

DETERMINATION DU FACTEUR D'ABSORPTION PAR UNE METHODE DE RAYONS SONORES

Seconde Partie :

INFLUENCE DE LA LOCALISATION DE L'ABSORBANT SUR LE CALCUL DU CHAMP SONORE

J.J.EMBRECHTS

Chargé de Recherches du Fonds National de la Recherche Scientifique

J.NEMERLIN

Ir Chef de Laboratoire
Chef du Département CEDIA du Service d'Acoustique Appliquée
de l'Université de Liège

P.SAINT-MARD

Ir de Recherche au Département CEDIA

1. INTRODUCTION

Dans un article précédent [1], nous avons comparé le comportement de plusieurs modèles prévisionnels lorsqu'ils étaient appliqués à la description du champ sonore en chambre réverbérante et, en particulier, à la détermination du facteur d'absorption d'un échantillon d'absorbant placé dans cette chambre.

Nous avons montré qu'un logiciel basé sur la technique des rayons sonores avait tendance à délivrer des facteurs d'absorption plus

faibles que les théories désormais classiques de Sabine et d'Eyring et que le modèle de Pujolle.

Pour effectuer ce test, la géométrie de la grande chambre réverbérante de l'Institut Montefiore a été modélisée. Une source sonore et une surface réceptrice y ont été disposées. Outre ces éléments, un échantillon (supposé d'épaisseur négligeable) de matériau absorbant a été introduit dans le modèle de la salle, au sol. Sa surface était de 12.1 m².

La figure 1 rappelle les résultats d'un calcul de temps de réverbération T_e , en fonction du facteur d'absorption α_e du matériau. Dans cette figure, T_v est le temps de réverbération calculé à vide, c'est-à-dire sans matériau absorbant.

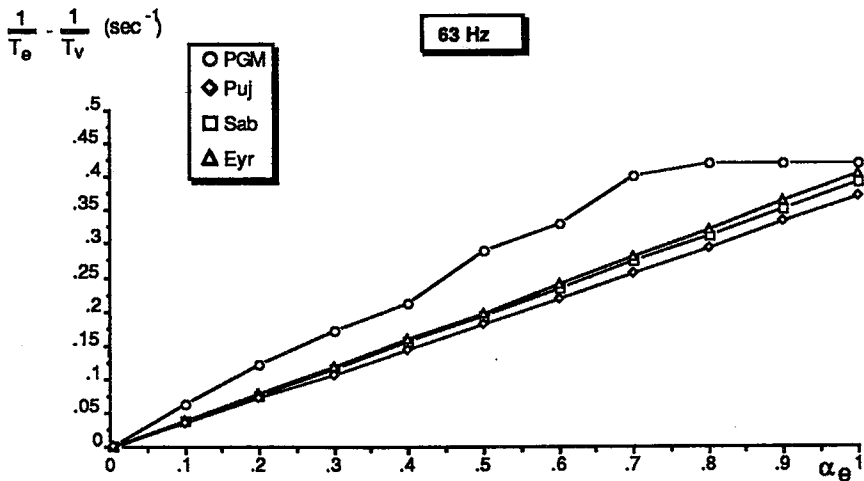


Figure 1

Dépendance entre α_e et $(T_e^{-1} - T_v^{-1})$ à 63 Hz pour divers modèles (cfr article [1])

De même, la figure 2 illustre l'évolution de l'écart ΔP entre la pression sonore sur la surface réceptrice sans et avec échantillon. Ces deux figures montrent clairement la différence de comportement entre le logiciel de rayons sonores (PGM) et les autres méthodes.

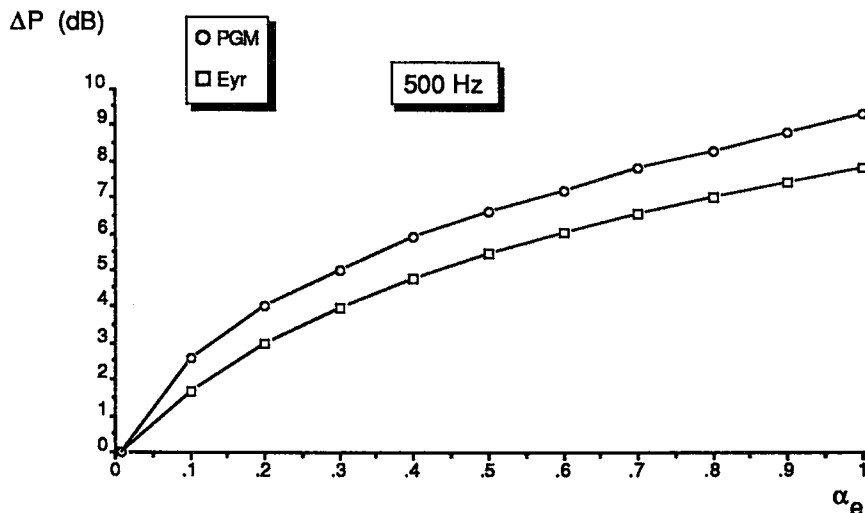


Figure 2

Dépendance entre α_e et ΔP (dB) à 500 Hz et pour deux modèles (cfr article [1])

Le but de cet article est d'analyser cette découverte :

- s'agit-il d'un comportement fautif du programme ou, au contraire, apporterait-il quelque chose de plus que les autres modèles ?
- si c'est le cas, que peut-on en conclure quant à la mesure du facteur d'absorption en chambre réverbérante ?

