La détection acoustique : un moyen d'investigation en hydraulique

Acoustic detection for hydraulic research

Jean-Claude Eude

Département Acoustique
Direction des Études et Recherches – E.D.F. Clamart

Introduction

L'étanchéité des circuits hydrauliques préoccupe de manière quasi-journalière les exploitants de notre industrie. La détection de fuite ne présente pas de difficultés particulières dans la mesure où le débit de fuite est relativement important. Il en est tout autrement lorsque ce débit est de l'ordre de quelques dizaines de l/h . La localisation d'une faible fuite dans un échangeur permet d'entreprendre une réparation avant que le débit ne soit trop important. La détection précoce permet d'éviter, compte tenu de la pression différentielle élevée, que ce jet de fluide n'érode les tubes voisins, créant ainsi un foyer de fuites à plus ou moins long terme.

Qu'est-ce qu'une fuite ?

Un orifice dans une paroi séparant deux milieux entre lesquels existe une pression différentielle est le siège d'un échappement de fluide.

Cet écoulement turbulent génère une émission sonore au niveau du jet ; cette manifestation sonore sera utilisée dans la première méthode.

Cet écoulement de fluide perturbe le milieu au repos et entraîne l'apparition d'une pression dynamique localisée au niveau de l'orifice. Cette constatation sera utilisée dans la seconde méthode de détection et localisation.

Lorsque le fluide s'écoulant par l'orifice est différent de celui du second milieu confiné dans un volume, il se forme un milieu possédant deux fluides que l'on peut détecter par modification des propriétés physiques du second milieu. Tel est le principe de la troisième méthode de détection.

Ces méthodes ont été étudiées principalement pour

détecter les fuites sur les tubes de générateur de vapeur (cf. Fig. 1) lorsque l'installation est à l'arrêt. Les fluides gazeux utilisés pour mettre en œuvre ces méthodes sont de l'air ou de l'hélium.

Caractéristique du bruit de jet

Un jet de gaz génère un champ acoustique provenant du mouvement turbulent de l'écoulement auquel se superpose suivant les conditions de détente un bruit de chocs.

La puissance acoustique rayonnée par le jet se calcule à partir de la puissance mécanique de celui-ci par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicatif appelé rendement acoustique.

L'écoulement dans cet orifice peut être subsonique ou sonique suivant les conditions de détente.

Bruit de turbulence

La puissance acoustique émise par un jet exprimée en watts s'écrit :

$$W = \eta Q v^2 / 2$$

Q étant le débit masse du fluide en kg/s , v sa vitesse en m/s .

La variation du coefficient η appelé rendement acoustique en fonction du nombre de Mach de l'écoulement est donné à la figure 2. Lorsque l'écoulement est sonique, le coefficient vaut 10^{-4} . Le niveau de puissance acoustique en dB par rapport à la référence de 10^{12} watts est

$$N_w = 10 \log W + 120$$

La figure 3 donne le spectre du bruit de turbulence,

Figure 1 — Générateur de vapeur.

Figure 2 — Variations du rendement acoustique η en fonction du nombre de Mach de l'écoulement (Bruit de turbulence).

Figure 3 — Spectre du bruit de jet (bruit de turbulence).

le maximum de niveau étant à la fréquence :

$$fp = 0,2 v/d$$

v étant la vitesse du fluide en m/s.

d étant le diamètre de l'orifice en m.

En-dessous de la fréquence fp , la décroissance est de l'ordre de 9 dB/octave.

Au-dessus de cette fréquence fp , la perte est de l'ordre de 2 dB/octave.

Bruit de chocs

Dans un jet d'air, lorsque le rapport des pressions amont aval est supérieur à 1,89, l'écoulement est sonique et l'onde de choc provoquée par la détente engendre la puissance acoustique en watts :

$$W' = \eta' Q C^2 / 2$$

Q étant le débit masse du fluide en kg/s.

C étant la célérité du son en m/s.

La figure 4 donne la variation du coefficient η' en fonction du rapport de pressions amont aval. Ce coefficient croît rapidement jusqu'au rapport de pression égal à 3.

Au-delà, ce coefficient tend vers 10^{-2} .

