

Pour de nombreuses mesures en conduit il est nécessaire de disposer de terminaisons anéchoïques. Celles-ci sont souvent réalisées de façon empirique avec des succès divers. Deux classes de terminaisons acoustiques sont à considérer : les terminaisons "ouvertes" qui sont susceptibles de laisser passer un flux d'air sans perte de charge et les terminaisons "fermées" qui ne peuvent fonctionner qu'en absence d'écoulement. Pour la première classe, les auteurs du présent papier ont montré comment une portion de conduit percée de trous latéraux recouverts d'un tissu métallique peut-être optimisée numériquement pour aboutir à un coefficient de réflexion inférieur à quelques % au-delà d'une certaine fréquence dépendant de la longueur de la terminaison. Par ailleurs les mêmes auteurs ont montré qu'il était possible de réaliser une terminaison parfaitement adaptée en basses fréquences en plaçant à l'extrémité du conduit de mesure un tissu métallique de résistance acoustique égale à l'impédance caractéristique $\rho c/S$ du tuyau. Il s'avère donc que les terminaisons du premier type sont efficaces à partir d'une fréquence donnée alors que la terminaison du second type l'est d'autant plus que la fréquence est basse. Nous montrerons alors comment il est théoriquement possible de combiner les deux principes pour aboutir à une terminaison anéchoïque quelque soit la fréquence. Des résultats expérimentaux issus d'une première réalisation seront présentés.

1 Introduction

La caractérisation acoustique de conduits tels que les échappements, filtres, tuyaux flexibles, etc. est généralement effectuée sur des bancs de test dédiés à la détermination de matrices de transferts ou à des mesures de bruit rayonné. La précision de ces mesures est généralement améliorée par l'utilisation des terminaisons anéchoïques aux extrémités du banc de test. Traditionnellement, des matériaux absorbants sont placés à l'extrémité du conduit dans le cas sans écoulement ou autour d'un conduit perforé, dans le cas avec l'écoulement. À ce jour, peu d'études ont été réalisées sur le sujet et bien qu'une norme [1] qui régit la conception de certaines terminaisons existe, les solutions ne sont pas optimisées. Ainsi, les terminaisons anéchoïques sont habituellement conçues de façon empirique et, à de basses fréquences, le coefficient de réflexion reste souvent trop élevé.

Dans ce papier, deux types de terminaison anéchoïques sont étudiées. En présence d'écoulement, la terminaison est constituée d'un tube perforé recouvert d'un tissu métallique. Le nombre et la densité des trous sont optimisés à l'aide d'un modèle analytique. En l'absence d'écoulement, une terminaison résistive telle que proposée par Dalmont et Al. [2] dans laquelle les tubes capillaires sont remplacés par un tissu métallique. Le principe est cette fois d'adapter l'impédance de la terminaison au tuyau, c'est-à-dire fermer le conduit par une résistance acoustique égale à son impédance caractéristique. Dans les deux cas, un modèle analytique est développé pour prédire et optimiser le coefficient de réflexion de la terminaison et les solutions retenues sont validées par des mesures. Enfin une terminaison hybride combinant les deux principes est proposée.

2 Coefficient de réflexion d'un tuyau ouvert

Pour obtenir une terminaison anéchoïque, une première solution consisterait à utiliser un tube infini de même diamètre que le conduit de mesure. En pratique un tube suffisamment long peut répondre au cahier des charges, sa longueur pouvant être déterminée en fonction de la valeur maximale admise pour le coefficient de réflexion sur une gamme de fréquences donnée. En effet, pour un coefficient de réflexion R souhaité à la fréquence f , la longueur nécessaire L_t de la terminaison de rayon r est définie par :

$$|R| = e^{-2\alpha L_t} \Rightarrow L_t = \frac{-\ln(|R|)}{2\alpha} \quad (1)$$

où $\alpha = 3 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{f}}{r}$

α est le coefficient d'absorption par unité de longueur du conduit dû aux pertes viscothermiques aux parois.