- peut-on assimiler les approches par temps de réverbération et par niveaux de pression et, sinon, laquelle choisir ?

C'est à ces trois questions que nous allons nous efforcer à présent de répondre.

2. L'HYPOTHESE DU CHAMP SONORE DIFFUS

Les théories classiques de la réverbération sont basées sur l'hypothèse d'un champ sonore diffus régnant dans l'espace clos. C'est le cas, notamment, des théories de Sabine et d'Eyring analysées dans ce travail. Cette hypothèse implique que toutes les directions de propagation contribuent à intensités égales au niveau sonore en un point quelconque de l'espace que nous appelons le 'point récepteur'.

Or, qu'en est-il dans notre cas ? Il est en effet reconnu que, dans un espace clos dont l'absorption des parois est faible et uniforme, on peut approcher les conditions de champ sonore diffus [2] : c'est vrai pour la chambre réverbérante à vide. Cependant, lorsqu'un échantillon d'absorbant bien localisé est introduit dans la salle de tests, il vient modifier le champ sonore, d'autant plus que ses propriétés d'absorption s'écartent de celles des murs de la chambre. Peut-on encore considérer que le champ sonore soit diffus ?

Une étude effectuée en 1982 [3] a déjà mis en évidence l'effet perturbateur de l'échantillon de matériau absorbant. Dans la même chambre réverbérante ont été calculés les vecteurs d'intensité sonore obtenus par combinaisons vectorielles d'un grand nombre de rayons sonores. L'analyse des résultats montrait clairement à l'époque que la directivité du champ sonore est influencée par la présence de l'absorbant ($\alpha = 0.88$) : les vecteurs d'intensité sonore sont dirigés de manière significative vers ce dernier (figure 3).

L'hypothèse de champ diffus peut donc être contestée en régime sonore permanent dans la chambre réverbérante avec échantillon. Et le bon sens nous amène dès lors à penser qu'en régime transitoire (analyse impulsionnelle), la diffusivité instantanée du champ sonore est également imparfaite.

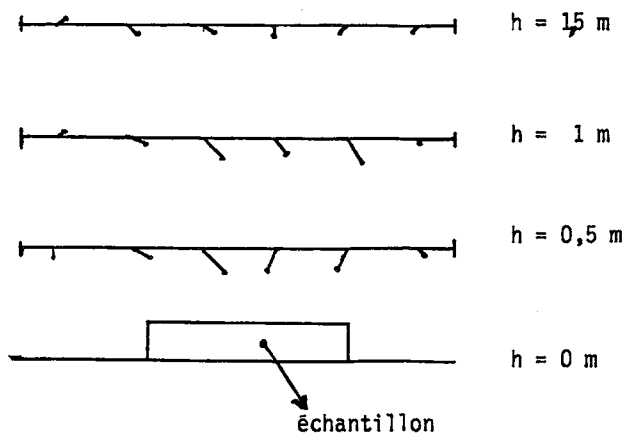


Figure 3

Vecteurs d'intensité sonore relative projetés dans un plan vertical, perpendiculaire à l'échantillon de matériau absorbant placé dans la chambre réverbérante. Les vecteurs sont présentés dans ce plan vertical à trois hauteurs : $h = 0.5, 1$ et 1.5 mètres (cfr. référence [3]).

Les considérations qui précèdent tendraient donc à prouver que la cause du comportement différent d'un logiciel de rayons sonores, appliqué à la chambre réverbérante, devrait se trouver, non pas dans une erreur (de modélisation ou autre) du programme, mais plutôt dans la mise en défaut de l'hypothèse d'application des méthodes traditionnelles.

Pour vérifier cette affirmation, une méthode directe consisterait à comparer les diverses techniques avec des mesures en chambre réverbérante. Cette dernière serait équipée successivement d'échantillons de facteurs d'absorption croissants et connus. Ce type d'échantillon normalisé fait cependant actuellement défaut et une méthode indirecte a été mise au point. Une campagne de simulation analogue à celle de l'article [1] a été décidée. Il s'agit de placer le logiciel de rayons sonores dans une situation respectant au mieux les hypothèses de champ diffus et de montrer que, dans ce cas, ses résultats correspondent aux théories classiques de réverbération.

