

RÉSUMÉ DES FORMULES

Célérité du son	$c = 20\sqrt{T}$
Libre parcours moyen	$l = \frac{4V}{S}$
Absorption d'une salle	$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$
Temps de réverbération de Sabine	$TR = \frac{0,16V}{A}$
Coefficient d'absorption	$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$
Libre parcours moyen	$l = \frac{4V}{S}$
Nombre de réflexions par seconde	$n = \frac{cS}{4V}$
Absorption d'une surface S_i	$A_i = \alpha_i S_i$

1 Activité documentaire : Acoustique des salles (1 h 30)

1.1 La réfraction du son

En général, dans une salle, l'air est plus chaud au niveau du public. L'onde sonore est donc déviée vers le plafond (figure 1, schéma (a)).

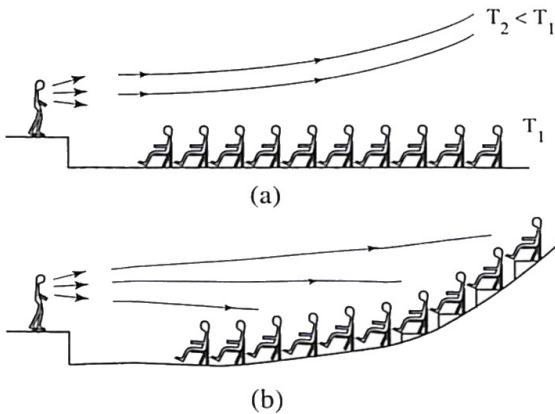


FIG. 1 – Réfraction de l'onde sonore.

C'est la raison pour laquelle on dit parfois que « le son monte » dans une salle, ce qui pénalise les places situées au fond de la salle. Le meilleur moyen pour pallier ce défaut consiste à incurver le plancher (figure 1, schéma (b)).

a. La célérité du son est liée à la température absolue par la formule $c = 20\sqrt{T}$. Expliquez l'origine de la réfraction dans une salle au niveau du public.

1.2 Réponse impulsionnelle d'une salle

Supposons qu'un son très bref (ce qu'on appelle une impulsion) soit émis par une source sonore et considérons un point de réception dans la salle (figure 2). L'onde est émise dans toutes les directions. Le premier front d'onde qui parvient au point de réception est celui qui part de la source pour atteindre directement le point de réception : on l'appelle le son direct. La multitude d'ondes réfléchies par les parois de la salle constituent le son réverbéré.

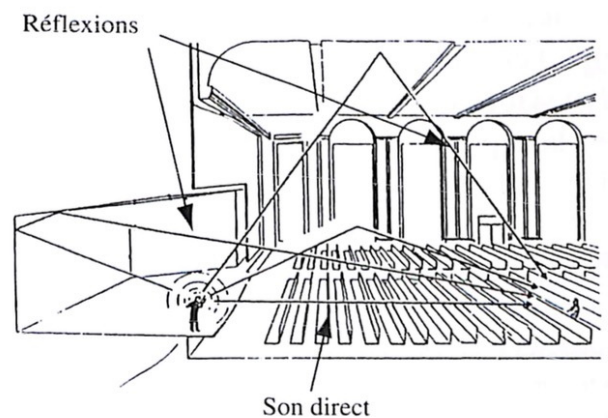


FIG. 2 – Réflexions multiples dans une salle.

La pression acoustique (le niveau sonore) recueillie en un point donné constitue la réponse impulsionnelle de la salle. Le tracé du son direct et de la succession des réflexions constitue l'échogramme (figure 3). Par raccourci de lan-

gage, on assimile souvent (ce que nous ferons également) échogramme et réponse impulsionnelle.

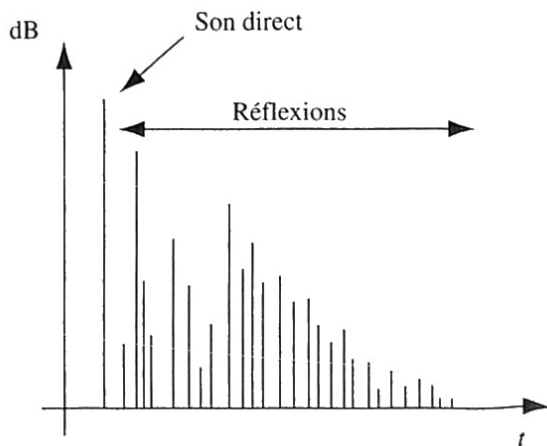


FIG. 3 – échogramme ou réponse impulsionnelle.

b. Indiquez les grandeurs en abscisse et en ordonnée sur l'échogramme. Quel est le nom de cette courbe ? Quel appareil ou ensemble d'appareils permet(tent) de tracer un tel échogramme ?

La réponse impulsionnelle dépend de la position de la source et de celle du récepteur. On ne parle pas de la réponse impulsionnelle d'une salle, mais de la réponse impulsionnelle *pour des positions de source et de récepteur données*. La réponse impulsionnelle illustre la manière dont la salle modifie le son émis par la source.

La réponse impulsionnelle représente la « signature acoustique » de la salle, pour des positions données de la source et du récepteur.

1.3 Mesure de la réponse impulsionnelle

Pour mesurer la réponse impulsionnelle, on peut émettre un bruit bref à l'emplacement de la source (par exemple la fermeture d'un clapet ou un coup de revolver tiré à blanc). Au point de réception, on enregistre alors le signal recueilli, composé du son direct et des réflexions successives. [...] Cependant, les méthodes actuelles n'utilisent plus de revolver pour mesurer la réponse impulsionnelle, mais plutôt une courte séquence de bruit $x(t)$. Au point de réception, on mesure le signal reçu $y(t)$.

1.4 Simulation de salle

Supposons que l'on souhaite connaître l'acoustique d'une salle, avant qu'elle ne soit construite.