Si par exemple on souhaite obtenir un coefficient de réflexion inférieur à 10% à partir de 100 Hz, pour un tuyau de diamètre 35 mm, la longueur doit être d'au moins 67m.

Cette solution est classiquement utilisée pour les tubes capillaires mais est plutôt encombrante pour des diamètres plus grands. De plus, en présence d'écoulement, les pertes de charge peuvent être trop importantes. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre d'autres solutions.

3 Terminaison traversante

Pour les bancs d'essai avec écoulement qui doivent être anéchoïques à chaque extrémité, les terminaisons ne doivent pas introduire de perte de charge supplémentaire. L'écoulement doit donc traverser librement la terminaison, c'est pourquoi nous qualifions ce type de terminaison de « traversante ».

3.1 Terminaison à fente progressive

Une solution simple proposée dans la norme 5136 [1], consiste à atténuer progressivement l'onde se propageant dans la terminaison à l'aide d'une fente progressive recouverte d'un matériau résistif:



Légende

1 fente triangulaire

$l = 9a$, $b = 0,6a$, recouverte de matériau poreux

NOTE 1 Résistance hydraulique d'environ $\rho \gg 400 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ($\approx \rho c$)

NOTE 2 Essai avec $d \leq 0,3 \text{ m}$

Figure 1. Terminaison à fente (d'après [1]).

D'après cette norme, la longueur de la fente doit être égale à neuf diamètres et, à l'extrémité de la fente, l'ouverture doit être égale au sixième du diamètre. En outre, la fente doit être couverte par un matériau d'une résistance acoustique d'environ 400 rayls MKS, c'est-à-dire proche de

l'impédance caractéristique de l'air dans les conditions normales.

Cette solution a été testée et les résultats sont loin d'être satisfaisant puisqu'on obtient un coefficient de réflexion inférieur à 0.3 à partir de 300Hz seulement (voir [3] pour plus de détails).

Afin d'améliorer ce type de terminaison à ouverture progressive nous avons opté pour un tube perforé dont la densité de perforations augmente avec la distance. L'avantage de cette solution est avant tout théorique puisqu'un modèle simple permettant une optimisation théorique peut être réalisé, ce qui n'est pas le cas pour une fente.

3.2 Modélisation d'une terminaison à tube perforé

Le principe de la terminaison à tube perforé est décrit figure 2. Une première partie de longueur L_{in} sans trou permet le montage avec le banc de test. La deuxième partie est composée de N segments de longueur constante ΔL contenant chacun un trou de diamètre variable. La longueur totale de la terminaison est le L_t .

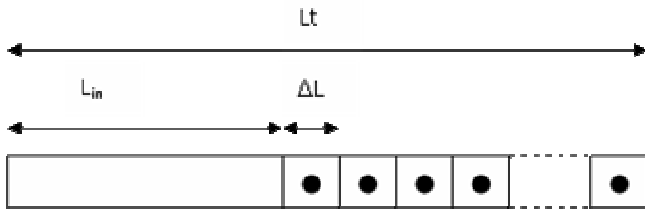


Figure 2. Schéma de la terminaison à tube perforé.

Le formalisme des matrices de transfert dans le domaine de fréquentiel est utilisé pour modéliser le comportement de ce système (cf. par exemple [4]). La matrice [MAT] est le produit des matrices de tous les éléments en série, c'est à dire d'abord la matrice de transfert du conduit sans trou de longueur L_{in} [Duct_ L_{in}] et les matrices de transfert de chaque partie avec le trou [SEG]_i :

$$[MAT] = [Duct_L_{in}] \cdot \prod_{i=1}^N [SEG]_i \quad (2)$$

La matrice de transfert d'un tube de section S et de longueur l est donnée par [4] :

$$[Duct_l] = \begin{bmatrix} \cos(kl) & jZ_c \sin(kl) \\ \frac{j}{Z_c} \sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \quad (3)$$

où $Z_c = \rho c / S$ est l'impédance caractéristique du tube.

La matrice de transfert de chaque segment avec un trou est le produit de la matrice de transfert d'un cylindre de longueur ΔL avec la matrice de transfert du trou seulement (qui n'a pas de longueur) :

$$[SEG]_i = [Duct_ \Delta L] \cdot [Mtrou]_i \quad (4)$$

La matrice de transfert du trou est [4] :

$$[Mtrou]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_t & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

où Z_t est l'impédance du trou :

$$Z_t = \frac{1}{S_{trou}} \left(j(K_1 \cdot k \cdot r + k \cdot t) + K_2 (k \cdot r)^2 + R \right) \quad (5)$$

avec:

- k le nombre d'onde;
- r le rayon du trou;
- S_{trou} la section du trou;
- t l'épaisseur du tuyau (hauteur du trou);
- R la résistance adimensionnée du tissu résistif;
- K_1 un coefficient d'inertie dépendant de la géométrie;
- K_2 un coefficient de rayonnement dépendant de la géométrie.

Notons que le terme R est prépondérant dans la valeur Z_t .

3.3 Résultats expérimentaux pour une terminaison à tube perforé optimisée

Des calculs menés sur la base du modèle analytique permettent de tirer quelques règles de conception d'une terminaison à tube perforée (pour plus de détails voir [3]) :

- La longueur de perforation détermine la limite basse fréquence de la terminaison : avec une terminaison d'environ 1 m, le coefficient de réflexion peut être inférieur à 20% à partir de 100 Hz ;

- La distance entre deux trous détermine la limite haute fréquence de la terminaison. En effet lorsque la distance entre deux trous est égale à une demi longueur d'onde, il y a réflexion sur le réseau. On peut opter pour une répartition irrégulière des trous mais le problème subsiste néanmoins. Par contre, mis à part le fait que la réalisation technique de la terminaison est plus longue, rien n'empêche de diminuer la distance entre les trous;

- Il n'est pas utile de commencer avec des trous trop petits ou de terminer avec des trous trop larges : une plage de diamètres de $1/10^{\text{ème}}$ à $1/4$ du diamètre du tube semble suffisante;

- La valeur de la résistance du tissu métallique doit être de l'ordre de 300 Rayls.

Compte tenu de ces considérations, on aboutit à une configuration optimale pour laquelle un coefficient de réflexion inférieur à 10% est obtenu entre 50 et 1000Hz. Cette terminaison de 2,5m est constituée d'un tube en acier d'épaisseur 5mm sur lequel ont été percés 16 trous – 8 trous de 8mm de diamètre, 4 trous de 12 mm et 4 trous de 16mm, chacun recouverts d'un tissu métallique résistif de 230 Rayls. Un espacement régulier entre chaque perforation de 15,6mm a été choisi de façon à rejeter le premier pic lié à la segmentation au-delà de 1000Hz.

Ce résultat montre l'efficacité d'un modèle analytique simple qui permet de déterminer les paramètres géométriques d'une terminaison répondant à un cahier des charges donné. Les résultats obtenus sont bien meilleurs que ceux que nous pouvons atteindre en suivant les recommandations de la norme 5136 [1] pour une

terminaison à fente progressive pour laquelle une optimisation numérique ne peut être faite.

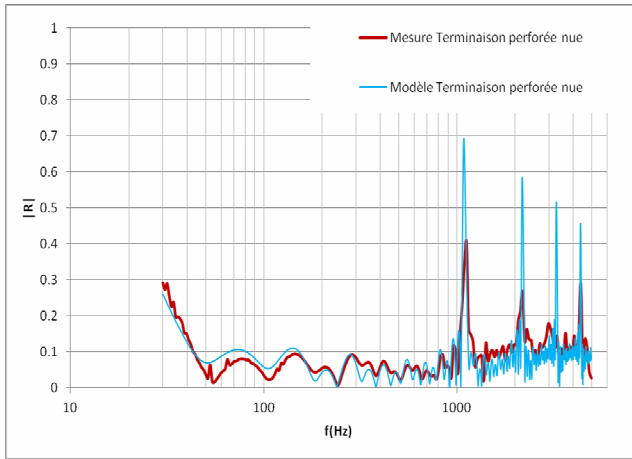


Figure 3. Coefficient de réflexion d'une terminaison à tube perforé. — Théorie ; — Expérience.

4 Terminaison résistive

4.1 Principe

Si l'on considère la réflexion d'une onde acoustique à l'intérieur d'un conduit fermé par une impédance Z , le coefficient de réflexion est donné par :

$$R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} \quad (6)$$

Où $Z_c = \frac{\rho c}{S}$ est l'impédance caractéristique du tuyau.

Si $Z = Z_c$, le coefficient de réflexion est nul, l'impédance est dite « adaptée ». C'est le principe de la terminaison résistive.

4.2 Conception de 1989

En 1989, Dalmont et al. [2] ont appliqué le principe de la terminaison adaptée. La principale difficulté à cette époque était de disposer d'une résistance pure sur une large gamme de fréquences. Cette résistance était obtenue avec une galette de micro-canaux utilisée dans les multiplicateurs d'électrons.

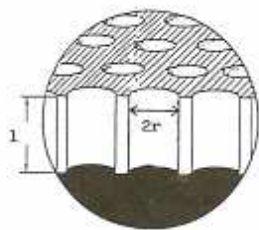


Figure 4. Schéma d'une plaque de micro canaux

Comme la plaque à micro-canaux utilisée avait une valeur de résistance approximative de $1600 \text{ Rayls} \sim 4\rho c$, celle-ci devait donc avoir une surface S' quatre fois plus grande que la section S du tuyau et une cavité de couplage était nécessaire.

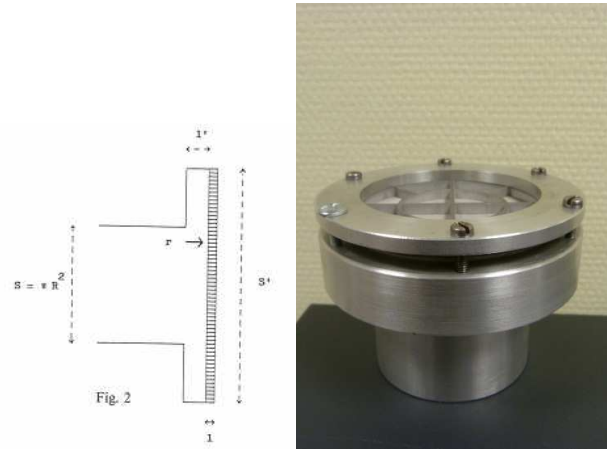


Figure 5. Schéma et photo de la cavité de couplage.

L'impédance d'entrée de la terminaison ainsi constituée peut être représentée par le circuit électrique équivalent suivant :

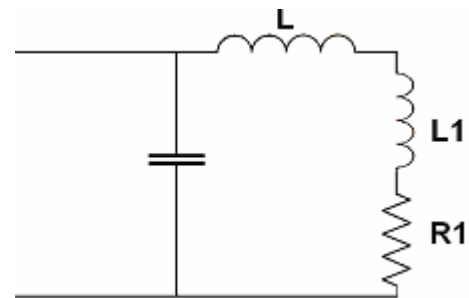


Figure 5. Schéma équivalent de la terminaison résistive.

