# PRESSURE FLUCTUATIONS INDUCED BY FLUID FLOW IN SINGULAR POINTS OF INDUSTRIAL CIRCUITS

R. J. GIBERT, B. VILLARD

*Département des Études Mécaniques et Thermiques,*
*C.E.A.-Centre d'Études Nucléaires de Saclay, B.P. nº 2, F-91190 Gif-sur-Yvette, France*

## SUMMARY

Flow singularities (enlargements, bards, valves, tees, ...) generate in the circuits of industrial plants wall pressure fluctuations which are the main cause of vibration.

Two types of pressure fluctuations can be considered:

— "Local" fluctuations: They are associated to the unsteadiness downstream from the singularity. These fluctuations may be characterized by frequency spectra, correlation length and phase lags. These parameters are used to calculate forces on the walls of the circuit.

— "Acoustic" fluctuations: The singularity acts as an acoustical source; its frequency spectrum and the acoustical transfer function of the circuit are needed to evaluate the acoustical level at any point.

Many studies have been made on the external flows and on the external acoustics (free jets, tubes arrays, ...). But, to our knowledge less work has been devoted to internal flow (especially to the acoustical aspect).

A methodical study of the most current singularities has been performed at C.E.A./D.E.M.T.:

— On one hand a theory of noise generation by unsteady flow in internal acoustics has been developed. This theory uses the basic ideas initiated by LIGHTILL. As a result it is shown that the plane wave propagation is a valid assumption and that a singularity can be acoustically modelled by a pressure and a mass-flow-rate discontinuities. Both are random functions of time, the spectra of which are determined from the local fluctuations characteristics.

— On other hand, characteristics of several singularities have been measured:
  - Intercorrelation spectra of local pressure fluctuations.
  - Autocorrelation spectra of associated acoustical sources (the measure of the acoustical pressures in the experimental circuit are interpreted by using the D.E.M.T. computer code VIBRAPHONE which gives the acoustical response of a complex circuit).

Experimental atmospheric air and water loops have been used. The Reynolds number has been changed between about $10^5$ and $10^6$; the Mach number between about 0,01 and 0,5.

Simple laws with dimensionless parameters are formulated and can be used for the estimation of the acoustical and mechanical vibration level of a circuit with given singularities.

I. Introduction

Les circuits parcourus par des fluides sont le siège de phénomènes vibratoires.

Ces phénomènes sont, dans la majorité des cas, engendrés par les fluctuations de la pression du fluide aux parois qui créent sur les struc tures mécaniques des efforts fluctuants.

Ces efforts excitent les résonances de ces structures et peuvent parfois occasionner des déplacements et des contraintes fluctuantes telles que des ruptures (par fatigue, par chocs, etc....) se produisent.

Ainsi un certain nombre d'incidents a eu lieu dans les circuits de grosses installations industrielles et en particulier dans les circuits de refroidissement des réacteurs nucléaires (centreurs CHINON II - échangeurs CHINON III etc....).

Pour qu'une excitation mécanique des structures soit importante, il faut bien sûr que l'amplitude des fluctuations de pression soit grande, mais aussi que les longueurs de corrélation de ces fluctuations ne soient pas trop petites vis-à-vis des dimensions caractéristiques de ces structures.

Il apparaît donc que la turbulence établie dans un tube droit parcouru par un fluide, qui est un phénomène à très petite échelle et d'intensité assez faible, aura un effet négligeable sur les structures. En revanche, des fluctuations à plus grande longueur de corrélation et beaucoup plus intenses peuvent prendre naissance en certains points particuliers du circuit, que nous appellerons d'une façon générale, singularités.

Au niveau d'une singularité, l'écoulement turbulent sera qualifié d'instationnaire, par opposition avec le régime quasi-stationnaire, de la turbulence établie.

Il existe de nombreuses singularités dans les circuits industriels. Elles peuvent être classées en deux types :

a) Les singularités à conditions aux limites variables : pompes, soufflantes, structures vibrantes dans un écoulement, etc....

b) Les singularités à conditions aux limites fixes, que l'on peut diviser en deux sous-groupes :

- les singularités à "écoulement externe" : obstacles fixes placés dans l'écoulement (tubes, faisceaux, ailettes, etc....).

- les singularités à "écoulement interne" : variations géométriques des conduits (variations de section, coudes, réunions de deux ou plusieurs conduits, etc....).

De nombreuses études sont actuellement consacrées aux obstacles dans les écoulements (faisceaux de tubes d'échangeurs, etc....), ainsi qu'aux fluctuations de pression engendrées par les machines tournantes.

Les études concernant les singularités à "écoulement interne" sont plus rares, bien qu'elles contribuent souvent d'une façon importante au niveau de fluctuation de pression relevé dans les circuits.

Un ensemble d'études a été développé au C.E.A./D.E.M.T.concernant les principales singularités simples rencontrées dans un circuit industriel :

élargissements brusques ou progressifs, jonctions d'écoulements en T, coudes, vannes, etc....

Un ensemble cohérent de résultats théoriques et expérimentaux a été dégagé dont nous présentons ici les principales caractéristiques illustrées de quelques exemples.

Pour plus de détail, nous renvoyons le lecteur à la référence (9) où l'ensemble des résultats obtenus est consigné sous forme d'un catalogue directement utilisable au niveau d'un projet d'installation industrielle, par exemple.

