
Problèmes liés à la génération de la transmission de bruit basse fréquence et de forte amplitude dans les circuits industriels

Problems connected with the production and transmission of low frequency, high amplitude noise in industrial circulation systems

D. Leducq

Société Bertin et Cie

1. Rappel des résultats obtenus pour des écoulements gazeux en conduite

Une singularité (élargissement brusque, diaphragme, dérivation, piquage, coude, vanne, ...) placée dans un écoulement en conduite, crée une perte de charge qui correspond à une dissipation d'énergie cinétique. Cette dissipation est transformée en partie en fluctuations de pression hydrodynamique locale et en partie en pression acoustique.

Il a été possible, lors d'une étude conjointe EDF-CEA-INSA Lyon-Bertin, aidée par la DGRST, de dégager les caractéristiques essentielles des sources locales et rayonnées liées à un certain nombre de singularités (élargissement brusque, coude, branchement en T, diaphragme, plaque perforée, vanne guillotine...) pour un écoulement aérodynamique subsonique et sans interaction avec les parois, considérées ici comme infiniment rigides. Cette étude permet de dégager quelques critères simples d'évaluation des sources liées aux singularités, en niveau global et spectral :

- le niveau global des fluctuations de pression locale est de l'ordre de 10 % à 20 % de la perte de charge singulière à l'endroit des fluctuations maximales (point de recollement dans le cas où la singularité provoque un décollement local) ;
- le niveau global de la pression acoustique (signal reçu loin de la singularité se propageant dans le conduit à la célérité du son) est de l'ordre de 1 à 2 % de la perte de charge singulière ;
- la densité spectrale de puissance présente l'allure générale d'un bruit de turbulence, avec une fréquence caractéristique f_c à partir de laquelle le niveau chute rapidement (sensiblement en f^{-3}). On peut former un nombre de Strouhal $f_c L/V$ à partir de cette fréquence, la vitesse V de l'écoulement et la taille caractéristique de la zone perturbée, à forte turbulence au droit de la singularité.

Pour le champ de pression dynamique locale, ce Strouhal est de l'ordre de 0,1 à 0,2. Pour le champ de pression acoustique rayonné dans les conduites, le Strouhal caractéristique est de l'ordre de 0,01 à 0,02.

Le champ de pression dynamique local n'interagit que rarement avec les structures, et son effet est limité dans l'espace. Les caractéristiques du champ acoustique peuvent être alors introduites dans un modèle du type "Vibraphone" mis au point par R. Gibert au CEA pour prévoir le bruit d'une installation en écoulement gazeux.

2. Modifications des phénomènes introduits par l'utilisation d'un liquide

2.1. Les risques de cavitation et leurs conséquences

Lorsque la dépression créée au droit d'une singularité est telle que la pression statique locale devient inférieure à un certain seuil voisin de la tension de vapeur du liquide, celui-ci se vaporise. Il se crée une poche de cavitation, mélange généralement de gaz et de vapeur qui se met à osciller, et surtout implose lorsque la pression locale remonte en provoquant un bruit intense de nature voisine de celle d'un coup de bélier. Sur le plan propagation, la poche gazeuse représente une rupture d'impédance acoustique qui provoque une dissymétrie de propagation.

2.2. Les couplages liquide-parois

En milieu confiné, une augmentation de pression acoustique correspond à une accumulation locale et instantanée de fluide. Cette accumulation est rendue possible soit par augmentation de la densité locale (effet de compressibilité du fluide), soit par extension du volume disponible (effet de déformabilité et élasticité

des parois). Les gaz ont une compressibilité importante et les parois qui les contiennent seront en général considérées comme indéformables. Il n'en est plus de même pour les liquides où les deux termes sont en général à prendre en compte. Par ailleurs, des forces de pressions sur les structures sont beaucoup plus importantes en hydrodynamique, l'interaction fluide-structure devient non négligeable et devient une source supplémentaire qu'on ne peut plus ignorer.

