

# Le son et le bruit

## Qu'est-ce que le son ?

Le son est une **petite oscillation de la pression autour d'une valeur d'équilibre**. Une source sonore, comme une corde de guitare, nos cordes vocales, ou une pièce de moteur, vibre plus ou moins vite autour d'une position moyenne. **Les molécules environnantes vibrent à leur tour et heurtent les molécules voisines**. Du fait de l'inertie et des forces attractives, la vibration se propage de proche en proche dans toutes les directions du milieu, qu'il soit gazeux, liquide ou solide.

## Isolation phonique

Tandis qu'un matériau absorbant diminue les sons réfléchis, un **matériau isolant** doit surtout réduire les sons transmis comme les **bruits aériens** intérieurs (musique ou conversations des voisins) et extérieurs (trafic routier) ou les **bruits d'impacts** (bruit de pas ou chute d'objets).

## Le bruit, enjeu de santé publique

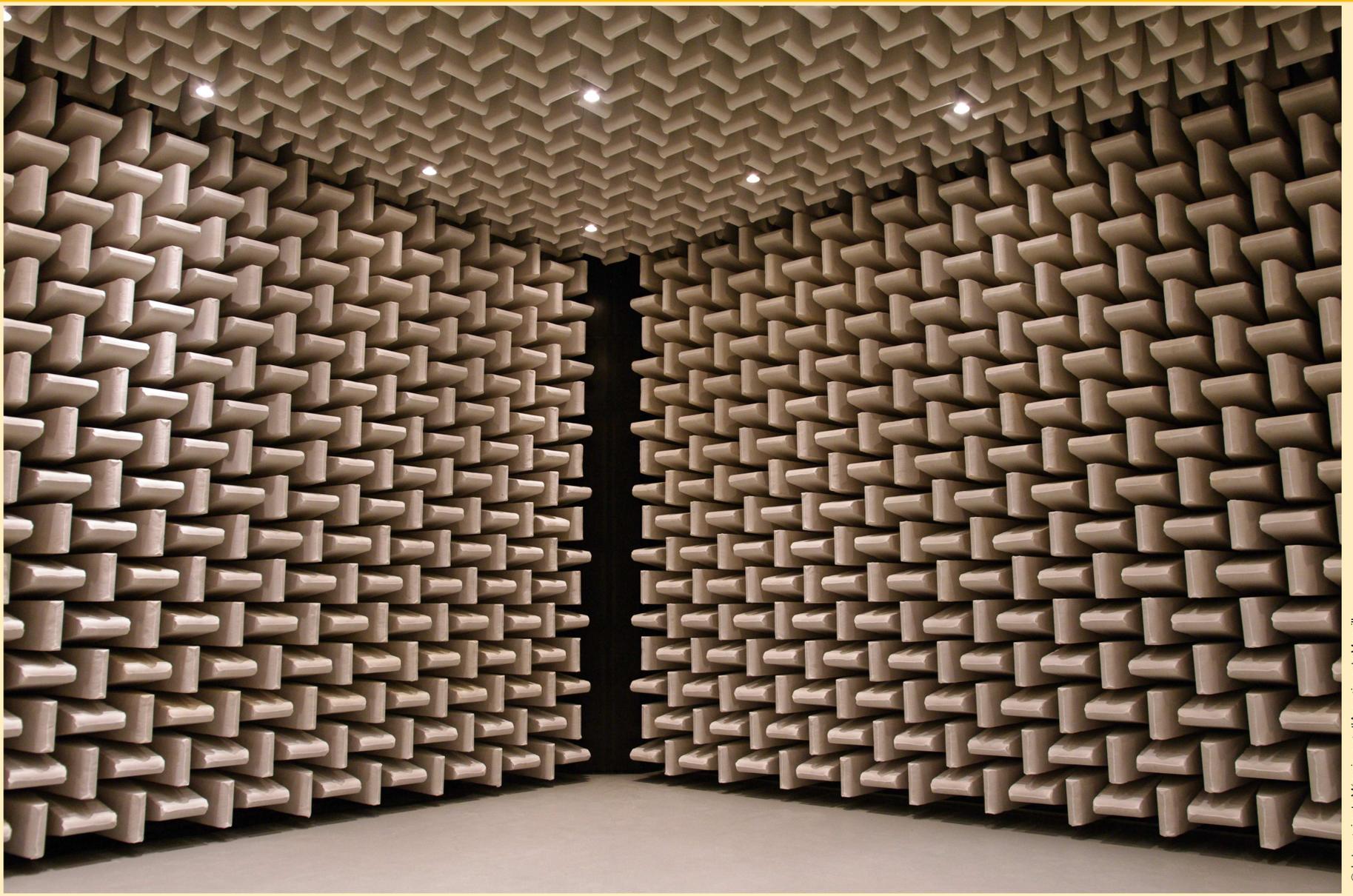
Nous sommes en permanence soumis à des sons gênants et incohérents : musiques indésirées, machines, conversations, véhicules, ...

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, **la pollution sonore est la deuxième pollution par son impact sur la santé humaine**, après la pollution atmosphérique. Elle entraîne des acouphènes, des troubles du sommeil et de l'apprentissage, et augmente le risque de crise cardiaque.

