

# Etude du comportement acoustique des matériaux absorbants susceptibles d'être utilisés dans l'industrie alimentaire

A.M. Ondet, M. Melon, service Métrologie, acoustique, vibrations, centre de recherche de l'INRS, Nancy

## Study of the acoustic behaviour of sound-absorbing materials for possible use in the food industry

Hygiene constraints in the food industry limit the choice of conventional sound-absorbing materials that can be used. Models potentially usable in the food industry were identified and subjected to theoretical and experimental study. A computer model of the acoustic behaviour of the materials available on the market was developed, and their absorption coefficients were measured. The model was validated by comparing the values measured with those calculated. It was then used to determine how the absorption coefficient changed with an air space behind the material. Finally, a noise prediction study demonstrated the usefulness of these materials, even on ceilings only, in reducing reverberation at the workplace when reverberation by the walls made a decisive contribution to workplace noise level.

Noise / Acoustical attenuation / Methodology / Trial / Measurement

**Dans l'industrie alimentaire, les contraintes d'hygiène limitent le choix des milieux absorbants acoustiques classiques. Les matériaux susceptibles d'être utilisés dans ce secteur industriel ont été recensés. Une étude théorique et expérimentale a été entreprise : d'une part, une modélisation de leur comportement acoustique a été mise au point et d'autre part, des mesures du coefficient d'absorption des matériaux existants dans le commerce ont été réalisées.**

**Le modèle a été validé en comparant les valeurs mesurées aux valeurs calculées. Il a ensuite été utilisé pour mettre en évidence l'évolution du coefficient d'absorption en présence d'un espace d'air à l'arrière du matériau. Enfin, une étude prévisionnelle a montré l'intérêt de recourir à ces matériaux même sur des surfaces limitées au plafond, pour réduire la réverbération des locaux, lorsque la contribution du champ réverbéré par les parois sur le niveau de bruit aux postes de travail joue un rôle déterminant.**

Bruit / Affaiblissement acoustique / Méthodologie / Essai / Mesure

**L**e bruit reçu par un travailleur dépend de nombreux paramètres qui peuvent être répartis en trois catégories distinctes :

- les paramètres associés à l'émission du bruit par les machines : nombre de machines, spectre de puissance acoustique, durée de fonctionnement...
- les paramètres liés à la propagation sonore dans le local : position des machines, géométrie du local, propriétés acoustiques des parois, encombrement...
- les paramètres associés aux postes de travail : localisation spatio-temporelle des postes, activités réalisées, etc.

Une démarche de réduction de l'exposition sonore des travailleurs implique nécessairement une action sur ces trois types de paramètres.

Le traitement acoustique du local, qui consiste à recouvrir les parois d'un matériau absorbant l'énergie sonore, est une solution qui permet, par action sur la propagation, de réduire le champ réverbéré et par suite, le niveau sonore en tout point du local suffisamment éloigné de la source sonore considérée. Cette solution, largement utilisée, est efficace lorsque la contribution du champ réverbéré par le local aux niveaux de bruit est importante. Par contre, elle n'apporte à elle seule aucune amélioration au voisinage d'une source de bruit lorsque le champ direct émis par cette source est prépondérant.

Les matériaux absorbants utilisés dans l'industrie sont généralement constitués d'une couche de laine minérale revêtue d'un film protecteur. La nature diphasique de la laine minérale engendre l'absorption du son par le matériau dans

les moyennes et hautes fréquences ( $f > 500$  Hz). La propagation du son dans les matériaux poreux s'apparente aux écoulements fluides qui, du fait des mécanismes liés à la géométrie du milieu poreux, entraînent des phénomènes de dissipation d'énergie irréversibles. Pour une couche de laine minérale donnée, les caractéristiques d'absorption du matériau seront d'autant moins perturbées que le film protecteur, nécessaire à la bonne tenue du matériau, sera transparent sur le plan acoustique. Généralement, le film protecteur est un voile de fibre de verre qui permet les écoulements fluides. Si les contraintes sont importantes (résistance mécanique, présence de brouillards d'huile...), des plaques perforées sont utilisées pour protéger le matériau poreux : celles-ci jouent un rôle d'écran. Des études portant sur ce type de matériau [1] ont montré qu'un taux de perforation minimal de l'ordre de 20 % est nécessaire pour conserver le pouvoir absorbant du matériau poreux.

Dans l'industrie alimentaire, les contraintes d'hygiène sont telles que l'emploi des matériaux absorbants acoustiques traditionnels est proscrit. En effet, dans ce secteur industriel, il convient d'empêcher toute prolifération bactérienne et les parois du local doivent être dans la plupart des cas, soit lavables, soit lessivables au jet (compléments en annexe 1). Les matériaux absorbants acoustiques qui sont les plus couramment proposés par les fournisseurs sont constitués eux aussi d'une couche de matériau poreux mais avec pour film protecteur, soit une couche de peinture microperforée, soit un film étanche. Compte tenu de la nature des mécanismes (écoulements fluides) qui sont à l'origine de l'absorption acoustique, il est naturel de s'interroger sur les performances acoustiques de ces matériaux, un film étanche ne pouvant être considéré a priori comme transparent sur le plan acoustique.

Les travaux effectués dans le cadre de cette étude comportent plusieurs parties complémentaires qui sont [2] :

- l'élaboration, à partir de travaux antérieurs, d'un modèle de calcul du comportement acoustique de matériaux recouverts d'un film étanche ou d'un film microperforé. La validation de ce modèle a été effectuée, dans quelques cas, par comparaison avec des mesures du coefficient d'absorption sous incidence normale ;

- l'exploitation partielle de ce modèle pour mettre en évidence l'influence de certains paramètres (épaisseur, influence du plénum), mais qui peut par ailleurs être utilisé pour effectuer des

études paramétriques pour prévoir et optimiser les caractéristiques des matériaux et leur mode de pose vis-à-vis d'une application donnée ;

- une comparaison entre les valeurs mesurées sous incidence normale et celles obtenues sous incidence aléatoire qui sont le plus souvent les valeurs fournies par les fabricants ;

- enfin, des simulations numériques ont été réalisées sur un cas d'école, à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle RaysCad+, afin d'illustrer l'amélioration qui peut être obtenue en terme de réverbération globale du local en utilisant l'un de ces matériaux.

Il ressort de l'ensemble de ces travaux que :

- les matériaux absorbants susceptibles d'être utilisés dans l'industrie alimentaire ont des caractéristiques acoustiques intéressantes malgré la présence de films plus ou moins étanches qui dégradent leurs performances,

- le modèle mis au point permet de prévoir et d'optimiser ces caractéristiques acoustiques à partir des données physiques et des conditions de pose,

- l'utilisation de ces matériaux, uniquement en plafond, permet de diminuer très sensiblement la réverbération des locaux, même si elle ne permet pas toujours d'atteindre les critères imposés par l'arrêté du 30 août 1990 pour les locaux industriels.

## 1. DESCRIPTION DES MATERIAUX EXISTANTS ET DES MODES DE POSE ASSOCIES

Les matériaux les plus couramment proposés par les fournisseurs, pour réduire la réverbération dans les locaux de l'industrie alimentaire, peuvent être regroupés dans deux familles : les matériaux poreux recouverts de peinture microperforée et les matériaux poreux recouverts d'un film étanche.

### 1.1. Matériaux poreux recouverts de peinture microperforée (fig. 1a et 1b)

Trois types de produits sont disponibles :

- des plaques de 4 cm de laine de verre revêtue sur la face apparente de peinture microperforée. Ce matériau se pose en faux plafond ;

- des plaques constituées de 2 cm de laine de verre revêtue sur toutes ses faces d'une peinture microporeuse. Ce matériau se pose également en faux plafond ;

- des plaques de 4 cm de laine de verre revêtue sur toutes ses faces de peinture microporeuse. Ces plaques sont utilisées pour constituer un réseau de baffles ou comme panneaux muraux.

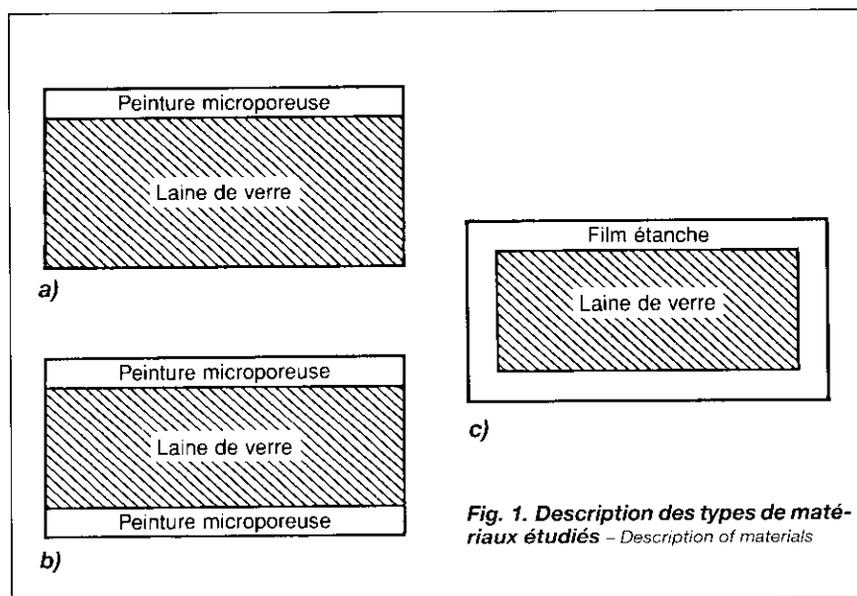


Fig. 1. Description des types de matériaux étudiés - Description of materials

D'après les fournisseurs, ces matériaux supportent l'époussetage, le nettoyage à l'aspirateur, le nettoyage humide et le nettoyage sous basse et haute pression ; ils peuvent être utilisés dans des locaux peu exposés aux salissures et n'exigeant un nettoyage humide que quelques fois par an.

