



Huitzilopochtli est facile à reconnaître (*voir ci-contre*): il arbore des plumes de colibri, un bouclier souvent marqué des cinq directions spatiales (les quatre points cardinaux et le ciel) et un propulseur en forme de serpent. Cette arme, le «serpent de feu», est Xiuhtecuhtli, l'incarnation du dieu Xiuhtecuhtli.

Autant des armes et un bouclier semblent pertinents pour un dieu de la guerre, autant la symbolique du colibri peut surprendre. C'est que vous avez rarement observé des colibris... Ces oiseaux sont très agressifs, les mâles n'hésitant pas à s'attaquer violemment à coups de becs et à défendre leur territoire.

Avec des collègues, Alejandro Rico-Guevara, de l'université de Californie à Berkeley, a pris le temps de les étudier de près. Et ce qu'il a découvert remet en cause des idées reçues sur les colibris. On pensait que la forme de leur bec résultait d'une coévolution avec l'anatomie des fleurs, qui leur fournissent du nectar et qui sont ainsi pollinisées.

C'était négliger le penchant des oiseaux pour la rixe. De fait, l'examen attentif des becs montre qu'ils sont aussi adaptés au combat. Par exemple, certains sont hérissés de pointes semblables à des dents de requins. Et sur la représentation de Huitzilopochtli, on peut deviner de telles dents sur le masque que porte sur son dos le dieu. D'autres becs de colibris sont crochus. D'autres encore sont acérés comme des épées. De quoi voler dans les plumes, au sens propre, d'un rival!

Ces deux fonctions, boire et se battre, s'opposent et se traduisent par un compromis dans la morphologie des becs. C'est particulièrement vrai en Amérique tropicale, où la compétition pour la nourriture est rude. La forme des becs n'est donc pas uniquement façonnée pour l'alimentation. Autre découverte, les colibris ne comptent pas sur la seule capillarité pour aspirer le nectar: la langue, fourchue, jouerait également le rôle de pompe.

Chez les Aztèques, les colibris symbolisaient les âmes des guerriers tombés au combat. Même sous cette forme ailée, ils n'ont rien perdu de leur tempérament! ■

A. Rico-Guevara et al., *Integrative Organismal Biology*, vol. 1(1), article oby006, 2019.



L'auteur a publié:  
**Pollock, Turner, Van Gogh,  
Vermeer et la science...**  
(Belin, 2018)

## LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK  
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

# DES SALLES QUI RÉSONNENT

La bonne qualité acoustique d'une pièce nécessite un compromis entre la durée de réverbération, due aux échos successifs du son, et l'amplification sonore caractéristique des volumes clos.

**C**hacun a pu le constater : un appartement vide résonne beaucoup plus qu'un appartement meublé, tandis que certaines pièces sont rapidement bruyantes dès que plusieurs personnes y discutent. Ces sensations acoustiques traduisent la réverbération de la pièce, due à la superposition des multiples échos des sons qui se réfléchissent sur ses parois. La forme de la pièce, la nature de ses parois et son contenu façonnent ces phénomènes acoustiques. Quels sont leurs rôles respectifs ?

## DES SONS QUI REBONDISSENT

Pour simplifier, imaginons-nous postés dans un couloir qui canalise les sons dans le sens de la longueur. Si nous frappons dans nos mains, le son, très bref, va se propager jusqu'aux extrémités, s'y réfléchir et revenir vers nous, et ainsi de suite, en

effectuant des allers et retours. Si le couloir est très long, le premier écho qui nous revient est suffisamment séparé du claquement initial pour que nous puissions distinguer les deux sons. Tel est le cas si l'intervalle de temps dépasse un dixième de seconde, ce qui, compte tenu de la vitesse du son dans l'air, 340 mètres par seconde, nous oblige à être éloigné de plus de 17 mètres de l'extrémité du couloir.

Dans un couloir plus court, nous ne distinguerons pas le son du premier écho, ni la succession des autres échos réfléchis. Nous entendrons plutôt un son continu dont l'intensité décroît, à cause de l'amortissement des ondes sonores sur les parois : c'est la «réverbération».