2.3. L'influence du remplissage et d'éventuelles poches d'air

Comme nous l'avons signalé pour la cavitation, la présence d'une interface gaz-liquide représente une rupture d'impédance qui modifie sensiblement les conditions de propagation. Il peut y avoir réflexion sur l'interface, amortissement sur la poche gazeuse, qui se met elle aussi à osciller à son tour et joue le rôle d'un filtre acoustique complexe.

Nous allons, à partir de trois séries d'expériences conduites récemment à la Société Bertin & Cie, mettre en évidence chacun de ces aspects liés au bruit d'écoulements hydrodynamiques en conduite;

3. Bruits basse fréquence engendrés par la cavitation en conduites industrielles

Dans le cadre d'un travail ayant reçu l'aide de la DGRST, nous avons étudié le bruit basse fréquence produit par une poche de cavitation à l'aval d'un diaphragme normalisé de rapport de section 1/2, dans une veine cylindrique de 80 mm de diamètre et 2 m de long, entre deux cuves pressurisées. Les résultats obtenus sont résumés sur les 2 figures 1 et 2.

Nous disposons de 3 capteurs implantés suivant le schéma de la figure 1. Les résultats obtenus par ces 3 capteurs P_1, P_2, P_3 affleurant à la paroi, au droit de la source, immédiatement à l'amont de celle-ci et à l'aval, ont mis en évidence entre 10 et 2 000 Hz, tout d'abord une rupture d'impédance au niveau de la source entraînant une dissymétrie entre propagation amont et aval.

Les niveaux spectraux rencontrés immédiatement à l'amont de la singularité sont d'un ordre de grandeur inférieur à ceux mesurés immédiatement à l'aval et l'allure des spectres est différente (on met en évidence à l'amont du diaphragme des résonances qui ne se retrouvent pas à l'aval (cf. Fig. 1).

L'étude des niveaux globaux et des spectres au droit de la source montre également des différences avec les résultats obtenus en monophasique.

Dans le cas d'écoulements monophasiques, sans cavitation, les composantes de la perturbation de pression reçues par le capteur sont de 3 ordres :

- le bruit de proximité créé par la couche limite : son niveau global moyen (écart type des fluctuations) sera pour l'exemple de l'écoulement à 8 m/s que nous avons testé de 300 Pa environ, la fréquence caractéristique du spectre (largeur de la bande à niveau constant) sera de 200 Hz [1, 2];
- la perturbation locale de pression créée par l'introduction du diaphragme qui est liée au Δp singulier créé par

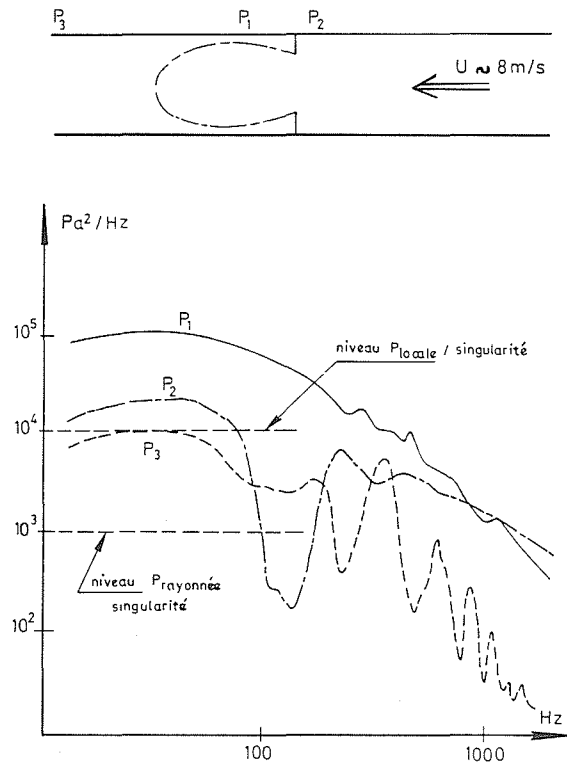


Figure 1. - Cavitation au droit d'un diaphragme.