Certains logiciels permettent de calculer la réponse impulsionnelle à partir du plan de la salle. Pour cela, on peut utiliser la méthode dite « des rayons » : le rayonnement de la source est décomposé en une multitude de rayons sonores ; le programme reconstitue le trajet de chacun de ces rayons au cours de ses réflexions successives jusqu'au point de réception.

Si on enregistre une source (un violon par exemple) en chambre sourde, on obtient un enregistrement *anéchoïque*, constitué du son du violon seul, exempt de toute réflexion. Cet enregistrement du violon est ensuite *convolué*(*) avec la réponse impulsionnelle simulée : cela donne le son du violon tel qu'il sera entendu dans la future salle.

(*) *Convolué* : multiplication de deux échogrammes.

1.5 Utilisation des maquettes

[En plus des simulations informatiques,] des maquettes sont également utilisées : une réplique réduite de la salle est construite, dans laquelle on mesure la réponse impulsionnelle. [Cette] mesure [...] se fait dans les ultrasons, car la taille de la salle étant moindre, il faut également réduire la longueur d'onde du son.

c. Quel type d'ondes faut-il utiliser si on veut réduire la longueur d'onde du son ? Donnez une valeur de la fréquence correspondante et la taille typique d'une maquette pour une salle de 50 m.

1.6 Historique de l'acoustique des salles

Il semblerait que les hommes préhistoriques n'étaient pas insensibles aux qualités acoustiques des grottes : en effet, on a remarqué que les peintures rupestres sont généralement situées dans les grottes les plus réverbérantes, et à des emplacements où de fortes résonances sont audibles.

Mais les premiers lieux véritablement consacrés à l'acoustique sont les théâtres de l'antiquité grecque. Un des plus célèbres est celui d'ÉPIDAURE (6 000 places), construit en 300 av. J.-C. De cette époque datent les premiers textes d'acoustique architecturale, signés de l'architecte romain VITRUVÉ au I^{er} siècle av. J.-C.. Toutefois, s'ils attestent d'une intuition certaine des phénomènes sonores, les textes de VITRUVÉ ne contiennent pas de formules mathématiques. Il reste qu'à la lumière des connaissances actuelles, il est possible de justifier les qualités acoustiques des théâtres antiques.



FIG. 4 – Théâtre d'ÉPIDAURE.

Même s'ils ne sont pas dédiés à l'écoute musicale, certains lieux sont réputés pour leurs propriétés acoustiques. C'est le cas de « l'oreille de SYRACUSE ». Il s'agit d'une

anfractuosité dans la roche, dont la forme rappelle vaguement une oreille. La légende dit que le tyran local, en se plaçant avec une nacelle au-dessus de l'anfractuosité, pouvait entendre les conversations des prisonniers captifs au fond de la grotte ! Dans le même esprit, on peut citer les lieux où le chuchotement d'une personne placée à un endroit donné est distinctement perçu par un auditeur situé à un emplacement éloigné.

Au Moyen Âge, de nombreuses églises sont construites. Leur grande réverbération favorise le chant grégorien, particulièrement adapté à l'acoustique de ces lieux. La réverbération permet alors aux notes successives de se « superposer » dans la salle, ce qui préfigure l'harmonie avant sa naissance réelle aux environs de l'an 1000.



FIG. 5 – Gewandhaus à LEIPZIG.

À partir de la Renaissance, la musique est diffusée dans des lieux plus petits et moins réfléchissants. Cela a sans doute contribué au développement d'arrangements musicaux plus complexes, associés à un jeu plus rapide (notamment grâce au clavecin).



FIG. 6 – La Scala de MILAN.

Cependant, les salles ne sont pas toujours construites pour leurs seules qualités acoustiques. On va aussi au concert pour être vu, et les salles doivent tenir compte de ces exigences sociales : par exemple, dans la salle du Gewandhaus à LEIPZIG, les spectateurs se faisaient face, plutôt que de regarder la scène !



FIG. 7 – Royal Albert Hall à LONDRES.

Les salles de concert se développent surtout pendant la période classique, dès le milieu du XVII^e siècle. C'est l'époque de BEETHOVEN, MOZART ou SCHUBERT. Une des salles les plus importantes est alors celle de *la Scala* de MILAN (1778).

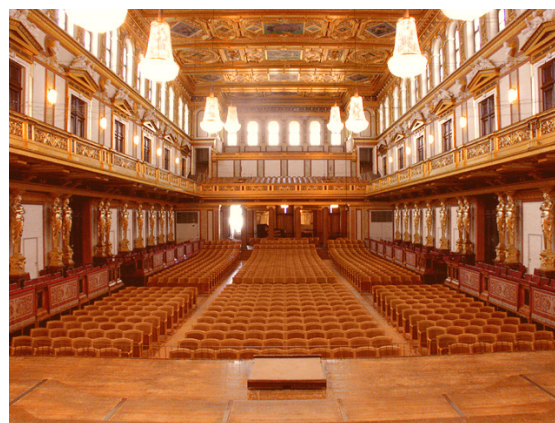


FIG. 8 – Grosser Musikverein à VIENNE

Le XIX^e siècle voit l'avènement de la période romantique. Les symphonies deviennent plus imposantes ; les salles suivent la tendance et leur taille s'accroît. On construit le *Royal Albert Hall* (1871) à LONDRES, la *Grosser Musikverein* à VIENNE (1869) ou la *Festspielhaus* à BAYREUTH (1876). La réverbération est accrue, ce qui permet d'accroître l'emphase de pièces plus symphoniques (par exemple les opéras de Wagner).



FIG. 9 – Festspielhaus à BAYREUTH

La première formule sur l'acoustique des salles date du début du XX^e siècle. On la doit à l'Américain Wallace CLEMENT SABINE : elle donne le temps de réverbération, qui mesure la durée de persistance du son réverbéré dans la salle.

d. Décrire brièvement la géométrie de chaque salle citée.