## II. Distinction entre les deux aspects de l'effet de singularité dans un circuit.

Soit un circuit contenant une singularité. Les caractéristiques spectrales des fluctuations de pression varient sensiblement suivant la région du circuit dans laquelle on effectue la mesure :

1) A l'aval immédiat de la singularité, l'écoulement est très perturbé. Il s'agit d'une turbulence à grande échelle, son effet sur les structures peut être important.

Les spectres d'autocorrélation des fluctuations de pression sont en général à large bande, les gammes de fréquences caractéristiques évoluent proportionnellement à la vitesse "moyenne"de l'écoulement. Les fonctions de cohérence entre deux signaux issus de deux capteurs évoluent avec la distance entre ces derniers.

2) Dans le reste du circuit (à l'amont et loin à l'aval de la singularité), la turbulence de l'écoulement est d'intensité faible et l'on observe essentiellement un phénomène de nature acoustique : les spectres d'autocorrélation des fluctuations de pression comportent des pics dont la fréquence n'évolue quasiment pas avec la vitesse de l'écoulement. Il s'agit des pics de résonance acoustique du circuit. De plus les fonctions de cohérence sont égales à 1 dans de larges plages de fréquence (quelle que soit la distance entre les capteurs).

Ceci veut dire que les signaux mesurés sont obtenus à partir d'une même source aléatoire "vue à travers la fonction de transfert acoustique du circuit".

Les singularités devront donc être caractérisées suivant deux points de vue :

- Du point de vue "local" : il s'agit d'analyser le phénomène décrit au paragraphe 1, qui ne dépend que de la géométrie et de l'écoulement au voisinage de la singularité.

- Du point de vue "acoustique" : il s'agit d'analyser le phénomène décrit au paragraphe 2 et plus particulièrement la source acoustique associée qui, comme le phénomène local, ne dépend que de la géométrie et de l'écoulement au voisinage de la singularité.

III. Caractéristiques générales des fluctuations locales engendrées par les singularités. (considérations basées sur des résultats expérimentaux)

A - Importance de la connaissance de certaines grandeurs caractéristiques de l'écoulement permanent.

Il est important de connaître certaines caractéristiques de l'écoulement permanent au niveau de la singularité. En effet, comme nous l'illustrerons plus loin, on peut former, à partir de grandeurs permanentes bien choisies, des variables et fonctions adimensionnelles telles que spectres, fréquences adimensionnelles, etc... Les caractéristiques spectrales et interspectrales des fluctuations peuvent alors s'exprimer en fonction de ces variables adimensionnelles suivant des lois standard où n'intervient que la nature de la singularité (Il est à remarquer d'ailleurs que souvent d'une singularité à une autre les lois adimensionnelles sont fort voisines).

Les principales grandeurs permanentes dont on a besoin sont :

a) Une pression de référence $\Delta P$ à laquelle nous rapportons les fluctuations de pression. Cette pression est souvent la différence des pressions statiques dans deux zones particulières de la singularité.

b) Une vitesse de référence V : on prend souvent la vitesse moyenne la plus grande dans la singularité.

c) Une ou plusieurs dimensions caractéristiques auxquelles nous rapportons les variables d'espace intervenant par exemple dans les lois de corrélation et qui interviennent également avec la vitesse V dans la détermination des fréquences caractéristiques des fluctuations.

Pour une singularité donnée, le choix des bonnes grandeurs permanentes est à rapprocher du choix d'un bon modèle représentant le mécanisme de l'instabilité dans la singularité.

Pour les singularités que nous avons analysées, l'expérience a permis de comprendre ces mécanismes et donc de choisir de bonnes grandeurs permanentes.

En ce qui concerne les autres singularités, en l'absence de toute donnée expérimentale, l'extrapolation de certains mécanismes du même type permet vraisemblablement une estimation honnête des caractéristiques des fluctuations.

B - Analyse des caractéristiques générales des grandeurs statistiques associées aux fluctuations locales.

1) Ecart-type (valeur quadratique moyenne) des fluctuations :

C'est la grandeur statistique la plus simple associée aux fluctuations. Elle mesure "l'intensité". Cet écart-type est rapporté à la pression de référence $\Delta P$.

$\sigma/\Delta P$ est une fonction de $\vec{r}$, $\vec{r}$ étant le point de la paroi de la singularité où l'on fait la mesure de pression fluctuante.

En général il existe pour la singularité une direction privilégiée qui est la direction de l'écoulement moyen dans le circuit dans lequel elle est placée. Les variations de $\sigma/\Delta P$ dans cette direction sont appelées variations

longitudinales ; les variations dans les directions perpendiculaires, variations transversales.

Longitudinalement $\sigma/\Delta P$ passe par un maximum dans une zone située à une distance moyenne $l_{max}$ du début de la singularité. Le rapport $l_{max}/\Delta$ ($\Delta$ étant la dimension de référence de la singularité) dépend de la nature de cette dernière. C'est l'une des caractéristiques intrinsèque de la singularité, ainsi que la longueur de la zone $\Delta l_1/\Delta$.

Transversalement $\sigma/\Delta P$ est constant si la singularité est à une symétrie géométrique de révolution, ou passe par un maximum dans une zone de longueur $\Delta l_2/\Delta$ si la singularité est très dissymétrique (réunions d'écoulements, coudes, etc....).

