

L'Acoustique

L'**acoustique** est la **science** du **son**, ce qui inclut sa production, son contrôle, sa transmission, sa réception et ses effets. Elle fait notamment appel à des notions de **mécanique des fluides**, de **mécanique vibratoire**, de **mécanique du solide déformable** et de **thermodynamique**.

Joseph Sauveur (1653-1716) construisit le mot *acoustique* à partir du grec ancien ἀκουστικός [akoustikos] signifiant « de l'ouïe », lui-même dérivant de ἀκούειν [akouein], signifiant « entendre »¹. Depuis, l'acoustique, comme spécialité de la science **physique**, étudie toutes les **ondes mécaniques** au sein des gaz, des liquides, mais également au sein des solides, et ce quelle que soit la plage de fréquences considérée (les **infrasons**, les **sons** et les **ultrasons**).

L'acoustique comprend de nombreuses ramifications parmi lesquelles on rencontre l'**électroacoustique** (microphones, haut-parleurs), l'**audition**, l'**acoustique musicale**, l'**acoustique architecturale**, etc.

L'acoustique a des applications dans les domaines des **sciences de la terre** et de l'**atmosphère**, des **sciences de l'ingénieur**, des **sciences de la vie** et de la **santé**, ainsi que dans les **sciences humaines** et **sociales**.

Histoire



Les principes de l'acoustique sont appliqués dès l'antiquité : [Théâtre romain](#) de [Bosra](#), [Syrie](#).

Science dont les bases remontent à l'**Antiquité**, Pythagore étudia au **vi^e siècle av. J.-C.** l'**acoustique musicale**, notamment les **intervalles**. Le **théâtre d'Épidaure** témoigne que dès le **iv^e siècle av. J.-C.** les grecs maîtrisaient les propriétés sonores des matériaux pour construire des amphithéâtres : l'agencement périodique des rangées de sièges du **théâtre d'Épidaure** permet de filtrer les basses fréquences (inférieures à 500 Hz) du bruit de fond (bruissement des arbres, auditoire)².

Acoustique empirique

L'origine de l'acoustique est attribuée à **Pythagore** (**vi^e siècle av. J.-C.**), qui étudia le fonctionnement des **cordes vibrantes** produisant des intervalles musicaux plaisants à l'oreille³. Ces intervalles sont à l'origine de l'**accord pythagorien** portant aujourd'hui son nom⁴. **Aristote** (**iv^e siècle av. J.-C.**) anticipa correctement que le son se générait de la mise en mouvement de l'air³ par une source « poussant vers l'avant l'air contigu de telle manière que le son voyage »^{4,5}. Son hypothèse était basée sur la **philosophie** plus que sur la **physique expérimentale**. D'ailleurs, il suggéra de manière erronée que les hautes fréquences se propageaient plus rapidement que les basses fréquences, erreur qui perdura plusieurs siècles³.

La spéculation que le son est un phénomène ondulatoire doit son origine à l'observation des ondes à la surface de l'eau. En effet, la notion d'[onde](#) peut être considérée, de manière rudimentaire, comme une perturbation oscillatoire qui se propage à partir d'une source et ne transporte pas de matière sur des grandes distances de propagation^{5,4}. La possibilité que le son présente un comportement analogue fut notamment soulignée par le philosophe grec [Chrysippe](#) (III^e siècle av. J.-C.) et l'architecte et ingénieur romain [Vitruve](#) (environ 25 av. J.-C.)^{5,4}, qui contribua par ailleurs à la conception de l'acoustique de théâtres antiques³. Le philosophe romain [Boèce](#) (470-525 ap. J.-C.) formula aussi l'hypothèse d'un comportement similaire, de même qu'il suggéra que la perception humaine de la [hauteur](#) était liée à la propriété physique de la [fréquence](#)³.

Propagation - Acoustique des salles

Article connexe : [acoustique architecturale](#).

En appliquant la théorie de la propagation des [ondes](#) aux vibrations sonores, on touche à un domaine déjà fort bien maîtrisé depuis l'[Antiquité](#), celui de l'acoustique des salles. Pour amplifier un son, les Grecs se servaient des propriétés physiques des matériaux, de la connaissance qu'ils avaient acquise sur les phénomènes de résorption et de réfraction des sons, et construisaient des amphithéâtres en leur donnant une forme particulière. Ainsi, les constructions où devaient se produire des orateurs ou des musiciens avaient une acoustique très étudiée. Le [théâtre d'Épidaure](#) en [Grèce](#) est le témoin de l'avancement des connaissances en acoustique dès l'[Antiquité](#).