De manière identique, le niveau de puissance acoustique en dB par rapport à la référence 10^{-12} watts est :

$$N'w = 10 \log W' + 120$$

Figure 4 — Variations de rendement acoustique η' en fonction du rapport des pressions amont/aval P_1/P_2 (bruit de choc).

Figure 5 – Variation du nombre de Strouhal donnant la fréquence du maximum du spectre de bruit de jet (bruit de choc).

Figure 6 – Spectre du bruit de jet (bruit de choc).

La figure 5 présente la variation du nombre de Strouhal pour un jet d'air en fonction du rapport des pressions diminué de la valeur 1,89. Ce nombre décroît lorsque le rapport des pressions croît.

Le spectre de ce bruit large bande (figure 6) présente un maximum à la fréquence f_p qui se déduit de la connaissance du rapport des pressions par :

$$f_p = S_o C/d$$

S_o étant le nombre de Strouhal.

C étant la célérité du son en m/s.

d étant le diamètre de l'orifice en m.

Application

Dans le cas d'un écoulement sonique, la puissance acoustique totale rayonnée en dB par le jet sera :

$$N_{wtot} = 10 \log [W + W'] + 120$$

Dans le cadre de nos applications, le rendement intéressant se situe pour un rapport de pression de l'ordre de 3, bien que dans ces conditions la fréquence du maximum du spectre du bruit de choc soit élevée.

Le tableau ci-dessous donne l'évaluation de la puissance acoustique totale rayonnée par deux fuites de diamètres 50 μ m et 180 μ m ainsi que la fréquence du maximum du spectre lorsque le fluide se détend de 3 bars à 1 bar.

Diamètre de l'orifice	50 μ m	180 μ m
N_{wtot}	86 dB	98 dB
f_p	$1.2 \cdot 10^6$ Hz	$3.4 \cdot 10^5$ Hz

1^{ère} Méthode : Détection de l'émission sonore du jet

Principe

L'écoulement de gaz par un orifice percé dans la paroi du tube génère un champ acoustique dans le tube. Ces ondes sonores se propagent en utilisant le tube comme guide acoustique. Cette énergie acoustique est rayonnée à l'extrémité ouverte du tube. C'est cette énergie rayonnée qui sera détectée par un ensemble microphonique et qui diagnostiquera la présence d'une fuite.

Transmission du son dans un guide

Ce jet de gaz dans le tube cylindrique est considéré comme source sonore.

En supposant qu'il n'y a pas d'écoulement, et absence de source dans le conduit, l'équation des ondes se ramène à l'équation d'Helmoltz :

$$\Delta \phi + k^2 \phi = 0$$

Δ est le Laplacien

ϕ le potentiel des vitesses

k le nombre d'onde.

Faisant les hypothèses suivantes :

- la paroi du guide est parfaitement réfléchissante,
- l'absorption dans l'air est négligée.

La résolution de cette équation dans le système de coordonnées cylindriques fait apparaître une suite de fréquences caractéristiques appelées "fréquences de coupure" des modes données par :

$$f_{mn} = C_o q_{mn}/2a$$

C_o est la célérité du son dans le conduit

a le rayon du guide

q_{mn} le nième zéro de la dérivée première de la fonction de Bessel J_m de 1^{ère} espèce ($\pi = 3,14$).

A chacune de ces fréquences est associé un mode de propagation privilégié correspondant à une distribution énergétique donnée dans une section droite du guide.

Lorsque ce mode est propagatif, cette distribution d'énergie reste identique tout au long de la propagation.

Par exemple, pour un diamètre intérieur du tube de 2 cm, lorsque la fréquence d'excitation est inférieure à 10 kHz, seul le mode plan est propagatif. Ce mode correspond à une distribution énergétique constante dans une section droite. Quelle que soit la fréquence d'excitation, le mode plan est toujours propagatif et se propage à la célérité du son.

Compte tenu de la largeur du spectre sonore émis par la fuite, un grand nombre de modes se propageront ; la position même de la fuite favorise l'établissement des modes azimutaux pairs. En effet, le guide possède un axe de symétrie d'ordre infini. La présence de cet orifice ne permet plus qu'une distribution d'énergie symétrique par rapport au plan passant par l'axe de symétrie du tube et la position de la fuite.