Pour caractériser ce phénomène, on utilise par convention la durée que met un son pour voir son intensité diminuer de 60 décibels (dB), c'est-à-dire d'un facteur 1 million ( $10^6$ ). C'est la différence entre un klaxon et un chuchotement, ou entre

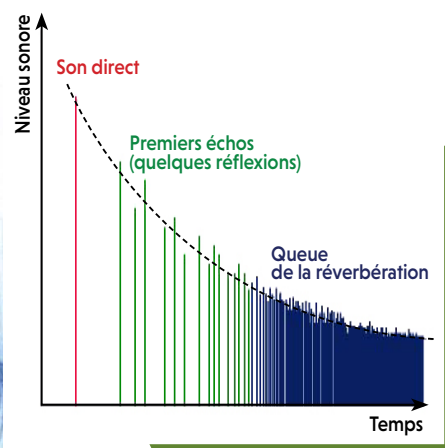
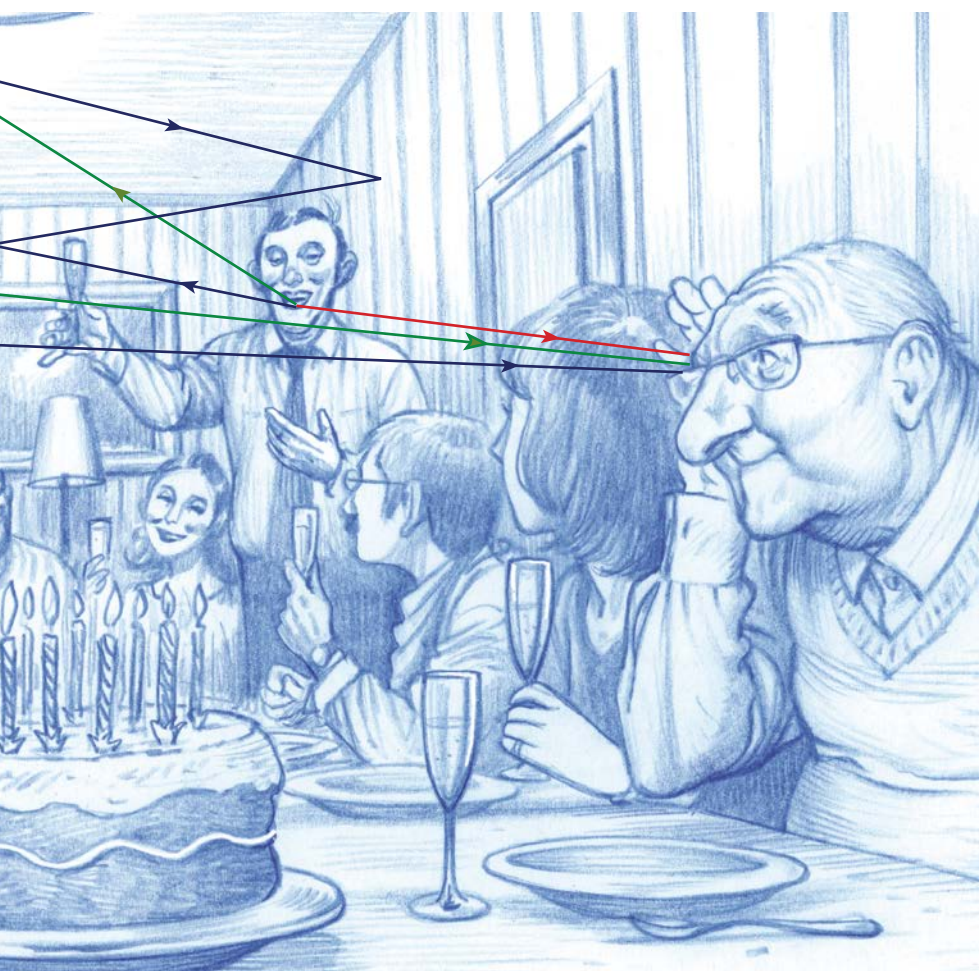


l'ambiance sonore d'une discothèque et celle d'une bibliothèque.