Les connaissances en acoustique des salles au temps de la Grèce antique étaient cependant avant tout empiriques. Ce domaine de connaissance restera très longtemps presque entièrement basée sur l'expérience, se développant par suite d'essais aboutissant parfois à des échecs, parfois à de grandes réussites pouvant ensuite servir de modèle pour les salles suivantes. Le physicien américain [Wallace Clement Sabine](#) est généralement considéré comme le père de l'acoustique des salles en tant que domaine scientifique. C'est en 1900 qu'il publie l'article *Reverberation* qui pose les bases de cette science toute jeune.

Nuisances et pollution sonores

- **[Nuisances](#)** : Les phénomènes de couplage vibro-acoustique sont très présents dans les industries aéronautiques, automobiles, ferroviaires et dans les industries mécaniques en général. Les problèmes liés à l'amélioration du confort intérieur et à la réduction des [nuisances](#) externes s'y posent de façon cruciale.
Des problèmes similaires se posent aussi dans l'industrie du bâtiment où les cloisons et les façades d'immeuble doivent être convenablement dimensionnées de façon à réduire la transmission du bruit. L'ingénieur acousticien doit être capable d'appréhender et de modéliser les phénomènes physiques mis en jeu. Il doit acquérir les connaissances nécessaires pour mettre en œuvre à la fois des méthodes analytiques et des outils numériques pour rechercher des solutions d'amélioration des produits en termes de réduction des nuisances sonores.
- **[Pollutions](#)** : Selon le dictionnaire français du vocabulaire normalisé de l'environnement, on peut parler de « *pollution* » sonore quand les conséquences du son propagé dans l'environnement génèrent une « *altération* » du fonctionnement de l'écosystème, généralement à la suite de la disparition ou du recul de certaines espèces, qui ne remplissent donc plus leurs fonctions écosystémiques.

Un **isolant phonique** est un [matériau](#) qui va réduire la propagation du [son](#) le traversant.

Isolant utilisé par domaine d'activité

Isolant dans un bâtiment

On parle d'**isolant phonique** dans le domaine du bâtiment, exemple : une plaque de [polyester](#) entre deux cloisons permet d'isoler phoniquement une pièce.

Dans la pratique, chaque matériau a sa propre résonance et sera donc relativement spécialisé sur une partie du [spectre](#) des longueurs d'onde. Une bonne isolation acoustique est malaisée à réaliser en deçà de trois couches. Généralement, on composera une bonne cloison avec deux matériaux durs pour faire masse, et un amortisseur, de manière à respecter le principe Masse/Ressort/Masse. L'[étanchéité](#) de la paroi est primordiale pour son isolation phonique.

Il est cependant possible de réaliser des isolations acoustiques minces (10–15 cm) en utilisant la combinaison de type suivant : structure portante dédoublée pour accrocher les panneaux de la paroi de part et d'autre tout en évitant que ceux-ci ne s'accrochent sur le même poteau, préférer des panneaux « sandwich » (c'est-à-dire contenant plusieurs couches de matériaux. Placer la première face de la paroi et y accrocher un isolant phonique de type « à cônes », comme les mousses expansées créées de protection que l'on trouve aussi dans les emballages de produits électroniques ou dans des [matelas](#) (mais qui ne conviennent pas dans le cas des matelas parce que leurs pores sont fermés et absorbent donc mal les sons). Mettre une couche de remplissage, la plus continue possible, en [laine de roche](#) mais sans forcer pour ne pas mettre les cônes sous pression. Venir appliquer la deuxième face de la cloison en ayant si possible recouvert sur les zones entre les montants le même isolant de type « à cônes ». Chaque face externe peut encore être renforcée par une couche de [liège](#) plus ou moins épaisse selon les besoins.

Si vous ne trouvez pas de panneaux-sandwich ou que votre budget ne vous le permet pas, utilisez pour chaque paroi des [plaques de plâtre](#) classiques jointoyées au [plâtre](#) mais rajoutez une simple feuille d'isolant phonique mince de 3–4 mm (comme pour les [parquets](#), rouleau de mousse [polyuréthane](#)) et dédoublez alors votre paroi en veillant à la continuité de la feuille (grâce à de la bande adhésive) mais aussi à recouvrir les joints de la paroi de base par le milieu de la plaque de la deuxième couche que vous jointoyez soigneusement au plâtre également.