1.7 Décomposition de la réponse impulsionnelle

La réponse impulsionnelle d'une salle peut se décomposer en trois parties : le son direct, les réflexions précoces, et le champ diffus.

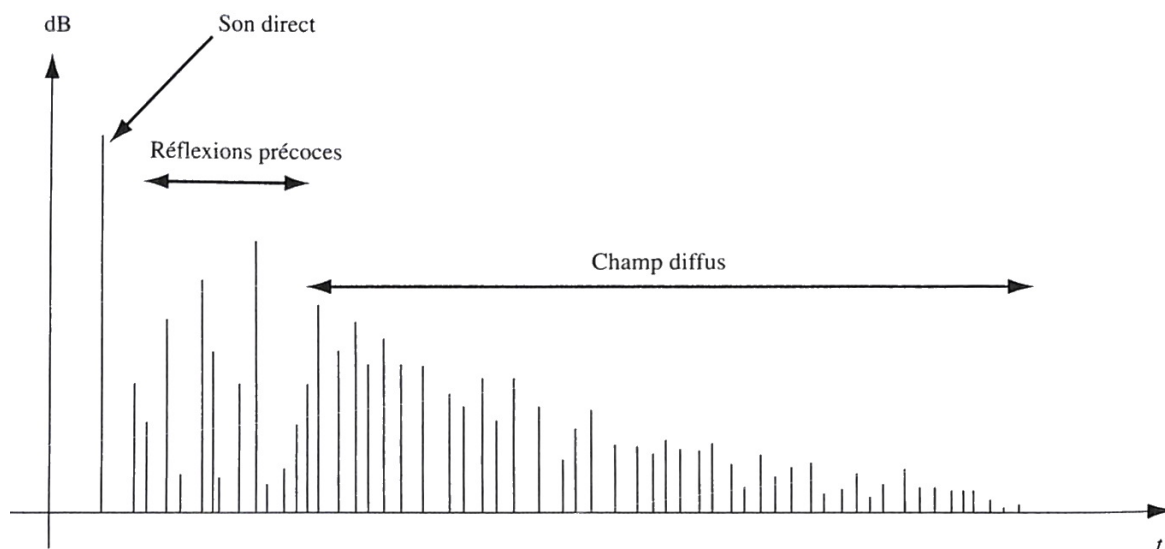


FIG. 10 – Décomposition de la réponse impulsionnelle.

Son direct Le son direct ne dépend que des caractéristiques de la source (puissance, directivité) et de la distance entre la source et le récepteur ; la salle n'intervient pas.

Réflexions précoces On appelle réflexions précoces, ou premières réflexions, les réflexions qui parviennent au point de réception dans les 80 à 100 premières millisecondes qui suivent le son direct. Le temps d'arrivée de la première réflexion importante est noté *Initial Time Delay Gap* (ITD Gap ou plus brièvement délai). Il est généralement

de l'ordre de 10 à 50 ms. Il n'existe pas de limite temporelle précise qui délimite les réflexions précoces du champ diffus. Cependant, on peut les distinguer des réflexions ultérieures car leur distribution temporelle n'est pas la même. En effet, il n'y a aucune forme de régularité dans les temps d'arrivée et les niveaux des réflexions précoces. Ces deux grandeurs dépendent des positions de la source et du récepteur, ainsi que de la configuration des parois mises en jeu (sol, mur du fond de scène, parois latérales...), et il n'est pas possible de les modéliser par une loi mathématique simple.

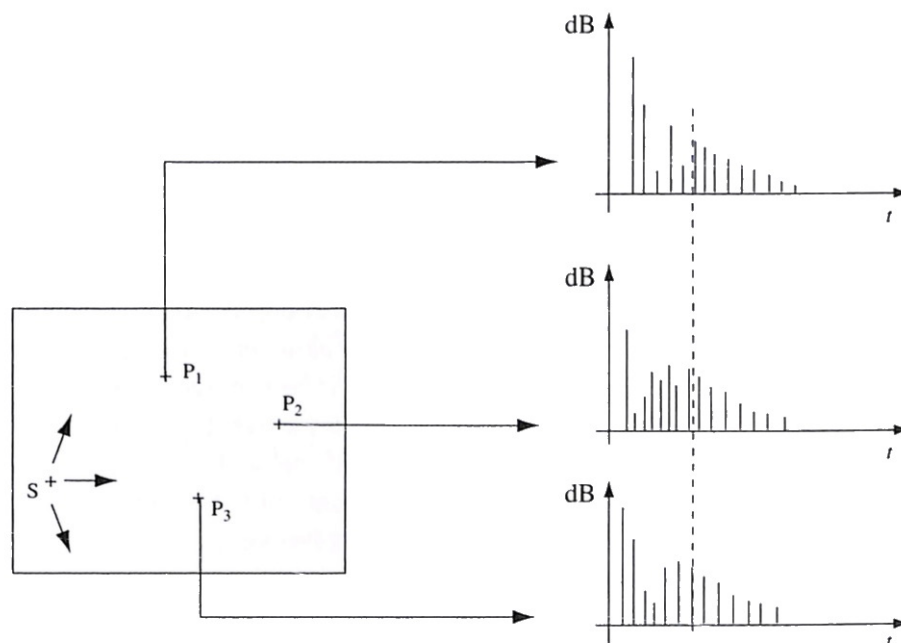


FIG. 11 – Réponses impulsionnelles en différentes positions.