## Comment se prémunir du bruit ?

Quand une onde sonore change de milieu de propagation, une partie de son énergie est réfléchi, et l'autre est transmise au nouveau milieu. Dans un matériau adéquat, l'onde sonore peut être partiellement absorbée : son amplitude est réduite et le bruit est atténué. En cas de réflexions multiples sur de grandes parois lisses, les sons réfléchis se superposent à leurs échos et l'environnement sonore devient déplaisant (piscines, gymnases). Inversement, on peut recouvrir les parois d'une pièce de **matériaux absorbants**, qui réfléchissent très peu le son, et la pièce devient **anéchoïque**.

## Une chambre anéchoïque



# Atténuer le son

## Un peu de solide et beaucoup d'air

Pour atténuer le son, on utilise des **matériaux poreux**, qui contiennent jusqu'à 98 % d'air autour d'un **réseau solide quasiment immobile**. On les classe en deux catégories : **fibreux** et **cellulaires**.

## Les matériaux fibreux

Dans les matériaux fibreux, des filaments solides sont enchevêtrés dans toutes les directions et donnent, parfois à l'aide d'un liant, une certaine rigidité à l'édifice. Parmi eux, les laines minérales (verre, basalte), végétales (bois, lin, chanvre, etc.) ou animales sont couramment utilisées dans le bâtiment.

## Un matériau fibreux

Dans un isolant à base de fibres de bois, il n'y a aucune membrane et l'air circule librement.



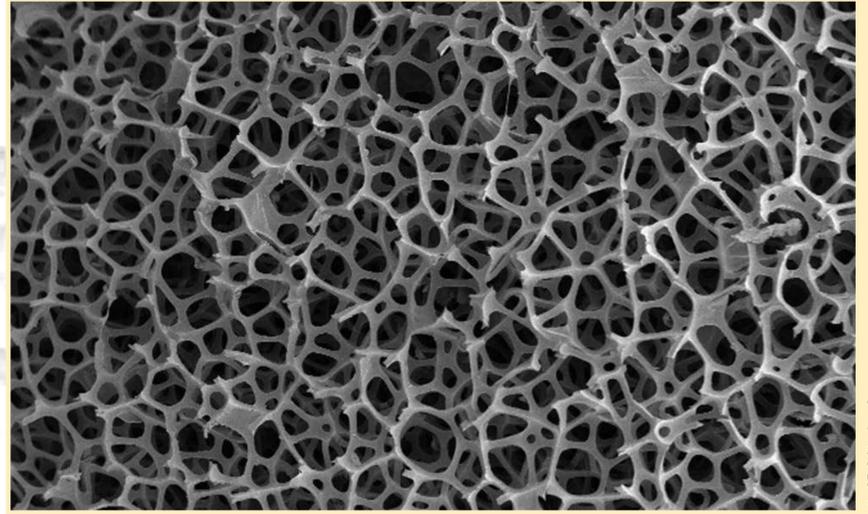
© Droits réservés

## Les matériaux cellulaires

Dans les matériaux cellulaires, la partie solide forme un **réseau continu d'arêtes**. Selon le matériau, l'air peut circuler librement entre les cellules ou y être enfermé si les cellules sont closes par des membranes. C'est le cas des éponges, des pierres volcaniques, du béton cellulaire ou du liège.

## Une mousse solide vue au microscope

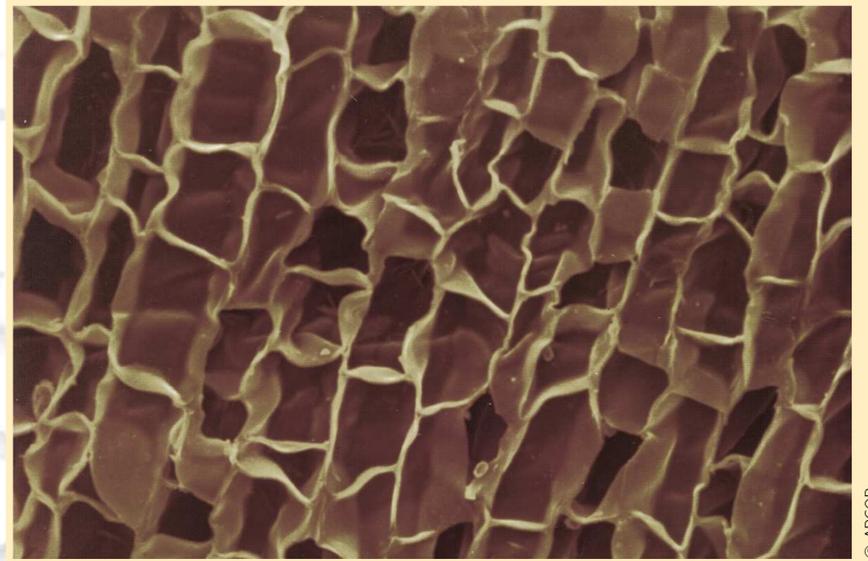
Ici, toutes les cellules sont ouvertes : il n'y a presque pas de membranes.



© CDC/Janice Carr

## Les cellules fermées du liège

Robert Hooke observa au microscope les cavités du liège en 1655 et les nomma « cellules ». Leurs parois empêchent l'air de circuler, contrairement aux mousses solides et aux matériaux fibreux.