Une autre caractéristique de la singularité est le $(\sigma/\Delta P)max$. Il est de 10 à 20 % si la singularité comporte un décollement franc (élargissement brusque, réunions d'écoulements ....). Ceci signifie que les fluctuations "crêtes à crêtes" de la pression sont de l'ordre de $\Delta P$. Le $\Delta P$ choisi correspond alors à la différence des pressions extrêmes entre lesquelles évolue la pression mesurée dans la singularité.

Pour les singularités du type diffuseur à 7° où il n'y a pas de décollement franc, $(\sigma/\Delta P)_{max}$ est en général plus faible.

2) Spectres d'autocorrélation des fluctuations :

a) Coordonnées adimensionnelles :

On utilise la vitesse V de référence et en général la dimension caractéristique $\Delta$ du 1°).

On définit alors une fréquence adimensionnelle ou nombre de Strouhal :

$$\bar{s} = \frac{\nu\Delta}{V} \quad (\nu \text{ étant la fréquence})$$

et une densité spectrale adimensionnelle :

$$\mathcal{F}(\bar{s}) = \frac{\mathcal{S}(\nu)}{\Delta P^2} \frac{V}{\Delta} \quad (\mathcal{S}(\nu) \text{ étant la densité spectrale})$$

$$\int_0^\infty \mathcal{S}(\bar{s})\, ds = \left(\frac{\sigma}{\Delta P}\right)^2$$

b) Allure des spectres :

La densité spectrale adimensionnelle est indépendante de la vitesse du fluide dans la singularité, de l'échelle de la singularité et si l'on a bien choisi V et $\Delta$, de la "géométrie" de la singularité. Nous appelons "géométrie" d'une singularité, l'ensemble des rapports des dimensions caractéristiques de la singularité (par exemple pour un élargissement brusque, la géométrie est définie par le rapport diamètre d'entrée/diamètre de sortie).

L'allure de $\mathcal{S}(s)$ est décroissante comme pour les spectres de turbulence. Une forme de type "Dryden" les représentent en général assez bien :

$$\mathcal{S}(s) = \frac{K}{1 + (s/s_c)^2} \quad \text{avec } K = \left(\frac{\sigma}{\Delta P}\right)^2 \frac{2s_c}{\pi}$$

$s_c$ est appelé nombre de Strouhal de coupure. Il s'agit également d'une caractéristique intrinsèque de la singularité.

c) Evolution spatiale :

Nous avons vu au 1°) que l'intensité des fluctuations variait avec la position du capteur. Le spectre et notamment $s_c$ varie également. En général on est amené à distinguer des zones géométriques de la paroi du voisinage de la singularité caractérisée par un certain $s_c$. La zone la plus importante est la zone où les fluctuations sont maximum. En général le $s_c$ correspondant est de l'ordre de 0,2 à 0,5. Mais il existe d'autres zones (par exemple : aval immédiat d'un élargissement brusque) où le $s_c$ est nettement plus faible ($\sim$ 0,01 à 0,02). Ces zones, bien que les fluctuations de pression y soient moins intenses peuvent jouer un rôle important en ce qui concerne le comportement acoustique de la singularité.

3) Spectres d'intercorrélation des fluctuations :

Nous utilisons pour étudier la corrélation spatiale des fluctuations de pression, la fonction de cohérence et la fonction phase. La fonction de cohérence est le rapport du module du spectre d'intercorrélation de deux signaux et de la racine carrée du produit des spectres d'autocorrélation de chacun des deux signaux.

La fonction phase est la phase du spectre d'intercorrélation.

Les caractéristiques de ces fonctions varient suivant que l'on se trouve dans l'une ou l'autre des zones dont on a parlé au paragraphe c) précédent.

Nous nous contenterons d'analyser ici la zone où les fluctuations sont maximum.

a) Fonction de cohérence :

La fonction de cohérence peut être tracée en fonction du nombre de Strouhal s défini précédemment. Elle se présente en général sous la forme d'un plateau limité supérieurement par un nombre de Strouhal voisin du nombre de Strouhal de coupure $s_c$.

Le niveau C de ce plateau est fonction de la position relative des deux capteurs que l'on corrèle :

- Corrélation longitudinale :

Considérons deux capteurs situés sur une même droite parallèle à l'écoulement moyen dans la singularité. C dépend de la distance $\Delta l$ de ces deux capteurs. On peut rapporter $\Delta l$ à la dimension caractéristique $\Delta$ définie précédemment (ou à une autre dimension caractéristique $\Delta_1$). La courbe $C\left(\frac{\Delta l}{\Delta}\right)$ est alors du type exponentiel décroissant :

$C = e^{-k_1\left|\frac{\Delta l}{\Delta_1}\right|}$. $k_1$ est indépendant de la vitesse du fluide et si $\Delta_1$ est bien choisi, de la géométrie de la singularité ; $k_1$ est donc une caractéristique intrinsèque de la singularité.

On peut également parler d'une longueur de corrélation longitudinale $\lambda_1$ définie par $C = e^{-\left|\frac{\Delta l}{\lambda_1}\right|}$ avec $\lambda_1 = \frac{1}{k_1}\ \Delta_1$.

- Corrélation transversale :

On peut définir de la même façon une longueur de corrélation transversale $\lambda_2$ telle que $\lambda_2 = \frac{1}{k_2} \Delta_2$. $\Delta_2$ étant une autre dimension caractéristique de la singularité.

b) Fonction phase :

La fonction phase peut être tracée en fonction de s ou mieux en fonction de $s' = \frac{\nu \Delta l}{V}$.