Champ diffus et temps de réverbération Au-delà d'un certain temps après l'arrivée du son direct (qui dépend de la salle et des positions de la source et du récepteur, voir figure 11), le récepteur reçoit le champ diffus. Celui-ci présente trois caractéristiques principales :

- en un point donné, l'intensité réverbérée décroît de manière *exponentielle* (la décroissance en *niveau* est donc *linéaire*). On appelle durée de réverbération la durée nécessaire pour que le son réverbéré décroisse de 60 dB dans la salle après extinction de la source. L'usage veut qu'on emploie surtout la dénomination de temps de réverbération, ce que nous ferons par la suite ;
- le champ diffus est homogène dans la salle : son intensité est statistiquement la même pour toutes les positions dans la salle (alors que les réflexions précoces dépendent de la position dans la salle). La figure 11 donne des exemples de réponses impulsionnelles enregistrées en différentes positions dans une même salle. Alors que les réflexions précoces dépendent de la position, le champ diffus est le même pour toutes les positions (cela en première approximation, car dans la pratique le champ diffus peut être plus fort contre les parois, et plus faible dans un recoin de la salle).
- le son diffus est chaotique. Les deux oreilles reçoivent une multitude de réflexions provenant de toutes les directions (figure 12).

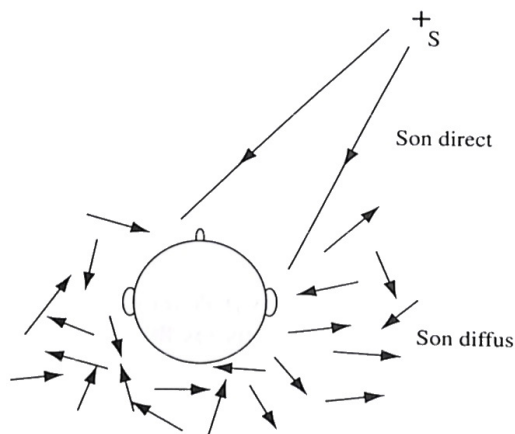


FIG. 12 – Perception par les deux oreilles.

À l'inverse, le son direct et les réflexions précoces proviennent d'une direction précise : aussi, les sons parvenant aux deux oreilles ne diffèrent-ils que par un décalage (dans leurs temps d'arrivée et leurs niveaux) qui dépend de la position de la source. Les différences entre les deux oreilles sont donc beaucoup plus grandes pour le champ diffus que pour le son direct et les réflexions précoces.

e. Expliquez la phrase « en un point donné, l'intensité réverbérée décroît de manière *exponentielle* (la décroissance en *niveau* est donc *linéaire*) ».

1.8 Identification des échos

La réponse impulsionnelle peut servir à détecter les échos. Ceux-ci sont de plusieurs types.

écho franc On appelle écho franc un écho perçu en tant que tel : autrement dit, le son est entendu deux fois de suite. On admet généralement qu'une réflexion de fort niveau est identifiée comme un écho franc si elle parvient plus de 50 ms après le son direct (figure 13). Mais cette valeur est une estimation moyenne, qui n'est pas à prendre au pied de la lettre. Une réflexion peut arriver plus tôt et être perçue comme un écho franc ; à l'inverse elle peut arriver plus tard et ne pas être détectée.

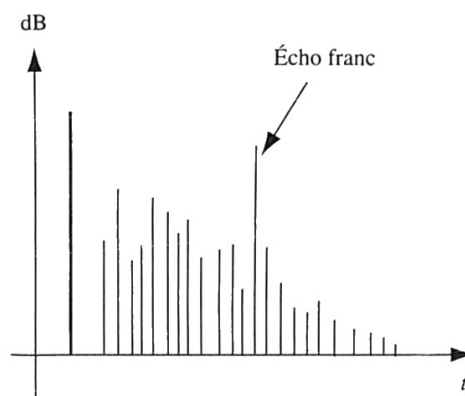


FIG. 13 – écho franc.

La perception de l'écho dépend aussi de la distribution des réflexions qui précèdent l'écho (si elles sont groupées ou espacées par exemple), ainsi que du niveau de l'écho.

Lorsqu'il y a des échos dans une salle, on cherche à les supprimer en rendant absorbantes les surfaces qui produisent ces échos. Pour détecter les surfaces à traiter, on repère alors les échos sur la réponse impulsionnelle ; puis on mesure leurs temps d'arrivée. De là, on déduit, à partir du plan de la salle, les surfaces responsables de l'écho.

écho tonal On appelle écho tonal une succession d'échos qui arrivent régulièrement et avec le même décalage temporel Δt (figure 14). De la sorte, on ne perçoit pas une répétition du son, mais une fréquence précise qui suit l'émission du son. Un écho tonal peut être produit par une structure périodique en gradins, ou par les murs réfléchissants d'une ruelle étroite.

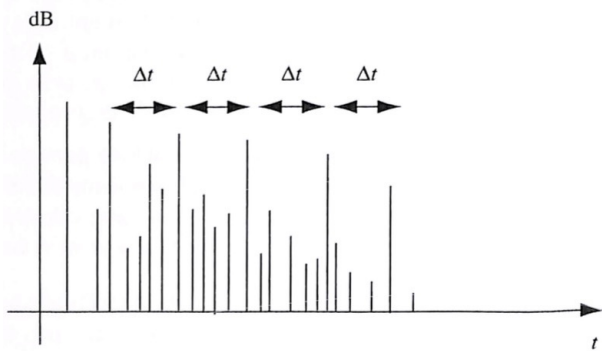


FIG. 14 – écho tonal.

Flutter écho On appelle *flutter écho*, ou *écho flottant*, une succession d'échos qui arrivent avec régularité, tout étant suffisamment séparés pour être discernés les uns des autres. Dans ce cas, on n'entend pas une note précise comme dans le cas de l'écho tonal, mais des répétitions à la manière du battement d'ailes d'un oiseau (d'où le nom, inspiré de l'anglais « *flutter* » qui peut se traduire par « battre des ailes »).