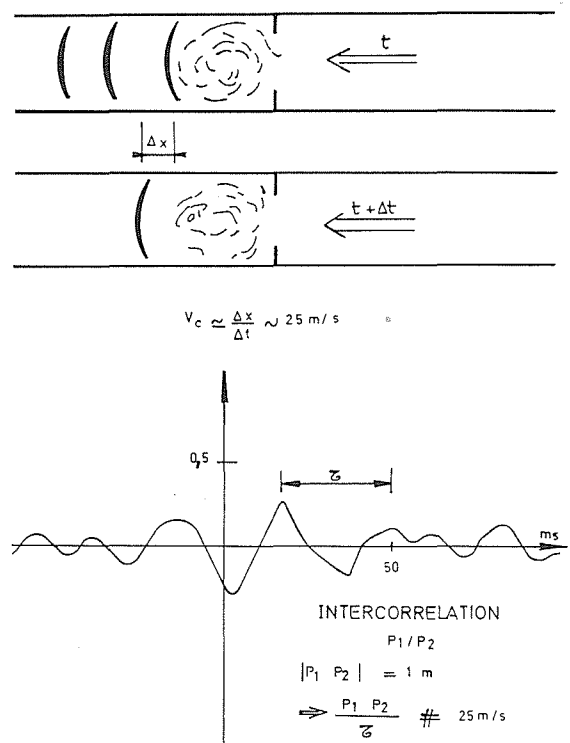


Figure 2. - Visualisation - Interprétation.

ce dernier. Dans notre cas, on peut considérer que Δp vaut une dynamique, soit 32 000 Pa pour 8 m/s. L'écart type maximum, au recollement du jet "sortant" du diaphragme, est de l'ordre de 0,1 Δp [3], soit 3 200 Pa. La fréquence de coupure qui correspond sensiblement

à un Strouhal de 0,2 calculé sur la différence des diamètres, vaut sensiblement 100 Hz ;

– la "source acoustique" [3, 4] qui a un niveau dix fois plus faible que la précédente, soit 320 Pa et une fréquence caractéristique de 10 Hz.

Les signaux recueillis en présence de cavitation donnent les niveaux sensiblement plus élevés : toujours pour la même vitesse, écart type de l'ordre de 10^4 Pascals et fréquence de coupure située vers 200 Hz. Le niveau spectral basse fréquence est augmenté d'environ 10 dB. La cavitation modifie donc sensiblement les caractéristiques de la source.

En résumé, on peut considérer que la cavitation a un rôle d'amplificateur à large bande des phénomènes hydrodynamiques locaux, auxquels viennent se superposer la rupture d'impédance signalée ci-dessus liée à la brusque variation de compressibilité du fluide.

Par ailleurs, on constate dans la gamme 0 - 200 Hz des niveaux très élevés, les allures des autres spectres ne suivant pas, comme signalé ci-dessus, les lois classiques du bruit enregistré à la paroi d'une conduite contenant un fluide en écoulement turbulent, ni celles gouvernant la source de pression d'une singularité en conduite.

On constate ainsi, à 4,2 m/s, que le niveau sans cavitation apparente qui est de 10^4 Pa/Hz à 15° et sans surpression augmente à la fois lorsque la pression augmente et lorsque la température augmente. Dans les trois cas, la fréquence de coupure à partir de laquelle le spectre décroît de façon continue est de 100 Hz.

Dans tous les autres cas, le niveau croît avec la vitesse à pression et température données, et pour une même vitesse, celui-ci décroît quand la pression augmente et croît quand la température augmente, donc croît avec l'intensité de cavitation.

La fréquence de coupure suit, elle, l'évolution inverse : elle croît quand la pression augmente et décroît quand la température augmente.

