dt - \frac{1}{4} c E \alpha S dt ; \text{ la surface } S \text{ ayant en effet reçu l'énergie } \frac{1}{4} c E S dt.$$

En régime permanent,  $dE$  est nulle et l'on aura  $E_0 = \frac{4P}{c \alpha S}$ . Mais supposons maintenant que

brusquement  $P$  devienne nulle. Il restera  $dE = - \frac{c \alpha S E}{4V} dt$ . D'où  $E = E_0 e^{-\frac{c \alpha S E}{4V} t}$

Soit:

$$t = \frac{4V}{c \alpha S} \text{Log} \frac{E_0}{E}$$

On a l'habitude de définir ce que l'on appelle le temps de réverbération d'une salle par le temps au bout duquel la densité d'énergie est devenue la millionième partie de la densité initiale. Si nous désignons ce temps par  $Tr$ , nous aurons :

$$Tr = \frac{4V}{c \alpha S} \text{Log} 10^6 = \frac{4V}{c \alpha S} 6.2,3 = 55,2 \frac{V}{\alpha c S}$$

Et si nous prenons le mètre comme unité de longueur et en faisant  $c = 340 \text{ m.s}^{-1}$ ,

$$Tr = 0,16 \frac{V}{\alpha S} = 0,16 \frac{V}{A}$$

Telle est la formule de SABINE. Elle nous a donné les coefficients d'absorptions du béton léger de pouzzolanes d'AMBOHINAORINA en fonction du dosage du béton utilisé.

### II.3.2.3. Temps de réverbération

Le temps de réverbération  $T$  est le temps nécessaire à l'énergie sonore pour décroître de 60 dB lorsque la source s'arrête d'émettre. [40]

L'absorption des différents matériaux varie fortement avec la fréquence et l'angle d'incidence de l'onde émise. Il s'en suit que le temps de réverbération varie avec la fréquence. En général, le temps de réverbération est plus long en basses fréquences, l'absorption étant faible.

Le temps de réverbération est très important pour la conception d'une salle ou d'un auditorium. Dans un local dont les surfaces sont hautement réfléchissantes (par exemple une salle de bain), le temps de réverbération est relativement long. En revanche dans une chambre anéchoïque (local dont les parois sont constituées de matériaux très absorbants), le temps de réverbération est pratiquement nul.

Si la salle est bien traitée, le temps de réverbération est à peu près constant pour toutes les fréquences

#### II.3.2.4. Matériaux et position

Le choix des matériaux et leur positionnement sont essentiels du point de vue acoustique. Les matériaux peuvent être classés selon trois grandes catégories suivant leur propriété acoustique : diffusant, réfléchissant ou absorbant. La forme, les matériaux et le mobilier doivent favoriser la diffusion du son, qui permet notamment de mieux tolérer une réverbération un peu trop élevée et d'éviter les phénomènes de focalisation. Les surfaces convexes, très texturées, irrégulières et non parallèles sont ainsi très favorables du point de vue acoustique.

Les matériaux réfléchissants doivent être utilisés dans les zones permettant de renvoyer le son précoce vers l'assemblée. On emploiera donc des matériaux réfléchissants (par exemple béton ou maçonnerie) proches des sources sonores pour les plafonds bas (hauteur < 10 m) et sur les parties inférieures des murs latéraux. Une surface réfléchissante permet de renvoyer spéculairement (comme un miroir) les sons dont la longueur d'onde est inférieure aux dimensions de cette surface.

Les matériaux absorbants, caractérisés par un coefficient d'absorption élevé, doivent être mis en place pour supprimer les phénomènes acoustiques gênants comme les échos et régler la réverbération.

#### II.3.2.5. Mesure d'absorption en tube de Kundt

Les mesures d'absorption sont effectuées selon la méthode dite du tube d'impédance. Cette méthode permet de mesurer l'absorption acoustique d'un matériau sous incidence normale. La mesure et le traitement des données sont réalisés selon la norme ASTM-E 1050-86 Le schéma suivant montre le principe de la mesure d'absorption en tube d'impédance.

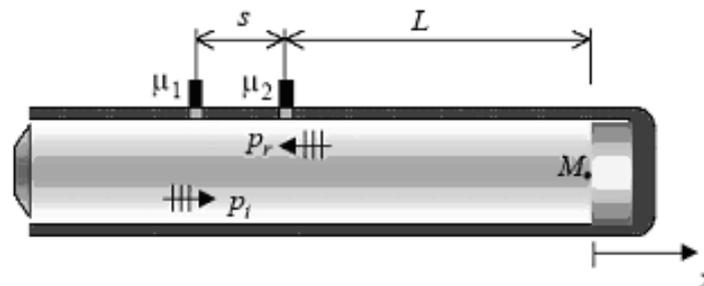


Figure n°19 : Principe de fonctionnement du tube d'impédance

Le haut-parleur émet une onde plane acoustique large bande. Une fraction de l'onde acoustique est absorbée par l'échantillon tandis qu'une autre partie est réfléchi à l'intérieur du tube, formant ainsi un système d'ondes stationnaires. Le champ acoustique à l'intérieur du tube se décompose donc en une partie propagative, correspondant à la fraction de l'énergie acoustique absorbée par le matériau, et une partie stationnaire, correspondant aux réflexions sur l'échantillon.

### III. CONCLUSION

Nous avons présenté une étude bibliographique de la structure poreuse et de l'absorption acoustique des matériaux absorbants comme le béton de pouzzolane et nous nous sommes particulièrement intéressé à leurs évolutions dans le cas où ce dernier est sollicité mécaniquement et soumis à une température. L'efficacité de ces procédés repose sur les paramètres suivants :

- la fréquence de travail,
- l'amplitude et la direction des vibrations,
- les dimensions de l'élément traité,
- la durée de l'opération,
- les caractéristiques du béton (composition granulométrique, dosage en ciment, teneur en eau, etc.).