On peut rencontrer un flutter écho lorsqu'un son est émis entre deux parois réfléchissantes et parallèles, alors que les autres parois sont absorbantes ou très éloignées : l'onde effectue une succession d'allers et retours entre les deux parois réfléchissantes.

f. Soit un son est émis au milieu d'une ruelle de 3 m de largeur. Les échos successifs parcourent la largeur de la rue avant de revenir périodiquement au point d'émission. Calculer la distance parcourue, la période de l'écho, et la fréquence perçue. Indiquez le type de l'écho.

g. On émet un son au milieu d'une salle dont les deux murs sont espacés de 30 m. Répondre aux mêmes questions que précédemment. Entend-on distinctement les salves d'échos ? Indiquez le type de l'écho.

1.9 Application : les pyramides Maya

Au Mexique, les guides qui font visiter les pyramides Maya prétendent que celles-ci émettent le cri d'un oiseau sacré, le *quetzal*. Ils illustrent leur propos en se plaçant au pied de la pyramide, puis en entrechoquant des pierres. Les visiteurs entendent alors un son qui commence sur une note aiguë, pour se terminer sur une note plus grave, ce qui évoque effectivement un cri d'oiseau.

Nul besoin de faire intervenir des phénomènes mystiques pour expliquer cet effet sonore. En fait, chaque marche renvoie un écho (figure 15). La succession des échos produit donc un écho tonal. Or, il se trouve que la profondeur des marches augmente à mesure que l'on s'élève sur la pyramide ($d_1 < d_2 < d_3 \dots$). On entend alors un écho tonal dont la fréquence est d'abord aiguë puis décroît progressivement.

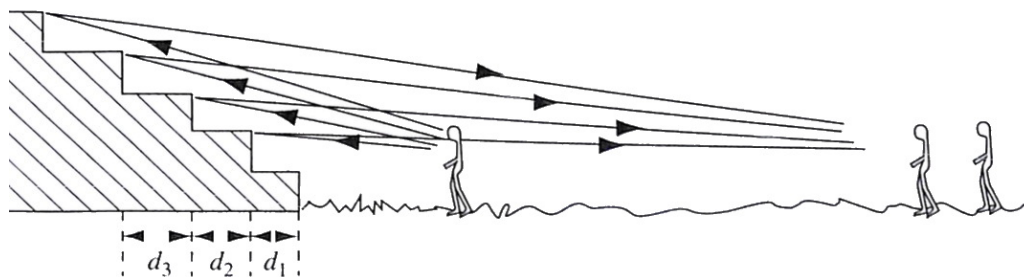


FIG. 15 – Réflexion sur une pyramide Maya.

1.10 Distribution temporelle des réflexions diffuses

Considérons une source sonore. On peut mentalement décomposer l'énergie émise en une multitude de « rayons sonores », qui partent de la source pour se réfléchir sur les parois de la salle. La figure 16 illustre le comportement d'un rayon sonore.

Le rayon sonore parcourt une distance l_1 avant de subir une première réflexion, puis une distance l_2 avant d'en subir une seconde, etc.

On appelle *libre parcours moyen* et on note l la distance moyenne parcourue par un rayon sonore entre deux ré-

flexions sur les parois. C'est la moyenne de l_1, l_2, l_3, \dots .

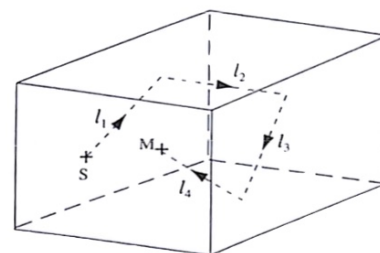


FIG. 16 – Réflexions multiples dans une salle.

Soit V le volume de la salle et S la surface interne des parois (c'est-à-dire la somme de la surface des murs, du plafond et du sol). On admettra que l peut s'exprimer

par :

$$l = \frac{4V}{S}$$

Il existe plusieurs formules donnant le libre parcours moyen ; celle-ci, comme les autres, est une formule approchée, mais elle offre l'avantage de la simplicité.

h. Vérifiez l'homogénéité de cette formule.

Si c est la célérité de l'onde sonore dans le milieu considéré (typiquement, l'air), le temps moyen entre deux réflexions est donc :

$$t = \frac{l}{c} = \frac{4V}{cS}$$

L'inverse est le nombre moyen n de réflexions par seconde :

$$n = \frac{1}{t} = \frac{cS}{4V}$$

En effet, pour effectuer 1 réflexion, le rayon met $\frac{4V}{cS}$ secondes ; donc en 1 seconde, il subit $\frac{cS}{4V}$ réflexions.

i. Comparons deux salles : une grande salle de concert de dimensions 30 m × 20 m × 15 m, et une petite salle d'écoute de dimensions 5 m × 4 m × 3 m. La surface interne est égale à la somme des surfaces de toutes les parois. Calculez les volumes V , les surfaces S , le libre parcours moyen l et le nombre de réflexions par seconde n pour chaque salle. Conclure.

On voit que n et l ne dépendent, dans le cadre de cette approximation, que des dimensions de la salle. L'absorption de la salle n'influe pas sur le nombre de réflexions, mais uniquement sur leurs niveaux. Si l'absorption est très forte, la réflexion peut être totalement atténuée.

1.11 Coefficient d'absorption

L'absorption d'un matériau est mesurée par son *coefficient d'absorption*, que l'on note α :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$$

α est un nombre sans unité qui varie de 0 (pour une paroi totalement réfléchissante) à 1 (pour une paroi totalement absorbante) :

$$0 < \alpha < 1$$

Le coefficient d'absorption d'un matériau dépend de la fréquence de l'onde sonore et de l'angle d'incidence. On donne généralement le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence, sans préciser l'angle : cela correspond au coefficient d'absorption moyen, pour tous les angles d'incidence, autrement dit pour le *champ diffus*.

Le tableau 1 suivant donne les ordres de grandeurs des coefficients d'absorption de quelques matériaux usuels.