## 1.2. Matériaux poreux recouverts d'un film étanche (fig. 1c)

Quatre matériaux de ce type sont disponibles sur le marché. Pour trois d'entre eux, il s'agit de plaques de laine de verre de haute densité de différentes épaisseurs (2 cm, 2,5 cm et 5 cm), entourées d'un film de Tedlar qui doit assurer une étanchéité absolue et une surface lisse. Ces matériaux se posent sur des profils apparents en faux plafond ou en baffles.

Le quatrième matériau est constitué de plaques de 6 cm de mousse de polyuréthane entourées d'un film plastique. Ces plaques sont utilisées pour former un réseau de baffles.

D'après les fournisseurs, ces matériaux peuvent être utilisés dans des locaux exposés à de fréquentes salissures et nécessitant un nettoyage humide tous les jours ; ils supportent l'époussetage, le nettoyage à l'aspirateur, le nettoyage humide et le nettoyage sous basse ou haute pression.

---

## 2. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT ACOUSTIQUE DE CES MATÉRIAUX

---

Deux types de matériaux ont été étudiés : le premier est constitué d'un matériau poreux recouvert d'un écran poreux ; le second est constitué d'un matériau poreux recouvert d'un écran étanche.

Deux modes de pose ont été considérés selon que le matériau est collé sur une paroi rigide parfaitement réfléchissante ou posé en présence d'un plénum (espace d'air entre matériau et paroi) [2].

Le modèle utilisé a été élaboré à partir des travaux d'Allard [3, 4], Guignouard [5] et Rebillard [6, 7] et est basé sur la théorie de Biot [8]. Il permet, dans les différentes configurations citées précédemment, de calculer l'impédance acoustique du matériau et son coefficient d'absorption sous incidence nor-

male, à partir d'un certain nombre de caractéristiques physiques des matériaux et du calcul global des écoulements liés à la propagation du son. L'ouvrage d'Allard [3] présente une description détaillée de la modélisation de l'absorption des matériaux. Seule une description succincte du modèle utilisé est rappelée ici.

### 2.1. Caractéristiques physiques des matériaux utilisés dans la modélisation

Le modèle de calcul mis en œuvre implique la prédétermination d'un certain nombre de grandeurs physiques liées à ses différents éléments constitutifs, à savoir le matériau poreux, l'écran poreux ou étanche.

#### 2.1.1. Le matériau poreux

Les matériaux poreux sont des matériaux diphasiques constitués d'un fluide saturant un squelette solide. Dans le cas des absorbants acoustiques, le fluide est de l'air, le solide peut être de la mousse, de la laine de verre, de la laine de roche, etc. Les paramètres utilisés dans le modèle pour caractériser ces matériaux sont les suivants :

- l'épaisseur  $e$  [m] ;
- la masse volumique  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] ;
- la porosité  $\Phi = \frac{V_f}{V_t}$  qui représente le

volume relatif des espaces occupés par le fluide. Celle-ci est définie comme étant le rapport entre le volume de la phase fluide  $V_f$  et le volume total du matériau  $V_t$ . Elle varie donc entre 0 et 1. Pour la plupart des matériaux fibreux, elle est voisine de 1. Elle se mesure à l'aide d'un porosimètre ;

- la résistance au passage de l'air  $\sigma$  [Ns/m<sup>4</sup>] qui représente le rapport entre la différence de pression statique  $\Delta p$  de chaque côté du matériau et le débit volumique  $V_e$  traversant ce matériau :

$$\sigma = \frac{\Delta p}{V_e}$$

où  $V$  représente le débit moyen par unité de surface et  $e$  l'épaisseur du matériau.

Pour la plupart des matériaux fibreux, la résistance au passage de l'air est comprise entre 5 000 et 100 000 Ns/m<sup>4</sup>. La détermination de cette grandeur caractéristique est rapide : elle s'effectue en aspirant de l'air à travers un échantillon de matériau.

- le facteur de structure ou tortuosité  $k_s$  caractérise l'orientation des pores dans

le matériau. Pour des pores cylindriques parallèles, inclinés d'un angle  $\theta$  par rapport à la normale de la surface du matériau :

$$k_s = \frac{1}{\cos^2 \theta}$$

Cette grandeur est obtenue globalement à partir de la mesure de la porosité  $\Phi$  et de la résistivité de l'échantillon imbibé dans un liquide conducteur électrique  $R_c$  :

$$k_s = \frac{\Phi R_c}{R_f}$$

où  $R_f$  est la résistivité du liquide conducteur ;

- le coefficient de cisaillement [N/m<sup>2</sup>] indique le rapport entre la contrainte tangentielle et le glissement qui en résulte. Sa détermination est obtenue par ajustement entre mesures et calcul de l'impédance de surface pour une fréquence donnée ;

- le coefficient de Poisson donne le rapport de la contraction latérale à l'extension longitudinale. Selon Sides et coll. [9], pour les laines minérales, ce coefficient est nul.

#### 2.1.2. L'écran poreux

L'écran poreux est supposé fin et souple. Il est caractérisé par :

- son épaisseur  $e$  [m],
- sa masse volumique  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],
- sa porosité  $\Phi$ ,
- son facteur de structure  $K_s$ ,
- sa résistance au passage de l'air  $\sigma$  [Ns/m<sup>4</sup>].

Les définitions et la détermination expérimentale des trois derniers paramètres (porosité, facteur de structure et résistance au passage de l'air) sont analogues à celles exposées pour le matériau poreux lui-même (cf. § 2.1.1).

#### 2.1.3. L'écran étanche

L'écran étanche est considéré comme une membrane parfaitement souple. Il est caractérisé uniquement par sa masse surfacique  $M_s$  [kg/m<sup>2</sup>].

### 2.2. Modélisation du comportement des matériaux poreux. Théorie de Biot

L'état du matériau en un point donné est caractérisé par six grandeurs physiques indépendantes qui sont les trois

vitesse et les trois contraintes suivantes :

–  $V_x^s$  : vitesse de la matrice suivant l'axe Ox,

–  $V_z^s$  : vitesse de la matrice suivant l'axe Oz,

–  $V_z^f$  : vitesse du fluide suivant l'axe Oz,

–  $t_{zz}^s$  : contrainte exercée sur la matrice sur l'axe Oz et suivant l'axe Oz,

–  $t_{xz}^s$  : contrainte exercée sur la matrice sur l'axe Ox et suivant l'axe Oz,

–  $t_{zz}^f$  : contrainte exercée sur le fluide sur l'axe Oz et suivant l'axe Oz.

Ces six grandeurs physiques peuvent être regroupées sous forme vectorielle de la manière suivante :

$$\vec{V} = [V_x^s, V_z^s, V_z^f, t_{zz}^s, t_{xz}^s, t_{zz}^f]$$

Biot montre que lorsqu'un matériau poreux subit des déformations ou des contraintes, celles-ci peuvent se propager dans le milieu poreux par trois types d'ondes :

– une onde longitudinale de compression, dite onde lente. Elle correspond à un déplacement du squelette en opposition de phase avec celui de l'air ;

– une onde longitudinale de compression, dite onde rapide. Elle correspond à un déplacement du squelette en phase avec celui de l'air. Elle est beaucoup moins amortie que l'onde lente ;

– une onde transversale de cisaillement. L'air ne contribue pas à la création de cette onde mais il est entraîné par le mouvement du squelette.

Le modèle de Biot permet de déterminer l'évolution de ces paramètres entre

un point 1 et un point 2 du matériau par une relation matricielle de la forme :

$$\vec{V}_2 = [T] \vec{V}_1$$

où T est une matrice dont les termes peuvent être calculés directement à partir de la connaissance des paramètres caractéristiques du matériau poreux, ces termes prenant en compte la propagation des phénomènes dans le matériau par les 3 types d'onde évoqués précédemment.

En particulier, l'expression précédente peut s'appliquer entre deux points situés chacun sur une des faces d'un même matériau.