Ceci confirme bien que le phénomène enregistré est gouverné essentiellement par la figure de cavitation. En effet, à vitesse donnée, on peut considérer la "poche" de cavitation comme une cavité déformable, dont la fréquence moyenne est fonction inverse de sa longueur caractéristique, plus la pression est élevée, plus cette longueur est faible, donc plus la fréquence est élevée. Inversement, plus la température est élevée, plus le seuil de cavitation est atteint rapidement plus la longueur caractéristique est élevée et plus la fréquence est faible.

Parallèlement à la mesure des pressions pariétales, nous avons procédé à un enregistrement cinématographique du phénomène.

L'examen au ralenti du film à 1 000 images-seconde, pris dans le cas de l'écoulement à 6,8 m/s, a permis de visualiser des structures quasi-périodiques (zones plus foncées, normales à l'écoulement) se déplaçant de l'amont vers l'aval immédiatement derrière la poche de cavitation.

L'examen image par image du film montre que ces structures, faisant penser aux ondes se développant derrière un réacteur à gaz chauds, se propagent par trains de 3 ou 4, dans le cas étudié et disparaissent après avoir parcouru l'équivalent de 1 à 2 diamètres de veine, elles sont distantes entre-elles de $1,5 \cdot 10^{-2}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ m et leur vitesse de propagation est de l'ordre de 10 m/s à 30 m/s.

Notons qu'à cette vitesse, il faut entre 25 et 75 ms pour que "l'onde" atteigne le capteur placé à l'entrée de la cuve aval. Or, la "période" de l'intercorrélation réalisée dans des conditions voisines (à 7,8 m/s) est de l'ordre de 40 ms (cf. Fig. 2), ce qui est parfaitement compatible avec l'hypothèse envisagée à partir de cet examen visuel d'une onde "de choc" se propageant derrière la poche de cavitation.

4. Qualification acoustique d'un tunnel hydrodynamique à charge constante

La Société Bertin & Cie a réalisé un moyen d'essai hydrodynamique dont le schéma et les caractéristiques principales sont données sur la figure 3. Dans le cadre d'une utilisation particulière (interaction de l'écoulement avec une cavité adjacente), la qualification acoustique basse fréquence (0 - 100 Hz) a été effectuée entraînant diverses modifications.

Nous résumerons ici la partie de l'étude relative à la source identifiée comme liée à la vanne papillon disposée en aval de la veine d'essais. Plusieurs faits saillants sont à noter :

a) Dans un premier temps, la vanne était placée à l'amont immédiat du coude faisant la liaison avec le canal de retour. La perte de charge dans la vanne est très importante (de l'ordre de 1 bar) et le coude était siège d'une cavitation intense, donc comme nous venons de le voir, d'une source basse fréquence liée à la poche de cavitation dans le coude. Les figures 4 et 5 montrent l'influence de cette cavitation. Dans un cas (Fig. 4), la vanne était à l'amont du coude, dans le second (Fig. 5), elle était placée à l'aval du coude et celui-ci était en charge, la cavitation étant ainsi éliminée.

b) Les estimations de la source liée à la singularité que représente la vanne sans interactions avec les parois sont l'application des résultats présentés au § 1 :

- le niveau global local est de l'ordre de 100 mb
- le niveau global du champ rayonné est de l'ordre de 10 mb.

Sur le plan caractéristiques spectrales, la dimension caractéristique à prendre en compte est la longueur présentée par le papillon dans le sens de l'écoulement. Or, celle-ci varie avec l'ouverture du papillon, donc de la vitesse. L'ordre de grandeur des fréquences caractéristiques du champ rayonné (mesuré à plusieurs mètres en amont de la vanne) est de 1 à 10 Hz.

L'examen des figures 5 et 6 dans ce domaine de fréquence permet de juger de l'influence de la vitesse sur le niveau spectral : à 2 m/s, le papillon n'est ouvert qu'à 20 %, la dimension caractéristique est sensiblement l'épaisseur de ce papillon. La fréquence caractéristique est voisine de 4 Hz. A 4 m/s, le papillon est ouvert à 60 %, la dimension caractéristique à prendre en compte est 3 à 4 fois supérieure. la fréquence caractéristique sera donc inférieure à celle trouvée précédemment : on trouve en fait 2,7 Hz.