	Fréquence (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Fenêtre	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Draperie légère	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Tenture lourde	0,05	0,15	0,35	0,45	0,40	0,35
Contreplaqué 5 mm à 25 mm du mur	0,07	0,12	0,28	0,11	0,08	0,08
Contreplaqué 5 mm à 50 mm du mur	0,47	0,34	0,30	0,11	0,08	0,08
Béton	0,32	0,25	0,22	0,20	0,19	0,20
Plâtre	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08
Parquet	0,03	0,04	0,08	0,12	0,10	0,10
Moquette 15 mm sur béton	0,20	0,25	0,31	0,36	0,52	0,73
Laine de verre	0,11	0,19	0,41	0,54	0,60	0,75
Spectateurs assis	0,58	0,70	0,80	0,90	0,90	0,88

TAB. 1 – Coefficients d'absorption de quelques matériaux usuels.

1.12 Absorption d'une surface

Considérons une salle dont les parois sont constituées de n surfaces recouvertes de matériaux différents (murs en bois, plancher en moquette, etc.). Appelons $S_1, S_2,$

..., S_n les surfaces des matériaux, et $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ leurs coefficients d'absorption respectifs.

On appelle *absorption* (en m^2) de la surface S_i de coefficient d'absorption α_i , la quantité :

$$A_i = \alpha_i S_i$$

j . Calculer l'absorption d'une draperie de 2 m^2 de coefficient d'absorption $\alpha = 0,35$ (à 250 Hz).

On peut remarquer qu'une surface de $0,7 \text{ m}^2$ d'un matériau parfaitement absorbant (c'est-à-dire d'un matériau théorique de coefficient d'absorption $\alpha = 1$) possède aussi une absorption $A = 0,7 \text{ m}^2$. Autrement dit, l'absorption d'un matériau de coefficient d'absorption α et de surface S est égale à la surface de matériau parfaitement absorbant ($\alpha = 1$) qui absorberait autant d'énergie que la surface S de coefficient d'absorption $\alpha < 1$.

1.13 Absorption d'une salle

L'absorption totale d'une salle (mesurée en m^2) est définie comme la somme des absorptions des surfaces qui la composent :

$$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

écrit autrement :

$$A_{\text{tot}} = A_1 + A_2 + \dots + A_n$$

Si une salle possède une absorption de $A = 100 \text{ m}^2$, cela signifie que l'ensemble des parois de la salle absorbe autant que 100 m^2 de matériau parfaitement absorbant.

1.14 Remarques

Fenêtre ouverte Lorsque l'onde sonore rencontre une fenêtre ouverte, toute l'énergie qui atteint cette surface est transmise au dehors. [...] *Vu de la salle*, l'énergie ne revenant pas, tout se passe comme si cette énergie était absorbée par la surface de l'ouverture. [...] Cette surface se comporte donc comme si elle avait un coefficient d'absorption $\alpha = 1$.

Surfaces doubles Dans une salle, la surface utile pour le calcul de l'absorption est la surface totale que viennent frapper les ondes sonores. Par exemple, si on laisse pendre du plafond 1 m^2 de tissu absorbant sur ses deux faces, l'absorption à considérer est double.

k . Faire l'application numérique pour le tissu précédent, pour lequel $\alpha = 0,3$.

Absorption du public Les surfaces composant le public (peau, cheveux, vêtements) peuvent être assimilées à des matériaux poreux. On considère généralement que l'absorption d'un spectateur assis est d'environ $A = 0,5 \text{ m}^2$.

Dans une salle, il est préférable que l'absorption soit indépendante du nombre de spectateurs. Pour cela, il faut recouvrir les sièges d'un matériau dont le coefficient d'absorption est identique à celui du public. De la sorte, l'absorption est la même, que le siège soit vide ou occupé.

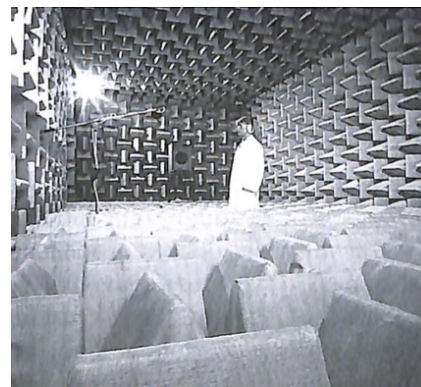


FIG. 17 – Chambre sourde.

Chambre sourde Une chambre sourde, ou salle anéchoïque, est une salle munie de matériaux très absorbants, de telle sorte que tout son émis est (théoriquement) totalement absorbé (dans la pratique, on peut atteindre 99 % d'absorption). Pour atténuer la réverbération dans la salle, des blocs épais de matériaux poreux en formes de coins sont utilisés. Ces blocs ont l'avantage de présenter une grande surface, et donc d'absorber beaucoup d'énergie acoustique.

1.15 Temps de réverbération

Définition Nous avons vu que le *temps de réverbération* (TR) est le temps mis par le son pour décroître de 60 dB dans la salle après extinction de la source.

Pour mesurer le TR, il n'est pas nécessaire de mesurer le temps réellement mis par l'énergie réverbérée pour décroître de 60 dB. En raison de la linéarité de la décroissance, on peut se contenter de mesurer, par exemple, la décroissance des 100 premières millisecondes. Puis on en déduit, par extrapolation, le temps correspondant à une décroissance de 60 dB.

Formule de Sabine Si on appelle V le volume de la salle (en m^3) et A son absorption (en m^2), on peut montrer que le temps de réverbération vaut :

$$TR = \frac{0,16V}{A}$$

La formule ne semble par homogène à première vue (m^3 au numérateur et m^2 au dénominateur), mais elle l'est malgré tout, car le facteur 0,16 est dimensionné.

Le TR se mesure en secondes. Comme A dépend de la fréquence, c'est aussi le cas du TR.

That's all folks !

2 Activité expérimentale : Mesure d'un TR

Objectif élaborer un protocole expérimental permettant de mesurer la durée de réverbération d'un lieu.