- La fonction phase longitudinale se présente alors sous la forme d'une droite dont la pente est indépendante de $\Delta l$ et de la vitesse de fluide. Ce déphasage proportionnel à s' est l'image d'un phénomène de transport des fluctuations à une vitesse $V_t$ telle que $\frac{V_t}{V} = \alpha$. $\alpha$ est donné par la pente de la droite :

$$\alpha = \frac{2\pi}{\text{pente (rad)}}$$

En général $\alpha$ est de l'ordre de 0,7 à 0,9.

- Transversalement, les fluctuations sont en général en phase.

c) Influence des nombres de Reynolds et de Mach :

Le fait que les grandeurs adimensionnelles définies précédemment ne dépendent ni de la vitesse et de la nature du fluide, ni de l'échelle de la singularité, montre l'indépendance des résultats vis-à-vis des nombres de Reynolds et de Mach. Il est cependant à remarquer que les expériences qui servent de base à ce rapport ont balayé une gamme de Reynolds de $0,5 \times 10^5$ à $2 \times 10^6$ et une gamme de nombres de Mach de 0,01 à 0,5 environ.

Les expériences ont été réalisées dans l'air à la pression atmosphérique ou dans l'eau.

## IV. Caractéristiques générales des sources acoustiques associées aux singularités.

### A - Mise en évidence théorique d'une source acoustique associée à une singularité.

A la référence 6 nous avons mis en évidence un second membre dans l'équation de propagation des ondes, en linéarisant les équations de Navier-Stokes et en distinguant les fluctuations de nature acoustique et les fluctuations de nature turbulente (incompressibles).

Si l'on néglige, par exemple, les effets de la vitesse permanente sur la propagation du son, l'équation s'écrit :

$$(1) \qquad \Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\bar{\rho} \nabla_i \nabla_j \widetilde{v_i' v_j'} \quad \text{(voir également référence 1)}$$

Le 1er membre de l'équation est l'opérateur acoustique classique agissant sur la pression fluctuante. Le second membre est un terme source qui est fonction uniquement des vitesses turbulentes $v'_i$ ($\bar{\rho}$ représente la masse volumique moyenne du fluide, $\widetilde{v'_i v'_j}$ la partie fluctuante du produit $v'_i v'_j$)

Nous voyons donc qu'au niveau des singularités d'un circuit, qui engendrent de fortes fluctuations de nature turbulente (fluctuations locales), le terme $\bar{\rho}\ \Delta_i\ \Delta_j\ \widetilde{v'_i\ v'_j}$ sera important, alors qu'il sera négligeable dans les autres parties du circuit.

Les singularités jouent donc le rôle de sources acoustiques vis-à-vis du circuit.

B - Théorie monodimensionnelle.

Nous avons étudié au chapitre précédent les caractéristiques générales des fluctuations locales engendrées par les singularités dans un circuit. Nous avons en particulier caractérisé leur spectre par un nombre de Strouhal de coupure $s_c$ au maximum égal à 0,5. L'essentiel de l'énergie de la fluctuation se situe en dessous de $s_c$.

Or si l'on compare la longueur d'onde acoustique à la fréquence $\nu_c$ ($s_c = \frac{\nu c \Delta}{V}$) à la dimension caractéristique $\Delta$ de la singularité nous avons :

$$\frac{\lambda_c}{\Delta} = \frac{1}{s_c M}$$

(M étant le nombre de Mach de l'écoulement).

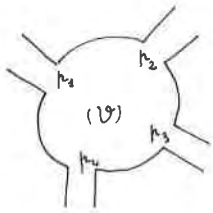
Or le nombre de Mach dans les installations industrielles est en général petit devant 1, la longueur d'onde des fluctuations générées par la singularité est donc grande vis-à-vis des dimensions de cette dernière. C'est-à-dire que l'on se situe bien en dessous de la fréquence de coupure acoustique des tubes constituant le circuit.

La propagation acoustique dans le circuit ne peut donc se faire que par ondes planes.

D'autre part la plupart des singularités se situent dans un tube (élargissements brusques, diffuseurs, coudes, etc....). Le volume d'écoulement perturbé a donc une entrée et une sortie. Le problème acoustique devient donc complètement monodimensionnel et nous montrons (réf. 1) que la singularité peut alors être caractérisée acoustiquement par une discontinuité $\Delta p(t)$ de la pression acoustique (p représentant alors la pression fluctuante acoustique en phase dans une section droite des tubes du circuit) et une discontinuité $\Delta q$ (t) du débit masse acoustique.

Ces deux discontinuités sont des fonctions aléatoires du temps que l'on caractérise par leur spectre d'autocorrélation.

Dans le cas plus général où la singularité communique par plusieurs entrées et sorties avec le reste du circuit, nous pouvons généraliser les notions précédentes en considérant qu'il existe N relations entre les pressions et débits acoustiques à l'entrée des N tubes au niveau de la singularité, comportant des seconds membres qui constituent des sources.




Ces relations peuvent être écrites sous la forme :

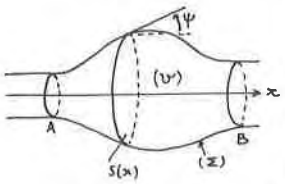
$$\begin{cases} P_i - p_1 = \Delta p_i \text{ (i variant de 2 à N)} \\ \sum_i^N q_i = \Delta q \end{cases}$$

<u>Remarque</u> : les $\Delta q$ et $\Delta p_i$ sont des fonctions aléatoires du temps en général corrélées entre elles.