© APCOR

## Les frottements de l'air contre les parois

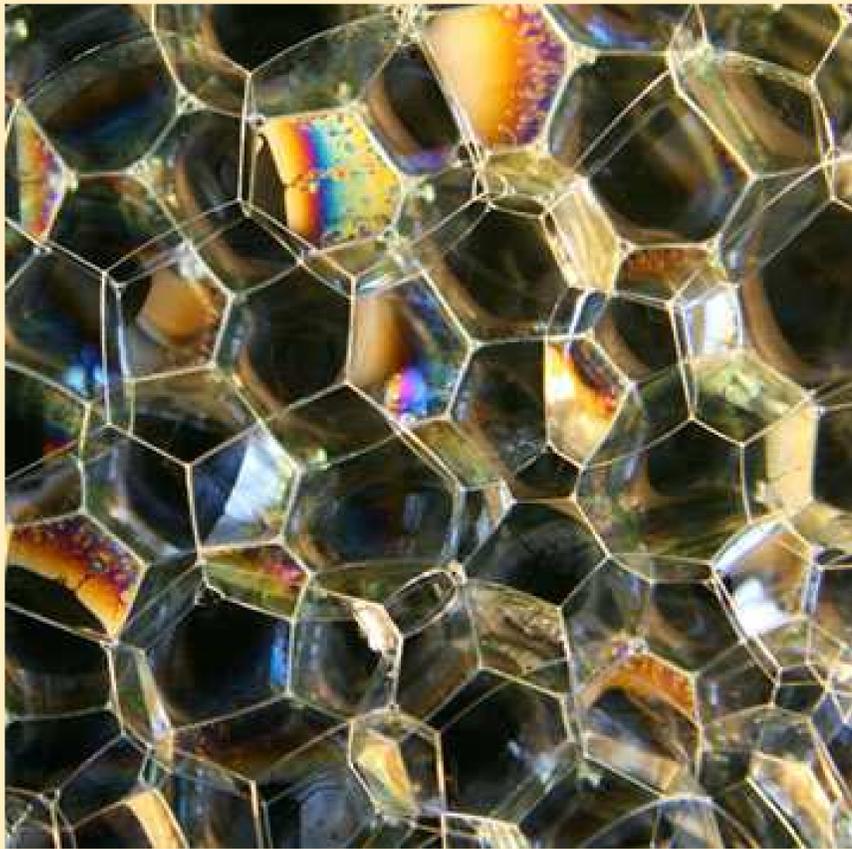
Si une onde sonore arrive à la surface d'un matériau poreux, elle fait aussi vibrer son réseau solide, mais la vibration se transmet préférentiellement dans l'air, bien moins dense. On considère donc, en première approximation, que **le réseau solide reste immobile**.

L'air ayant une **grande surface de contact** avec les parois solides, ses vibrations entraînent des frottements et des échanges thermiques avec ces parois, donc une **dissipation de l'énergie acoustique**. Ainsi, l'amplitude du son diminue en se propageant, ce qui donne à ces matériaux leurs propriétés d'atténuation acoustique.

# Les mousses liquides

## Les mousses liquides

La mousse liquide est un matériau poreux atypique, semblable à la mousse solide, sauf que son squelette est liquide. En plus des **canaux liquides** (arêtes), son squelette comporte de fines **membranes liquides** qui empêchent la mousse de s'effondrer. Ces mousses liquides se rencontrent dans les produits cosmétiques (mousse à raser, shampooing), dans l'alimentation (bière, cappuccino) ou dans certains extincteurs. La fabrication d'une mousse liquide se fait en mélangeant intimement un liquide et un gaz.



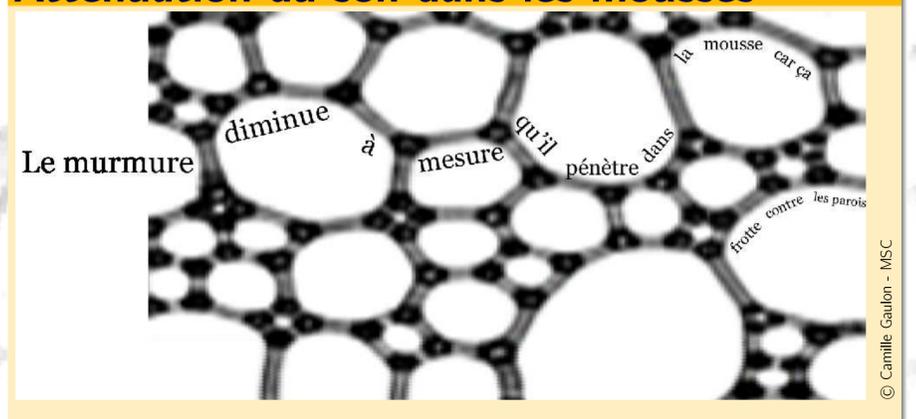
## Tout vibre dans une mousse liquide

Lorsqu'une onde sonore atteint la surface d'une mousse liquide, elle déforme les membranes, fines et souples, et se propage à l'ensemble de la mousse. **Contrairement aux mousses solides, tous les composants de la mousse liquide vibrent : l'air, les canaux et les membranes.** L'amplitude de vibration des différents éléments dépend de la fréquence d'excitation.