Atténuation du son dans un guide

Trois phénomènes différents engendrent une atténuation du son dans un tube lors de la propagation :

- Deux propriétés du milieu se combinent pour diminuer l'information sonore qui se propage :
- d'une part l'atténuation moléculaire résultant de l'absorption et de la dispersion du son par les molécules. L'ensemble de courbes donné par Kneser permet de déterminer en fonction des paramètres physiques du milieu la valeur de cette atténuation,
- d'autre part, l'atténuation causée par la conduction de la chaleur et la viscosité résultant d'échange d'énergie et de phénomènes de relaxation entre les différentes molécules. Différentes théories permettent d'évaluer approximativement cette atténuation. Dans les hautes fréquences, cette atténuation s'exprime par :

$$\delta c = 0,0437 A / \lambda^2 \text{ dB/m}$$

avec $A = 45 \cdot 10^{-5}$ à 20°C

λ longueur d'onde en m.

Ces deux atténuations existent aussi en espace libre ; elles sont caractéristiques du milieu de propagation.

- Une atténuation supplémentaire liée aux pertes thermiques et visqueuses provenant de la paroi du tube diminue l'information sonore. Plusieurs théories, reposant sur la propagation d'onde plane dans un tube, proposent de caractériser cette atténuation. La formule de Kirchhoff donnant la constante d'atténuation dans un tube circulaire est :

$$\delta t = 4,43 \times 10^{-2} f^{1/2} / Ca$$

C est la célérité du son en m/s

a le rayon intérieur du tube en m

f la fréquence du signal acoustique en Hertz

δt est exprimé en dB/m.

Compte tenu que tous ces phénomènes s'ajoutent pour diminuer l'information sonore lors de la propagation, la constante d'atténuation résultante est la somme de toutes ces atténuations.

La figure 7 présente l'atténuation expérimentale obtenue en faisant le rapport des pressions de part et d'autre de la fuite. Cette atténuation croît rapidement en fonction de la fréquence.

Figure 7 — Atténuation expérimentale par 1/3 d'octave obtenue sur une distance de 3 m dans un tube de diamètre intérieur de 21 mm.

Détection de l'énergie sonore

Le principe de détection suppose que le niveau sonore filtré dans une bande de fréquences est uniquement émis par la fuite. Dans ces conditions nous comparons le niveau obtenu à l'extrémité d'un tube non fuitard et d'un tube fuitard. L'augmentation de niveau diagnostique le tube fuitard.

Le plus grand nombre d'appareils commercialisés recherche cette augmentation de niveau dans une bande ultrasonore. En effet, le compromis suivant doit être effectué :

- bruit de fond minimal dans la bande de fréquences choisie ;
- sensibilité maximale de l'ensemble microphonique dans cette bande de fréquences.

Ce compromis, très performant pour détecter la présence d'ultra sons en espace "semi-libre" est mis en échec lorsque l'on conserve la même bande de fréquences pour détecter des ondes ultrasonores se propageant dans un guide de faible dimension. L'atténuation liée aux pertes par divergence est remplacée par les pertes thermiques et visqueuses provenant de la paroi du tube qui sont beaucoup plus importantes dans cette bande de fréquences.

La figure 8 présente les niveaux par bande 1/3 d'octave pour deux fuites calibrées sous une différence de pression de 3 bars.

Le secondaire est mis en pression d'air à 3 bars. La recherche s'effectue au niveau de la plaque tubulaire côté primaire.

On utilise un sonomètre muni d'un microphone 1/2 pouce et équipé d'un boîtier de filtres 1/3 d'octave. Sauf cas particulier, les mesures seront effectuées dans le 1/3 d'octave centré sur 12,5 kHz. Un concentrateur conique permet d'augmenter la directivité de l'ensemble.

On détermine le bruit de fond ambiant dans le tiers d'octave centré sur 12,5 kHz en faisant des mesures dans différentes directions. Après avoir repéré le niveau du bruit de fond, on effectue l'investigation au niveau de la plaque tubulaire. L'augmentation de niveau dans ce 1/3 d'octave permet de diagnostiquer le tube fuitard.

Figure 8 — Niveau sonore par 1/3 d'octave à 10 cm de l'extrémité du tube pour deux fuites calibrées.