Entre 10 et 30 Hz, en tunnel hydrodynamique, on constate sur les planches 5 et 6 une bande de fréquence à niveau très élevé. La cohérence et la phase entre divers

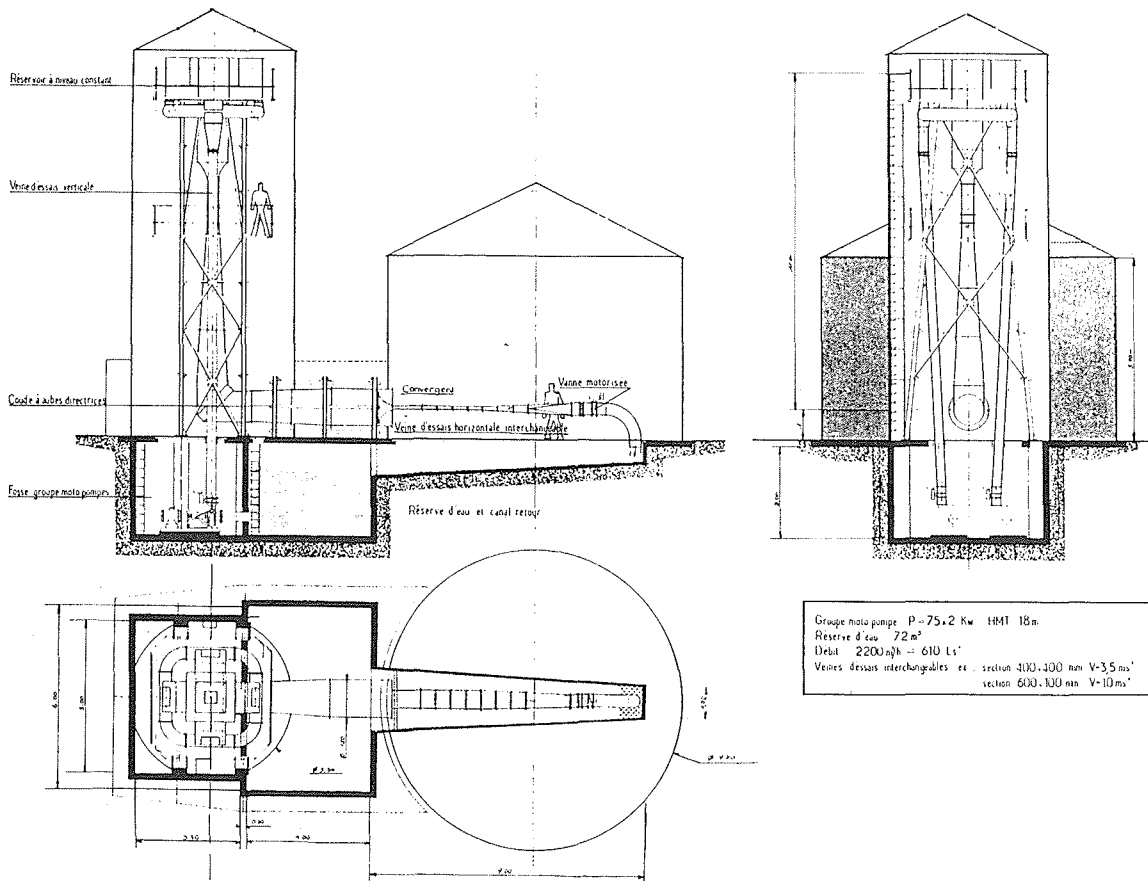
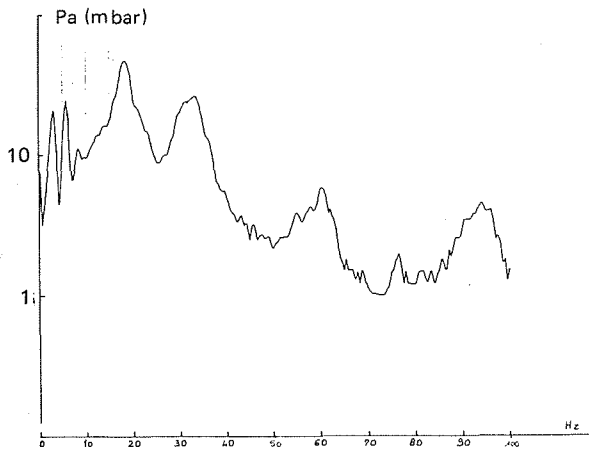
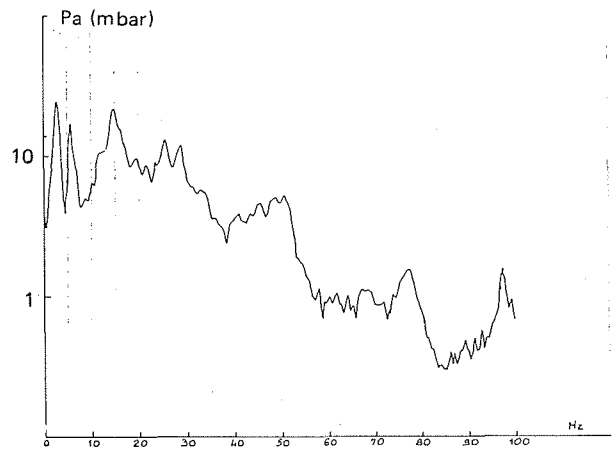