### 2.3. Elaboration du système d'équations

Les matériaux étudiés sont constitués d'une couche de milieu poreux, recouverte sur une ou deux faces d'un écran microporeux (fig. 2a et 2b) ou d'un écran imperméable (fig. 2c et 2d). Ils sont collés sur une surface rigide (fig. 2a et 2c) ou séparés de cette surface par un plénum (fig. 2b et 2d). L'élaboration de modèles pour prédire le comportement de ces matériaux s'obtient à partir de l'écriture d'une part, d'un ensemble d'équations décrivant la propagation dans chaque milieu et d'autre part, des équations de continuité pour chaque changement de milieu.

#### 2.3.1. Prise en compte de l'interface air-écran

A la surface du matériau, la relation qui relie la pression P et la vitesse V au point noté 1 sur la figure 2 donne accès à l'impédance de surface Z du matériau :

$$Z = \frac{P}{V}$$

#### 2.3.2. Modélisation du passage de la surface du matériau au milieu poreux

Cas de l'écran poreux (fig. 2a et 2b)

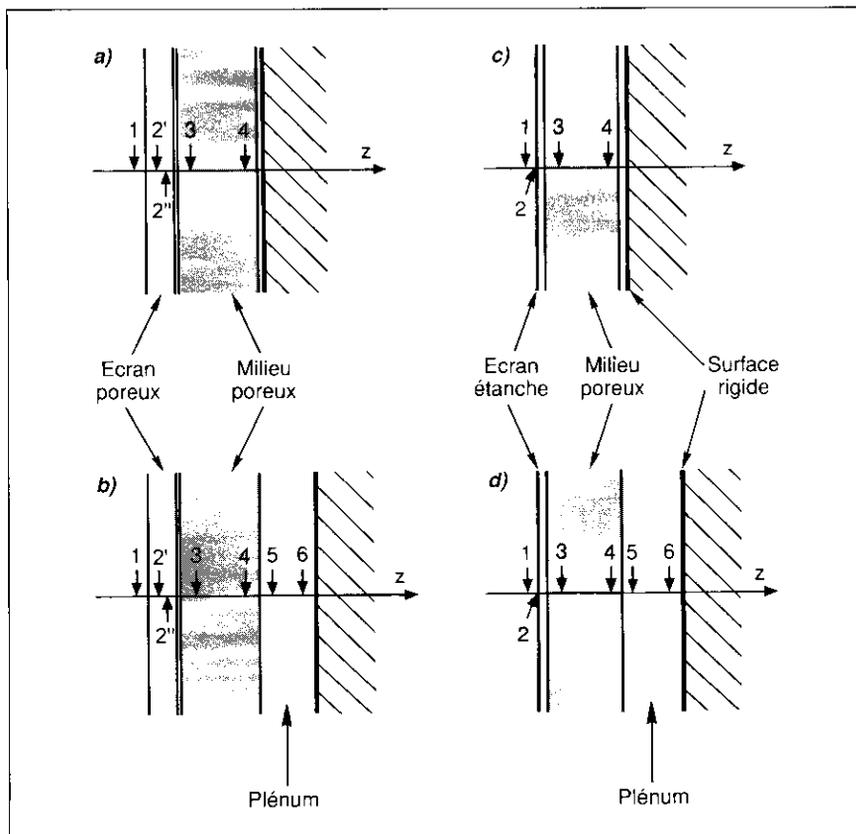
La modélisation de l'interface entre l'écran poreux et le matériau poreux s'obtient en écrivant :

- la continuité des vitesses entre les points 1 et 3. Pour écrire cette équation, on suppose que les hypothèses suivantes sont vérifiées :

- l'écran poreux est suffisamment souple pour que seuls les effets de membrane soient pris en compte ;

- l'écran poreux est de faible épaisseur ; ceci permet d'écrire la continuité des

**Fig. 2. Description des configurations étudiées. Matériaux poreux recouverts d'un écran poreux : a) pose collée ; b) avec plénum. Matériaux poreux recouverts d'un écran étanche : c) pose collée ; d) avec plénum** – Description of configurations studied : a) porous materials covered with a porous screen, without plenum ; b) porous materials covered with a porous screen, with plenum ; c) materials covered with an airtight screen, without plenum ; d) materials covered with an airtight screen, with plenum



vitesse de part et d'autre de l'écran (entre les points 1 et 3), dans le fluide d'une part et dans la structure d'autre part ;

– l'écran est solidaire du milieu poreux ; ainsi, la vitesse normale de la structure des deux milieux est continue à la limite aux points 2'' et 3 ;

- la continuité des débits à la surface du matériau (soit entre les points 1 et 2') d'une part et à la limite entre l'écran poreux et le matériau poreux (soit entre les points 2'' et 3) d'autre part ;

- les équations du mouvement de la partie solide et de la partie fluide de l'écran obtenues en écrivant l'équilibre des forces s'exerçant de part et d'autre de l'écran (soit aux points 1 et 3), sur la structure solide et sur le fluide.

#### Cas de l'écran étanche (fig. 2c et 2d)

La modélisation de l'interface écran poreux-milieu poreux est obtenue en écrivant :

– la continuité des vitesses entre les points 1 et 3 situés de part et d'autre de l'écran. De même que pour l'écran poreux, l'écran imperméable est supposé souple et de faible épaisseur : en conséquence, seuls les effets de membrane sont considérés ;

– les équations du mouvement de l'écran (point 2) à partir de l'équilibre des forces s'exerçant de part et d'autre de l'écran (points 1 et 3).

#### 2.3.3. Modélisation du milieu poreux (fig. 2)

Le modèle de Biot permet de relier contraintes et vitesses d'une face à l'autre du matériau poreux (points 3 et 4) :  $\vec{V}_4 = [T] \vec{V}_3$

#### 2.3.4. Modélisation de l'arrière du matériau

Selon le mode de pose, l'arrière du matériau est constitué du milieu poreux, collé ou non sur une surface rigide parfaitement réfléchissante.

#### Cas du matériau collé sur une surface rigide (fig. 2a et 2c)

Lorsque le matériau est collé sur la surface rigide, les vitesses du fluide et de la structure du matériau poreux s'annulent sur cette surface (point 4).

#### Cas du matériau séparé de la surface rigide par un espace d'air (fig. 2b et 2d)

A la limite entre le matériau poreux et l'air, la continuité des débits et l'équi-

libre des forces entre les points 4 et 5 permettent d'obtenir :

– une relation entre la vitesse à l'arrière du matériau (point 5) et les vitesses dans le fluide et la structure du matériau poreux (point 4) ;

– une relation entre la pression à l'arrière du matériau (point 5) et les contraintes dans le fluide et dans la structure du milieu poreux (point 4).

Par ailleurs, en faisant l'hypothèse de la propagation d'ondes planes dans le plénum (entre les points 5 et 6) et de la réflexion totale sur la surface rigide (point 6), on obtient une relation entre la pression et la vitesse à l'arrière du matériau au point 5.

Pour une configuration donnée, les équations formant le système à résoudre sont obtenues directement à partir de la connaissance de la constitution du matériau et de son mode de pose.

#### 2.4. Détermination du coefficient d'absorption

Pour toutes les configurations étudiées, l'écriture de l'ensemble des équations conduit à un système linéaire homogène (second membre nul) de trois équations à trois inconnues paramétrées par l'impédance de surface  $Z$ . La condition pour que ce système ait une solution autre que la solution où chaque inconnue est nulle, est que son déterminant soit nul. L'écriture de cette condition permet de calculer l'impédance de surface  $Z$  du matériau et d'en déduire son coefficient d'absorption par la relation suivante :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} \right|^2$$

où  $Z_c = \rho_0 c$  représente l'impédance caractéristique de l'air.

En conclusion, le coefficient d'absorption de ces matériaux, dans les conditions de pose définies, est obtenu par résolution d'un système d'équations construit à partir des paramètres physiques suivants :

– pour le matériau poreux : son épaisseur, sa masse volumique, sa porosité, son facteur de structure, sa résistance au passage de l'air, son coefficient de Poisson et son module de cisaillement ;

– pour l'écran poreux : son épaisseur, sa masse volumique, sa porosité, son facteur de structure et sa résistance au passage de l'air ;

– pour l'écran étanche : sa masse surfacique ;

– pour l'espace d'air à l'arrière du matériau : son épaisseur.

### 3. VALIDATION DU MODELE DE CALCUL DU COEFFICIENT D'ABSORPTION DES MATERIAUX

Afin de valider le modèle mis au point, pour chaque matériau dont la constitution est décrite dans le tableau I, le coefficient d'absorption calculé à l'aide du modèle a été comparé au coefficient d'absorption mesuré sous incidence normale.

Pour ce faire, deux séries de mesure ont été entreprises :

– d'une part, des mesures des paramètres physiques des constituants des différents matériaux ont été réalisées ; les valeurs obtenues sont les paramètres d'entrée du modèle de calcul du coefficient d'absorption des matériaux ;

– d'autre part, des mesures directes du coefficient d'absorption sous incidence normale des matériaux ont été entreprises à l'aide de la technique du doublet microphonique.

Toutes ces mesures ont été réalisées à l'Université du Maine.