Dans le cas du béton lisse ou peint, ou encore du marbre, l'absorption de l'intensité sonore à chaque réflexion est de l'ordre de 1% (donc 99% de l'intensité est réfléchi). Il faut alors plus de 1370 réflexions pour atteindre une réduction de 60 dB ; ce qui, pour un couloir de 10 mètres de long, fait un temps de réverbération de l'ordre de 40 secondes. Cette valeur est évidemment très surestimée, car les ondes sonores ne se réfléchissent pas uniquement sur les extrémités, mais aussi sur les murs latéraux. Elle suggère cependant une durée bien trop longue

## LA RÉVERBÉRATION DU SON

**L**orsqu'un son bref est émis dans une salle, l'auditeur présent entend non seulement le son initial, mais aussi ses échos successifs. Plus le nombre de réflexions qu'a subies un écho sur les murs et autres obstacles est élevé, plus son intensité est faible et son instant d'arrivée tardif. Le son direct (en rouge) parvient à l'auditeur en premier, puis les échos correspondant à un petit nombre de réflexions (en vert), puis ceux correspondant à de nombreuses réflexions (en bleu). Lorsque l'intensité initiale a diminué d'un facteur 1 million (soit 60 décibels), on convient que la réverbération a pris fin, ce qui définit le temps de réverbération.



Un son se propage en général dans toutes les directions. Dans une salle, il donne lieu à toute une série d'échos, en fonction des réflexions subies sur les murs et autres surfaces.

pour un bon confort auditif. L'allongement des sons ne permettant plus de les distinguer, les paroles deviennent inintelligibles et la musique se transforme en un vacarme confus.

### LE VOLUME SONORE AUGMENTE

Faut-il donc tout faire pour réduire la réverbération ? Ce serait oublier que celle-ci a un avantage : elle permet au son de s'accumuler, et donc d'augmenter le volume sonore. Au lieu de claquer les mains au milieu du couloir, allumons un haut-parleur qui émet cette fois un son continu. Au début, nous n'entendons que le son direct, puis vient se superposer le

premier retour : l'intensité sonore a doublé et on a gagné 3 dB. À mesure que nous parvenons les autres sons réfléchis, l'intensité continue de croître. C'est pour cette raison que l'on entend bien mieux une personne ou un musicien en intérieur qu'en extérieur.

Quel est le gain dû à cette réverbération ? Comme l'intensité sonore s'atténue à chaque réflexion, on atteint au bout du temps de réverbération une valeur maximale. On montre que cette dernière est égale à l'intensité de la source divisée par le coefficient d'absorption. Avec des parois en béton, on aura ainsi un gain d'un facteur 100 (ou  $10^2$ ), soit de 20 dB.

La conception acoustique d'une salle suppose donc de trouver un compromis sur le temps de réverbération : assez court pour que le son entendu soit intelligible, mais aussi assez long pour bénéficier de l'effet d'amplification. En pratique, pour bien entendre des paroles, le temps de réverbération doit être inférieur à 0,8 seconde. En revanche, pour la musique, on peut accepter 1 à 2 secondes, et plus encore pour la musique d'orgue. On >

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> comprend ainsi que les contraintes acoustiques d'une salle de théâtre diffèrent de celles d'une salle de concert, sans parler de l'opéra qui conjugue parole et musique...

Comment connaître le temps de réverbération pour une pièce de forme quelconque? Il faut d'abord estimer le parcours moyen entre deux réflexions du son sur les parois en tenant compte de tous les trajets possibles, y compris les réflexions multiples sur les murs. Chose remarquable, il existe une estimation simple dans le cas d'une salle parallélépipédique: le parcours moyen est égal à 4 fois le rapport entre le volume de la pièce et sa surface. Pour une pièce large de 3 mètres, longue de 4 mètres et haute de 2,5 mètres, on obtient environ 2 mètres, une valeur inférieure à toutes les dimensions de la pièce. La raison en est que les réflexions dominantes sont celles entre murs adjacents (au niveau des arêtes et des coins).

Il nous faut ensuite connaître comment le son est absorbé, car plus l'absorption est importante, plus le temps de réverbération est court. Or les moyens de moduler l'absorption sont nombreux.