3. CHAMBRE REVERBERANTE A PAROIS UNIFORMEMENT ABSORBANTES

La formule de Sabine est rappelée ci-dessous (1). Elle exprime le temps de réverbération T_e (sec) en fonction du volume V (m³) et de la surface totale des parois S_m (m²) de la chambre, de la surface S_e (m²) du matériau absorbant et des facteurs d'absorption α_m (murs nus), α_e (échantillon) et m (air, népers/m).

$$T_e = \frac{0.161 V}{\alpha_m(S_m - S_e) + \alpha_e S_e + 4 m V} \quad (1)$$

En analysant cette équation, remarquons que la distribution spatiale du matériau absorbant n'a, a priori, aucune influence sur la valeur du temps de réverbération. Nous pensons cependant que cette distribution spatiale intervient dans l'hypothèse de champ diffus et que, plus la répartition de l'absorbant est homogène, plus l'on se rapprochera des conditions d'application de la formule (1).

Nous allons à présent placer le logiciel de rayons sonores dans la situation où le pouvoir d'absorption du matériau est distribué uniformément sur les parois de la chambre réverbérante. La manière de procéder sera la suivante :

- fixer la valeur de α_e entre 0.1 et 1, comme dans l'étude [1];
- calculer le facteur d'absorption moyen par :

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_e S_e + \alpha_m (S_m - S_e)}{S_m} \quad (2)$$

- déterminer le champ sonore comme en [1], c'est-à-dire temps de réverbération et niveau de pression au récepteur. On impose pour cela que toutes les parois de la chambre vide soient recouvertes d'un matériau dont le facteur d'absorption serait α calculé en (2).

Cette valeur moyenne $\overline{\alpha}$ est, ici, au plus égale à 0.1 (à 8 kHz et pour $\alpha_e = 1$). Nous approchons donc des conditions d'un champ sonore diffus, non seulement parce que l'absorbant est uniformément distribué, mais aussi parce que le facteur d'absorption moyen est faible.

TABLEAU 1

Relation entre α_e (facteur d'absorption de l'échantillon) et $(T_e^{-1} - T_v^{-1})$ calculés (sec^{-1}) lorsque le pouvoir absorbant du matériau est distribué uniformément sur les parois.

α_e	f(Hz)	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
0.1		0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.036	0.029	0.021
0.2		0.073	0.072	0.070	0.071	0.072	0.069	0.066	0.062
0.3		0.106	0.106	0.106	0.107	0.108	0.110	0.103	0.100
0.4		0.148	0.148	0.148	0.147	0.147	0.143	0.135	0.135
0.5		0.181	0.182	0.181	0.181	0.181	0.184	0.175	0.166
0.6		0.221	0.222	0.222	0.222	0.221	0.217	0.214	0.207
0.7		0.257	0.256	0.255	0.257	0.256	0.259	0.251	0.251
0.8		0.296	0.297	0.297	0.298	0.298	0.292	0.296	0.281
0.9		0.333	0.332	0.332	0.334	0.330	0.332	0.328	0.322
1.0		0.373	0.374	0.374	0.372	0.369	0.371	0.367	0.368

Il est évident que les méthodes classiques donneront les mêmes résultats qu'aux figures 1 et 2 puisque la valeur moyenne α est inchangée. Le lecteur intéressé consultera, pour des résultats plus complets, l'article [1] aux figures 3 et 4 . Par contre, nous allons voir que le logiciel de rayons sonores va tenir compte de la localisation différente de l'absorbant et délivrer des résultats différents.

Il serait superflu de rappeler ici les détails concernant l'exécution du programme de simulation. La seule différence intervenant par rapport à l'étude précédente étant que la surface de l'échantillon est ôtée du modèle et que le facteur d'absorption des parois est uniforme et calculé par l'équation (2).

TABLEAU 2

Différence $\Delta P(\text{dB})$ entre les niveaux de pression calculés dans la salle pyramidale (salle vide - salle avec échantillon) lorsque le pouvoir absorbant du matériau est distribué uniformément sur les parois.

α_e	f (Hz)	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K
0.1		2.3	2.0	2.0	1.7	1.4	0.9	0.3	0.2
0.2		4.0	3.6	3.4	3.0	2.5	1.7	0.8	0.4
0.3		4.9	4.4	4.3	3.8	3.2	2.3	1.0	0.5
0.4		5.9	5.4	5.3	4.7	4.1	2.9	1.4	0.7
0.5		6.7	6.1	6.0	5.3	4.7	3.5	1.8	0.8
0.6		7.4	6.8	6.7	6.0	5.4	4.0	2.2	1.1
0.7		7.9	7.4	7.2	6.5	5.8	4.4	2.4	1.2
0.8		8.5	7.9	7.8	7.0	6.3	4.8	2.8	1.4
0.9		9.0	8.3	8.1	7.4	6.6	5.2	3.0	1.6
1		9.3	8.7	8.6	7.8	7.1	5.5	3.2	1.8

Le tableau 1 reprend, en fonction des temps de réverbération calculés par le programme, la relation entre α_e et $(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_v})$. Le tableau 2 nous donne quant à lui la différence entre les niveaux de pression calculés au récepteur sans ($\alpha_e = \alpha_m$) et avec échantillon.

Les figures 4 et 5 illustrent le comportement du logiciel de rayons sonores par rapport aux théories classiques, à 63, 500 et 8000 Hz.