#### 3.1. Mesures effectuées

Pour chaque matériau décrit dans le tableau I, les caractéristiques physiques de chacun de leurs constituants ont été mesurées, soit :

– pour les milieux poreux : l'épaisseur, la porosité, le facteur de structure, la résistance au passage de l'air ;

– pour les écrans poreux : l'épaisseur, la masse volumique, la porosité, la résistance au passage de l'air ;

– pour les écrans étanches : la masse surfacique.

Par ailleurs, pour chacun des matériaux à l'étude (tableau I), le coefficient d'absorption a été mesuré sous incidence normale, par la technique du doublet microphonique [10] décrite en annexe 2. Les mesures ont été réalisées dans une chambre sourde pour des fréquences variant de 300 Hz à 5 000 Hz, les matériaux étant collés sur un socle lourd et rigide.

TABLEAU I  
Composition des matériaux étudiés

Matériau (n°)	Milieu poreux	Épaisseur (cm)	Conditionnement
1	Laine de verre	4	Plaques revêtues sur 1 face de peinture microporeuse
2		2	Plaques revêtues sur les 6 faces de peinture microporeuse
3		2	Plaques entourées d'un film Tedlar
4		2,5	
5		5	

TABLEAU II

Caractéristiques physiques des milieux poreux des matériaux étudiés

Matériau (n°)	Épaisseur (m)	Porosité	Résistance au passage (Ns/m <sup>4</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Module de cisaillement (N/m <sup>2</sup> ) (*)	Facteur de structure
1	0,04	0,97	20.10 <sup>3</sup>	63	1 700 + 170 i	1
2	0,02	0,96	30.10 <sup>3</sup>	88	5 000 + 500 i	1,04
3	0,02	0,96	40.10 <sup>3</sup>	75	500 + 50 i	1
4	0,026	0,96	40.10 <sup>3</sup>	71	400 + 40 i	1
5	0,052	0,97	20.10 <sup>3</sup>	53	200 + 20 i	1

(\*) Paramètre ajusté.

TABLEAU III

Caractéristiques physiques des écrans microporeux des matériaux 1 et 2

Matériau (n°)	Épaisseur (m)	Porosité (*)	Facteur de structure	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance au passage de l'air (Ns/m <sup>4</sup> )
1	5.10 <sup>-4</sup>	0,02	1	600	2,5.10 <sup>6</sup>
2	6.10 <sup>-4</sup>	0,02	1	600	3.10 <sup>6</sup>

(\*) Paramètre ajusté.

TABLEAU IV

Caractéristiques physiques des écrans étanches des matériaux 3, 4, 5

Matériau (n°)	Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )
3	0,04
4	0,042
5	0,042

### 3.2. Résultats obtenus

Les caractéristiques physiques des éléments constituant chaque matériau et nécessaires à l'utilisation du modèle, sont données dans les tableaux II, III et IV. Le tableau II concerne le milieu poreux et contient les valeurs des paramètres utiles pour appliquer la théorie de Biot. Le tableau III donne les caractéristiques physiques des écrans poreux entrant dans la constitution des matériaux 1 et 2. Enfin, le tableau IV donne la masse surfacique des écrans étanches entrant dans la constitution des matériaux 3, 4 et 5.

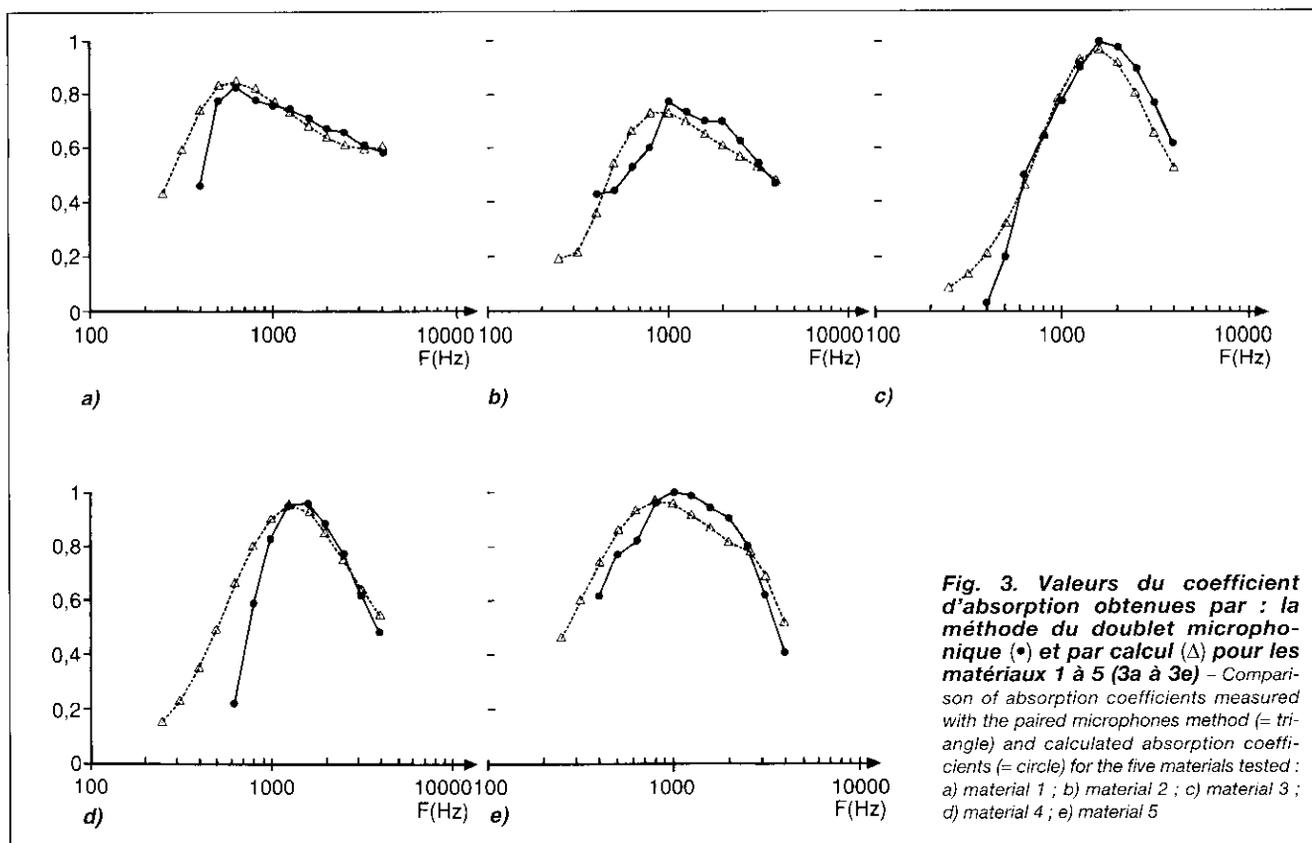
Pour chaque matériau étudié, les caractéristiques physiques de chacun des éléments entrant dans sa constitution (tableau I) ont alors été injectées dans le modèle de calcul du coefficient d'absorption. Les matériaux sont supposés collés sur un support rigide ; le coefficient d'absorption a été calculé pour une incidence normale pour des fréquences variant de 200 Hz à 5 000 Hz.

Pour chaque matériau étudié, les figures 3a à 3d montrent les courbes d'évolution en fonction de la fréquence du coefficient d'absorption calculé, comparées à celles obtenues expérimentalement par la technique du doublet microphonique.

#### 3.2.1. Matériaux recouverts de peinture microporeuse

Le coefficient d'absorption des matériaux revêtus d'un film de peinture microporeuse (fig. 3a et 3b) varie entre 0,4 et 0,8 dans la gamme de fréquences 400 Hz-4 000 Hz et présente un pic d'absorption à 0,8 pour une fréquence voisine de 600 Hz pour le matériau 1 et de 1 000 Hz pour le matériau 2. La comparaison des courbes, obtenues sur les figures 3a (matériau 1) et 3b (matériau 2), montre que l'augmentation de l'épaisseur de la couche de matériau poreux se traduit par un élargissement du pic d'absorption vers les basses fréquences, la valeur maximale étant décalée vers les basses fréquences.

On observe une bonne concordance entre les résultats de calcul et les résultats expérimentaux. Les pics d'absorption et l'allure des courbes sont bien décrits par le modèle de calcul. Le modèle met donc bien en évidence l'influence de l'augmentation de l'épaisseur de la couche de matériau poreux.



**Fig. 3. Valeurs du coefficient d'absorption obtenues par : la méthode du doublet microphonique (•) et par calcul (Δ) pour les matériaux 1 à 5 (3a à 3e)** – Comparison of absorption coefficients measured with the paired microphones method (= triangle) and calculated absorption coefficients (= circle) for the five materials tested : a) material 1 ; b) material 2 ; c) material 3 ; d) material 4 ; e) material 5

### 3.2.2. Matériaux recouverts d'un film de Tedlar

Les matériaux 3 et 4, qui sont entourés d'un film de Tedlar, ont un pic d'absorption très marqué et relativement large entre 1 000 et 3 000 Hz (fig. 3c et 3d). Le coefficient d'absorption est compris entre 0,7 et 1 dans cette gamme de fréquences. Ce pic s'élargit lorsqu'on augmente l'épaisseur du matériau poreux, notamment vers les basses fréquences : en effet, pour le matériau n° 5, qui est 2 fois plus épais que les précédents, le pic d'absorption s'étale entre 500 et 3 000 Hz. Par ailleurs, pour les trois matériaux considérés, l'absorption chute fortement sous incidence normale vers les hautes et les basses fréquences.