Remarque : il est difficile de mesurer un TR-60, c'est-à-dire une décroissance de 60 dB, si on ne dispose pas d'une salle parfaitement silencieuse. En revanche on peut mesurer le TR sur une décroissance de 20 dB (TR-20) ou de 30 dB (TR-30), et simplement extrapoler le résultat à 60 dB.

2.1 Méthode n° 1 – Clap

- Brancher le micro-casque à l'aide des prises en façade de l'ordinateur. Bien vérifier la bonne détection du micro-casque.
- Ouvrir Audacity, vérifier la bonne détection du micro.
- Lancer un enregistrement, et dans le silence complet, créer un clap, c'est-à-dire une impulsion sonore très forte et très brève (avec deux morceaux de bois ou avec les mains).
- Sous le menu **Effets**, ouvrir **Console Nyquist...**, qui permet de taper des lignes de code affectant directement les données enregistrées. Entrer exactement la ligne de code suivante, et valider par **Ok** :

```
(force-srate *sound-srate* (rms s))
```

Cette ligne de code permet de ne garder que la forme englobante de l'onde, sa valeur « crête », et donc d'éliminer toutes les oscillations.

- Sous le menu popup à gauche de l'enregistrement, sélectionner **Forme d'onde (dB)** pour changer l'intensité en ordonnée en dB. Cet affichage permet de lire directement l'amplitude du son en décibels (dB).
- Zoomer sur la partie intéressante de la trace, celle qui correspond à la décroissance linéaire depuis l'impulsion.
- Imprimer et tracer une droite d'interpolation et mener une lecture graphique de la durée de réverbération.

- Extrapoler la durée trouvée précédemment à un « véritable » TR à 60 dB.

2.2 Méthode n° 2 – Fréquences normalisées

On propose différentes fréquences normalisées, indiquées dans le tableau 2.

- Décrire le protocole expérimental.
- La fréquence du son a-t-elle une influence sur la durée de réverbération ? Justifier.
- Après mise en commun des résultats expérimentaux (tableau 2), indiquer quel lieu présente le plus de réverbération.

2.3 Méthode n° 3 – Champ d'un haut-parleur

La troisième méthode consiste à émettre un son avec un haut-parleur, et à capter son champ direct à proximité (par exemple, 50 cm) et son champ diffus à plus grande distance (par exemple, 3 m). Le champ diffus est caractéristique de la salle, et permet grâce aux formules de remonter au TR de la salle.

Nous ne réaliserons pas cette méthode.

2.4 Méthode n° 4 – Maquette

La quatrième méthode consiste à construire une maquette de la salle dont on veut mesurer le TR, et d'utiliser des émetteurs-récepteurs d'ultrasons pour les mesures. L'échelle de la maquette doit être identique au facteur multiplicatif pour passer des sons audibles aux ultrasons.

Nous ne réaliserons pas cette méthode.

Fréquence (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
N-D de PARIS	8,5 s	8 s	7,5 s	6 s	4,5 s	2,7 s
Opéra Bastille Salle 113	1,8 s	1,7 s	1,7 s	1,7 s	1,7 s	1,5 s

TAB. 2 – Fréquences normalisées (méthode n° 2).

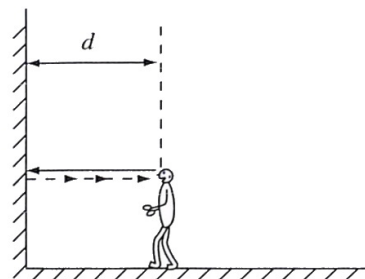
3 Exercices pour la séance n° 9

8.1 À bâtons rompus

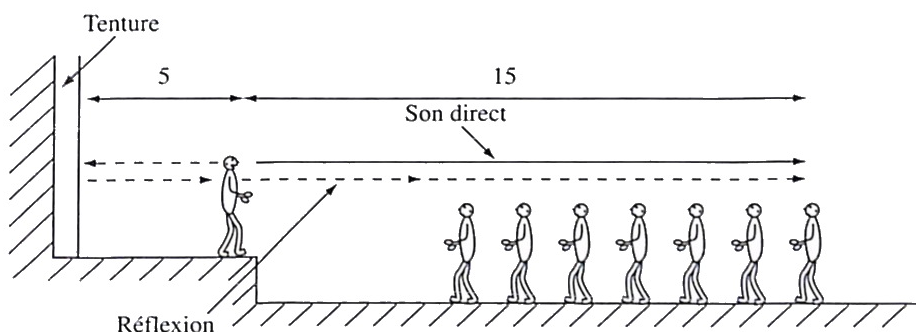
1. Donner la définition de la durée de réverbération d'une salle.
2. Quelle est la différence entre la réverbération et l'écho ?
3. Quels sont les inconvénients d'une pièce ne présentant aucune réverbération ?
4. Comment peut-on limiter la réverbération d'une pièce ?
5. La durée de réverbération dépend-elle de la fréquence du son ?
6. Comparer les durées de réverbération de Notre de Dame de Paris et de l'opéra de la Bastille. Proposer une explication.

8.2 échos en tout genre

1. Vous vous placez face à un mur, puis vous criez « Aline » en direction de celui-ci. Déterminer la distance d (minimale ou maximale) au delà (ou en deça) de laquelle l'écho est perceptible.



2. Un théâtre possède une scène de 5 m de profondeur (voir figure). Le mur du fond de scène comporte une tenture. Celle-ci étant abîmée, on souhaite l'enlever. Cependant, il se pourrait que le mur du fond de scène, qui est très réfléchissant, produise un écho gênant. Pour savoir si c'est le cas, plaçons-nous dans l'hypothèse où la tenture est enlevée. Considérons un spectateur situé à 15 m de la scène, et supposons qu'un acteur parle sur le devant de la scène. Calculer, pour ce spectateur, le retard entre le son direct et le son réfléchi sur le mur du fond de scène. En déduire si on peut enlever sans crainte la tenture, ou si cela risque de produire un écho perceptible.