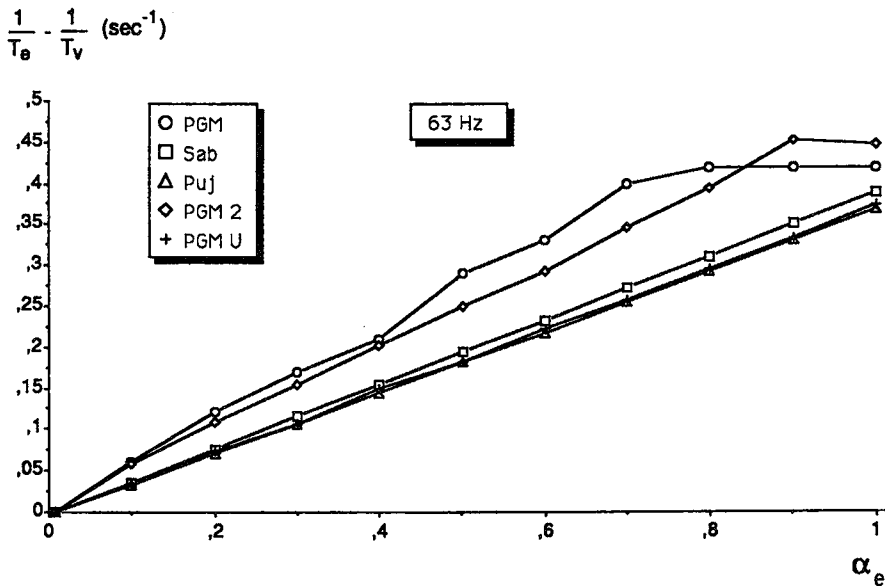


Figure 4

Dépendance entre α_e et $(T_e^{-1} - T_v^{-1})$ à 63, 500 et 8000 Hz pour divers modèles :

PGM : résultats du logiciel de rayons, premier passage (cfr. article [1]);

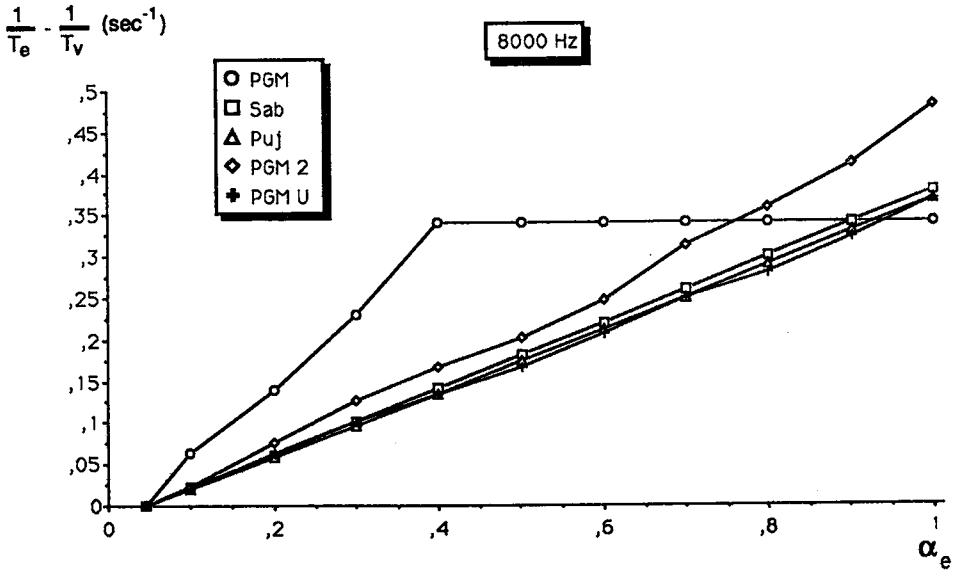
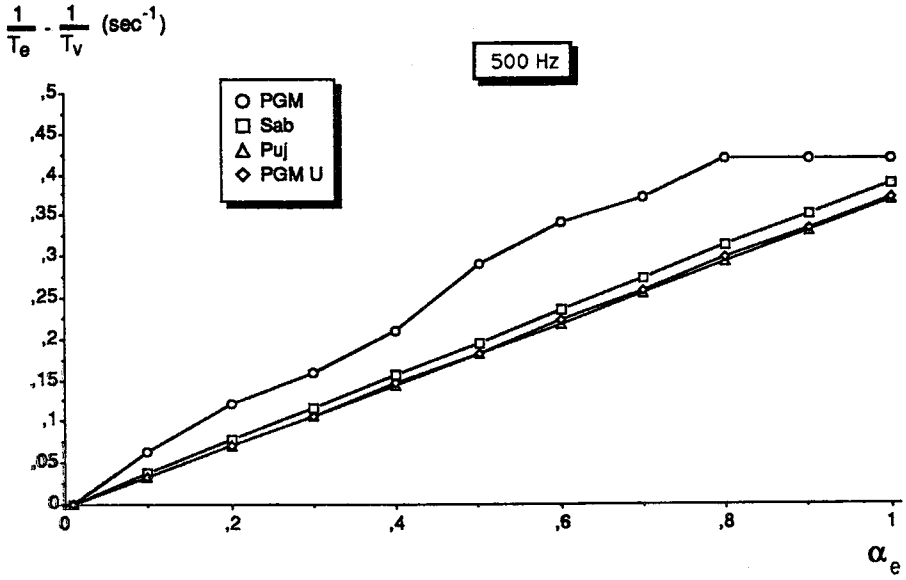
Sab : théorie de Sabine;