1°) <u>Expressions des discontinuités $\Delta p$ et $\Delta q$ en fonction des fluctuations locales induites par une singularité à une entrée et une sortie de même direction</u> :

A la référence (1) nous avons explicité les expressions des fonctions $\Delta p$ (t) et $\Delta q$ (t) en intégrant l'équation (1) dans une tranche de volume perpendiculaire à la direction 0x de l'entrée et de la sortie. En posant : $T_{xx} = \bar{\rho}\, \widetilde{v'_x{}^2}$.

Nous obtenons :




$$(2)\begin{cases} \Delta q\ (t) = \dfrac{1}{c^2}\ \dfrac{d}{dt} \displaystyle\int_{(V)} T_{xx}\ d\tau \\ \Delta p\ (t) = \displaystyle\int_{(\Sigma)} p' \sin\psi\ \frac{d\sigma}{S} - \int_{(V)} T_{xx}\ \frac{dS}{dx}\ \frac{d\tau}{S^2} \end{cases}$$

$(\Sigma)$ = paroi de $(V)$

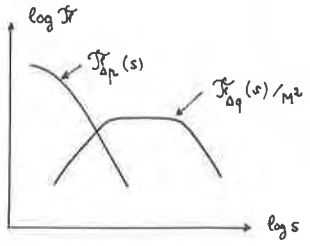
p' désigne la fluctuation locale de pression que nous pouvons définir d'une façon exacte par : $p' = p - \frac{1}{S} \int_{(S)} p\ d\sigma$

S (x) désigne la section de la tranche d'abscisse x, $\psi$ l'angle de la tangente à la paroi avec 0x ; c est la vitesse du son.

Une analyse dimensionnelle montre que les spectres adimensionnels $\mathcal{F}_{\Delta q}(s)$ et $\mathcal{F}_{\Delta p}(s)$ des fonctions $\Delta q(t)$ et $\Delta p(t)$, peuvent être mis sous la forme :

$$\begin{cases} \mathcal{F}_{\Delta q}(s) = M^2\ s^2\, \mathcal{F}(s) \\ \mathcal{F}_{\Delta q}(s) = \mathcal{F}'(s) \end{cases}$$

M étant le nombre de Mach de référence de l'écoulement $\mathcal{F}(s)$ et $\mathcal{F}'(s)$ sont deux spectres adimensionnels caractéristiques liés aux fluctuations turbulentes dans la singularité, donc d'allure décroissante en s (de type Dryden par exemple). Le graphique ci-contre montre l'allure de $\mathcal{F}_{\Delta q}(s)$ et $\mathcal{F}_{\Delta p}(s)$ et en particulier qu'aux très bas nombres de Strouhal la singularité se comporte comme une discontinuité de pression acoustique et que pour des nombres de



Strouhal plus élevés elle se comporte, si le nombre de Mach n'est pas trop petit (pratiquement >0,2 - 0,3), comme une discontinuité de débit acoustique.

D'autre part, nous voyons que l'écart-type de la discontinuité $\Delta q(t)$ évolue avec la vitesse de référence de l'écoulement dans la singularité en $V^3$ ($M\Delta P$) alors que la discontinuité $\Delta p(t)$ évolue comme les fluctuations locales c'est-à-dire en $V^2$ ($\Delta P$).

L'importance de la discontinuité $\Delta q(t)$ est donc d'autant plus grande que la vitesse de l'écoulement est élevée.

Cependant dans la plupart des cas industriels les nombres de Mach de l'écoulement sont faibles (surtout dans les écoulements de liquides) et l'on s'intéresse en général aux basses fréquences. C'est donc la discontinuité $\Delta p(t)$ qui est la plus importante.

C - Considérations sur la méthode de détermination expérimentale des sources acoustiques associées aux singularités.

L'estimation des discontinuités de débit et pression acoustique associées à une singularité est théoriquement possible à partir des fluctuations locales. Cependant il faut pour cela connaître le spectre d'intercorrélation des pressions fluctuantes en tout point de la paroi de la singularité (pour déterminer $\Delta p(t)$) et du terme $T_{ij}$ dans tout le volume perturbé (pour déterminer $\Delta q(t)$). Ceci est en général fort lourd.

Si donc les formules du chapitre B) peuvent être utiles pour obtenir un ordre de grandeur des sources acoustiques, la seule façon précise d'obtenir ces dernières, est de faire une mesure acoustique directe.

Pour cela, on place la singularité à étudier dans un circuit et l'on mesure les fluctuations de pression engendrées soit à l'amont de la singularité, soit loin à l'aval. L'interprétation de ces mesures acoustiques posent un certain nombre de problèmes :

1°) Il faut tout d'abord que dans le circuit expérimental la singularité soit l'unique source d'excitation acoustique du circuit.

2°) On ne mesure pas la source acoustique mais la réponse du circuit à cette source. Il est donc nécessaire de connaître parfaitement la fonction de transfert acoustique du circuit pour pouvoir déterminer correctement à partir des spectres des fluctuations de pression acoustique dans le circuit, le spectre de la source.