Figure 3. — Tunnel hydrodynamique.

Figure 4. — Point n° 1.
Capteur n° 1 (ras de paroi) — 4 m/s — 2 pompes.Figure 5. — Point n° 8
Capteur P8 (ras de paroi) — 4 m/s — 2 pompes-vanne après coude

capteurs relevées par ailleurs montrent qu'il s'agit de bruit rayonné. Cette bande de fréquence correspond au domaine spectral du champ de pressions locales associé à la vanne. On a mesuré par ailleurs les vibrations en paroi : dans cette gamme de fréquence, la cohérence est égale à 1 et la phase égale à π . Le mécanisme de génération le plus probable est donc, à notre avis le suivant : les fluctuations locales de pression excitent la structure au

droit de la vanne, il se crée un accrochage entre hydrodynamique et la réponse élastique de la structure. Cet accrochage engendre un champ de pression acoustique intense, sensiblement du même niveau que le champ défini plus haut, qui vient s'ajouter à celui-ci du fait de l'interaction fluide-structure que l'on pouvait négliger en aérodynamique, mais qui devient très important en hydrodynamique.

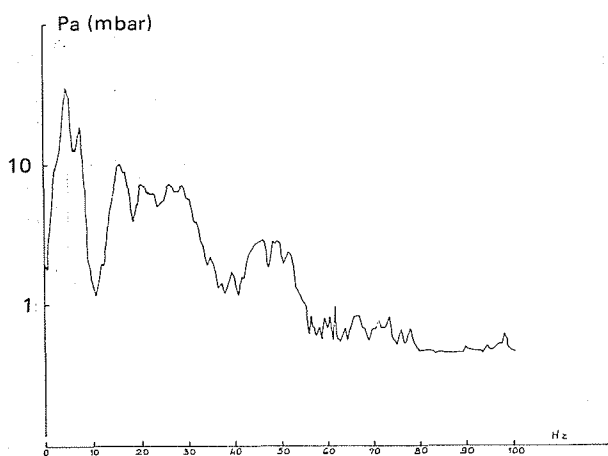


Figure 6. — Point n° 6
Capteur P1 (ras de paroi) — 2 m/s — 2 pompes-vanne après coude

5. Transmission d'ondes basses fréquences d'amplitude finie en conduite, avec et sans présence de poches d'air

Une installation expérimentale a été réalisée en tuyau PVC de 50 mm intérieur, 60 mm extérieur, de 50 m de longueur, suivant le schéma donné figure 7.