Domaine de l'audio

Les [maisons de disques](#) ou les chaînes radio utilisent des pièces isolées phoniquement respectivement pour l'enregistrement de musique ([Studio d'enregistrement](#)) ou d'émissions.

Il existe sur le marché français un matériau naturel très performant à base de chanvre fabriqué aujourd'hui sous forme de brique

(Brique de Chanvre Acoustique)

ce matériau possède une forte porosité ouverte, l'onde émise pénètre dans le matériau et s'amortit le long des capillaires par effets visqueux , ceci explique ces qualités unique d'absorption des ondes.

courbe d'absorption acoustique



Autoroutes (et routes)

Article détaillé : [Mur anti-bruit](#).

Dans le domaine routier (notamment [autoroutier](#)), il existe des murs de béton ou des remblais (plus techniquement un [merlon](#)) pour éviter que le bruit des véhicules perturbe les riverains.

Isolation phonique

Article détaillé : [Isolation phonique](#).

L'isolation phonique désigne l'art de respecter les contraintes sonores d'un projet par l'utilisation notamment de matériaux isolants et de formes adaptées.

Notes et références

Voir aussi

- [Pollution sonore](#)
- [Isolation phonique](#)
- [Chambre anéchoïque](#)

Acoustique des salles de spectacle

En appliquant la théorie de la propagation des [ondes](#) aux vibrations sonores, on touche à un domaine déjà fort bien maîtrisé depuis l'[Antiquité](#), celui de l'acoustique des salles. Pour amplifier un son, les Grecs se servaient des propriétés physiques des matériaux, de la connaissance qu'ils avaient acquise sur les phénomènes de résorption et de réfraction des sons, et construisaient des [théâtres](#) et [amphithéâtres](#) en leur donnant une forme particulière. Ainsi, les constructions où devaient se produire des orateurs ou des musiciens avaient une acoustique très étudiée. Le [théâtre d'Épidaure](#) est ainsi un témoin de l'avancement des connaissances des [Grecs](#) en acoustique dès le [IV^e siècle av. J.-C.](#).

Les connaissances en acoustique des salles au temps de la Grèce antique étaient cependant avant tout empiriques. Ce domaine de connaissance restera très longtemps presque entièrement basé sur l'expérience, se développant par suite d'essais aboutissant parfois à des échecs, parfois à de grandes

réussites pouvant ensuite servir de modèle pour les salles suivantes. Le physicien américain [Wallace Clement Sabine](#) est généralement considéré comme le père de l'acoustique des salles en tant que domaine scientifique. En 1900, il publie l'article *Reverberation* qui pose les bases de cette science toute jeune.

Lorsqu'un son est émis dans une salle, les ondes sonores se réfléchissent sur ses parois pour parvenir à l'auditeur avec un retard, par rapport à l'onde directe, proportionnel à la distance parcourue. Il résulte de ces multiples réflexions un son continu dont l'amplitude décroît plus ou moins rapidement. La mesure de cette réponse est généralement appelée échogramme ou [réponse impulsionnelle](#). La durée de réverbération ou [temps de réverbération](#) TR est généralement définie comme la durée nécessaire pour que la puissance sonore atteigne un millionième de sa valeur initiale (ce qui correspond à une décroissance de 60 dB).

[Wallace Clement Sabine](#) étudia la propagation des ondes sonores dans une enceinte fermée. Il montra que le temps de [réverbération acoustique](#) est proportionnel au volume v divisé par le produit de l'aire totale de ses parois (murs, planchers et plafonds) par un coefficient d'absorption α compris entre 0 (paroi totalement réfléchissante) et 1 (paroi totalement absorbante, de laquelle aucune onde sonore ne se réfléchit, dite aussi *fenêtre ouverte*). On calcule le dénominateur $s \cdot \alpha$ en ajoutant les produits partiels obtenus pour chacun des éléments des parois⁴

Formule de Sabine:

TR : secondes, v : m³, s : m², α : [0, 1]².