Puj : modèle de Pujolle-Leclerc;

PGM 2: résultats du logiciel, deuxième passage, absorbant localisé;

PGMU: résultats du logiciel avec absorbant distribué uniformément sur les parois.

Figure 4 (suite)



La figure 4 nous montre tout d'abord l'évolution du temps de réverbération en fonction de α_e :

- par la théorie de Sabine,
- par le modèle de Pujolle-Leclerc,
- par le logiciel de rayons sonores, lorsque l'absorbant est distribué uniformément sur tous les murs, et
- par le même logiciel avec absorbant localisé : premier passage (cfr. article [1]) et deuxième passage (certains paramètres sont différents, nous en reparlerons plus loin).

Il apparaît clairement que, lorsque le pouvoir absorbant de l'échantillon est uniformément distribué, le programme donne des résultats très proches des théories classiques et, plus particulièrement, du modèle de Pujolle-Leclerc. Cette constatation se retrouve à toutes les fréquences et le démarquage par rapport au cas de l'absorbant localisé est très net.

La figure 5 nous montre ensuite l'évolution du niveau de pression au récepteur en fonction de α_e :

- par la théorie d'Eyring (cfr. équation 4 de l'article [1]),
- par le logiciel de rayons sonores, lorsque l'absorbant est distribué uniformément sur tous les murs, et
- par le même logiciel avec absorbant localisé.

Il apparaît de nouveau clairement que les deux premiers modèles sont très proches l'un de l'autre et nettement démarqués du troisième.

De toutes ces considérations, nous pouvons conclure que le comportement différent du programme, observé dans l'article précédent, provient du fait que le logiciel de rayons sonores tient compte de la localisation réelle de l'absorbant. Ce qui n'est pas le cas des méthodes classiques.

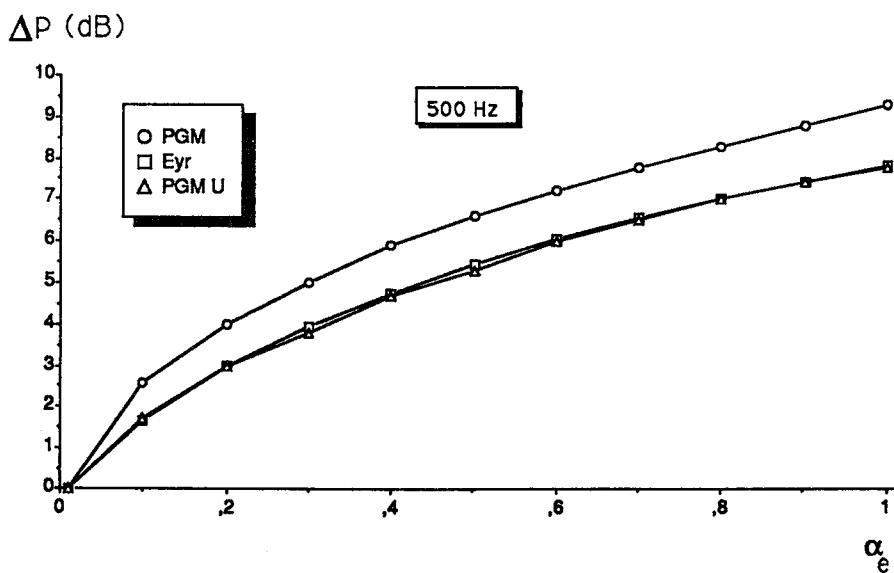
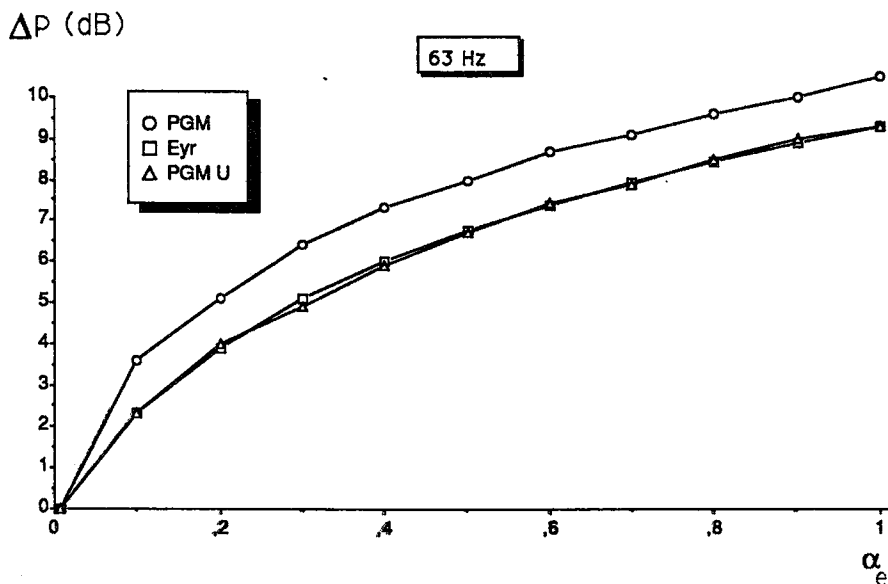
Figure 5