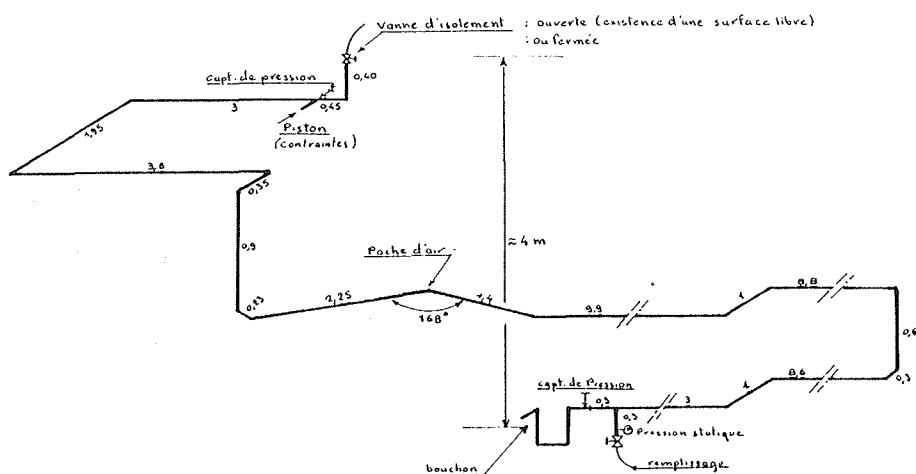


Figure 7. — Pente de la canalisation ≈ 3% — Distance en m.

A une extrémité la conduite était fermée par un matériau plus ou moins rigide, à l'autre extrémité il était possible, grâce à un piston, d'envoyer des ondes de pression d'amplitude pouvant atteindre plusieurs bars. Pour déterminer la fréquence propre de la conduite et son amortissement, on a étudié sa réponse à un Dirac de pression (mise en mouvement brutal du piston). Ces essais ont été faits avec une conduite pleine d'eau d'une part, et avec présence d'une poche d'air en point haut d'autre part. Les résultats sont donnés sur les figures 8 et 9. Ils ont permis de mettre en évidence d'une part l'influence de l'élasticité des parois, d'autre part l'influence de la rupture d'impédance due à la poche d'air.

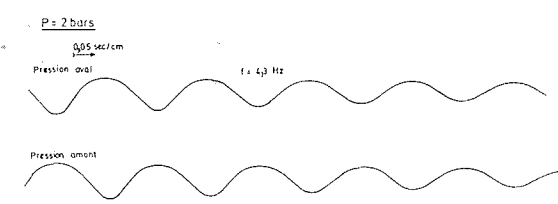


Figure 8

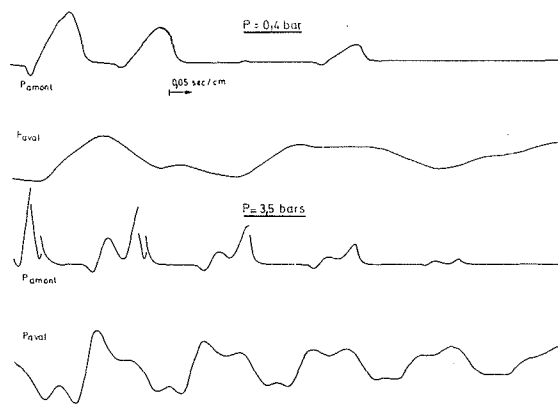


Figure 9

a) Influence de l'élasticité des parois :

On retrouve le problème bien connu dans l'étude de propagation des coups de bélier. L'accumulation d'énergie sous l'effet d'augmentation de la pression se fait à la fois par compressibilité et déformabilité des parois.