Pour cela il faut que les conditions aux limites du circuit soient acoustiquement bien définies et il faut en général disposer d'un code de calcul (voir réf. 7).

3°) Il faut également que la fonction de transfert soit favorable dans la zone du circuit où l'on effectue la mesure. C'est-à-dire que son module ne soit pas trop petit devant 1, que les résonances du circuit ne soient pas trop serrées dans la gamme de fréquence étudiée, etc....

4°) Il faut enfin prendre un certain nombre de précautions pour que l'écoulement dans la singularité ne soit pas altéré (prévoir une certaine

longueur de tube droit à l'aval et à l'amont de la singularité, étudier l'éventualité de couplages entre les fluctuations acoustiques et l'écoulement perturbé, etc....).

On pourra par exemple consulter la référence 1 qui décrit en détail de telles études expérimentales.

D - Caractéristiques générales des fonctions $\Delta p(t)$ et $\Delta q(t)$.

1 - Discontinuité $\Delta p(t)$ :

Nous avons déjà vu que le spectre $\mathcal{S}_{\Delta p}(\nu)$ de $\Delta p(t)$ pouvait être tracé en coordonnées adimensionnelles de la même façon que les spectres des fluctuations de pression locales. Nous choisirons en général les mêmes coordonnées adimensionnelles : le nombre de Strouhal $s = \frac{\nu\Delta}{V}$ et la densité spectrale adimensionnelle :

$$\mathcal{F}_{\Delta p}(s) = \frac{\mathcal{S}_{\Delta p}(\nu)}{\Delta p^2} \frac{V}{\Delta}$$

Nous avons vu qu'alors $\mathcal{F}_{\Delta p}(s)$ est indépendant du débit dans le circuit et que son allure est du type "turbulence". On peut définir comme pour les fluctuations locales, un nombre de Strouhal de coupure $s_c$ qui est en général plus petit que celui des fluctuations locales (souvent de l'ordre de 0,01).

L'écart type adimensionnel $\sigma/\Delta P$ est en général de l'ordre de $10^{-2}$ (1/10ème des fluctuations locales).

2 - Discontinuité $\Delta q(t)$ :

Le spectre $\mathcal{S}_{\Delta q}(\nu)$ de $\Delta q(t)$ peut également être tracé en coordonnées adimensionnelles :

$$s = \frac{\nu\Delta}{V} \quad \text{et} \quad \mathcal{F}_{\Delta q}(s) = \frac{\mathcal{S}_{\Delta q}(\nu)}{\Delta p^2} \left(\frac{c}{S}\right)^2 \frac{V}{\Delta}$$

(S est une section caractéristique des tubes au niveau de la singularité).

Nous avons vu qu'alors $\mathcal{F}_{\Delta q}(s)$ était proportionnel au carré du nombre de Mach $M = V/c$.

Pour les singularités créant une forte zone perturbée à l'aval du circuit, $\mathcal{F}_{\Delta q}(s)/M^2$ présente un plateau en Strouhal de l'ordre de $10^{-2}$. Les nombres de Strouhal de coupure $s_1$ et $s_2$ qui limitent ce plateau sont de l'ordre de 0,1 à 0,5.

Remarque : Les domaines en Strouhal des spectres des fonctions $\Delta p(t)$ et $\Delta q(t)$ étant en général disjoint, on pourra supposer sans faire d'erreur importante que ces fonctions sont décorrélées.

Les ordres de grandeur donnés dans ce paragraphe n'ont qu'une valeur indicative. En effet les paramètres adimensionnels utilisés étant adaptés aux fluctuations locales, les spectres adimensionnels acoustiques sont plus dépendants de la "géométrie" et de la nature des singularités.

V. Conclusions

Les études effectuées au C.E.A./D.E.M.T. ainsi que dans d'autres laboratoires, nous ont permis de dresser un premier catalogue de singularités d'écoulement couramment rencontrées dans le circuit.

Les graphique ci-après, qui en sont tirés, illustrent, pour l'élargissement brusque, la façon dont sont présentés les résultats.

Cependant ce catalogue est loin d'être complet et de nombreuses études tant expérimentales que théoriques sont encore nécessaires pour pouvoir prévoir avec une bonne précision les fluctuations de pression engendrées par les écoulements perturbés dans les circuits, notamment en ce qui concerne des singularités plus complexes ou des singularités couplées très proches les unes des autres.

Références

[1] M.J. LIGHTHILL "On sound generated aerodynamically" (Proc. Roy. Soc. Vol. 211, 1952 - pp.564-587 and Vol. 224, 1954 - pp.1-32)

[2] C.L. MORFEY "Sound transmission and generation in ducts with flow" (Int. of Sound and Vibration Research - Univ. of Southampton" March 70)

[3] A. FORTIER "Ecoulementsinstationnaires dans les circuits" (Congrès AIRN 1969)

[4] R. HENRY "Mise en évidence et analyses des instationnarités élastiques dans les écoulements internes" (Thèse de Doctorat, Paris VI, 1971)

[5] A. ROUSE, F. ASCE, V. JEZDINSKY "Fluctuation of pressure in conduit expensions" (J. Hydraulics Division - Proceeding of the Am. Soc. of Liv. Engineers, 1966)

[6] R.J. GIBERT "Etudes expérimentales de deux singularités d'un circuit" (Note CEA - 1735 - 1974)