Dépendance entre α_e et ΔP (dB) à 63,500 et 8000 Hz, pour divers modèles :

PGM : résultats du logiciel de rayons sonores avec absorbant localisé;

Eyr : théorie d'Eyring;

PGMU : résultats du logiciel avec absorbant distribué uniformément sur les parois.



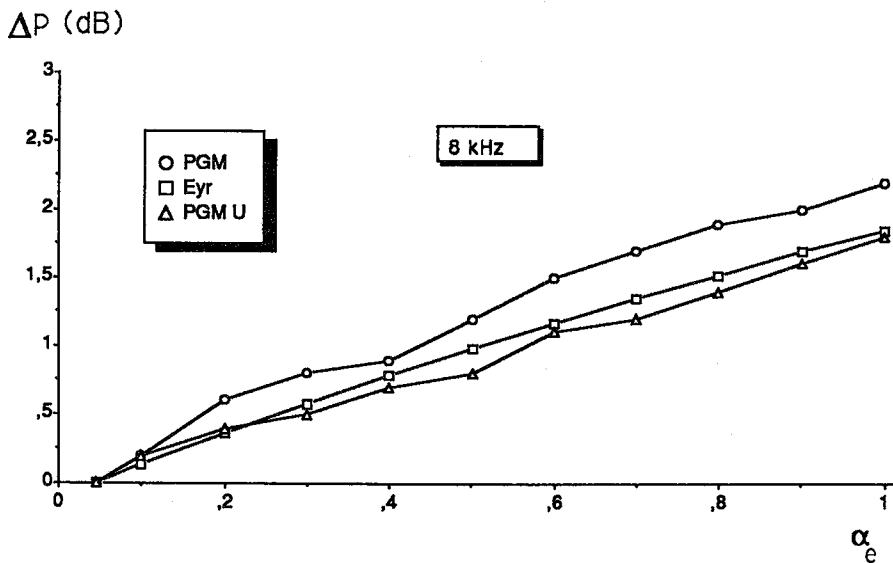


Figure 5 (suite)

Que peut-on en conclure quant à la mesure du facteur d'absorption en chambre réverbérante? Tout simplement qu'il serait scientifiquement plus justifié de lui adjoindre, non pas le modèle de Sabine, mais un modèle d'acoustique géométrique plus fidèle. Si, techniquement, cette résolution est possible, il se pose pratiquement le problème de l'harmonisation des différents laboratoires. Quel logiciel choisir ? Sous quelles conditions et avec quels paramètres ? Avec quelle surface d'absorbant ? Autant de questions que ne soulève pas le modèle de Sabine.

Il n'empêche que les facteurs d'absorption calculés par cette nouvelle méthode devraient être préférés par tout utilisateur de logiciels d'acoustique géométrique. Ils devraient permettre d'augmenter la fiabilité des techniques prévisionnelles utilisant ces logiciels.

4. APPROCHES PAR TEMPS DE REVERBERATION OU PAR NIVEAUX DE PRESSION ?

Les exemples traités dans l'article [1], soit un échantillon de mousse et un de laine de verre, mettaient en évidence les écarts entre facteurs d'absorption obtenus par les deux approches. Ces écarts sont parfois hautement significatifs, que l'on utilise le logiciel de rayons sonores d'une part, ou les méthodes classiques d'autre part (Sabine pour le temps de réverbération et Eyring pour les niveaux de pression).

La question est à présent de savoir quelle approche choisir pour déterminer les facteurs d'absorption, particulièrement en ce qui concerne le logiciel de rayons sonores. Et l'on pourrait se demander tout d'abord pourquoi l'on obtient, dans certains cas, des résultats différents.

Une première cause possible est l'incertitude de mesure sur T_e (sec) et sur ΔP (dB). Au tableau 1, à 8 kHz, $T_v = 1.39$ sec et $T_e = 0.92$ sec pour $\alpha_e = 1$. Autrement dit, à un intervalle de 0.1 en α_e correspond un écart d'environ 0.05 secondes en temps de réverbération. Une erreur de mesure de l'ordre de 0.1 sec sur ce dernier peut faire varier α_e de ± 0.2 ! En basse fréquence, à 63 Hz, la situation est meilleure puisque la même erreur de 0.1 sec sur T_e n'entraîne plus qu'un écart inférieur à 0.03 en α_e . Cette conclusion est également valable pour les niveaux de pression (cfr. tableau 2). Une incertitude de 0.2 dB sur la mesure de ΔP entraîne une variation de ± 0.1 en α_e à 8 kHz et inférieure à 0.05 à 63 Hz.