De même que pour les matériaux poreux, recouverts d'une peinture microporeuse, on observe une assez bonne concordance entre les courbes d'absorption mesurées et calculées à l'aide du modèle.

L'ensemble des confrontations mesure-calcul effectuées montre que le modèle élaboré est bien adapté pour l'étude du

comportement des matériaux utilisables dans l'industrie alimentaire. L'intérêt d'un tel modèle est de pouvoir observer, à partir de simulations numériques, l'influence de différents paramètres tels que l'épaisseur du matériau poreux, l'épaisseur du plénum...

## 4. EXPLOITATION DU MODELE POUR L'ETUDE DE L'INFLUENCE D'UN ESPACE D'AIR A L'ARRIERE DU MATERIAU

Le modèle de calcul de l'impédance et du coefficient d'absorption ayant été validé pour l'étude du comportement des matériaux collés sur un support rigide, des simulations ont été entreprises pour mettre en évidence l'influence d'un plénum à l'arrière du matériau.

Les simulations ont été réalisées pour les matériaux 1 et 3, le n° 1 étant consti-

tué de 4 cm de laine de verre recouverte de peinture microporeuse et le n° 3 étant constitué de 2 cm de laine de verre recouverte d'un film de Tedlar.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 4a et 4b. Elles mettent en évidence que le fait d'ajouter un espace d'air à l'arrière du matériau se traduit par les effets suivants :

- le coefficient d'absorption augmente sensiblement en basses fréquences ( $f < 500$  Hz) ;

- le coefficient d'absorption oscille en moyennes fréquences (ici, pour des fréquences comprises entre 500 et 1 500 Hz). L'ampleur des oscillations diminue lorsque la fréquence augmente. Ce comportement oscillant peut conduire à une diminution de l'absorption pour certaines fréquences ;

- le coefficient d'absorption n'est pas modifié en hautes fréquences ( $f > 2 000$  Hz) ;

- pour le matériau 3, constitué d'un matériau poreux recouvert d'un film de Tedlar, le pic d'absorption se décale légèrement vers les hautes fréquences.

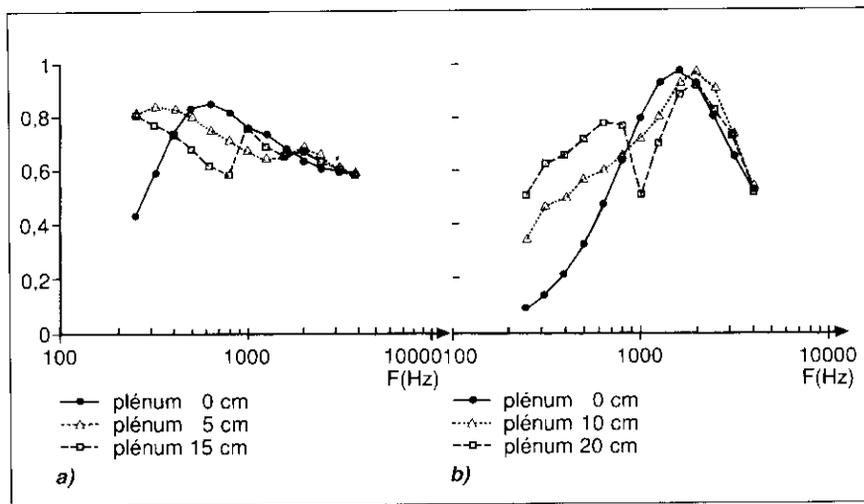


Fig. 4. Calcul du coefficient d'absorption pour différentes épaisseurs de plénum : a) Matériau 1. b) Matériau 3 - Absorption coefficient of two materials calculated for different plenum widths : a) material 1 ; b) material 3

## 5. UTILISATION DES MATERIAUX ABSORBANTS DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

### 5.1. Comparaison des résultats obtenus aux données fournies par les fabricants

Pour les matériaux étudiés, on trouve dans la documentation technique fournie par les fabricants les courbes donnant l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence. Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures réalisées par des laboratoires d'essais conformément à des procédures normalisées (ISO) en salle réverbérante. Dans tous les cas, les matériaux ont été étudiés en présence d'un espace d'air à l'arrière du matériau dont le rôle favorable en basses fréquences a été mis en évidence par calcul sous incidence normale (cf. Chap. 4).

Une salle réverbérante est une salle dont les parois sont très réfléchissantes, ce qui entraîne un champ acoustique diffus : l'incidence des ondes en un point de l'espace est aléatoire. La détermination du coefficient d'absorption en salle réverbérante est obtenue en comparant la durée de réverbération de la salle en présence d'un échantillon de matériau à celle de la salle vide. La valeur obtenue correspond donc à une incidence aléatoire des ondes acoustiques sur le matériau absorbant.

Pour chacun des cinq matériaux étudiés, le coefficient d'absorption, mesuré

en chambre réverbérante avec plénum, est comparé à celui mesuré par la méthode du doublet microphonique sans plénum sur les figures 5a à 5e.

Pour les matériaux 1 et 2, constitués d'un milieu poreux revêtu d'une couche de peinture microporeuse, on observe (fig. 5a et 5b) que le coefficient d'absorption mesuré en salle réverbérante et en présence d'un plénum est, pour toute la gamme de fréquences, toujours supérieur à celui mesuré sous incidence normale et en l'absence de plénum par la méthode du doublet microphonique.

Pour les matériaux 3, 4 et 5, constitués d'une couche de laine de verre recouverte d'un film étanche, on observe (fig. 5c à 5e) que le coefficient d'absorption mesuré en salle réverbérante est supérieur à celui mesuré sous incidence normale en basses fréquences. L'absorption est proche de 1 en moyennes fréquences par les deux méthodes, le pic d'absorption est cependant légèrement décalé vers les hautes fréquences par la méthode de la salle réverbérante.

Deux phénomènes peuvent expliquer ces différences :

- **la présence d'un plénum** : conformément aux résultats obtenus par le modèle de calcul (fig. 4a et 4b), la présence d'un espace d'air à l'arrière du matériau conduit à une augmentation importante de l'absorption en basses fréquences. C'est probablement ce qui explique l'écart observé en basses fréquences pour les cinq matériaux ;

- **l'incidence des ondes** : alors que les mesures utilisant la méthode du doublet

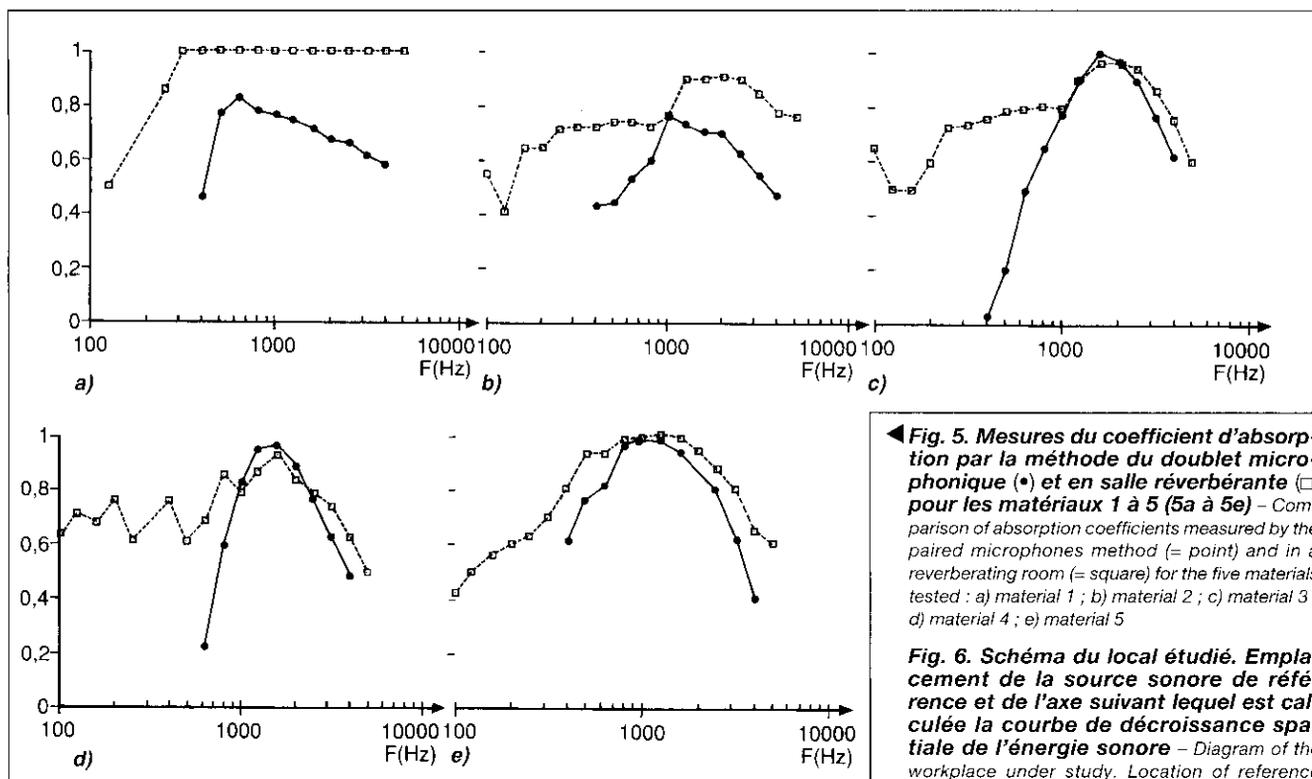
microphonique ont été réalisées sous incidence normale, la méthode de la salle réverbérante utilise un champ diffus, soit une incidence aléatoire. Généralement, pour les matériaux poreux, le coefficient d'absorption augmente avec l'incidence. Pour les matériaux 1 et 2, qui sont revêtus de peinture microporeuse, ce mécanisme existe probablement et permet d'expliquer les écarts observés en hautes fréquences entre les mesures en chambre réverbérante et les mesures par la technique du doublet microphonique.