## Résonance d'une mousse

**A basse fréquence**, les canaux et les membranes liquides bougent ensemble. En revanche, **à haute fréquence**, les canaux liquides demeurent immobiles en raison de leur inertie, et seuls les films vibrent. Aux fréquences intermédiaires, un phénomène surprenant se produit : les canaux se déplacent à faible amplitude, tandis que les membranes ont une forte amplitude de vibration, en opposition de phase (quand les canaux vont dans un sens, les membranes vont en sens opposé). Ce phénomène de **résonance** est associé à une forte atténuation du son.

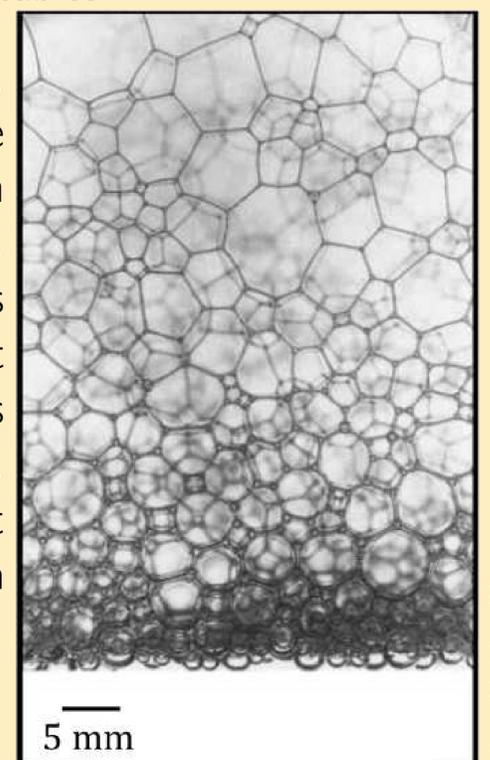
## Atténuation du son dans les mousses



## Instabilité des mousses liquides

Les mousses liquides ont ainsi montré leur potentiel pour lutter contre le bruit. Cependant, elles manquent de stabilité : avec le temps, le liquide s'écoule vers le bas par gravité, les parois trop fines se rompent, et le liquide est soumis à l'évaporation. La mousse disparaît ainsi progressivement. C'est pourquoi l'on cherche actuellement des matériaux similaires mais plus stables.

Sous l'effet du poids, le liquide s'accumule progressivement en bas de la mousse. Les grosses bulles du haut éclatent et les petites bulles du bas fusionnent. La mousse disparaît ainsi peu à peu à cause de ce drainage.

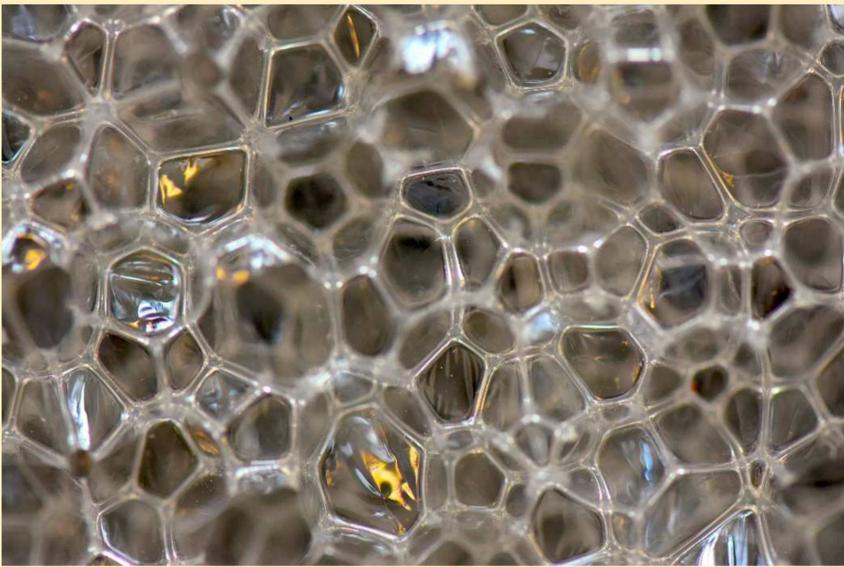


# Les mousses solides

## Les mousses solides

Des mousses solides sont déjà employées pour lutter contre les nuisances sonores, mais la plupart sont sans membranes. Puisque les mousses liquides, principalement composées de membranes, ont de meilleures capacités d'atténuation du son, nous explorons maintenant **une nouvelle classe de matériaux : des mousses solides avec membranes**. On les obtient en laissant se solidifier une mousse de polyuréthane liquide. Selon le procédé de fabrication, chaque échantillon contient plus ou moins de membranes.