Une seconde cause possible est inhérente à la manière dont on calcule le temps de réverbération. Statistiquement parlant, si les niveaux de pression correspondant au début de la décroissance temporelle sont bien estimés, il n'en va pas de même à la fin de cette décroissance (vers les -40 dB et plus). En effet, les rayons sonores encore actifs à ce moment proviennent probablement de nombreuses sources images toutes différentes, de puissances parfois très différentes. Certaines d'entre elles sont sélectionnées par le tir de rayons, certaines surestimées, d'autre encore sous-estimées et parfois même oubliées. Il est reconnu que l'erreur statistique sur un niveau, pour un nombre de rayons fixés, augmente avec la diversité des sources créant ce niveau (variance plus grande), ce qui est le cas de la queue de la décroissance temporelle.

Outre cette erreur statistique, le nombre de points choisis pour calculer la droite de régression à partir de la décroissance temporelle, ainsi que la marge ou dynamique (-20, -30 ou -40 dB), influencent le temps de réverbération obtenu. Pour illustrer cette affirmation, nous avons recalculé, à 63 et 8000 Hz, les temps de réverbération avec échantillon absorbant localisé, en modifiant certains paramètres par rapport à l'article [1]. Parmi eux, le nombre de rayons tirés, le nombre de points ou la dynamique (dB) déterminant la régression linéaire et l'énergie minimale transportée par le rayon sonore (test d'arrêt). La figure 4 montre que, si à 63 Hz les courbes obtenues avec absorbant localisé sont assez proches l'une de l'autre, à 8 kHz, par contre, elles se démarquent notablement, tout en restant au-delà des méthodes à hypothèses de champ diffus.

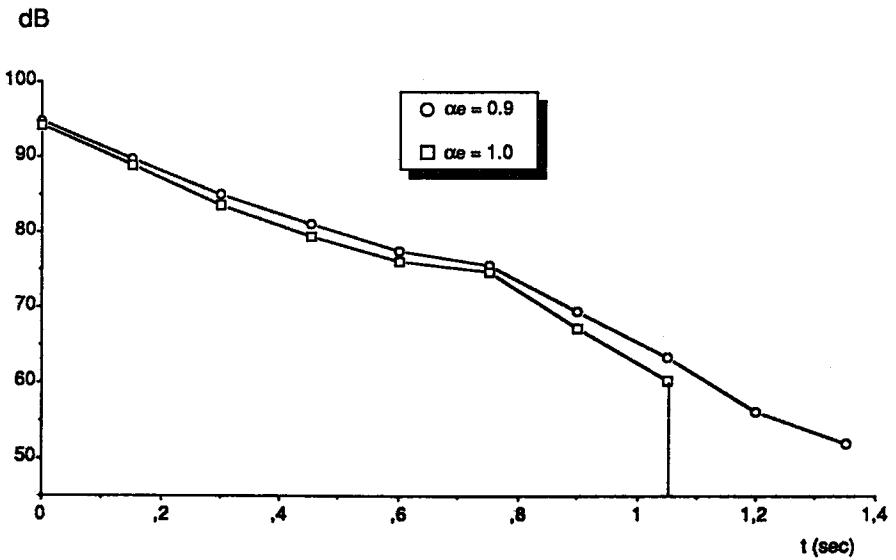
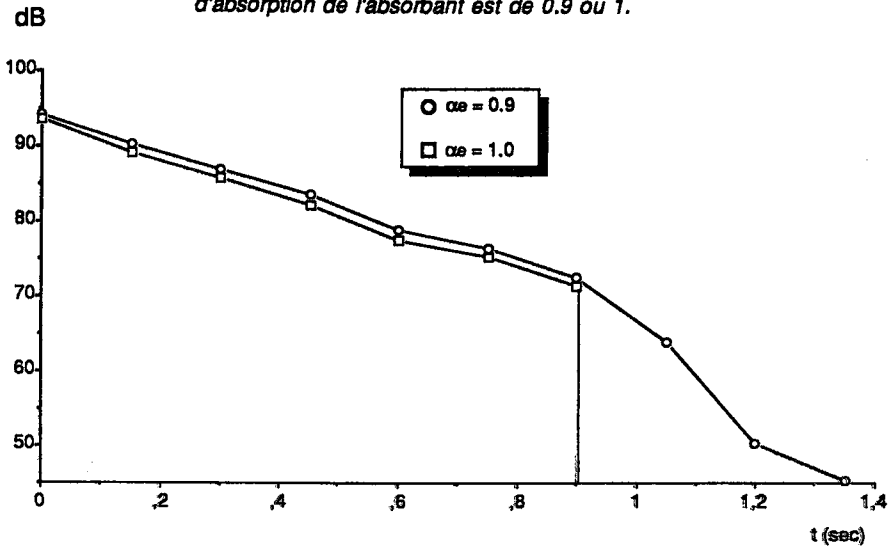
La figure 6 illustre un autre phénomène, conséquence de l'imprécision statistique aux intervalles de temps éloignés dans la décroissance temporelle.