De plus, quelle que soit la méthode de mesure, l'échantillon est de dimensions finies. Dans la méthode de la salle réverbérante, on mesure le comportement global de la salle en présence de l'échantillon : l'effet de diffraction par les bords de l'échantillon existe et il n'est pas pris en compte dans la méthode de détermination du coefficient d'absorption. Par contre, dans la méthode du doublet microphonique, cet effet est minimisé car le doublet microphonique est situé très près de la surface de l'échantillon.

### 5.2. Efficacité du traitement acoustique dans un local

Afin d'illustrer l'intérêt de réaliser le traitement acoustique d'un local à l'aide de tels matériaux, des simulations ont été entreprises à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle RaysCad+ [12]. Le local étudié est un parallélépipède de 30 m x 30 m x 6 m. Pour différentes configurations de traitement du local, la courbe de décroissance spatiale de l'énergie sonore a été calculée dans une allée située sur l'axe du local (fig. 6) pour une source sonore émettant un bruit rose. Les simulations ont été faites pour diverses densités d'encombrement.

La pente par doublement de distance de chaque courbe ainsi obtenue peut être comparée à la valeur limite donnée par l'arrêté du 30 août 1990 [13] qui exige qu'un local à construire ou à réaménager, dans lequel des machines bruyantes doivent être installées, soit conçu de manière à limiter la réverbération du local. Un local est considéré comme traité, au sens de l'arrêté, lorsque la pente par doublement de distance est supérieure à la valeur limite définie par le critère. Rappelons que, dans l'industrie alimentaire, ce dernier critère n'est pas exigé, les contraintes liées aux problèmes d'hygiène étant primordiales et dans certains cas, en contradiction avec les critères acoustiques.

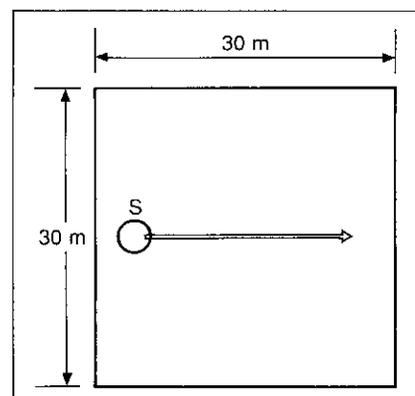


◀ Fig. 5. Mesures du coefficient d'absorption par la méthode du doublet microphonique (\*) et en salle réverbérante (□) pour les matériaux 1 à 5 (5a à 5e) – Comparison of absorption coefficients measured by the paired microphones method (= point) and in a reverberating room (= square) for the five materials tested : a) material 1 ; b) material 2 ; c) material 3 ; d) material 4 ; e) material 5

Fig. 6. Schéma du local étudié. Emplacement de la source sonore de référence et de l'axe suivant lequel est calculée la courbe de décroissance spatiale de l'énergie sonore – Diagram of the workplace under study. Location of reference sound source and axis along which the curve of sound decrement with distance was calculated ▼

TABLEAU V  
Traitement des parois - configuration étudiées

Configurations étudiées	Partie basse des murs (h < 2 m)	Partie haute des murs (h > 2 m)	Plafond	Plénum
1	0,1	0,1	0,1	non
2	0,1	0,1	mat 3	non
3	0,1	mat 3	mat 3	non
4	0,1	0,1	mat 3	oui, 30 cm
5	0,1	mat 3	mat 3	oui, 30 cm



### 5.2.1. Configurations étudiées

#### Traitement du local

Cinq configurations de traitement du local ont été étudiées et sont décrites de façon synthétique dans le tableau V.

**Cas 1 :** le local est réverbérant ; on suppose que le coefficient d'absorption est de l'ordre de 0,1 sur tout le spectre pour le mur et le plafond.

**Cas 2 :** le plafond est recouvert du matériau n° 3 sans plénum. Les valeurs du coefficient d'absorption retenues sont celles obtenues expérimentalement par la méthode du doublet microphonique (cas du matériau collé) et don-

nées sur la figure 5c. Les murs sont réfléchissants (absorption = 0,1 sur tout le spectre).

**Cas 3 :** le plafond et la partie haute des parois verticales (h > 2m) sont recouverts du matériau n° 3 sans plénum. La partie basse des parois verticales (h < 2 m) est réfléchissante (absorption = 0,1 sur tout le spectre).

**Cas 4 :** le plafond est recouvert à l'aide du matériau n° 3, avec un plénum. Les valeurs du coefficient d'absorption retenues sont celles obtenues expérimentalement en salle réverbérante (cas du matériau posé avec un plénum) et données sur la figure 5c. Les parois verticales sont réfléchissantes (absorption = 0,1 sur tout le spectre).

**Cas 5 :** le plafond et la partie haute des parois verticales (h > 2 m) sont recouvertes à l'aide du matériau n° 3, avec un plénum. La partie basse des parois verticales (h < 2 m) est réfléchissante (absorption = 0,1 sur tout le spectre).

#### Encombrement du local

Les configurations d'encombrement étudiées sont les suivantes :

– le local est vide : la majorité des locaux dits vides contiennent des structures du type piliers, pont roulant, structures métalliques... et se situent entre les deux situations extrêmes suivantes qui ont été étudiées : le local ne contient aucun objet diffusant ; le local contient des objets diffusants de type piliers, structures métalliques...

– le local est encombré : il n'existe pas une configuration d'encombrement unique caractéristique pour tous les locaux. De même, au sein d'un même local, l'encombrement n'est jamais réparti de manière uniforme sur toute la surface de base du local. Aussi, afin de donner une plage de variation, quatre situations ont été considérées : le local est peu encombré sur une hauteur de 1 m ; le local est très encombré sur une hauteur de 1 m ; le local est peu encombré sur une hauteur de 2 m ; le local est très encombré sur une hauteur de 2 m.

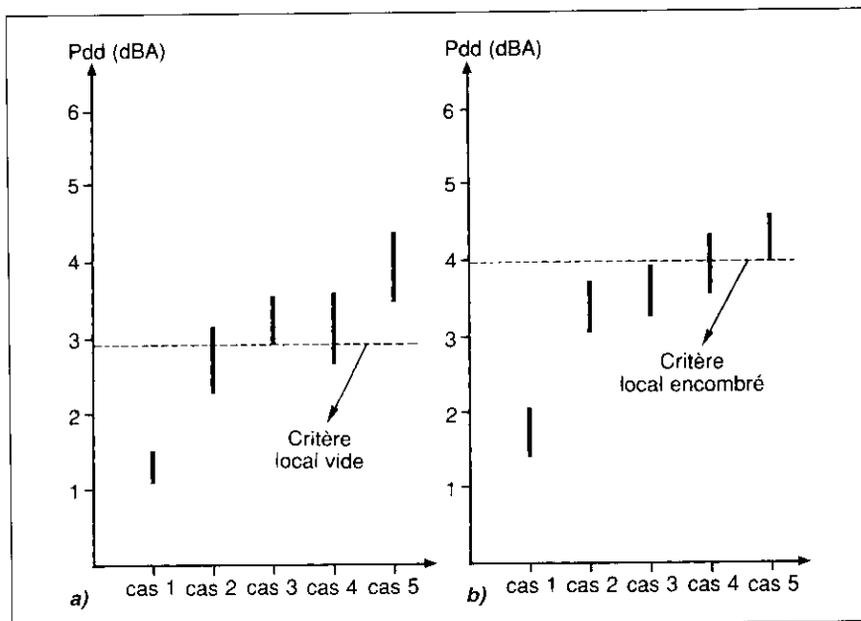
### 5.2.2. Résultats obtenus

Sur la figure 7a correspondant au cas du local vide, on donne pour chaque cas de traitement du local (cas 1 à 5), la plage de variation de la pente par doublement de distance : la valeur minimale correspond au cas du local parfaitement vide, la valeur maximale correspond au cas du local vide mais contenant quelques éléments diffusants.