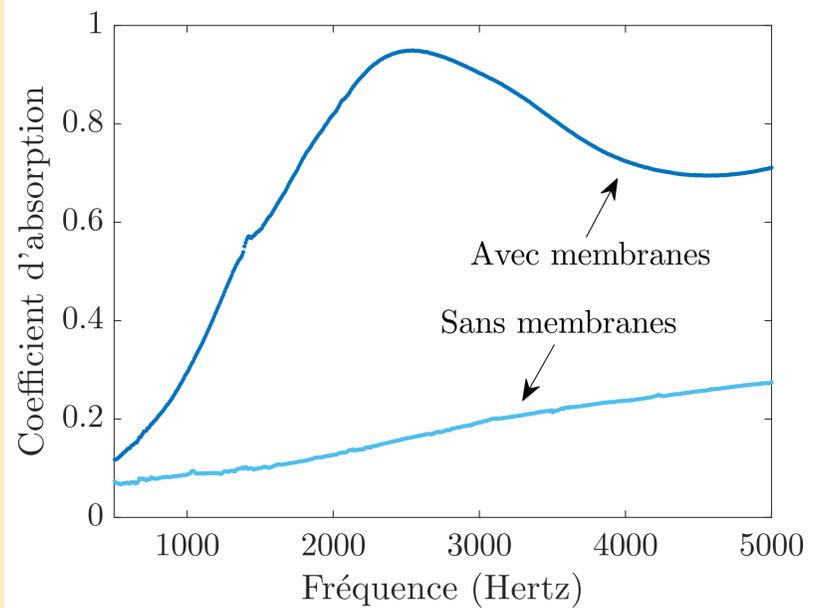
## Avec ou sans membranes ?



## Comparaison des deux types de mousse

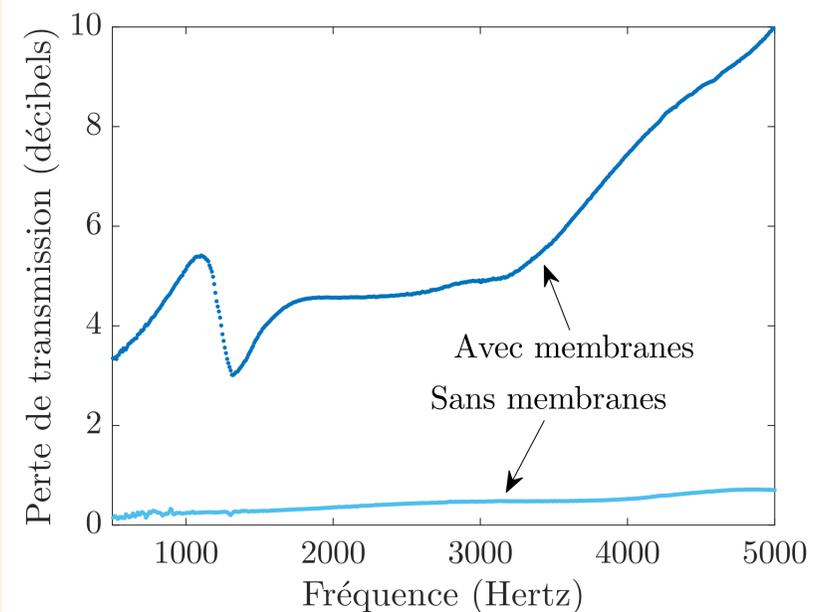
On mesure expérimentalement les propriétés de réflexion et de transmission du son pour ces deux types de mousse. Dans les deux cas **la présence des membranes donne de meilleurs résultats**. Les membranes étant très fines (quelques microns d'épaisseur) et déformables, l'onde sonore peut pénétrer dans le matériau pour y être atténuée. De plus, ces parois n'ajoutent que peu de masse au matériau. Ces mousses avec fines membranes sont donc des matériaux prometteurs pour lutter contre les nuisances sonores.

## Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )



Pour une paroi non absorbante,  $\alpha = 0$ . La mousse sans membrane ( $0.1 \leq \alpha \leq 0.25$ ) ne fait guère mieux. La mousse avec membranes absorbe mieux le son, puisque  $\alpha$  atteint quasiment 1. Les membranes ne réfléchissent donc pas l'onde mais la laissent pénétrer à l'intérieur de la mousse, où elle est dissipée.

## Perte par transmission (TL)



$TL(f)$  augmente globalement avec la fréquence, mais présente un maximum local vers 1000 Hz. TL indique de combien de décibels un son transmis est réduit. Sans les membranes, la mousse ne bloque presque pas la transmission. Avec des membranes, on réduit le son de 3 à 10 décibels. **Bien que légères, elles ont la même efficacité qu'une paroi lourde pour atténuer le son.**

# Propriétés effectives des mousses solides

## Le rôle des membranes

L'expérience nous montre que **les mousses solides avec membranes sont plus efficaces que celles sans membranes pour lutter contre le bruit**. Pourquoi ?