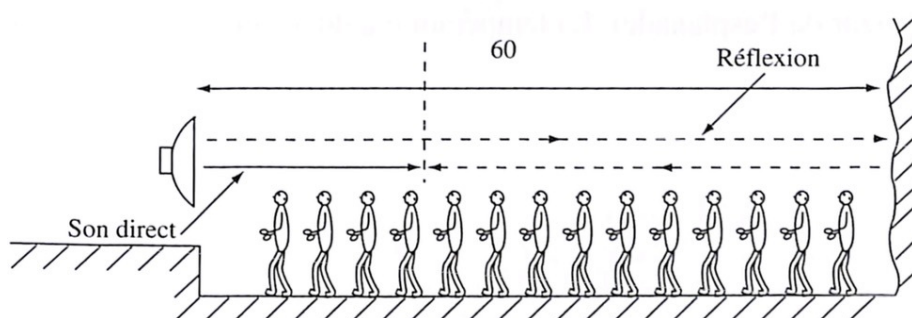


3. On organise un concert en plein air. L'esplanade est longue de 60 m, et au fond de celle-ci, à l'extrémité opposée à la scène, se trouve une paroi rocheuse susceptible de produire un écho (voir figure). Si les sièges sont disposés en rangées tous les mètres, déterminer les rangées susceptibles d'être gênées par l'écho. Effectuer le calcul à 30 °C et à 10 °C.

Donnée : En première approximation, la célérité c du son, en mètre par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), est liée à la température absolue T , en kelvin (K), telle que :

$$c = 20\sqrt{T} \quad \text{avec} \quad T = \theta + 273,15$$

où θ désigne la température en degré Celsius (°C).



8.3 Isolation acoustique d'un réfectoire

Le Conseil Régional souhaite effectuer des travaux dans le réfectoire d'un lycée, qui date des années 80, afin d'améliorer son acoustique. Une entreprise privée est venue sur place et a déterminé un temps de réverbération $TR = 2,0$ s dans ce réfectoire.

Les documents utiles à la résolution sont donnés sur la page suivante.

1. Pourquoi est-il nécessaire de diminuer le temps de réverbération de la salle du réfectoire ?
2. Compléter le tableau en **ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE** en indiquant la surface des différentes structures présente dans la salle ainsi que le matériau utilisé.
3. Afin de mettre le réfectoire en conformité avec la loi, l'administration souhaite placer des plaques isolantes sur toute la surface du plafond, sans modifier les murs ni le sol. L'entreprise ayant effectué le calcul du temps de réverbération du réfectoire propose alors plusieurs matériaux isolants afin de diminuer celui-ci :

Isolant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5
Coefficient d'absorption acoustique	0,15	0,25	0,30	0,50	0,80
Prix au m ² pose incluse (€)	20	40	70	100	180

Parmi ces cinq isolants, lequel serait-il judicieux de choisir ?

Remarque :

L'analyse des données, la démarche suivie et l'analyse critique du résultat sont évaluées et nécessitent d'être correctement présentées.

Le candidat notera sur sa copie toutes ses pistes de recherche, même si elles n'ont pas abouti.

ANNEXE – À RENDRE AVEC LA COPIE

	Surface (m ²)	Matériau
Plafond		
Sol		
Portes		
Fenêtres		
Murs (ouvertures non comprises)		

Document 1 : Article 5 de l'arrêté du 25 avril 2003.

Les temps de réverbération (exprimés en secondes) à respecter dans les locaux sont donnés dans le tableau ci-dessous. Ils correspondent à la moyenne arithmétique des temps de réverbération dans les intervalles d'octaves centrés sur 500, 1000 et 2000 Hz. Ces valeurs s'entendent pour des locaux normalement meublés et non occupés.

Locaux meublés non occupés	Temps de réverbération moyen TR (exprimé en secondes)
Salle de repos des écoles maternelles, local d'enseignement de musique, d'études, d'activités pratiques, salles de restauration et polyvalente de volume $\leq 250 \text{ m}^3$. Local médical ou social, infirmerie.	$0,4 \leq TR \leq 0,8$
Local d'enseignement, de musique, d'études ou d'activités pratiques d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq TR \leq 1,2$
Salle de restauration d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$TR \leq 1,2$
Salle polyvalente d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq TR \leq 1,2$

D'après : www.legifrance.gouv.fr

Document 2 : Formulaire.

- Le temps de réverbération TR (ou durée de réverbération) représente la durée nécessaire pour que le niveau sonore d'un son diminue de 60 dB une fois la source éteinte.
- Le temps de réverbération TR , exprimé en secondes, se calcule à partir de la formule de Sabine : $TR = 0,16 \times \frac{V}{A}$, V étant le volume de la salle (en m^3) et A sa surface équivalente d'absorption (en m^2).
- On définit la surface équivalente d'absorption d'une salle par $A = \alpha \times S$, α étant le coefficient d'absorption acoustique du matériau et S sa surface. Dans le cas de plusieurs matériaux de natures et de surfaces différentes, on a : $A = \sum \alpha_i \times S_i$

Document 3 : Informations sur le réfectoire.

Le réfectoire est une salle rectangulaire de 15,00 m de long sur 8,00 m de large. La hauteur sous plafond est de 3,50 m.

Le réfectoire dispose de 6 fenêtres de 6,00 m^2 chacune.

Deux grandes portes en bois de 2,00 m de large et de 3,00 m de haut permettent d'accéder à la salle.

Le sol est en carrelage tandis que les murs et le plafond sont en plâtre.

Le réfectoire dispose de 20 tables et de 120 chaises. L'ensemble du mobilier a une surface d'absorption équivalente : $A_M = 12,5 \text{ m}^2$.

Document 4 : Coefficient d'absorption acoustique moyen α de différents matériaux.

Matériau	Plâtre	Carrelage	Bois	Verre
α	0,030	0,020	0,15	0,18