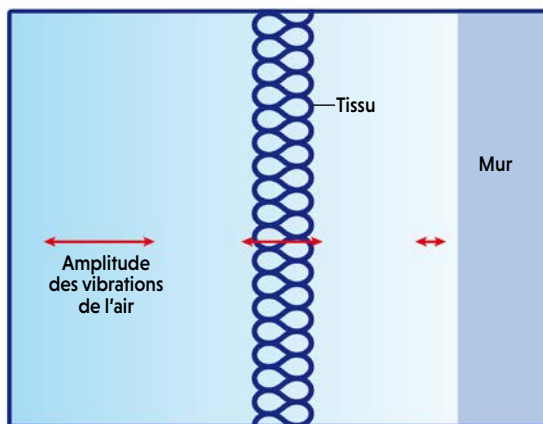
### CONTRÔLER LA RÉVERBÉRATION EN MODULANT L'ABSORPTION

L'absorbant idéal (100%) est évidemment une ouverture – porte ou fenêtre ouverte – qui ne renvoie aucun son. Sinon, le son peut être partiellement transmis (et donc moins réfléchi) à travers des surfaces rigides. Par exemple, une vitre en verre transmet le son d'autant plus efficacement que celui-ci est grave: la transmission est de 35% à 150 hertz, 20% à 500 hertz (la tonalité du téléphone) et seulement 4% à 4000 hertz.

On peut aussi utiliser des matériaux poreux ou fibreux (moquette, tapis, plaque de liège...). D'une part, les oscillations de l'air provoquées par le passage de la vibration sonore s'amortissent dans les multiples petits canaux du matériau, par effet de viscosité (comme l'écoulement de l'eau dans un tuyau). D'autre part, une partie de l'énergie acoustique se transmet aux fibres, qui sont mises en mouvement. Toutefois, ces amortissements sont faibles si on colle le matériau à la paroi, qui est un nœud de vibration: les oscillations de l'air perpendiculairement à la surface y ayant une très faible amplitude, on a tout à gagner à écarter le matériau du mur (*voir l'encadré ci-dessus*). C'est flagrant avec les tissus et tentures suspendus: à 1 kilohertz, un rideau de velours absorbe près de 80% de l'intensité sonore.

## DU TISSU MURAL BIEN POSÉ

**P**our qu'un tissu mural absorbe bien les bruits, il faut laisser un espace entre lui et le mur, de l'ordre du centimètre. En effet, au niveau du mur, on a un nœud de vibration de l'air: les oscillations de l'air (*doubles flèches, échelle exagérée*) perpendiculaires au mur et dues à l'onde sonore y sont d'amplitude nulle. Or pour absorber de l'énergie sonore, un tissu mural (ou un rideau) doit se trouver là où les vibrations acoustiques sont notables. Pour une fréquence sonore de 440 hertz – la tonalité du téléphone –, l'amplitude des oscillations de l'air est maximale à une distance au mur égale au quart de la longueur d'onde du son, distance qui vaut donc un peu moins de 20 centimètres.



Le plus souvent, une pièce a des parois de natures différentes sur le plan acoustique. On caractérise alors chaque surface par sa surface équivalente de fenêtre ouverte, obtenue en multipliant l'aire considérée par le coefficient d'absorption. L'unité utilisée est le sabin, du nom du physicien américain Wallace Sabine qui, en 1898, a trouvé une très bonne approximation du temps de réverbération.

La probabilité moyenne d'absorption d'un son est alors le rapport entre la surface équivalente d'absorption et la surface totale des parois de la pièce. On calcule ensuite le temps de réverbération à partir du parcours moyen du son et de la probabilité moyenne d'absorption. *In fine*, il ne reste, dans la formule de Sabine donnant le temps de réverbération, que le rapport entre le volume de la pièce sur la surface absorbante, le tout multiplié par un coefficient numérique qui vaut environ 0,16.

Pour la salle parallélépipédique évoquée plus haut, le temps de réverbération avec des murs en béton est de 8 secondes. Avec de la moquette et du liège sur les murs, ce temps est divisé par 20, ce qui donne 0,4 seconde, une valeur tout à fait acceptable. En pratique, la présence de mobilier ou de spectateurs pour les salles de concerts change aussi considérablement les choses, et il faut prendre cela en compte pour estimer avec précision les propriétés acoustiques de la salle. ■

### BIBLIOGRAPHIE

D. Keepports, **Simple echoes and subtle reverberations**, *Physics Education*, vol. 45(2), pp. 190-195, 2010.

H. G. Leventhall, **The acoustics of rooms**, *Physics Education*, vol. 2(2), pp. 101-106, 1967.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

---

EN TRIANT VOS JOURNAUX,  
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,  
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES  
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE  
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE  
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

[CONSIGNESDETRI.FR](http://CONSIGNESDETRI.FR)

---

**CITEO**

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio