

# L'absorption acoustique active : une application directe des phénomènes d'interférences

par Laurent BLONDEL et Pierre LECOMTE  
Faculté Polytechnique de Mons  
Service de Physique Générale  
9, rue de Houdain - B7000 Mons - Belgique

---

## RÉSUMÉ

*On se propose d'illustrer le phénomène d'interférence entre deux ondes au moyen d'un concept relativement récent : l'absorption acoustique active. Les principes de base de l'absorption active sont tout d'abord discutés. Nous décrivons ensuite les caractéristiques d'un dispositif de laboratoire, et nous montrons comment ce système permet d'illustrer les principes d'interférences destructives et constructives. Le concept de mesure en décibels est introduit. Enfin, le problème de la conservation de l'énergie dans un dispositif d'absorption acoustique active est évoqué.*

## 1. INTRODUCTION

Les phénomènes d'interférences ont, historiquement, joué un rôle important dans l'évolution de la physique. Ainsi, dès le XVII<sup>e</sup> siècle, deux conceptions différentes s'affrontent sur la nature de la lumière. Pour Newton (1642-1727), la lumière est constituée de particules de couleurs différentes qui se déplacent en ligne droite, alors que pour Huygens (1629-1695), elle est formée par des ondes qui se propagent en ligne droite. Durant plus d'un siècle, les partisans des deux théories s'affrontent. Il faut attendre le XIX<sup>e</sup> siècle, et les travaux du Français Fresnel (1788-1827) et de l'Anglais Young (1773-1829) pour que le problème trouve un début de solution. Young propose la célèbre expérience qui porte désormais son nom, et qui consiste à éclairer deux trous ou deux fentes percés dans un matériau opaque. Deux cônes de lumière sont alors émis, dont on s'arrange pour qu'ils aient une partie commune. Un écran placé perpendiculairement à la direction de propagation des cônes lumineux montre alors une succession de franges alternativement claires et sombres. Young considère les franges claires comme une addition de vibrations lumineuses (interférence constructive), alors que les franges sombres sont vues comme une soustraction de vibrations lumineuses (interférence destructive).

Dès lors, les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle se rallient à l'interprétation de Huygens et admettent la nature ondulatoire de la lumière. Un siècle plus tard, les travaux d'Einstein, confirmés et étendus par ceux du Français de Broglie, montreront la double nature corpusculaire / ondulatoire de la lumière, réconciliant par la même occasion Newton et Huygens. On trouvera un récit passionnant de cette évolution des idées dans la référence [1].

Nous proposons dans cet article d'illustrer les phénomènes d'interférences constructives et destructives non pas grâce à des ondes lumineuses, comme le firent Young et Fresnel, mais via des ondes acoustiques. Les phénomènes d'interférences sont en effet à la base d'une technique relativement neuve et innovatrice de réduction du bruit, l'absorption acoustique active, que nous nous proposons de décrire et d'illustrer.

L'article sera divisé en trois parties : dans un premier temps, nous poserons les principes théoriques de base de l'absorption active. Ensuite, nous décrirons les principales caractéristiques d'un dispositif d'absorption active de laboratoire, didactique et peu onéreux. Enfin, nous montrerons que l'absorption acoustique active permet également une réflexion sur le principe de conservation de l'énergie.

## 2. PRINCIPES DE L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ACTIVE ET RÉALISATIONS

L'absorption acoustique active est un procédé de lutte contre le bruit qui se distingue des méthodes classiques (dites passives) par l'utilisation de sources acoustiques contrôlées par un dispositif électronique. L'idée fondamentale est de créer, en tout point de l'espace, une onde acoustique opposée à celle générée par la source de bruit indésirable.

### 2.1. Principes théoriques de l'absorption active

L'absorption active puise ses bases théoriques dans deux principes importants de la physique : le principe de superposition et le principe de Huygens.

Mathématiquement, le principe de superposition s'exprime sous la forme suivante. Considérons deux signaux acoustiques sinusoïdaux et de même pulsation  $\omega$ . Les pressions acoustiques relatives à ces signaux s'écrivent respectivement :

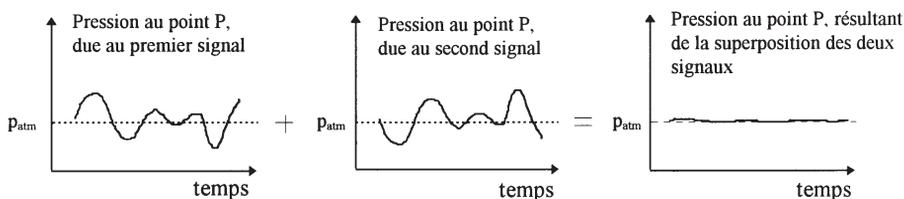
$$p_1(t) = a_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad \text{et} \quad p_2(t) = a_2 \sin(\omega t + \phi_2)$$

Lorsque ces deux signaux se rencontrent en un point  $P$  de l'espace, ils donnent naissance, pour peu que les phénomènes soient linéaires, à la pression acoustique résultante  $r(t)$ , donnée par la relation (1) :

$$r(t) = a_1 \sin(\omega t + \phi_1) + a_2 \sin(\omega t + \phi_2) \quad (1)$$

Cette dernière expression est identiquement nulle si ( $a_1 = -a_2$  et  $\phi_1 = \phi_2$ ) ou bien si ( $a_1 = a_2$  et  $\phi_2 = \phi_1 + 180^\circ$ ). L'amplitude d'un signal étant par définition positive, seule la deuxième possibilité doit être retenue. En d'autres termes, le point  $P$  sera protégé du bruit si les deux signaux  $p_1(t)$  et  $p_2(t)$  y ont même fréquence, même amplitude et y sont déphasés de  $180^\circ$ . On constate donc qu'un signal de bruit indésirable peut être fortement atténué si on lui superpose sa réplique inversée. Le principe de base de l'absorption active, illustré à la figure 1, peut donc être traduit par l'équation suivante, relativement surprenante :

Bruit + Bruit = Silence !



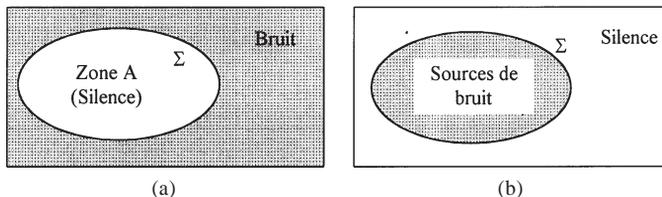
**Figure 1** : Illustration du principe de superposition. Dans la figure,  $p_{atm}$  représente la pression atmosphérique.

Le principe évoqué ci-dessus est également rigoureusement valable pour des signaux quelconques, puisque l'analyse de Fourier nous enseigne que tout signal est en fait constitué de la superposition d'un ensemble de sinusoïdes.

Cette théorie élémentaire ne trouve des applications directes que dans les situations les plus simples, telles l'annulation du bruit en un point précis de l'espace ou dans un champ acoustique monodimensionnel (la notion de champ acoustique monodimensionnel est précisée à l'annexe 2).

Le principe de Huygens explique quant à lui comment il est possible de pratiquer l'absorption acoustique active dans une zone de l'espace. Considérons (figure 2a) une zone  $A$  de l'espace complètement séparée des sources de bruit indésirable par une surface fictive fermée,  $\Sigma$ . Le principe de Huygens montre que le champ acoustique en un point quelconque de la région  $A$ , produit par les sources extérieures à la surface  $\Sigma$ , peut être reproduit exactement par un ensemble de sources secondaires réparties continûment sur la surface de Huygens. La pression acoustique peut donc être annulée en chacun des points de la zone  $A$  en inversant la phase de ces sources secondaires, et en superposant le signal qu'elles émettent avec le signal acoustique produit par les sources extérieures à la surface  $\Sigma$ . Ce principe laisse dès lors entrevoir un moyen de protéger un volume fini vis-à-vis des sources de bruit extérieures.

D'une manière duale, il est possible également d'atténuer le bruit émis à l'extérieur de la surface  $\Sigma$ , qui contient cette fois toutes les sources de bruit. Cette possibilité est illustrée à la figure 2b.



**Figure 2** : Illustration du principe de Huygens.

Techniquement, une répartition continue des différentes sources secondaires sur la surface fictive  $\Sigma$  n'est, bien entendu, pas envisageable. Cependant, en pratique, il est souvent possible de n'utiliser qu'un nombre fini de sources discrètes. Une atténuation non négligeable peut être obtenue si l'espacement entre ces sources discrètes est inférieur à la demi-longueur d'onde correspondant à la plus haute fréquence à atténuer. Cette contrainte technologique explique la raison pour laquelle l'absorption active n'est applicable que pour la réduction de signaux de longueurs d'onde élevées, c'est-à-dire de fréquences relativement basses. On considère ainsi que les techniques d'absorption active sont inopérantes lorsque les bruits à atténuer ont un spectre situé au-delà de 400 - 500 Hz.

## 2.2. Intérêt de l'absorption active

En basse fréquence, les méthodes conventionnelles d'atténuation des bruits, basées sur le placement d'absorbants acoustiques entre la zone bruyante et la zone où le silence est désiré, conduisent en général à des résultats décevants. Ceci provient du fait qu'en basse fréquence, les longueurs d'onde acoustiques sont en général très grandes par rapport à l'épaisseur des absorbants acoustiques, ce qui rend ces derniers peu efficaces. Pour fixer les idées, une onde acoustique de fréquence égale à 100 Hz possède une longueur d'onde égale, dans l'air et dans les conditions normales, à 3,4 mètres. Pour qu'il soit efficace, l'absorbant acoustique doit avoir une épaisseur du même ordre de grandeur ce qui, on le voit, posera en général d'énormes problèmes d'encombrement.

Au vu de ce qui précède, on comprend que l'absorption active constitue un complément idéal aux techniques d'absorption passive : lorsque les bruits à atténuer auront des fréquences relativement élevées (supérieures à 300-400 Hz), un dispositif purement passif sera privilégié, alors que les signaux acoustiques de fréquences relativement basses (inférieures à 300 Hz) seront atténués par des dispositifs actifs. Par ailleurs, un bruit possédant un contenu en fréquence étendu (basses et hautes fréquences) pourra être atténué via un dispositif hybride actif / passif.

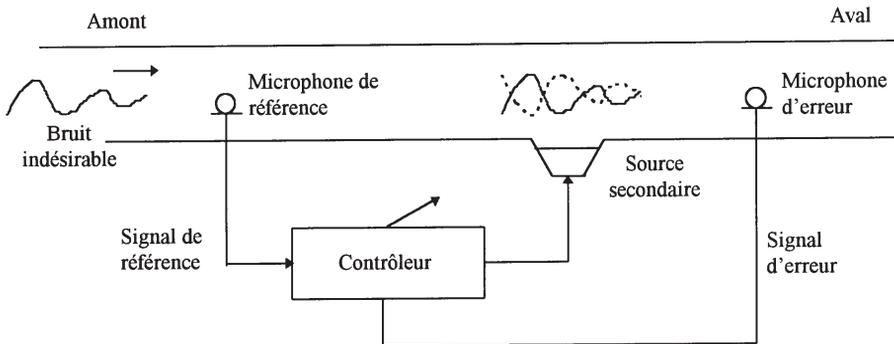
### 3. L'ABSORPTION ACOUSTIQUE ACTIVE AU LABORATOIRE

Nous allons appliquer l'absorption acoustique active à l'atténuation des bruits se propageant dans les conduits. La raison en est double. Tout d'abord, l'absorption active dans les conduits est, théoriquement, plus simple à appréhender que l'absorption dans des zones tridimensionnelles de l'espace. De plus, la mise en œuvre de l'absorption active en conduits ne nécessite qu'un matériel relativement restreint, simple et peu onéreux.

#### 3.1. Absorption active dans les conduits

L'absorption active dans un conduit est une application simple à aborder en ce sens que la propagation dans les conduits se fait, sous certaines conditions brièvement décrites en annexe 2, sous forme d'ondes planes ce qui, on l'a vu dans la section 2, permet l'application directe du principe de superposition.

La figure 3 illustre un dispositif d'absorption acoustique active en conduit, tel qu'on peut le rencontrer dans des applications industrielles.



**Figure 3** : Schéma bloc général d'un dispositif d'absorption active dans les conduits. Le signal en trait pointillé correspond au signal émis par la source secondaire.

Le fonctionnement de ce dispositif peut être décrit comme suit. Tout d'abord, le bruit indésirable, qui se propage vers l'aval du conduit, est capté par un microphone, dit «microphone de référence». Le signal capté, appelé «signal de référence», est alors transmis au contrôleur. Ce contrôleur constitue en fait le cœur du dispositif. C'est en général un filtre numérique adaptatif, qui est responsable du calcul des caractéristiques du signal secondaire qui sera superposé au signal indésirable.

Ce signal secondaire est alors émis par la «source secondaire», en général constituée par un haut-parleur électrodynamique. Un amplificateur de puissance est placé entre la sortie du contrôleur et la source secondaire. Cet amplificateur de puissance n'apparaît pas sur la figure 3, pour des raisons de clarté. Il est important de noter que, bien que l'axe du haut-parleur secondaire soit perpendiculaire à celui du conduit, il est néanmoins possible de générer des ondes se propageant dans la seule direction de l'axe du conduit. La condition pour obtenir cette propagation sous forme d'ondes planes est que les longueurs d'onde des signaux émis par le haut-parleur secondaire soient grandes (au moins deux fois supérieures) par rapport aux dimensions transversales du tuyau.

Lorsque le dispositif fonctionne correctement, le signal secondaire, réplique «inversee» (ou déphasée de  $180^\circ$  dans le cas de signaux harmoniques) du signal primaire, est émis par la source secondaire au moment où le signal de bruit indésirable passe au droit de celle-ci. La zone située en aval de la source secondaire est alors «protégée» du bruit indésirable, et devient silencieuse. En général, un second microphone, appelé «microphone d'erreur», est placé dans la zone protégée, afin d'optimiser les performances du système. Ce second microphone capte le signal de bruit résiduel, appelé signal d'erreur, et le renvoie vers le contrôleur, où un algorithme modifie les coefficients du filtre adaptatif, et ce, jusqu'à ce que l'amplitude du signal d'erreur soit minimale. Nous ne nous étendons pas ici sur les caractéristiques de l'algorithme de minimisation. De nombreuses informations sur cet algorithme sont fournies dans la référence [2].

S'il représente directement une application pratique, le dispositif symbolisé à la figure 3 semble peu intéressant dans le cadre d'une étude de laboratoire. Tout d'abord, il est nécessaire de trouver un dispositif qui va générer le signal de bruit indésirable. Ensuite, le contrôleur est un dispositif relativement complexe, nécessitant un support matériel dédié (un ordinateur équipé d'une carte de traitement de signal) et assez onéreux. Enfin, le dispositif présenté est entièrement automatique et ne requiert dès lors aucune intervention humaine, ce qui le rend peu intéressant d'un point de vue pédagogique.

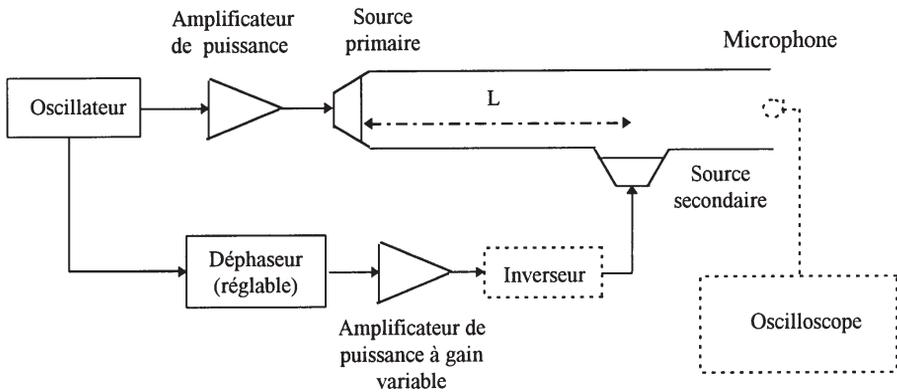
### 3.2. Dispositif de laboratoire

La figure 4 présente une version largement simplifiée du dispositif évoqué ci-dessus, dans laquelle un déphaseur se substitue au contrôleur et dans laquelle les microphones de référence et d'erreur ont disparu. Ce dispositif va nous permettre d'illustrer l'absorption acoustique active des sons sinusoïdaux se propageant dans les tuyaux.

Un schéma de construction détaillé de chacun des éléments électroniques présents dans ce dispositif est présenté à l'annexe 1. Les dimensions physiques du tuyau  $y$  sont également données. Afin de faciliter le placement de la source secondaire, on veillera à construire un tuyau de section rectangulaire ou carrée. Pour des raisons de facilité éga-

lement, nous conseillons de réaliser le tuyau en bois. Un bois relativement dense et épais sera choisi, afin de garantir que le tuyau ne rayonne pas d'énergie acoustique via la vibration de ses parois, ce qui pourrait gêner la perception auditive du phénomène d'absorption active. Un bois lamellé, d'épaisseur au moins égale à 15 mm, convient parfaitement.

Les dimensions de la section du tuyau sont importantes, car elles vont influencer le mode de propagation de l'onde acoustique à l'intérieur du tuyau. Ce problème est discuté à l'annexe 2.



**Figure 4** : Dispositif simplifié d'absorption active dans les conduits. Les éléments représentés en pointillés ne sont pas indispensables au bon fonctionnement de l'ensemble.

Le principe de fonctionnement du dispositif peut être décrit comme suit. Un oscillateur alimente la source primaire (un haut-parleur électrodynamique) avec un signal sinusoïdal. Le signal acoustique ainsi créé, que l'on appellera signal primaire, se propage vers l'embouchure libre du tuyau. Dans le même temps, l'oscillateur alimente également le déphaseur. Le signal de sortie du déphaseur est alors transmis, via un amplificateur de puissance de gain réglable et un inverseur, à la source secondaire.

### 3.3. Réglage du dispositif

La question se pose de la procédure de réglage du dispositif de laboratoire. Rappelons que le but est de créer une interférence destructive au droit de la source secondaire, afin de créer une zone de silence en aval de cette source secondaire. Si  $A$  et  $\phi$  représentent respectivement l'amplitude et la phase (référence arbitraire) du signal primaire lorsqu'il passe au droit de la source secondaire, alors le signal émis par la source secon-

daire doit lui aussi avoir une amplitude égale à A, mais une phase égale à  $(\phi + 180)$  degrés, par rapport à la même référence que ci-dessus. Que doit donc valoir le déphasage introduit par le déphaseur ?

Si l'on suppose que la distance mesurée entre la sortie de la source primaire et la source secondaire est égale à L (voir figure 4), et si on néglige l'influence acoustique du tuyau, alors, la variation de phase  $\Delta\phi$  (en degrés) du signal primaire (longueur d'onde  $\lambda$ ) lorsqu'il se propage depuis la sortie de la source primaire jusqu'au droit de la source secondaire est égale à :

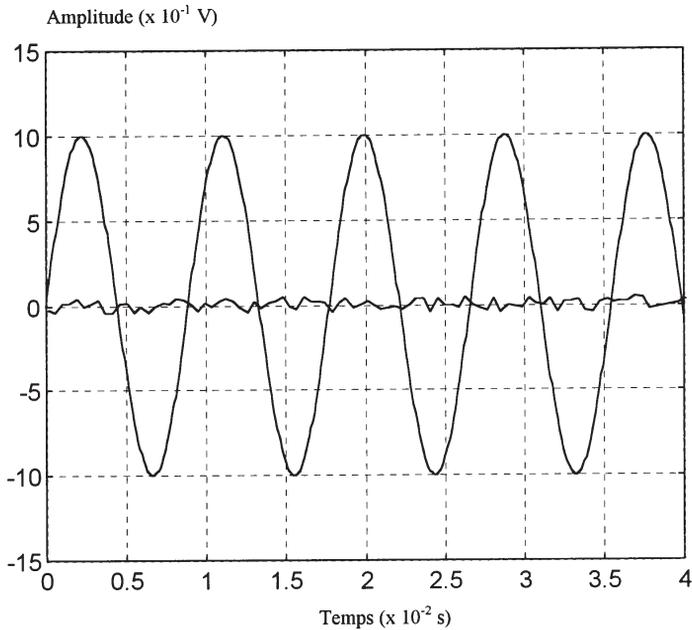
$$\Delta\phi = 360 \times \frac{L}{\lambda} \quad (2)$$

Si on suppose que les déphasages introduits par les amplificateurs de puissance et les sources primaires et secondaires sont négligeables, alors le déphaseur doit être réglé de façon telle qu'il introduise un déphasage égal à  $(\Delta\phi + 180^\circ)$ .

En pratique cependant, la situation ne sera pas aussi simple car le tuyau, les amplificateurs de puissance et les haut-parleurs introduisent des déphasages supplémentaires, difficilement quantifiables par des méthodes simples. La relation évoquée ci-dessus est donc, dans le cas réel, peu utile, et le réglage du système se fera grâce à une méthode d'approximations successives :

1. Un signal sinusoïdal est généré par l'oscillateur et est émis par la source primaire. La fréquence de ce signal sera choisie de telle manière que l'onde acoustique générée se propage sous forme d'onde plane dans la direction de l'axe du tuyau (voir l'annexe 2). Une plage adéquate est celle qui s'étend de 50 Hz à 200-300 Hz. Notons que lorsque la source primaire seule fonctionne, l'onde progressive qu'elle émet est partiellement réfléchiée sur l'extrémité libre du tuyau. L'onde résultante dans le tuyau contient alors une composante progressive, à laquelle se superpose une onde stationnaire. Cette onde stationnaire n'a cependant aucun effet sur les réglages du dispositif, puisqu'elle ne véhicule aucune énergie.
2. Le gain de l'amplificateur alimentant la source secondaire est fixé à une valeur arbitraire.
3. Le déphasage introduit par le déphaseur est réglé de telle sorte que l'amplitude du signal acoustique en aval de la source secondaire diminue.
4. Le gain de l'amplificateur alimentant la source secondaire est lui aussi réglé de telle sorte que l'amplitude du signal acoustique à l'extrémité du tuyau diminue.
5. Retour au point 3.

Ce réglage est, en pratique, extrêmement simple à réaliser et se répétera jusqu'à ce que l'amplitude du signal acoustique résiduel à l'extrémité du tuyau soit pratiquement nulle. Il est possible de juger de l'amplitude de ce signal uniquement grâce à l'écoute. Nous pensons cependant que la procédure de réglage est encore simplifiée lorsqu'un microphone, connecté à un oscilloscope, est placé près de la sortie du tuyau, ce qui permet de visualiser directement la pression acoustique résiduelle en aval de la source secondaire. Cette visualisation, dont un exemple est donné à la figure 5, possède également un intérêt pédagogique indéniable. Notons que la seule condition sur la disposition géométrique du microphone est qu'il soit situé entre la source secondaire et l'extrémité libre du tuyau.



**Figure 5 :** Performances typiques d'un dispositif d'absorption active en conduit, telles qu'elles peuvent être visualisées sur un oscilloscope. La sinusoïde correspond au signal dû à la source primaire seule, le second signal correspond au signal résiduel observé lorsque le dispositif d'absorption active est correctement réglé.

### 3.4. Aspect métrologique

Les performances du dispositif d'absorption active, ou, en d'autres termes, les atténuations obtenues, sont très nettement audibles. Cependant, il peut être intéressant de

mesurer ces performances. Dans ce cas, on utilisera un sonomètre placé à la sortie du tuyau. Rappelons que le niveau de pression acoustique  $L_p$  est défini comme suit :

$$L_p = 20 \times \log_{10} \frac{P_{eff}}{2 \times 10^{-5}} \quad (3)$$

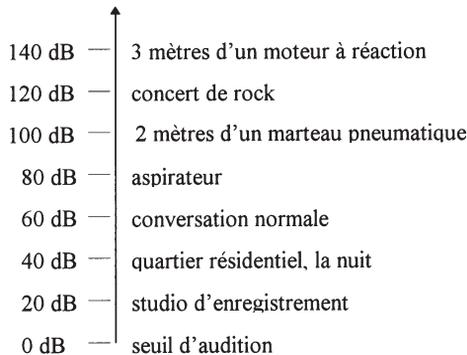
Dans cette relation,  $p_{eff}$  représente la valeur efficace de la pression acoustique, telle que mesurée par le sonomètre. Le niveau de pression acoustique s'exprime en décibels, et la constante  $2 \cdot 10^{-5}$  (Pa) est choisie de telle sorte qu'un niveau de pression acoustique de 0 dB corresponde au seuil d'audition (signal acoustique juste perceptible pour une oreille normale).

Dans un premier temps, le niveau de pression acoustique  $L_{p1}$  est mesuré lorsque la source primaire seule fonctionne. Ensuite, le dispositif d'absorption active ayant été réglé selon la procédure décrite au point précédent, le niveau de pression acoustique résiduel  $L_{p2}$  est mesuré.

L'atténuation  $N$  générée par le dispositif d'absorption active est donnée par la relation suivante :

$$N \text{ (dB)} = L_{p1} - L_{p2} \quad (4)$$

Le dispositif d'absorption active, lorsqu'il est correctement réglé, est capable de générer des atténuations allant de 20 dB à 50 dB. L'échelle présentée ci-après permet, à titre d'illustration, de se rendre compte des performances du dispositif.



On voit par exemple qu'une atténuation de 20 dB correspond au passage d'un niveau acoustique proche de celui émis par un aspirateur au niveau acoustique d'une conversation normale.

La mesure des atténuations n'est pas la seule mesure intéressante qui peut être faite sur le dispositif. Ainsi, on peut se poser la question suivante : que se passera-t-il si, au lieu d'être émis en opposition de phase, le signal généré par la source secondaire est émis en phase par rapport au signal primaire ?

Cette question peut être résolue de façon théorique. L'intérêt est ici d'établir une relation qui va nous permettre d'additionner des niveaux de pression acoustique. Rappelons qu'un niveau de pression acoustique s'exprime selon une échelle non linéaire, graduée en décibels. Ainsi, deux niveaux de pression acoustique  $X$  dB et  $Y$  dB ne donneront pas une pression acoustique résultante égale à  $(X + Y)$  dB.

On peut écrire, si  $p_{1\text{eff}}$  et  $p_{2\text{eff}}$  représentent les valeurs efficaces des deux signaux 1 et 2 dont on doit calculer le niveau de pression acoustique résultant :

$$X = 20 \times \log_{10} \frac{p_{1\text{eff}}}{2 \times 10^{-5}} \quad (5)$$

et :

$$Y = 20 \times \log_{10} \frac{p_{2\text{eff}}}{2 \times 10^{-5}} \quad (6)$$

et donc :

$$p_{1\text{eff}} = 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{\frac{X}{20}} \quad (7)$$

et :

$$p_{2\text{eff}} = 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{\frac{Y}{20}} \quad (8)$$

Les deux signaux  $p_1(t)$  et  $p_2(t)$  sont sinusoidaux. On peut donc écrire, si  $p_{\text{crê}}$  représente la valeur de crête de ces signaux :

$$p_{1\text{crê}} = \sqrt{2} \times p_{1\text{eff}} \quad (9)$$

et :

$$p_{2\text{crê}} = \sqrt{2} \times p_{2\text{eff}} \quad (10)$$

Ces deux signaux sont, de plus, par hypothèse, émis en phase. Leur somme  $p_r$  est donc un signal sinusoidal, dont les valeurs de crête et efficace valent respectivement :

$$p_{r\text{crê}} = p_{1\text{crê}} + p_{2\text{crê}} \quad (11)$$

$$P_{r\text{ eff}} = \frac{P_{r\text{ crê}}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

ou encore, en employant les relations (9) et (10) :

$$P_{r\text{ eff}} = P_{1\text{ eff}} + P_{2\text{ eff}} \quad (13)$$

Le niveau de pression  $L_{p, r}$  du signal résultant est défini comme suit :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} \frac{P_{r\text{ eff}}}{2 \times 10^{-5}} \quad (14)$$

et dès lors, en utilisant les relations (13), (7) et (8), il vient :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} \left( 10^{\frac{X}{20}} + 10^{\frac{Y}{20}} \right) \quad (15)$$

Dans le cas qui nous occupe, les deux signaux ont même amplitude. Dès lors,  $X = Y$  et le niveau de pression résultant est donné par :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} \left( 2 \times 10^{\frac{X}{20}} \right) \quad (16)$$

En faisant intervenir la relation (5), il vient :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} \left( 2 \times 10^{\log_{10} \frac{P_{1\text{ eff}}}{2 \times 10^{-5}}} \right) \quad (17)$$

ou encore :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} \left( 2 \times \frac{P_{1\text{ eff}}}{2 \times 10^{-5}} \right) \quad (18)$$

L'accroissement du niveau de pression acoustique dans le cas où les deux signaux sont émis en phase, par rapport au cas où seul le signal primaire est émis est donc donné par la relation suivante :

$$L_{p, r} = 20 \times \log_{10} (2) + 20 \times \log_{10} \left( \frac{P_{1\text{ eff}}}{2 \times 10^{-5}} \right) \approx X + 6 \text{ dB} \quad (19)$$

On constate donc un accroissement de 6 dB par rapport au cas où le signal primaire seul est émis. Cet accroissement de 6 dB pourra être mesuré grâce au sonomètre.

Notons que l'inverseur présenté à la figure 4 permet, lorsque le dispositif d'absorption active est réglé de façon optimale, de passer d'une émission en opposition de phase à une émission en phase, et dès lors d'envisager l'énorme différence que produit, au niveau acoustique, le passage d'une interférence destructive à une interférence constructive. Remarquons finalement que la présence de l'inverseur n'est pas nécessaire, puisqu'un passage de l'émission en opposition de phase à l'émission en phase peut être obtenu directement en inversant les connexions du haut-parleur secondaire.

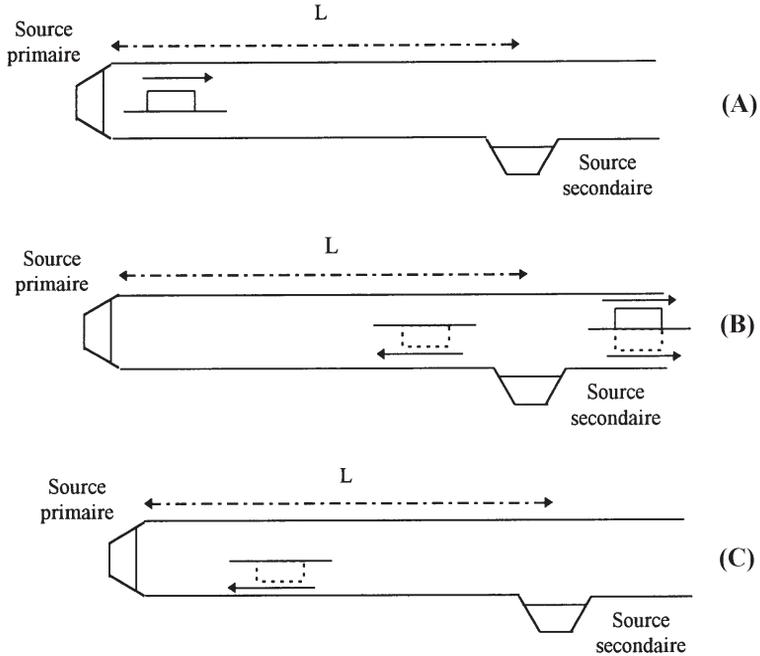
## 5. BRÈVE RÉFLEXION SUR LE PRINCIPE DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Durant plusieurs années, un problème a retenu l'attention des scientifiques travaillant dans le domaine de l'absorption acoustique active. La question qu'ils se posaient est relativement simple à exposer : «où va l'énergie acoustique dans le système ?».

A priori, on pourrait penser intuitivement que cette énergie acoustique est directement absorbée par la source secondaire. Cependant, un rapide raisonnement montre que cette hypothèse est erronée. En effet, la puissance développée par un haut-parleur est proportionnelle au produit de la pression acoustique produite par le haut-parleur et du débit de celui-ci (le débit d'un haut-parleur correspond au volume d'air déplacé par unité de temps par la membrane du haut-parleur). Nous avons montré que dans un système d'absorption active correctement réglé, la pression acoustique au droit de la source secondaire était pratiquement nulle : la puissance acoustique développée (c'est-à-dire émise ou reçue) par la source secondaire est donc négligeable par rapport à la puissance acoustique véhiculée par le signal de bruit indésirable. **En d'autres termes, la puissance acoustique du signal indésirable n'est pas absorbée par la source secondaire**, ce qui peut laisser penser que le titre choisi pour cet article est malheureux ! Une discussion détaillée de ce problème peut être trouvée dans la référence [2], section 5.8. Notons que ce phénomène pose un problème théorique pour définir le rendement électroacoustique de la source secondaire. En général, le rendement électroacoustique d'un haut-parleur est défini comme le rapport entre la puissance acoustique émise par la source et la puissance électrique nécessaire à son bon fonctionnement. La puissance acoustique développée par la source secondaire étant négligeable, il est nécessaire de redéfinir complètement le concept de rendement électroacoustique de cette dernière. Ce problème, qui dépasse le cadre de cet article, est évoqué en détails dans la référence [4].

La figure 6 montre que la source secondaire se comporte en fait comme un réflecteur. Une impulsion acoustique est émise par la source primaire et se propage vers la source secondaire (figure 6A). Lorsque ce signal arrive au droit de la source secondaire, cette dernière émet la même impulsion, déphasée de  $180^\circ$  par rapport à l'impulsion primaire (figure 6B). L'émission du haut-parleur secondaire est identique aussi bien vers l'aval

que vers l'amont du tuyau. En aval de la source secondaire, les deux impulsions se compensent, tandis qu'une impulsion que l'on peut qualifier de résiduelle se propage vers l'amont du tuyau (figure 6C). La comparaison entre les figures 6(A) et 6(C) montre bien que la source secondaire réfléchit le signal primaire. Notons qu'il est possible que l'impulsion résiduelle se réfléchisse sur la source primaire. Elle reviendra alors vers la source secondaire, et le processus décrit aux figures 6(A), (B) et (C) se répétera indéfiniment.



**Figure 6** : Aspect temporel du contrôle acoustique actif, qui montre que la source secondaire se comporte comme un réflecteur. Dans cette figure, les signaux en traits pleins et pointillés représentent respectivement les signaux émis par la source primaire et la source secondaire.

On comprend dès lors que la puissance acoustique émise par la source primaire n'est nullement absorbée par le dispositif, mais qu'elle est simplement réfléchie, comme si la source secondaire constituait une barrière infranchissable.

En pratique, si l'on tient compte des pertes acoustiques entre la source primaire et la source secondaire, dues par exemple aux vibrations inévitables des parois du tuyau, il apparaît clairement que l'impulsion que se renvoient continuellement la source pri-

maire et la source secondaire verra son amplitude décroître progressivement, pour finalement disparaître. On peut en conclure que la majeure partie de la puissance acoustique émise par la source primaire est dissipée dans le tronçon de tuyau qui la sépare de la source secondaire.

Lorsque le signal émis par la source primaire n'est plus transitoire, mais varie de façon continue dans le temps, la situation est qualitativement plus difficile à expliquer et le raisonnement simple donné ci-dessus n'est plus envisageable. Néanmoins, on peut montrer que la source secondaire continue d'agir comme un réflecteur.

## CONCLUSION

Cette manipulation d'acoustique, réalisée au départ d'un matériel simple et peu onéreux et puisant ses bases théoriques dans un des principes fondamentaux de la physique, le principe de superposition, permet à l'élève de se familiariser avec plusieurs notions importantes, parmi lesquelles nous citerons :

- les notions d'onde et de phase,
- les notions d'interférences constructives et destructives,
- la mesure d'un niveau de bruit avec un sonomètre,
- la manipulation d'une échelle de mesure exprimée en décibels.

La manipulation permettra également à l'élève d'établir un parallélisme entre les phénomènes d'interférences optiques et d'interférences acoustiques.

De plus, elle conduira à une réflexion sur l'application dans un cas concret du principe de conservation de l'énergie et montrera qu'il n'est pas toujours évident de répondre à la question de savoir où va l'énergie.

Enfin, et ce n'est pas là son moindre mérite, la manipulation proposée permettra, nous l'espérons, de sensibiliser l'élève au problème de la pollution sonore et aux techniques de lutte contre le bruit, et lui donnera pourquoi pas l'envie de respecter l'environnement sonore dont la qualité est si précieuse au bien-être de tous.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] C. ALLÈGRE : «*La défaite de Platon, ou la science du XX<sup>e</sup> siècle*» - Fayard, Paris, 1995.
- [2] P.A. NELSON et S.J. ELLIOTT : «*Active Control of Sound*» - Academic Press, London, 1992.
- [3] P. MEUNIER : «*Étude théorique et expérimentale d'un dispositif d'absorption active des bruits dans les conduits*», travail de fin d'études - Faculté Polytechnique de Mons, Mons, Belgique, 1993.
- [4] L.A. BLONDEL et S.J. ELLIOTT : «*Subsonic Compressed-air Sources for Active Noise Control*» - Actes du Congrès ACTIVE '97 (Budapest, Hongrie), pp. 619-634, 1997.
- [5] KINSLER, FREY, COPPENS and SANDERS : «*Fundamentals of Acoustics - 3<sup>rd</sup> Edition*», J. Wiley & Sons, New York, 1982.

## *Annexe 1*

### *Schémas électriques et mécaniques du dispositif de laboratoire*

---

Cette annexe se propose de détailler chacun des principaux éléments du schéma bloc présenté à la figure 4, afin de permettre la réalisation du dispositif d'absorption active de laboratoire.

#### 1. L'OSCILLATEUR

Un générateur audio de laboratoire sera utilisé. Il doit pouvoir générer des signaux sinusoïdaux à des fréquences comprises entre 30 et 200 Hz environ.

#### 2. LE DÉPHASEUR

Le déphaseur est basé sur un circuit dit BBD (Bucket Brigade Device). Il s'agit d'un circuit dans lequel les charges électriques sont transmises d'une cellule élémentaire à la suivante avec un certain délai. Le principe de fonctionnement de ce circuit est illustré à la figure 7.

Le circuit intégré MN 3004 comporte cinq cent douze cellules. On peut le considérer comme un registre à décalage analogique. A chaque impulsion de l'horloge Cp1, on prélève un échantillon du signal présent à l'entrée. Un condensateur est chargé de mémoriser cet échantillon. Lorsqu'apparaît l'impulsion d'horloge suivante, cette charge est transférée au condensateur suivant. L'échantillon déposé à l'entrée se retrouve dès lors à la sortie après cinq cent douze impulsions d'horloge.

Les impulsions d'horloge sont fournies par le circuit intégré MN 3101. Le circuit MN 3101 permet de construire un oscillateur RC dont la fréquence, réglable via C ou R, détermine la durée du retard. En laissant non connectées les broches 5 et 6, on peut injecter à la broche 7 le signal d'un oscillateur extérieur.

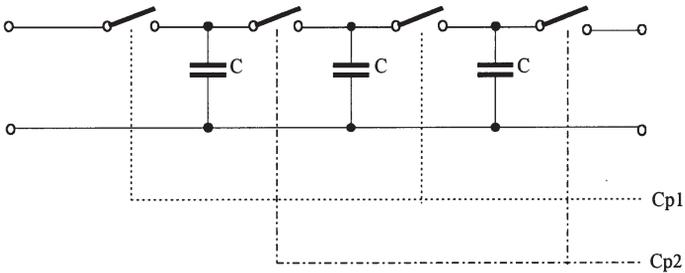


Figure 7 : Principe de base du circuit à transfert de charges utilisé pour réaliser le déphaseur.