De même, sur la figure 7b correspondant au cas du local encombré, on donne pour chacun des cinq cas de traitement de local étudié, la plage de variation de la pente par doublement de distance : ici, les plages de variation contiennent les quatre cas de densités d'encombrement considérés et détaillés au § 5.2.1.

Le local étudié a une surface au sol de 900 m<sup>2</sup>. Les limites inférieures de la pente par doublement de distance (Pdd), définies par l'arrêté du 30 août 1990, sont respectivement de 2,93 et 4 pour le local vide et pour le local encombré. Ces limites sont reportées par un trait horizontal sur les figures 7a et 7b. L'examen de ces figures conduit aux observations suivantes :

- l'emploi du matériau absorbant n° 3, utilisable dans l'industrie alimentaire, permet à titre d'exemple de réduire notablement la réverbération dans ce type de local. Pour le matériau considéré, le traitement seul du plafond, sans plénum (cas n° 2), permet de se rapprocher de la valeur fixée par l'arrêté du 30 août 1990, mais sans l'atteindre ;
- la présence d'un plénum (cas 4 et 5), lors de l'utilisation de ce type de matériau, permet d'améliorer la performance globale du local. En effet, pour le matériau considéré (matériau n° 3), on observe qu'en présence d'un plénum, le critère exigé par l'arrêté du 30 août 1990 a une forte probabilité d'être satisfait, dans le local vide comme dans le local encombré ;



**Fig. 7. Plages de variation des pentes par doublement de distance, calculées pour un local vide (a) ou encombré (b) (dimensions : 30 m x 30 m x 6 m)** – Ranges of slope variation as distance doubles, calculated for an empty room (30 x 30 x 6 m) ; case 1 – reverberating room ; case 2 – ceiling fitted with material 3, without plenum ; case 3 – ceiling and upper part of walls fitted with material 3, without plenum ; case 4 – ceiling fitted with material 3, with plenum ; case 5 – ceiling and upper part of walls fitted with material 3, without plenum

– l'influence du traitement de la partie haute des parois verticales sur la pente par doublement de distance est plus importante dans le local vide (fig. 7a) que dans le local encombré (fig. 7b). Ceci est dû au fait que dans le local encombré, la propagation du son entre la source, les parois verticales et les points récepteurs est entravée par la présence d'obstacles. Les parois verticales sont donc plus lointaines sur le plan acoustique qu'elles ne le sont en réalité ; l'efficacité de leur traitement est donc moindre au centre du local.

### 5.2.3. Choix d'un matériau pour un local donné

Pour un local donné, le choix d'un matériau et son mode de pose doit être fait à partir de deux critères acoustiques complémentaires :

- l'efficacité globale du traitement : la pente par doublement de distance en dB(A) pour un bruit rose est un bon indicateur pour caractériser le local. Elle doit être la plus grande possible et elle peut être comparée au critère exigé par l'arrêté du 30 août 1990 ;
- l'efficacité du traitement pour réduire l'exposition au bruit des travailleurs : celle-ci s'exprime en terme de gain acoustique pour une configuration de machines et de postes de travail donnée.

En effet, l'utilisation de matériaux qui ont un spectre d'absorption très irrégulier, comme c'est le cas pour le matériau n° 3, utilisé pour nos simulations, peut ponctuellement réserver quelques surprises dans certains cas particuliers. A titre d'exemple, pour le local considéré, on a observé que le matériau n° 3 posé sans plénum, sur le plafond ou sur le plafond et la partie haute des murs, permettait de se rapprocher du critère fixé par l'arrêté du 30 août 1990. Or, l'examen de la courbe d'absorption de ce matériau (cf. fig. 1) montre qu'un tel traitement sera très efficace dans les bandes d'octave 1 000 et 2 000 Hz et peu efficace dans les bandes d'octave 250 et 500 Hz, bien que globalement, le résultat obtenu au niveau de la courbe de décroissance, pour un bruit rose et en dBA, apparaisse comme relativement satisfaisant. Dans un tel cas, si les machines émettent essentiellement dans la gamme 250-500 Hz, ce traitement est peu efficace en ce qui concerne la réduction des niveaux de bruit : il est alors indispensable d'augmenter l'absorption dans les basses fréquences, soit en disposant un plénum, soit en choisissant un matériau plus épais, qui est plus absorbant dans cette gamme de fréquences (fig. 3e).

Par contre, ce même traitement sans plénum pourra être très performant si le bruit est émis essentiellement dans les bandes de fréquences 1 000 Hz-2 000 Hz.

Il n'existe pas de solution unique (choix du matériau, distribution sur les parois, mode de pose) convenant à tous les locaux. La meilleure solution pourra être obtenue à partir d'une étude prévisionnelle qui permettra d'évaluer d'une part, les caractéristiques acoustiques du local (courbes de décroissance sonore avant et après traitement) et d'autre part, le gain apporté en terme de niveaux d'exposition pour la configuration machines-local-postes de travail donnée.

## 6. CONCLUSION

Les matériaux absorbants susceptibles d'être utilisés dans l'industrie alimentaire ont été recensés. Deux types de matériaux ont été étudiés :

- des matériaux constitués de laine de verre revêtus d'une peinture microperforée. D'après les fournisseurs, ces matériaux supportent l'époussetage, le nettoyage à l'aspirateur, le nettoyage humide et le nettoyage sous basse et haute pressions ; ils peuvent être utilisés dans des locaux peu exposés aux salissures et n'exigeant un nettoyage humide que quelques fois par an. Leur coefficient d'absorption sous incidence normale varie entre 0,4 et 0,8 pour des fréquences comprises entre 300 et 4 000 Hz. Il est plus important sous incidence aléatoire et en présence d'un plénum : le coefficient d'absorption est alors supérieur à 0,7 pour les fréquences supérieures à 200 Hz ;

- des matériaux constitués de laine de verre entourés d'un film de Tedlar. D'après les fournisseurs, ces matériaux peuvent être utilisés dans des locaux exposés à de fréquentes salissures et nécessitant un nettoyage humide tous les jours ; ils supportent l'époussetage, le nettoyage à l'aspirateur, le nettoyage humide et le nettoyage sous basse ou haute pressions. Les matériaux d'une épaisseur de l'ordre de 2 cm possèdent un pic d'absorption large et très marqué entre 1 000 et 3 000 Hz. Sous incidence normale et en l'absence de plénum, l'absorption de ces matériaux est faible en dehors de cette plage de fréquences. Un plénum d'air à l'arrière du matériau permet d'augmenter l'absorption de façon considérable dans les basses fréquences. Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur de la laine de verre conduit elle aussi à un élargissement du pic d'absorption vers les basses fréquences.

Un modèle de calcul du coefficient d'absorption de ce type de matériau a

été mis au point. Une validation de ce modèle a été réalisée à partir d'une confrontation entre des résultats de calcul et les valeurs mesurées pour les différents matériaux. Ce modèle a ensuite été partiellement exploité pour étudier l'influence du mode de pose (avec ou sans plénum) d'un matériau.

Enfin, des simulations numériques réalisées sur un cas d'école, à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle Rays-Cad+, illustrent l'amélioration qui peut être obtenue en terme de réverbération globale du local en utilisant l'un de ces

matériaux. On montre dans un cas particulier que le traitement seul du plafond, où les critères fondamentaux en matière d'hygiène sont moins stricts que pour les parois (au niveau de la rugosité, de la porosité, de la résistance aux chocs mécaniques...), permet à lui seul d'obtenir une nette amélioration de la qualité acoustique du local, celle-ci se rapprochant de celle imposée par l'arrêté du 30 août 1990. Une discussion montre que le choix du matériau et de son mode de pose doit être fait à partir d'une estimation des gains acoustiques prévisibles sur les niveaux sonores aux postes de travail.