Cette formule rend prévisible l'influence des matériaux utilisés dans la construction d'un lieu sur son acoustique, à condition d'en avoir déterminé au préalable l'indice d'absorption, ce que l'on fait en les introduisant dans une pièce conçue à cet effet ([chambre réverbérante](#)) et en mesurant les changements qu'ils y apportent.

Sabine s'était intéressé principalement aux grandes salles de concert, qui doivent posséder des parois suffisamment réfléchissantes pour transmettre le son à tous les auditeurs. Sa formule convient quand les coefficients d'absorption sont suffisamment petits. Quand ceux-ci sont grands, elle est manifestement fautive: si $\alpha = 1$, c'est-à-dire que les parois absorbent entièrement le son, il ne devrait y avoir aucune réverbération ($TR = 0$); mais la formule de Sabine donne une valeur non nulle. Pour remédier à cela, Eyring a proposé de redéfinir α comme le [logarithme naturel](#) du coefficient de transmission (1 - absorption).

Formule d'Eyring

Les deux formules donnent des résultats équivalents quand α est petit; il s'agit d'une évaluation à deux signes significatifs au plus, et non pas d'une mesure physique rigoureuse. Sabine était déjà conscient que la durée de réverbération ne suffit pas pour décrire la qualité acoustique d'une salle. Dans son article 'Reverberation', il propose trois facteurs définissant les conditions d'une bonne écoute. Ces trois facteurs sont :

- *Loudness* (puissance, énergie totale de la réponse impulsionnelle).
- *Distortion of complex sounds* (c'est-à-dire la balance, spectrale comme spatiale, résultat des phénomènes d'[interférences](#) et de [résonance](#)).
- Confusion (perte de clarté due à une prolongation des sons résultant des phénomènes de réverbération et d'[écho](#)).

Mais pour ces trois facteurs perceptifs, Sabine ne propose qu'un critère objectif (le TR), ne permettant de caractériser que le phénomène de réverbération.

[Leo L. Beranek](#) proposa le premier, bien plus tard, une approche de définition générale de la qualité acoustique d'une salle de spectacle. Son étude des aspects perceptifs se proposait de faire comparer entre elles différentes salles de concert par des experts (chefs d'orchestre, interprètes et critiques musicaux). À partir d'entretiens avec ces experts et de ses écoutes personnelles, Beranek proposa une liste de 18 facteurs perceptifs qu'il résumera plus tard en 7 :

- « Reverberance » : réverbérance, évaluation subjective du phénomène de réverbération ;

- « Loudness » : puissance sonore ;
- « Spaciousness » : sensation d'espace et d'enveloppement sonore ;
- « Clarity » : clarté ou transparence ;
- « Intimacy » : intimité, sensation de proximité sonore ;
- « Warmth » : chaleur apportée par la coloration des timbres par la salle ;
- « Hearing on stage » : aptitude pour les musiciens, les comédiens ou les conférenciers (donc dans le contexte d'une salle de spectacle uniquement) à s'entendre correctement.

Pour presque tous ces facteurs perceptifs, Beranek propose des critères objectifs mesurables : le *TR* pour 'Reverberance', la force sonore *G* pour 'Loudness', la proportion de réflexions précoces parvenant latéralement à l'auditeur pour 'Spaciousness' (découverte de [Michael Barron](#)), le rapport de l'énergie sonore précoce sur l'énergie sonore tardive pour 'Clarity' (critère C80 défini par [Abdel Alim](#)), le délai temporel de la première réflexion parvenant à l'auditeur pour 'Intimacy', le rapport du *TR* en basses fréquences sur le *TR* dans les médiums pour 'Warmth'. Seul 'Hearing on stage' n'est pas associé à un critère objectif.

Salles de concert, opéra

Ces salles doivent être optimisées pour la musique. L'origine des sons est bien définie, il faut assurer au public une bonne qualité d'écoute.

Généralement, les salles de concert et d'opéra ont un temps de réverbération plus long que les autres types de salle. Cette réverbération contribue à l'impression de volume sonore et à l'impression d'harmonie musicale.

Théâtre

Des dizaines ou des centaines de spectateurs doivent entendre un son émis avec la puissance relativement faible par la voix des comédiens. Plus de réverbération augmente le volume perçu, mais diminue l'intelligibilité du texte. La réponse acoustique optimale d'une salle de théâtre donne un temps de réverbération plus court que celui d'une salle de concert.