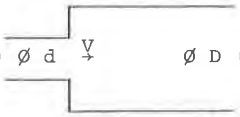
[7] R.J. GIBERT, M. LIVOLANT i G. BAYLAC "Calcul de l'amplification acoustique dans les circuits complexes" (La Houille Blanche n° 5 - 1971)

[8] R.J. GIBERT, B. VILLARD "Sources acoustiques associées à la réunion de deux écoulements dans un circuit" (Congrès F.A.S.E. 75, Oct. 1975)

[9] R.J. GIBERT "Etude des fluctuations de pression dans les circuits parcourus par des fluides" (Note CEA n° 1925, 1976)

## ELARGISSEMENT BRUSQUE

1°) Principales grandeurs permanentes de référence




largeur de référence : D-d

paramètre caractéristique : d/D

Vitesse de référence : vitesse moyenne du fluide dans le tube amont : V

Pression de référence : recompression $\Delta P$ entre l'amont et l'aval.

$$\boxed{\Delta P = \frac{Q^2}{\rho S_1 S_2}\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)} \quad (Q = \text{débit de masse})$$

2°) Fluctuations locales de pression de paroi (voir graphique)

- Coordonnées adimensionnelles des spectres

$$\begin{cases} s = \dfrac{\nu(D-d)}{V} \\ F(s) = \dfrac{\mathcal{S}(\nu)}{\Delta P^2} \dfrac{V}{D-d} \end{cases}$$

- Fonction de cohérence :

$$\boxed{C\left(\frac{\Delta\ell}{d}, \Delta\theta\right) \simeq e^{-0,85 \left|\frac{\Delta\ell}{d}\right| \left|\frac{\Delta\theta}{\pi/4}\right|}}$$

( $\Delta\ell$ = distance entre les deux sections droites du tube contenant les deux points de mesure, $\Delta\theta$ = écart angulaire azimutal de ces deux points).

Remarque : La cohérence dépend assez peu de la fréquence dans une large plage

- Fonction phase

$$\boxed{\Phi\left(\frac{\nu\Delta\ell}{V}\right) \simeq -\frac{2\pi}{0,7}\frac{\nu\Delta\ell}{V}}$$

3°) Source acoustique associée (voir graphiques)

- Discontinuité de la pression acoustique : $\mathcal{F}_{\Delta P}(s) = \dfrac{\mathcal{S}_{\Delta p}(\nu)}{\Delta P^2} \dfrac{V}{D-d}$

- Discontinuité du débit acoustique : $\mathcal{F}_{\Delta q}(s) = \dfrac{\mathcal{S}_{\Delta q}(\nu)}{\Delta P^2} \left(\dfrac{c}{S_2}\right)^2 \dfrac{V}{D-d}$

M = nombre de Mach = $\dfrac{V}{c}$

c = vitesse du son

4°) Remarques générales : résultats obtenus pour :

$$0,5 \times 10^5 < R_e = \frac{\rho V d}{\mu} < 1,5 \times 10^6 \quad \text{et} \quad 0,05 < M < 0,5$$