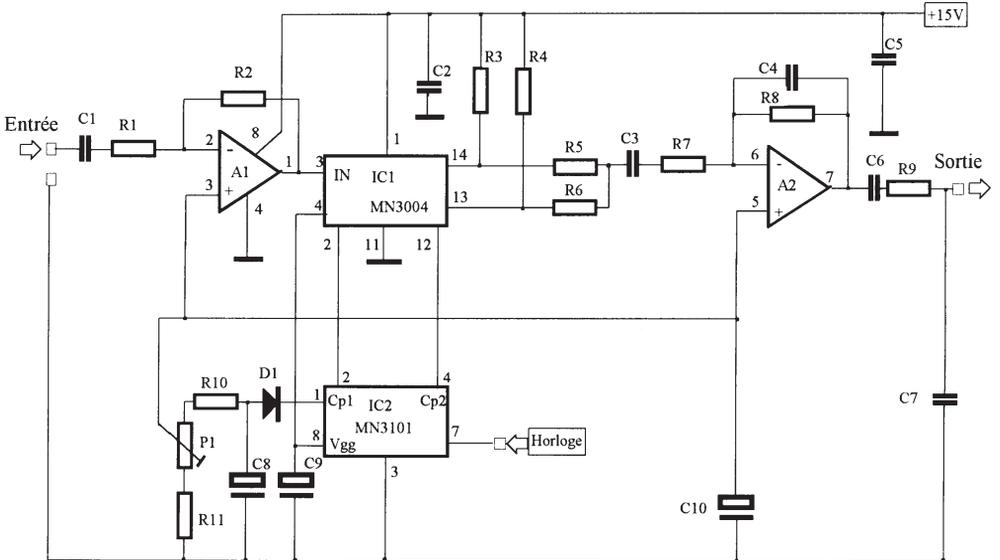


Figure 8 : Schéma électrique du déphaseur.

**Liste des composants**

Résistances

- R1, R2 = 10 kΩ    R3, R4 = 100 kΩ    R5, R6 = 5,6 kΩ  
 R7, R8 = 150 kΩ    R9 = 100 Ω    R10, R11 = 68 kΩ

Condensateurs

C1, C3 = 1  $\mu$ F    C2, C5 = 100 nF    C4 = 56 pF    C6 = 2,2  $\mu$ F

C7 = 82 nF    C8 = 22  $\mu$ F    C9, C10 = 4,7  $\mu$ F

Potentiomètre

P1 = 100 k $\Omega$

Diode

D1 = 1N 4148

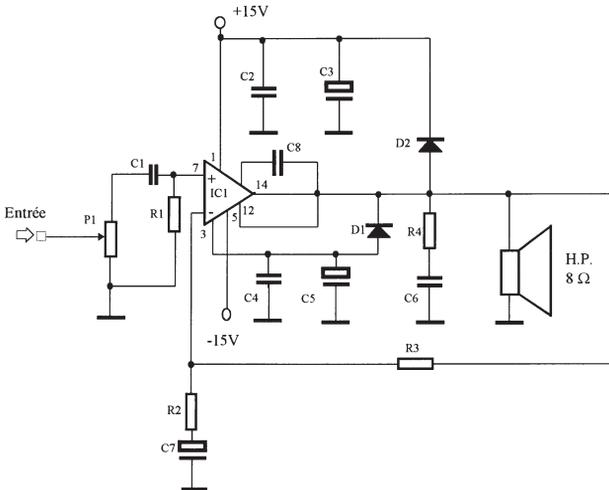
Circuits intégrés

IC1 = MN3004    IC2 = MN3101

IC3 = TL072 (amplificateurs opérationnels A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub>)

**3. LES AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE**

La figure 9 présente le schéma électrique des amplificateurs qui alimenteront la source primaire et la source secondaire. Le gain de cet amplificateur est réglable via le potentiomètre P<sub>1</sub>. Cette possibilité de réglage de gain est fondamentale pour l'amplificateur qui alimente la source secondaire.



**Figure 9** : Schéma électrique des amplificateurs de puissance qui alimentent la source primaire et la source secondaire.

**Liste des composants**Résistances

R1, R3 = 100 k $\Omega$  R2 = 3,3 k $\Omega$  R4 = 1  $\Omega$

Potentiomètre

P1 = 47 k $\Omega$

Condensateurs

C1, C2, C4, C6 = 0,1  $\mu$ F C3, C5 = 100  $\mu$ F C7 = 4,7  $\mu$ F C8 = 0,1  $\mu$ F

Diodes

D1, D2 = 1N 4148

Circuit intégré

IC1 = TDA 2020

**4. LES SOURCES PRIMAIRES ET SECONDAIRES**

Les sources primaires et secondaires sont constituées de haut-parleurs électrodynamiques classiques. Ces haut-parleurs doivent avoir une bonne réponse en basses fréquences. Pour cela, on les choisira de telle manière que leur cône ait un diamètre environ égal à 20 cm (non critique). Afin d'éviter d'éventuels problèmes engendrés par une différence de puissance entre la source primaire et la source secondaire, on choisira deux haut-parleurs de puissance égale. A titre indicatif, voici les principales caractéristiques des haut-parleurs que nous avons utilisés :

- Impédance : 8  $\Omega$ ,
- Puissance d'entrée nominale : 20 W,
- Diamètre du cône : 20,3 cm,
- Réponse en fréquence : 30-5000 Hz environ,
- Fréquence de résonance : 30 Hz.

Pour éviter le rayonnement de l'arrière de la membrane des haut-parleurs, il est conseillé de les placer dans une enceinte (voir la figure 11).

## 5. L'INVERSEUR

La figure 10 présente le schéma électrique de l'inverseur.

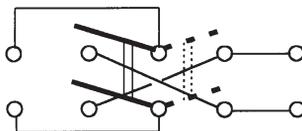


Figure 10 : Schéma électrique de l'inverseur.

## 6. LE TUYAU DE BOIS

Le tuyau réalisé est présenté à la figure 11. Toutes les dimensions sur cette figure sont exprimées en millimètres. Pour la réalisation, nous avons utilisé un bois lamellé de 18 mm d'épaisseur.