## Bibliographie

1. GUIGNOUARD P. et coll. - Prediction and measurement of the acoustical impedance and absorption coefficient at oblique incidence of porous layers with perforated facings. *Noise Control Engineering Journal*, 1991, **36**, pp. 129-135.
2. MELON M. - Comportement acoustique des matériaux absorbants utilisés dans l'industrie alimentaire. Rapport de DEA Acoustique appliquée, Université du Maine, 1992.
3. ALLARD J.F. - Propagation of sound in porous media-modelling sound absorbing materials. Amsterdam, Elsevier Applied Science, 1993.
4. ALLARD J.F. et coll. - Modelization at oblique incidence of layered porous materials with impervious screens. *Journal of Acoustical Society of America*, 1990, **87**, 3, pp. 1200-1206.
5. GUIGNOUARD P. - L'absorption acoustique des matériaux poreux. Prédiction et Mesures. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1991.
6. REBILLARD P. - Prédiction de l'impédance de surface des matériaux poreux stratifiés par la théorie de Biot. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1991.
7. REBILLARD P. et coll. - The effect of a porous facing on the impedance and the absorption coefficient of a layer of porous material. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, **156**, 3, pp. 541-555.
8. BIOT M.A. - The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. II. Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, **28**, pp. 168-191.
9. SIDES D.J. et coll. - Application of a generalized acoustic propagation theory of fibrous absorbents. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, **19**, pp. 49-64.
10. ALLARD J.F., SIEBEN B. - Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyser. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, **77**, pp. 1617-1618.
11. CHUNG J.Y., BLASER D.A. - Transfert function method of measuring in-duct acoustic properties. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, **68**, 3, pp. 907-914.
12. ONDET A.M., BARBRY J.L. - Modelling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, **82**, 2, pp. 787-802.
13. Arrêté du 30 août 1990 pris pour l'application de l'article R. 235-2-11 du Code du Travail et relatif à la correction acoustique des lieux de travail. *Journal Officiel*, 27 septembre 1990.

## Quelques éléments réglementaires concernant l'hygiène pour les surfaces des locaux dans l'industrie alimentaire

**A – Extraits de l'annexe de la directive 93/43/CEE du conseil du 14 juin 1993 relative à l'hygiène des denrées alimentaires**

### ***I. Prescription générale pour les locaux – § 1 et 2***

1. Les locaux, par lesquels circulent les denrées alimentaires, doivent être propres et en bon état d'entretien.
2. Par leur agencement, leur conception, leur construction et leurs dimensions, les locaux par lesquels circulent les denrées alimentaires doivent :
  - a) pouvoir être nettoyés et/ou désinfectés de manière convenable ;
  - b) permettre de prévenir l'encrassement, le contact avec les matériaux toxiques, le déversement de particules dans les denrées alimentaires et la formation de condensation et de moisissure indésirable sur les surfaces ;
  - c) permettre la mise en œuvre de bonnes pratiques d'hygiène, et notamment prévenir la contamination croisée entre et durant les opérations par les denrées alimentaires, les équipements, les matériaux, l'eau, l'aération et le personnel et les sources de contamination extérieures telles les insectes et autres animaux nuisibles ;
  - d) offrir, au besoin, des conditions de température permettant une transformation et un stockage hygiénique des produits.

### ***II. Prescriptions spécifiques pour les locaux où les denrées alimentaires sont préparées, traitées ou transformées (à l'exclusion des salles à manger et des locaux précisés au chapitre III) – § 1a, 1b et 1c***

- a) Les revêtements de sol doivent être bien entretenus, faciles à nettoyer et, au besoin, à désinfecter. Cela exige l'utilisation de matériaux étanches, non absorbants, lavables et non toxiques, sauf si les exploitants du secteur alimentaire peuvent prouver à l'autorité compétente que d'autres matériaux utilisés conviennent. Le cas échéant, les sols doivent permettre une évacuation adéquate en surface.
- b) Les surfaces murales doivent être bien entretenues, faciles à laver et, au besoin, à désinfecter. Cela exige l'utilisation de matériaux étanches, non absorbants, lavables et non toxiques et une surface lisse jusqu'à une hauteur convenable pour les opérations, sauf si les exploitants du secteur alimentaire peuvent prouver à l'autorité compétente que d'autres matériaux utilisés conviennent.
- c) Les plafonds, faux-plafonds et autres équipements suspendus doivent être conçus, construits et ouverts de manière à empêcher l'encrassement et à réduire la condensation, l'apparition de moisissures indésirables et le déversement de particules.

### **B – Bibliographie concernant les aspects réglementaires relatifs à l'hygiène**

1. Directive 93/43/CEE du conseil du 14 juin 1993 relative à l'hygiène des denrées alimentaires.
2. Etablissements se livrant à la préparation et à la mise sur le marché de viandes d'animaux de boucherie découpées, désossées ou non (arrêté du 17 mars 1992).
3. Abattoirs d'animaux de boucherie (arrêté du 17 mars 1992).
4. Etablissements de production, de préparation, de commercialisation de graisses animales fondues, d'extraits de viandes ou de produits à base, d'issues autres que ceux présentés à l'état frais, réfrigérés ou congelés (arrêté du 22 décembre 1992).
5. Etablissements de production, et d'échanges d'estomacs, vessies et boyaux nettoyés, salés ou séchés et/ou chauffés (arrêté du 22 décembre 1992).
6. Etablissements de production, de mise sur le marché et d'échanges de produits à base de viande (arrêté du 22 janvier 1993).
7. Etablissements de préparation, de commercialisation et d'utilisation des viandes séparées mécaniquement (arrêté du 23 février 1994).
8. Etablissements d'abattage de volailles (arrêté du 14 janvier 1994).
9. Etablissements de production et de mise sur le marché des viandes fraîches de lapin et de rongeurs ou gibiers d'élevage (arrêté du 19 novembre 1993).
10. Etablissements de préparation des aliments pour animaux de compagnie (arrêté du 2 mai 1994).
11. Etablissements de manipulation des produits de la pêche (arrêté du 28 décembre 1992).
12. Etablissements de vente en gros des produits de la pêche (arrêté du 29 décembre 1992).
13. Etablissements de traitement et de transformation du lait et des produits à base de lait (arrêté du 30 décembre 1993).
14. Etablissements de production et de mise sur le marché des ovoproduits (arrêté du 15 avril 1992).
15. Arrêté du 9 mai 1995 sur l'hygiène des aliments remis aux consommateurs.

## Principe de la méthode du doublet microphonique

Cette méthode a été développée par Allard [10] à partir des travaux de Chung et Blaser [11].

Les mesures sont réalisées dans une salle anéchoïque. Deux microphones sont disposés sur un axe perpendiculaire à la surface du matériau à étudier et à proximité de celle-ci (fig.). La source de bruit est un haut-parleur positionné au-dessus des microphones et à une distance suffisamment grande du matériau.

Les deux microphones M1 et M2 mesurent simultanément les pressions  $p_1$  et  $p_2$ . En première approximation, lorsque la distance entre microphones est petite devant la longueur d'onde, la pression et la vitesse au point M, situé à égale distance des deux microphones, sont obtenues par les expressions suivantes :

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

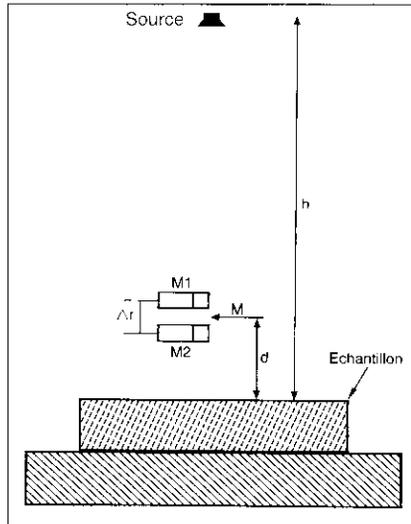
$$v = \frac{p_1 - p_2}{(i\omega\rho\Delta r)}$$

avec :

$\omega$  : pulsation,

$\rho$  : masse volumique du fluide,

$\Delta r$  : distance séparant les deux microphones.



**Schéma du dispositif de mesure** - Measurement of absorption coefficient by the paired microphones method

En notant  $H(\omega)$  la fonction de transfert définie comme étant le rapport entre les pressions  $p_1$  et  $p_2$  :

$$H(\omega) = \frac{p_2}{p_1}$$

L'impédance  $Z_M = p/v$  au point M est reliée à la fonction de transfert  $H(\omega)$  par la relation :

$$Z_M = \frac{i\omega\rho\Delta r (1 + H(\omega))}{2 (1 - H(\omega))}$$

Les équations de propagation permettent de relier l'impédance au point M à l'impédance de surface. Dans le cas présent, les mesures sont réalisées dans une salle anéchoïque ; la distance entre source sonore et matériau est grande, ce qui permet de faire l'hypothèse de la propagation d'ondes planes. On obtient alors l'équation qui relie l'impédance de surface à l'impédance au point M :

$$Z = Z_c \left[ \frac{Z_M - iZ_c \tan(kd)}{Z_c - iZ_M \tan(kd)} \right]$$

avec :

$Z_c$  : impédance caractéristique de l'air,

$c$  : célérité du son dans l'air,

$d$  : distance du point M à l'échantillon,

$k = \frac{\omega}{c}$  : constante de propagation dans l'air.

L'impédance de surface et le coefficient d'absorption du matériau sont obtenus à partir de la mesure de la fonction de transfert  $H(\omega)$ .

Reçu en août 95, accepté en octobre 95. ■

**INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ**  
**30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14**

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires, 1<sup>er</sup> trimestre 1996, n° 162 - ND 2010 - 1 000 ex.  
N° CPPAP 804 AD/PC/DC du 14-03-85 - Directeur de la publication : D. MOYEN  
ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0509-9