Si K est la compressibilité du fluide : $K = 1/\rho_0 C_0^2$
 D la distansibilité des parois,
le terme de compressibilité équivalente sera :

$$K + D = 1/\rho C^2$$

où C sera la célérité apparente du son à l'intérieur de la conduite. Pour une conduite de diamètre a , de module d'Young E , de coefficient de Poisson σ et d'épaisseur e ,

$$\text{on a : } D = \frac{a(1-\sigma^2)}{eE}$$

$$\text{d'où : } \frac{1}{\rho_0 C^2} = \frac{1}{\rho_0 C_0^2} + \frac{a(1-\sigma^2)}{eE}$$

et la formulation classique :

$$C = C_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{a \rho_0 C_0^2 (1-\sigma^2)}{eE}}}$$

Les essais de lâchers (impulsion de pression) donnent des célérités de l'ordre de 500 à 800 m/s alors que dans l'eau $C \cong 1500$ m/s. Les résultats sont en bon accord avec la formule ci-dessus, pour les essais avec conduite sous pression. Par contre, pour les essais à l'air libre ou en dépression, la célérité est inférieure à la valeur calculée. Ceci traduit en fait un autre effet : celui de la présence d'air non dissous qui joue vis-à-vis de l'eau le même rôle "d'accumulateur" que les parois déformables et augmente sa compressibilité apparente. C'est aussi un résultat bien connu depuis Strasberg et dont il faut tenir compte dans les circuits industriels où les fluides transportés sont rarement monophasiques.

b) Influence de la présence d'un volume d'air en point haut ou au voisinage d'une singularité :

Si l'air dispersé sous forme de bulle agit sur la célérité apparente, une poche dont les dimensions avoisinent le diamètre de la conduite crée une discontinuité dans la propagation comme nous l'avons vu dans l'étude de la cavitation. Nous retrouvons ce phénomène dans la présente étude (Fig. 9). Alors que les essais en conduite pleine donnaient des signaux en forme de sinusoïde amortie, il est possible ici de déterminer une fréquence fondamentale sur l'ensemble de la conduite. Les signaux enregistrés à chaque extrémité de la conduite, de part et d'autre de la poche d'air, qui avaient des formes sensible-

ment identiques sans poche d'air, sont cette fois totalement différents. Dans ce cas, les phénomènes peuvent en fait être schématisés de la façon suivante : sous l'effet du piston, la colonne d'eau entre le piston et la poche d'air se déplace en bloc, comme un corps incompressible. Elle agit elle-même comme un piston sur la poche d'air qui se met à osciller et devient une source secondaire mettant en mouvement le reste de la colonne d'eau à l'aval de la poche. C'est le signal venant de cette source secondaire qu'enregistre le capteur à l'extrémité opposée à la source d'excitation.

Conclusions

Nous venons, à la lumière de quelques expériences pratiques, de mettre en évidence quelques aspects spécifiques de la génération de bruit par les écoulements liquides en conduites. Ces résultats gardent cependant un aspect général et qualitatif. On peut prévoir que les phénomènes décrits ci-dessus prendront naissance dans des conditions déterminées. On ne peut encore quantifier avec précision leurs effets sur le plan du bruit. Des études plus approfondies et plus systématiques, sur le plan expérimental notamment, sont encore nécessaires. Celles-ci font partie des projets de recherches à moyen terme de la Société Bertin & Cie.

Références bibliographiques

- [1] CLINCH J.M. — *Measurements of the wall pressure field at the surface of a smoothwalled pipe containing turbulent water flow* U.S.V. 1969, vol 9 pp. 398, 419.
- [2] NICOLET J.B., SOUQUET J., MARTIN J.M. — *Etudes et essais en vue de caractériser les sources des vibrations aérodynamiques*. Rapport de fin de contrat D.G.R.S.T. 1972.
- [3] GIBERT R.J. — *Etude expérimentale de deux singularités d'un circuit*. Note C.E.A. N 1735.
- [4] HENRY R. — *Mise en évidence et analyse des instationnarités élastiques dans les écoulements internes*.