Les performances acoustiques d'un matériau découlent de propriétés mécaniques, comme la **masse volumique** ( $\rho$ ) et la **compressibilité** ( $\chi$ ) définies par

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \quad \text{et} \quad \chi = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)$$

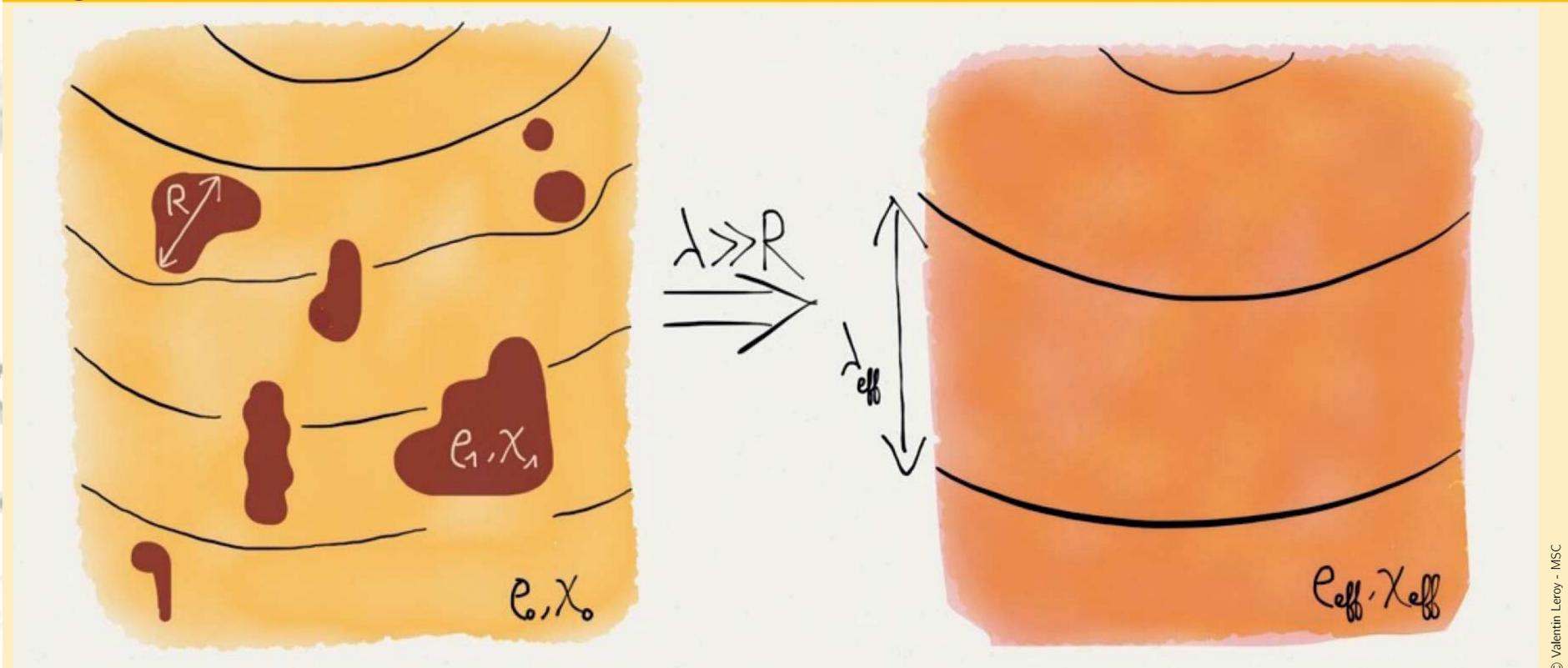
qui déterminent la vitesse et l'atténuation du son. La compressibilité indique à quel point le matériau peut se déformer sous l'effet d'une pression : un gaz est plus compressible qu'un solide. De plus, les solides sont plus denses que les gaz.

## Propriétés effectives

Bien qu'une mousse soit composée de deux milieux différents, on peut la représenter comme un matériau homogène, avec des **propriétés effectives** qui dépendent des propriétés individuelles de ses deux constituants. Sa compressibilité effective est quasiment égale à celle de l'air mais **sa densité effective n'est pas égale au rapport masse/volume**. De plus, l'ajout de l'infime masse des membranes augmente significativement la dissipation du son.

Dans les mousses liquides, un phénomène de résonance a lieu à certaines fréquences. La dissipation du son est alors maximale. Un tel phénomène n'a pas encore été obtenu dans les mousses solides avec membranes car leur squelette est trop rigide.

## Longueur d'onde et milieu effectif



Une onde acoustique de longueur d'onde  $\lambda$  se propage dans un matériau hétérogène composé de deux phases : une matrice (jaune) de densité  $\rho_0$  et de compressibilité  $\chi_0$ , avec des inclusions (rouges), de densité  $\rho_1$  et de compressibilité  $\chi_1$ . Si la longueur d'onde est très grande devant la taille caractéristique,  $R$ , des inclusions, alors l'ensemble équivaut à un milieu homogène (orange, à droite), avec des propriétés effectives  $\rho_{\text{eff}}$  et  $\chi_{\text{eff}}$ , qui dépendent de celles des deux phases. Pour une mousse, les deux phases sont l'air et le squelette (liquide ou solide).

# Le laboratoire Matière et Systèmes Complexes

## Les milieux complexes

Au Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, qu'entend-on par « complexe » ? Un milieu est dit complexe si **la connaissance de ses constituants élémentaires ne suffit pas à en expliquer le comportement global.**

La recherche de MSC concerne le monde qui nous entoure quotidiennement en insistant sur l'aspect sciences naturelles de la physique, et en s'en inspirant pour développer de nouvelles applications.

Notre travail consiste à déterminer les ingrédients physiques minimaux qui suffisent à décrire des systèmes complexes comme la cellule animale, les fluides et matériaux complexes, puis d'en déduire les propriétés qui en résultent : l'origine des formes de la nature, les effets collectifs, etc.