Fig. 1

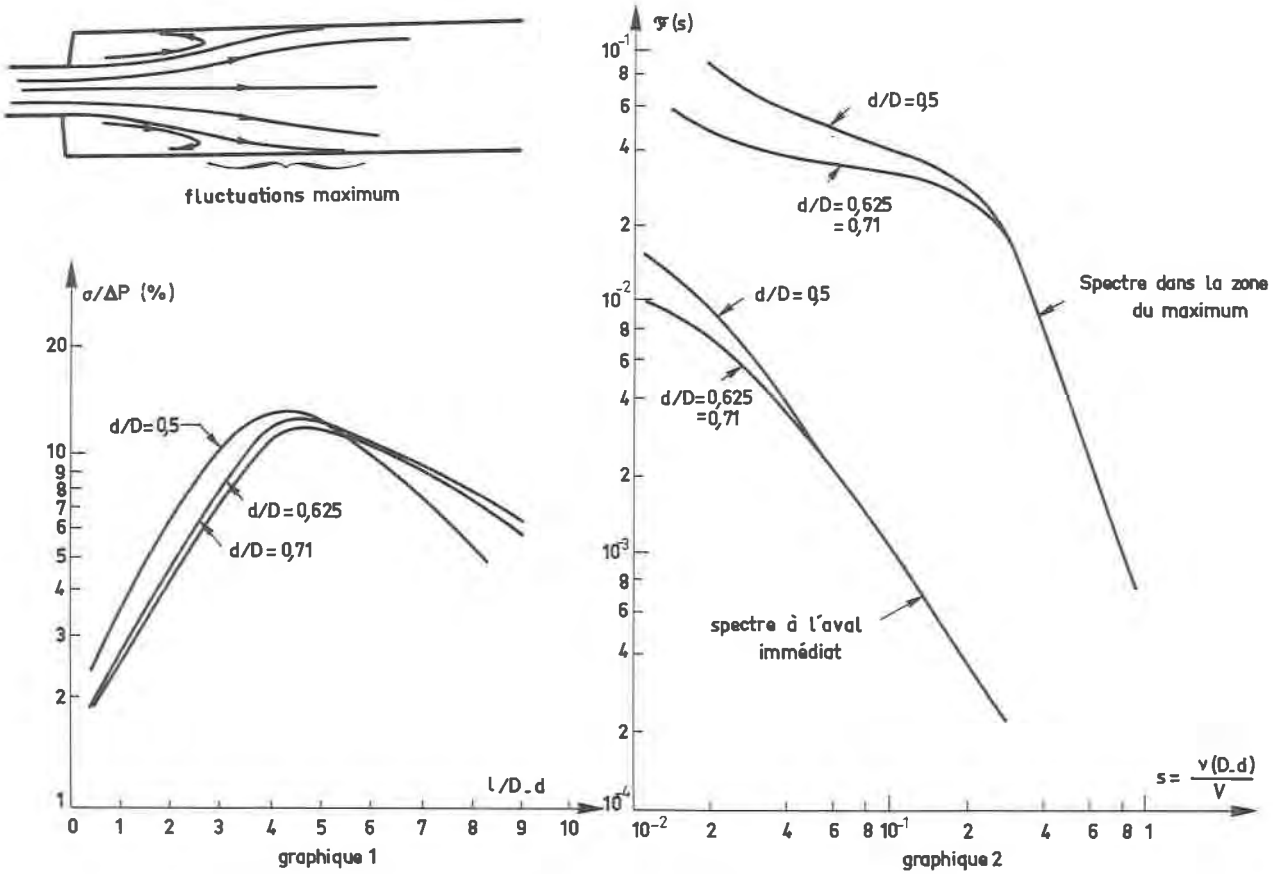



FIG.2_ ELARGISSEMENT BRUSQUE
(fluctuations de pression locales)

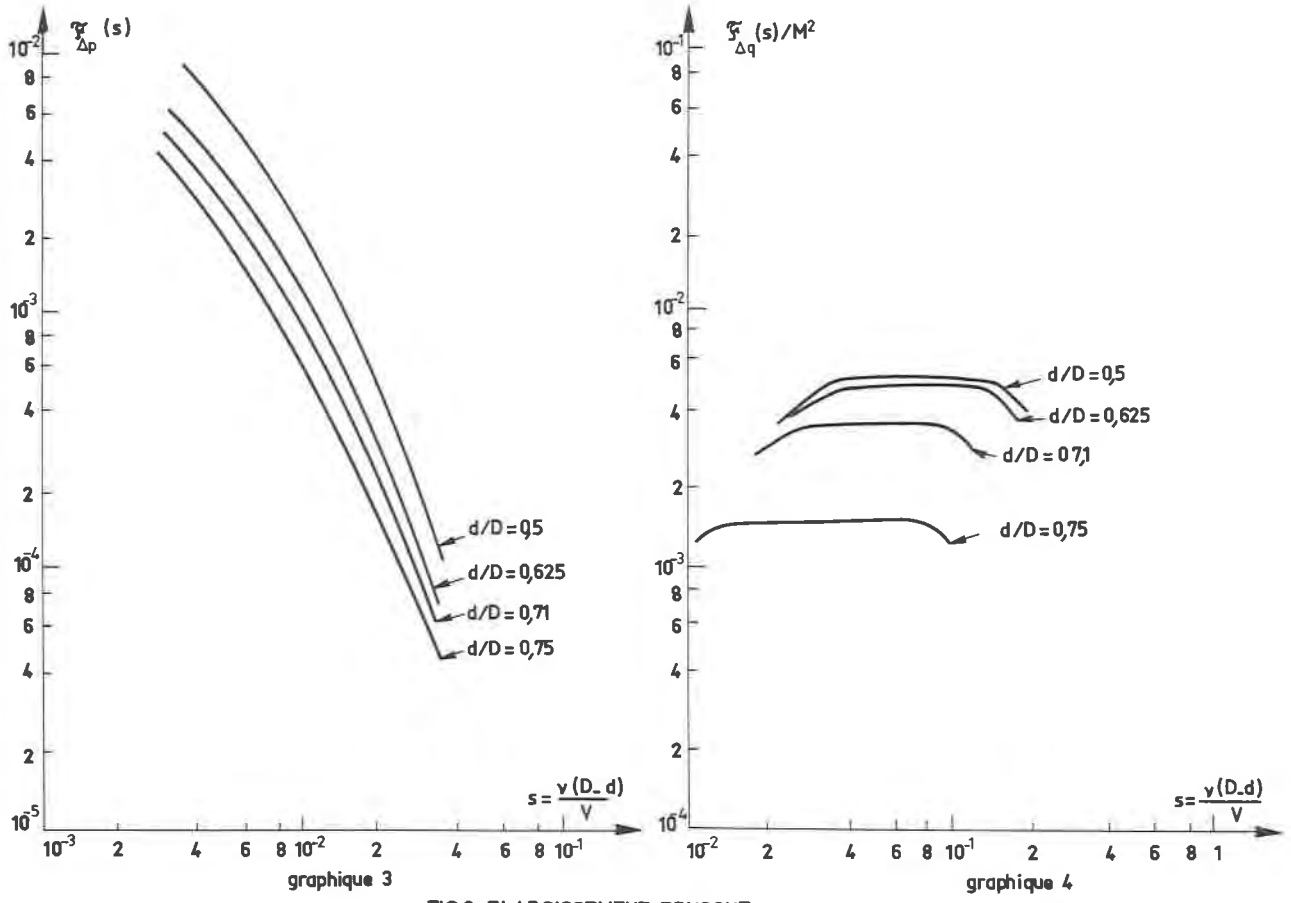



FIG 3. ELARGISSEMENT BRUSQUE

(source acoustique)