La capacité $C = V/\rho c^2$ représente la compressibilité du volume de la cavité de couplage et l'inductance L représente l'inertie liée au changement de section. Les termes L_1 et R_1 représentent respectivement l'inertie de rayonnement et la résistance de la plaque de micro canaux. Le volume de la cavité qui pourrait au premier abord apparaître comme un élément négatif s'avère pouvoir être utilisé pour compenser l'effet de l'impédance de rayonnement. En effet, aux basses fréquences, pour une valeur bien choisie du volume telle que :

$$\frac{L'}{C} = Z_c^2 \quad (7)$$

avec $L' = L + L_1$, le circuit $L'C$ est équivalent à une certaine longueur de conduit. Dans cette situation, le comportement de la terminaison est semblable à celui d'un conduit un peu plus long et fermé par une résistance, où le

terme d'inertie de rayonnement est éliminé. Ce raisonnement n'étant valable qu'en basse fréquence, si la résistance est bien ajustée, la terminaison est d'autant plus efficace que la fréquence est basse. Avec cette première conception, un coefficient de réflexion inférieur à 5% était obtenu en dessous de 2000 Hz. Le principal inconvénient était le coût de la galette de micro-canaux.

4.3 Nouvelle conception

Le montage utilisé en 1989 est réutilisé en remplaçant la galette de micro-canaux par un tissu métallique pincé entre deux raidisseurs. Le volume de la cavité est ajusté en vissant ou en dévissant la partie supérieure de la terminaison. Le dispositif est simplement placé à l'extrémité de la conduite (figure 5).



Figure 5. Eléments constitutifs de la terminaison résistive.

Dans un premier temps la valeur de la résistance est ajustée de façon à obtenir un coefficient de réflexion proche de zéro aux très basses fréquences. La figure 6 montre trois situations avec 6, 7 et 8 couches de tissu résistif, l'optimum étant obtenu pour 7 couches.

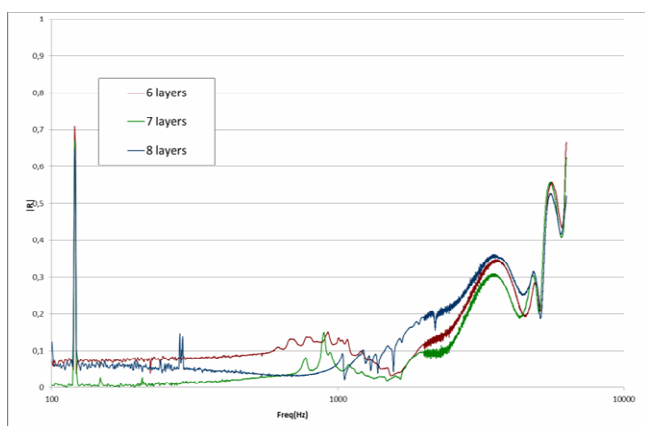


Figure 6. Module du coefficient de réflexion de la terminaison résistive avec différents nombres de couches de tissu résistif. — 6 couches ; — 7 couches ; — 8 couches.

Dans un second temps, le volume de la cavité est ajusté pour diminuer l'effet des éléments réactifs (équation 7). La figure 7 montre le coefficient de réflexion obtenu pour trois configurations différentes.

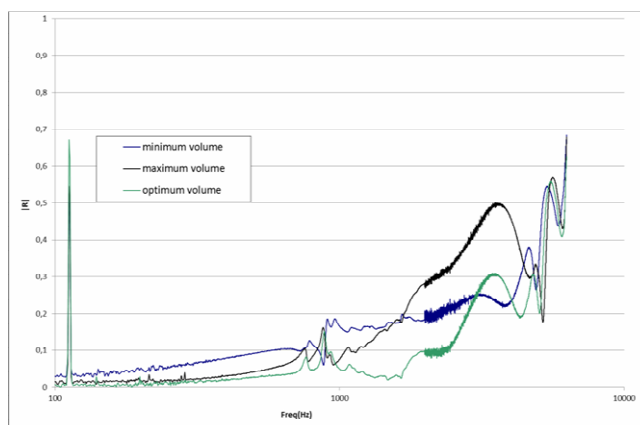


Figure 7. Module du coefficient de réflexion de la terminaison résistive pour différents volumes de la cavité de couplage. — volume trop petit ; — volume trop grand ; — volume optimal.