© Université Paris-Diderot

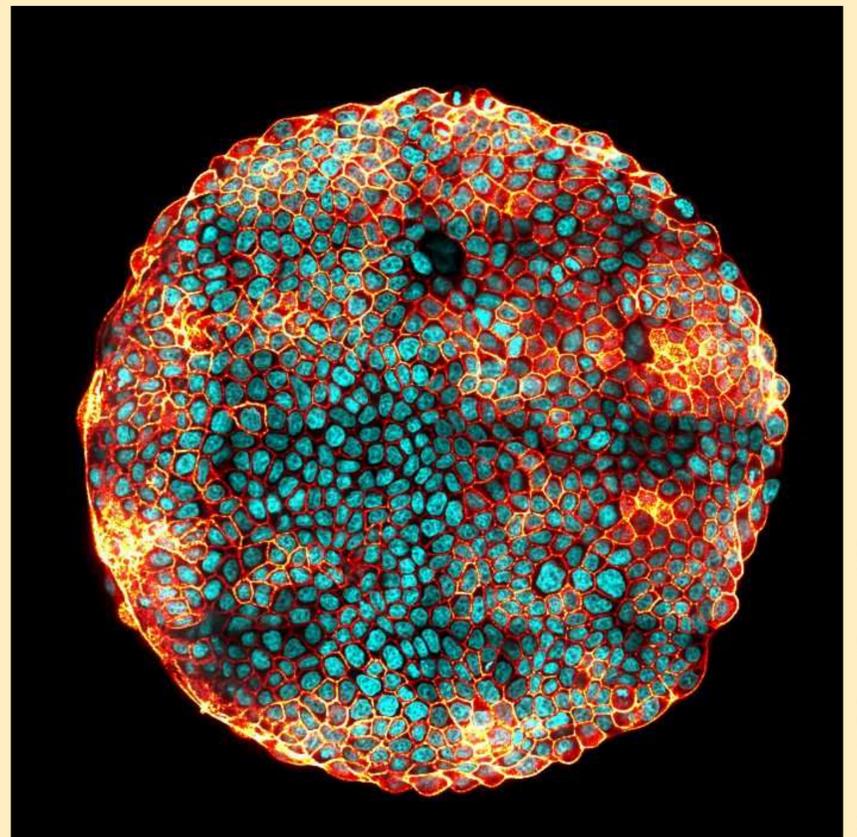
Campus de l'Université Paris-Diderot, où se trouve le laboratoire MSC.

## La complexité des mousses

Les mousses liquides sont de bons exemples de milieux complexes. Dans le liquide, le son se propage à la vitesse  $c_{liq} = 1500$  m/s. Dans l'air, sa vitesse vaut  $c_{air} = 340$  m/s. Dans la mousse, non seulement  $c_{mousse}$  dépend de la fréquence (les graves ne se propagent pas aussi vite que les aigus), mais ces valeurs varient d'environ 30 m/s à 220 m/s. Inutile de faire une moyenne de  $c_{air}$  et de  $c_{liq}$  pour obtenir  $c_{mousse}$  : les propriétés globales ne sont pas de simples moyennes des propriétés des constituants. On parle alors de **milieu non linéaire.**

## Les cellules biologiques

La photo ci-dessous représente un îlot de cellules (noyaux en bleu, parois en orange).



© N. Hamard / D. Pereira / S. Hénon - MSC

La croissance et l'organisation des cellules suivent les lois de la biologie, de la chimie et de la mécanique, disciplines intégrées dans la biophysique.

## Les dunes



© enviro2b

La physique des dunes fait appel à la fois à la morphogénèse, aux milieux granulaires et procédés de sédimentation et à la mécanique des fluides pour modéliser les interactions du sable avec le vent, sans oublier l'acoustique pour le chant des dunes !

# Grandeurs acoustiques

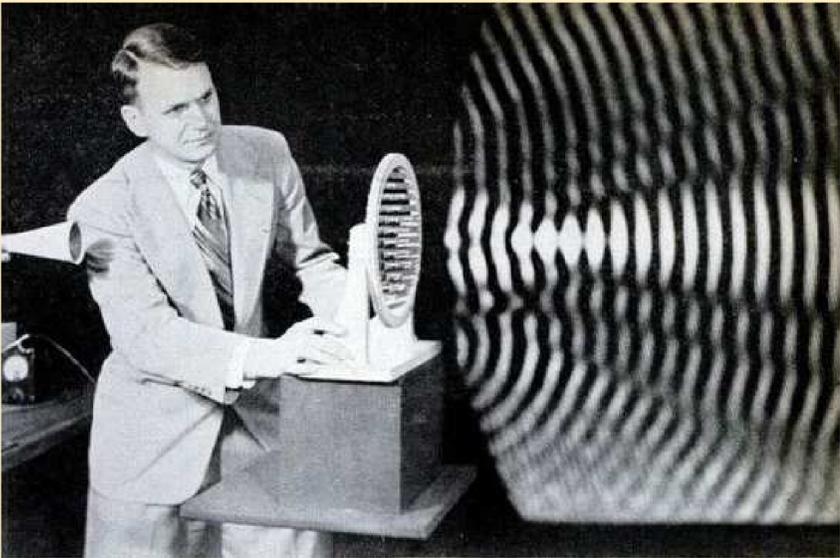
## Vitesse, fréquence et longueur d'onde

Tous les sons sont des superpositions de sons élémentaires, ou **sons purs**, qui ont une **fréquence** définie,  $f$ , égale au nombre d'allers-retours effectués chaque seconde par les molécules. On la mesure en hertz (Hz), l'inverse d'une seconde. Les fréquences audibles vont de 20 Hz (son grave) à 20000 Hz (son aigu).