Lorsque le facteur d'absorption de l'échantillon $\alpha_e=1$, les rayons sonores participant au calcul des niveaux résiduels ne sont jamais passés par l'échantillon (sinon, ils auraient été éteints). Pour un tir de 500 rayons, aucun d'entre eux ne parvient à atteindre 1.05 sec de temps de parcours sans toucher le matériau absorbant. Conséquence : la décroissance temporelle s'arrête brusquement à 0.9 secondes. Pour un tir de 4500 rayons, quelques uns d'entre eux parviennent jusque 1.05 sec, mais pas plus que 1.2 secondes. Ici, la décroissance s'arrête à 1.05 secondes.

Pour $\alpha_e = 0.9$, les rayons passant une fois (principalement) par le matériau absorbant apportent leur contribution et l'on obtient des niveaux résiduels plus lointains, mais leur précision laisse à désirer. Comparons pour cela les résultats des tirs de 500 et 4500 rayons dans la queue de la décroissance (figure 6).

Figure 6

Décroissances temporelles du niveau sonore (dB) calculées sur la surface réceptrice à l'aide d'un échantillon statistique de 500 rayons (haut) et d'un échantillon de 4500 rayons (bas). La fréquence est de 63 Hz. Le facteur d'absorption de l'absorbant est de 0.9 ou 1.



Finalement, lorsque l'on effectue des régressions linéaires sur ces diagrammes, les temps de réverbération calculés sont plus élevés avec $\alpha_e = 1$ qu'avec $\alpha_e = 0.9$ (cfr. tableau 3) ! Ce non-sens est une illustration supplémentaire de la difficulté de déterminer, avec une dynamique de 40 dB, le temps de réverbération.

TABLEAU 3

Comparaison des temps de réverbération (sec) calculés à partir des décroissances temporelles de la figure 6, à 63 Hz

α_e	0.7	0.8	0.9	1.0
500 rayons	2.42	2.11	2.24	2.45
4500 rayons	2.55	2.27	2.00	2.02

Le calcul des niveaux sonores au récepteur est, par contre, beaucoup plus stable et indépendant vis-à-vis de tous ces paramètres. L'opérateur maîtrise beaucoup mieux l'erreur statistique correspondante et l'erreur systématique due à l'arrêt des rayons est négligeable pour une énergie minimale du rayon inférieure à 1% [4].

En conclusion, l'approche par niveaux nous semble donc plus attrayante, d'autant plus que l'utilisation des logiciels s'oriente principalement vers le calcul de niveaux sonores et de cartes de bruit.

L'approche temporelle ne doit pas être abandonnée pour autant. Une analyse de la décroissance temporelle pendant les premiers instants après arrêt de la source, là où l'erreur statistique est la plus faible, permettrait de conserver toute la richesse de ces informations avec des temps d'exécution du programme raisonnables. Il s'agirait alors, non plus d'une approche par temps de réverbération, mais plutôt par 'early decay time', correspondant à une régression linéaire de la décroissance sur une dynamique de 10 dB.

5. CONCLUSION

En conclusion de cette deuxième partie de l'étude consacrée à la détermination du facteur d'absorption par une méthode de rayons sonores, il vient que :

- le démarquage du logiciel de simulation vis-à-vis des théories classiques de réverbération provient du fait que le programme de rayons sonores tient compte de la localisation effective de l'échantillon absorbant dans la chambre réverbérante;
- lorsque le pouvoir absorbant du matériau est distribué uniformément sur les parois de la chambre, on retrouve les résultats acquis avec l'hypothèse de champ diffus et, plus précisément, le modèle de Pujolle-Leclerc;
- l'approche par niveaux est préférable à l'approche par temps de réverbération, le calcul de ce dernier paramètre étant trop sensible à l'erreur statistique et au choix de certaines données. Une approche par 'early decay time', considérant la décroissance temporelle des dix premiers décibels, pourrait être envisagée.

REFERENCES

- [1] NEMERLIN,J. et EMBRECHTS,J.J., Détermination du facteur d'absorption par une méthode de rayons sonores. Première partie : Simulation de la mesure du facteur d'absorption en chambre réverbérante, *Bulletin d'Acoustique* , n°4,1988, pp.7-26.
- [2] KUTTRUFF,H., Room Acoustics, *Applied Science Publishers Ltd*, London 1973, chapter 5.
- [3] EMBRECHTS,J.J., Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques, *Acustica*, Vol.51, n°6, 1982, pp.288-295.
- [4] EMBRECHTS,J.J., Analyse de la précision d'une méthode prévisionnelle utilisant le concept de rayon sonore, *Bulletin d'Acoustique* , n°2, 1987, pp.35-55.