Salles de cinéma

Une salle de cinéma diffuse un programme enregistré par des moyens électroniques. Le critère de puissance sonore perçue ne se pose pas, puisqu'il dépend de la puissance des amplificateurs. On recherche un niveau sonore équilibré à toutes les places, une bonne intelligibilité du texte, une bonne qualité de reproduction musicale, et le meilleur amortissement possible des bruits émis par les spectateurs. Le temps de réverbération d'une salle de cinéma est normalement bien plus court que celui d'un théâtre.

Salles sonorisées

Les salles équipées d'un système de renforcement sonore, posent des problèmes particuliers aux architectes-acousticiens. D'une part, le public doit bénéficier d'un niveau sonore suffisant, mais pas excessif, à toutes les places, et d'autre part il faut éviter les résonances, facilement excitées par la puissance du système de sonorisation, et qui diffèrent selon la position des microphones. Tous les critères doivent être évalués avec diverses configurations de sonorisation.

Acoustique des lieux de travail

Ateliers industriels

Dans les ateliers industriels, le problème qui se pose est la contention des niveaux de bruit, avec de nombreuses sources sonores. En plus des impératifs de communication orale liés au travail, des normes, lois et règlements fixent les niveaux de bruit maximum admissibles. Les contraintes de l'organisation de la production rendent le travail des acousticiens et architectes complexe.

Bureaux organisés en espace ouvert

Comme dans l'espace industriel, les architectes et acousticiens qui travaillent sur des espaces ouverts de bureaux ont de nombreuses contraintes. Le niveau de bruit auquel ils doivent parvenir est plus faible ; il

doit permettre une communication verbale aisée entre les personnes qui y travaillent, sans que les voix perturbent excessivement les voisins.

Studios d'enregistrement, de radio et de télévision et leurs salles de contrôle

Les exploitants de ces espaces de travail dédiés au son sont particulièrement exigeants quant à l'acoustique des locaux.

Isolation acoustique

La question de l'isolation est un aspect fondamental de l'acoustique du bâtiment. Il s'agit de s'assurer qu'une habitation ou un lieu d'activité ne sera pas perturbé par le bruit extérieur ou celui provenant des autres pièces du même bâtiment. L'isolation est généralement quantifiée par une grandeur appelée isolement acoustique normalisé D_nT , exprimé en [dB\(A\)](#) par rapport à un [bruit rose](#) à l'émission. L'uniformisation européenne des normes en acoustique du bâtiment a amené une nouvelle définition de cet isolement acoustique cette fois désigné par D_nTw et exprimé en [dB](#). Cet isolement ne dépend pas que de la performance de la paroi séparative (son [indice d'affaiblissement acoustique](#)) : en effet, d'autres phénomènes que la transmission directe interviennent dans le passage du niveau d'émission au niveau de réception :

- les transmissions latérales, par propagation des vibrations dans les parois liées à la paroi séparative puis rayonnement de ces parois ;
- les transmissions parasites dues aux défauts d'exécution et au passage de gaine et de canalisations dans la paroi ;
- la réverbération dans le local de réception, liée à son volume et à son aire d'absorption équivalente.

Il existe donc principalement trois façons d'améliorer une isolation acoustique :

- limiter les transmissions directes, soit en réduisant la surface séparative, soit en améliorant l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi séparative en utilisant des matériaux de construction plus lourds ([loi de masse](#)) ou en utilisant des complexes multicouches (principe Masse/Ressort/Masse) ;
- limiter les transmissions latérales : les parois latérales les plus exposées à cette forme de transmission sont les parois légères et rigides telles que les carreaux de plâtre, les blocs de béton creux ou les briques creuses. Si ce type de paroi ne peut être évité, on pourra les traiter en collant des doublages en matériaux poreux et souples de type [laine minérale](#) par exemple. Une autre possibilité est d'introduire des ruptures d'impédance bloquant la propagation des vibrations. Ces coupures peuvent par exemple être réalisées à l'aide de joints de dilatation ;
- limiter les transmissions parasites, en surveillant les défauts d'exécution, en rebouchant les fissures, joints, passages de câbles ou de tuyauteries. Une très grande attention est nécessaire : par exemple, une paroi dont la constitution permet théoriquement un affaiblissement acoustique de 60 dB, si elle comporte 1 % de trous, ne permet plus que d'atteindre une performance de 20 dB !