Dans le domaine basses fréquences le spectre du bruit de jet croît de 8 dB/octave et l'atténuation dans le tube croît en fonction de la fréquence, ces deux remarques permettent d'évaluer la position de la fuite en effectuant deux mesures dans des tiers d'octave différents. La distance de l'orifice à l'extrémité du tube est :

$$d = (N_2 - N'_2 - 8)/\delta$$

N_2, N'_2 niveau acoustique dans deux tiers d'octave, distance d'une octave

δ différence d'atténuation entre ces deux tiers d'octave

Connaissant la position de la fuite, l'évaluation des dimensions équivalentes se fait par un abaque.

2^{ème} Méthode : Détection du jet de fluide

Principe

L'écoulement de gaz perturbe le milieu au repos et entraîne l'apparition d'une pression dynamique localisée au niveau de l'orifice.

Figure 9 - Comparaison entre le niveau de pression sonore régnant dans le tube et le niveau de pression sous la fuite ϕ 30 μm .

L'impact du jet sur un microphone se déplaçant dans le tube engendre un signal électrique, fonction de l'énergie cinétique du jet, de la sensibilité et de la directivité du microphone.

La composition fréquentielle du signal dépend des fluctuations de pression dynamique provenant de l'impact du jet et du déplacement du capteur.

Un jet de gaz se détendant à travers un orifice engendre un champ acoustique. Le niveau sonore global varie en fonction de l'énergie cinétique du jet. Le "rendement acoustique" du jet est défini comme le rapport de la puissance acoustique sur la puissance mécanique du jet. Expérimentalement, ce rapport est compris entre 10^{-2} à 10^{-7} suivant les conditions de détente et les paramètres physiques du gaz.

Le microphone étant sensible à la pression totale dans un milieu en mouvement, c'est une fraction de cette pression totale que l'on mesure lorsque l'ensemble microphonique passe sous la fuite. Nous mesurons donc, non plus uniquement la pression acoustique, mais la pression acoustique augmentée d'une fraction de la pression dynamique. En conséquence, si l'on considère le champ sonore dans le tube comme bruit de fond, le rapport signal sur bruit que l'on peut espérer obtenir lorsque le microphone passe devant la fuite, est une fraction de l'inverse du rendement acoustique. Cet inverse du rendement acoustique est compris entre 10^{+2} et 10^{+7} suivant les conditions de détente.

Sur la figure 9, nous avons reporté simultanément le niveau de pression sonore par 1/3 d'octave régnant dans le tube et une fraction du niveau de pression dynamique captée par un microphone sous la fuite. Ces deux spectres ont été obtenus en même temps. L'augmentation du niveau de pression sonore entre les figures 8 et 9 s'explique par la superposition du bruit d'impact du jet sur le microphone placé sous la fuite.

Détection du jet de fluide

Le principe de détection suppose que lors du passage de l'ensemble microphonique sous la fuite, celui-ci capte une fraction de la pression dynamique. En conséquence, cette méthode s'affranchit du bruit de fond ambiant généré par la fuite.

L'augmentation du niveau lors du passage du microphone sous la fuite positionne l'orifice.

Le spectre obtenu sur la figure 9 permet de choisir cette bande de fréquences. Un filtre passe-bande sup-

Figure 10 - Augmentation du niveau de pression lorsque l'ensemble microphonique passe sous la fuite.

prime les composantes générées par le frottement de l'ensemble microphonique.

Le conditionnement du circuit est identique à celui utilisé lors de la méthode précédente.

On utilise un microphone avec son préamplificateur fixé à l'extrémité d'un câble. Un amplificateur, un filtre passe-bande et un enregistreur graphique de niveau ont permis d'obtenir les résultats mentionnés sur la figure 10.

Un autre dispositif portatif est équipé d'une paire d'écouteurs permettant dès l'entrée du microphone dans le tube de reconnaître le bruit de jet et lors du passage du microphone sous la fuite, de repérer la longueur de câble afin de localiser la fuite.

On détermine le bruit de fond généré par la fuite. Déplaçant le microphone dans le tube, lorsque l'on constate l'augmentation du niveau, on localise la fuite.

3^{ème} Méthode : Mesure de la vitesse de propagation

Principe

Lorsque le gaz s'écoulant par l'orifice est différent de celui du second milieu et que, de par ses propriétés ce gaz reste confiné dans un volume en remplaçant ce second milieu, on peut détecter la présence de ce gaz par modification des propriétés physiques du milieu.