On obtient ainsi un coefficient de réflexion inférieur à 2% entre 0 et 500Hz et inférieur à 5% entre 500 et 800Hz. On note une dégradation notable des performances entre 800 et 1200 Hz due aux vibrations des tissus résistifs qui persistent malgré la présence de raidisseurs. Au-delà de 1000Hz les performances se dégradent à cause des éléments réactifs de la terminaison (inertie de rayonnement et compressibilité du volume de couplage).

5 Terminaison toutes fréquences

Les résultats des paragraphes précédents montrent que la terminaison résistive est d'autant meilleure que la fréquence est basse alors que la terminaison à tube perforé est optimum à partir d'une certaine fréquence (30Hz dans l'exemple présenté). On pourrait donc penser combiner les deux types de terminaison pour aboutir à une terminaison efficace pour toutes les fréquences inférieures à la fréquence de coupure du tuyau. Cette solution n'est malheureusement pas valable car la terminaison à trous perforés dépend peu de l'impédance terminale. On peut par contre placer la terminaison résistive au bout d'un tube long ce qui rend le coefficient de réflexion du tube proche de zéro même pour des fréquences très basses. Cette solution est néanmoins peu pratique. On peut diminuer sensiblement la longueur du tuyau en plaçant une quantité minimale de matériau absorbant (figure 8).

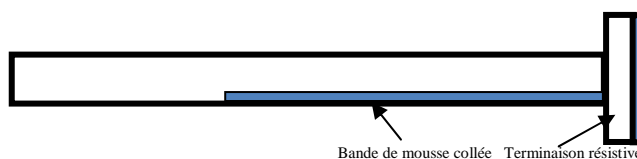


Figure 8. schéma de la terminaison toutes fréquences.

Les premières expériences (figure 9) montrent qu'avec un tuyau de 2m il est possible d'obtenir un coefficient de réflexion inférieur à 0.1 quelle que soit la fréquence.

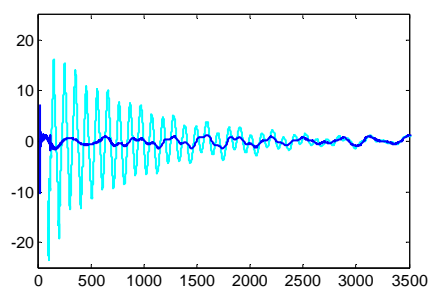


Figure 9. Impédance d'entrée réduite en dB du tube avec mousse ouverte _____ et de la terminaison toutes fréquences _____ en fonction de la fréquence.

6 Conclusion

Nous avons montré que l'optimisation de terminaisons anéchoïques répondant à un cahier des charges précis peut-être aisément réalisée, à condition de passer par une modélisation analytique de la terminaison permettant de prévoir les performances de la terminaison. L'usage de tissus résistifs dont la résistance acoustique est connue a permis d'aboutir à des réalisations proches du modèle théorique.

Références

- [1] Annexe E "Directives pour l'étude et la réalisation d'une terminaison anéchoïque" Norme NF ISO 5136 "Détermination de la puissance acoustique rayonnée dans un conduit par des ventilateurs et d'autres systèmes de ventilation (Méthode en conduit) ".
- [2] JP. Dalmont, J. Kergomard, X. Meynial "Réalisation d'une terminaison anéchoïque pour un tuyau sonore aux basses fréquences" CRAS (compte rendu de l'académie des sciences de Paris), t. 309, série II, p. 453-458 (1989).
- [3] E. Portier, J.P. Dalmont "Acoustic optimization of anechoic termination with and without superimposed flow", Compte rendu du 7eme congrés Confort Automobile et Ferroviaire (2012).
- [4] A. Chaigne, J. Kergomard "Physique des instruments de musique", seconde édition, Belin 2013.