Un son pur possède aussi une **longueur d'onde**,  $\lambda$  : c'est la distance entre deux points successifs où les molécules ont la même vitesse de vibration.

La **vitesse de propagation** d'une telle onde est  $c = \lambda f$ . Dans les conditions normales,  $c \simeq 340$  m/s dans l'air et  $c \simeq 1500$  m/s dans l'eau.

## Voir le son dans l'air

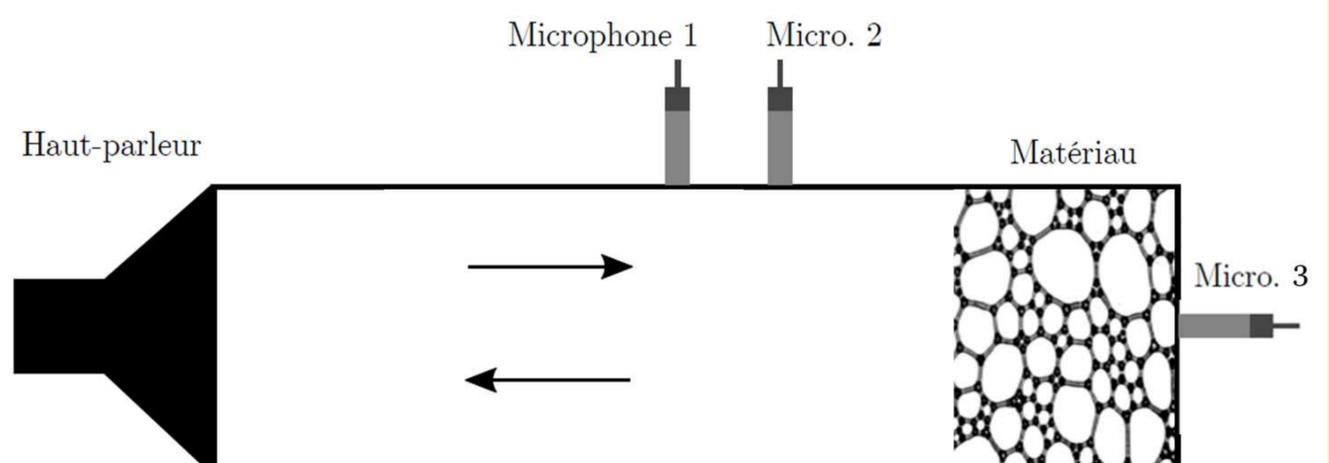


Un ingénieux système de fouet équipé d'un micro et d'une source de lumière dont l'intensité est proportionnelle à celle du son capté permet de visualiser une onde sonore dans l'air.

## Dispositif de mesure

On mesure  $\alpha$  et TL à l'aide d'un tube muni d'un haut-parleur et de microphones.

L'onde émise par le haut-parleur est partiellement absorbée par l'échantillon et réfléchiée par la paroi.



## Masse volumique ( $\rho$ ) et compressibilité ( $\chi$ )

La vitesse du son est définie par la relation

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi\rho}}$$

Plus un milieu est léger ( $\rho$  petit) ou peu compressible ( $\chi$  petit) et plus le son s'y propage vite.

## Atténuation et pertes d'énergie

Quand une onde se propage, son amplitude diminue exponentiellement d'un facteur  $e^{-ax}$  sur une distance  $x$ . Le coefficient  $a$  s'appelle **l'atténuation** de l'onde.  $1/a$  est la distance typique sur laquelle l'amplitude de l'onde diminue significativement. Comme l'eau atténue le son moins bien que l'air, les mammifères marins peuvent communiquer sur de grandes distances.

## Réflexion et transmission

Une onde sonore, d'amplitude  $A_i$ , rencontre une paroi. Une onde, d'amplitude  $A_r$ , est réfléchiée, et une autre, d'amplitude  $A_t$ , traverse la paroi.

Le **coefficient de réflexion**,  $r$ , et le **coefficient de transmission**,  $t$ , sont définis par les rapports entre les amplitudes réfléchiée et transmise, et l'amplitude incidente :

$$r = \frac{A_r}{A_i} \quad \text{et} \quad t = \frac{A_t}{A_i}$$

## Absorption et perte par transmission

Le **coefficient d'absorption**,  $\alpha = 1 - |r|^2$ , mesure la quantité d'énergie acoustique qui n'est pas réfléchiée par un matériau. La **perte par transmission** (TL = *Transmission Loss*) est définie par :

$$TL = -10 \log_{10}(|t|^2)$$

Elle indique de combien de décibels un son transmis est réduit après avoir traversé le matériau.  $\alpha$  et TL dépendent de l'épaisseur de l'échantillon.