La méthode utilise la différence de vitesse de propagation d'une impulsion sonore se propageant dans deux milieux gazeux différents :

- une impulsion sonore se propageant dans un tube sain c'est-à-dire avec une vitesse de propagation de l'ordre de 340 m/s
- une impulsion sonore se propageant dans un tube fuitard dont la fuite débite un autre gaz que l'air, soit une vitesse de propagation différente de celle de l'air.

Si ce gaz est de l'hydrogène, la vitesse de propagation est de l'ordre de 1 270 m/s. C'est donc avec ce gaz que l'on obtient la différence la plus importante. Toutefois l'hélium sera préférable à l'hydrogène pour une raison de sécurité, bien que la vitesse de propagation soit de l'ordre de 980 m/s.

Principe de détection

On utilise une méthode d'écho pour évaluer la vitesse de propagation d'une impulsion sonore.

L'impulsion sonore générée par un émetteur est réfléchi à l'extrémité du tube ; considérant la longueur du tube et la température du gaz, la mesure de temps entre l'émission et la réception permet de connaître la composition du milieu, de déceler la présence d'hélium et, par conséquent diagnostiquer le tube fuitard.

Le secondaire est mis en pression d'hélium, le transducteur est placé au niveau de la plaque tubulaire côté primaire.

Un appareil commercialisé comprenant un émetteur récepteur, un générateur d'impulsion, des circuits amplificateurs et un oscilloscope à mémoire, permet d'effectuer des mesures de temps de parcours.

La mesure du temps s'écoulant entre le déclenchement et la réception du premier écho se fait à l'aide de la visualisation sur l'oscilloscope. La comparaison du temps de parcours avec celui obtenu dans un tube en air permet de diagnostiquer la présence d'une fuite.

Les expérimentations sur cette méthode sont en cours.

Conclusion

La détection des microfuites est délicate lorsque le débit de fuite est relativement faible : les trois méthodes proposées ont donné des résultats satisfaisants au laboratoire. Lorsque l'étanchéité des circuits est impérative, la méthode utilisant le bruit de jet peut être complétée par la méthode utilisant la mesure de la vitesse de propagation. Ces deux méthodes apparaissent comme complémentaires dans certaines applications.

Bibliographie

- LIGHTILL M.J. — On sound generated aerodynamically. *Proc. Roy Soc. A* 222 (1952).
- EUDE Jean-Claude. — *Détection acoustique de microfuite de tubes GV PWR 900 MW*. Notes E.D.F. HE/21/4507 — HE/21/77/467 — HE/21/78/502 — HE/21/CR/4533.
- BERANEK L. — *Acoustics*. McGraw Hill book company Inc 1954.

Discussion

Président : M. J. MATTEI

Le Président ouvre la discussion en observant que le sujet traité par M. EUDE est à la limite des domaines de l'hydraulique.

M. TOURET. — Pourrait-on selon vous, utiliser une méthode basée sur l'altération des propriétés acoustiques du milieu (célérité, amortissement...) associée à l'apparition de cavitation ? On pourrait dans cette hypothèse utiliser un émetteur situé par exemple à l'aspiration d'une pompe et un récepteur au refoulement, afin de détecter l'altération de la propagation des ondes acoustiques dans le liquide.

M. EUDE. — On peut très bien observer une variation de vitesse de propagation lorsque le milieu est différent ; toutefois, il y a, dans la cavitation, des problèmes très difficiles à cerner, comme l'a montré M. LEDUCQ : ces vitesses de propagation se modifient énormément en fonction, d'une part des conduites

elles-mêmes, de leur raideur, d'autre part en fonction de la concentration en air du milieu.

M. DELCAMBRE. — Dans le cas de faibles fuites, l'écart entre la durée de propagation du son dans le tube avec hélium et sans hélium n'est-elle pas susceptible d'être masquée par l'écart dû à des températures différentes ?

M. EUDE. — C'est exact. J'ai peut-être omis de dire que la longueur du tube d'hélium dépend du temps de mise en pression de l'hélium. Le problème se pose comme suit : si l'on a pu évaluer approximativement un débit de fuite, c'est un indice qui permet de calculer la durée de mise en pression en hélium. Nous avons dans nos installations une idée du débit de fuite global, mais pas une idée du débit de fuite tube à tube.

Le Président. — Je remercie M. EUDE.