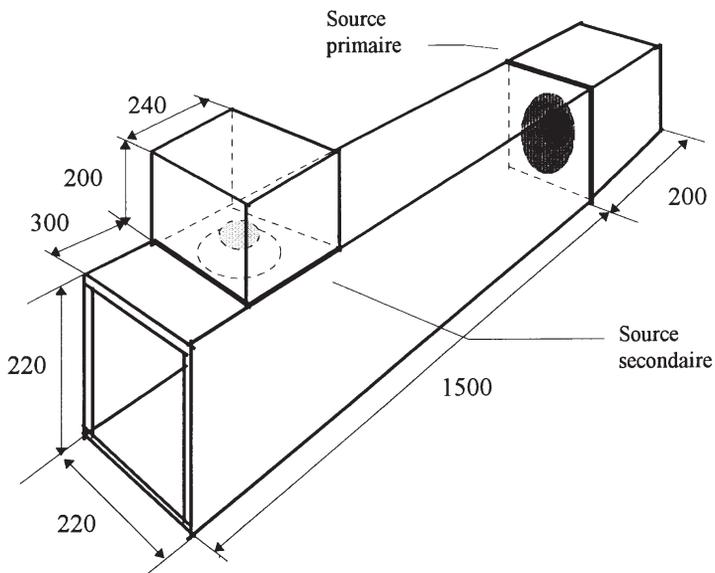


Figure 11 : Schéma mécanique du tuyau (toutes les dimensions sont données en mm).

## *Annexe 2*

### *Propagation sous forme d'ondes planes dans un tuyau*

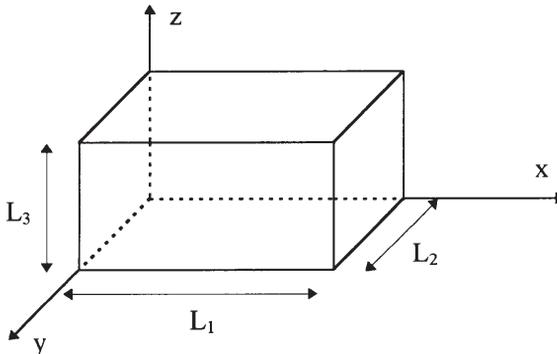
---

Le texte mentionne à plusieurs reprises que lorsque le signal acoustique indésirable se propage sous forme d'ondes acoustiques planes (on dit aussi que la propagation est monodimensionnelle), le principe de superposition peut être directement appliqué, ce qui simplifie la complexité des dispositifs d'absorption active. L'objectif de cette annexe est de répondre aux questions suivantes :

1. Qu'entend-on par propagation monodimensionnelle ?
2. A quelle(s) condition(s) se produit-elle ?

La réponse rigoureuse à ces questions implique des notions d'acoustique relativement poussées (équation d'Helmholtz, fonctions propres, modes de propagation, ...), qui dépassent le cadre de cet article. Pour cette raison, nous répondrons à ces questions de façon qualitative. Le lecteur intéressé par une étude approfondie peut par exemple consulter la référence [5].

Considérons l'enceinte rectangulaire illustrée à la figure 12, dont les dimensions dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  valent respectivement  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$ .



**Figure 12** : Propagation d'ondes acoustiques dans une enceinte.

Supposons qu'un haut-parleur situé dans un coin de cette enceinte y génère un signal acoustique harmonique, dont la longueur d'onde dans l'air est égale à  $\lambda$ . Ce signal acoustique va se propager dans l'enceinte, et on peut montrer que la pression acoustique un point  $P$  de cette dernière, de coordonnées  $(X, Y, Z)$ , résulte de la superposition de trois ondes acoustiques : une onde se propageant selon la direction  $x$ , une onde se propageant selon la direction  $y$ , et une onde se propageant selon la direction  $z$ . Cependant, la propagation d'une onde acoustique dans une direction donnée n'est possible que sous certaines conditions. Ainsi, le signal acoustique se propagera dans la direction  $x$  si la condition suivante est vérifiée :

$$\lambda < 2 L_1 \quad (20)$$

De façon analogue, la propagation dans les directions  $y$  et  $z$  se produit si les conditions (21) et (22) sont respectivement vérifiées :

$$\lambda < 2 L_2 \quad (21)$$

$$\lambda < 2 L_3 \quad (22)$$

Prenons un exemple numérique pour fixer les idées. Supposons que l'enceinte, fortement allongée, a les dimensions suivantes :  $L_1 = 5 \text{ m}$ ,  $L_2 = 0.5 \text{ m}$ ,  $L_3 = 0.2 \text{ m}$ . En fonction de la valeur de  $\lambda$ , il vient :

1.  $\lambda > 10 \text{ m}$  : aucune des conditions (20), (21) et (22) n'est vérifiée. Aucune propagation ne se produit dans l'enceinte : pour chaque instant  $t$  donné, la pression acoustique est **identique** en tous les points de l'enceinte.
2.  $1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$  : seule la condition (20) est vérifiée et la propagation se produit dans la direction  $x$  uniquement. En d'autres mots, en un instant  $t$  donné, la pression acoustique dans l'enceinte n'est fonction **que** de la coordonnée  $X$  et la pression acoustique est identique en tous les points d'un plan perpendiculaire à l'axe  $x$  et passant par le point  $X$  ; on dit que l'on a propagation d'une **onde plane** selon la direction  $x$ , ou encore que la propagation est monodimensionnelle, dans la direction  $x$ .
3.  $0.4 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ m}$  : les conditions (20) et (21) sont vérifiées et la propagation se produit dans les directions  $x$  et  $y$  uniquement : pour chaque instant  $t$  donné, la pression acoustique dans l'enceinte n'est fonction **que** des coordonnées  $X$  et  $Y$ .
4.  $\lambda < 0.4 \text{ m}$  : les conditions (20), (21) et (22) sont vérifiées : la propagation de l'onde s'effectue selon les trois directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  et la pression acoustique dans l'enceinte est, pour tout instant  $t$ , fonction des trois coordonnées  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ .

Pour le tuyau considéré dans cet article ( $L_1 = 1.5 \text{ m}$  ;  $L_2 = L_3 = 0.22 \text{ m}$ ), la propagation sous forme d'ondes planes dans la direction de l'axe du tuyau est garantie si la rela-

tion (20) est vérifiée, c'est-à-dire pour les signaux acoustiques de longueurs d'onde supérieures à  $0,44\text{ m}$ , soit de fréquences inférieures à  $770\text{ Hz}$ . Notons, pour conclure cette annexe, que ce type de propagation simplifie fortement le dispositif nécessaire pour le contrôle actif. Ainsi, dans le schéma de principe de la figure 3, **un seul** microphone de référence suffit pour caractériser l'onde acoustique en **tous** les points d'un plan perpendiculaire à l'axe du tuyau et «passant» par ce microphone, la même remarque étant valable pour le microphone d'erreur. Le lecteur intéressé par le contrôle actif en présence de modes acoustiques d'ordre supérieur peut par exemple consulter les chapitres 10 et 11 de la référence [2].