

Le bruit de cavitation

Yves Lecoffre

YLec Consultants

24, Boulevard de la Chantourne

F 38700 La Tronche

E-mail : ylec@wanadoo.fr

<http://perso.wanadoo.fr/ylec/>

La cavitation est le phénomène de vaporisation des liquides sous l'effet de dépressions, généralement dues à de grandes vitesses d'écoulement. Elle se produit dans la plupart des machines tournantes et des composants hydrauliques fixes, comme les vannes, dont la plage utile de fonctionnement est limitée par l'apparition ou le développement du phénomène.

La cavitation s'accompagne en effet le plus souvent des nuisances suivantes :

- génération de bruits intenses. Dès que le phénomène apparaît, il est courant d'enregistrer une augmentation du bruit moyen de l'ordre de 20 à 40 dB, ceci dans toute la gamme des fréquences, de l'audible à plusieurs Méga Hertz (Figure 1). Dans certaines conditions extrêmes, on a pu mesurer des niveaux de bruit aérien de 125 dB(A) à 1 mètre d'une zone de cavitation dans un écoulement d'eau à 60 m/s.
- destructions des surfaces. L'érosion due à la cavitation peut obliger à réparer fréquemment les machines, même si celles-ci sont correctement dimensionnées d'un strict point de vue de leurs performances hydrodynamiques;
- pertes de performances. Lorsque le phénomène est trop développé, c'est-à-dire lorsque la vapeur a envahi les composants, les machines subissent des chutes importantes de leurs performances pouvant, à la limite, aller jusqu'à les rendre totalement inutilisables.

La figure ci-dessous montre l'accroissement spectaculaire du bruit émis par un sous-marin lorsque la cavitation se développe sur son propulseur en raison d'un accroissement de 50% de la vitesse du bâtiment.

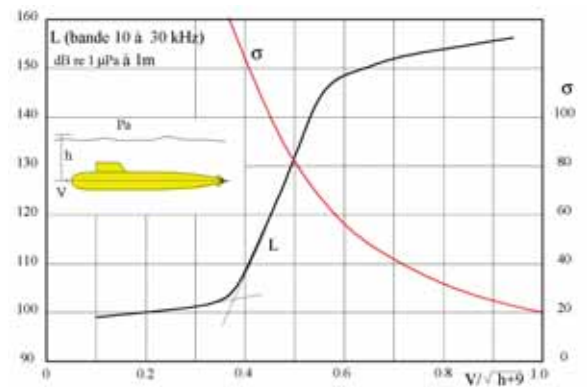


Fig. 1 : Bruit haute fréquence émis par un sous-marins US de la seconde guerre mondiale. Strasberg et Sette.

Ce court article a pour objectif d'expliquer les mécanismes générateurs de bruit, de donner quelques ordres de grandeur caractéristiques du phénomène et d'indiquer quelques méthodes pratiques permettant d'éliminer le phénomène ou de réduire son intensité. On présente également une méthode originale et bon marché de détection de la cavitation.

Cavitation : quelques exemples

La cavitation apparaît dans un liquide lorsque la pression devient localement inférieure ou égale à la tension de vapeur. Ceci peut se produire sous l'effet de grandes vitesses d'écoulement ou d'ondes de pression.

Tube de Venturi

Considérons un écoulement dans un tube de Venturi (Figure 2). On peut écrire entre la section amont (am) et le col (t) l'équation de Bernoulli.

$$p_{am} + \frac{1}{2} \rho V_{am}^2 = p_t + \frac{1}{2} \rho V_t^2$$

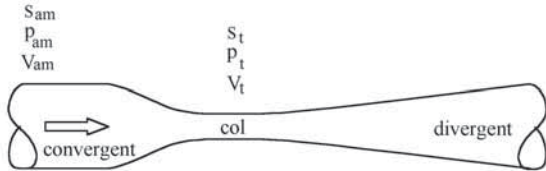


Fig. 2 : Tube de Venturi.

D'où l'on tire la valeur de la pression au col :

$$p_t = p_{am} - \frac{1}{2} \rho V_t^2 \left(1 - \frac{V_{am}^2}{V_t^2} \right)$$

ou :

$$p_t = p_{am} - \frac{1}{2} \rho V_t^2 \left(1 - \frac{S_t^2}{S_{am}^2} \right)$$

Si, pour une pression p_{am} donnée, celle, par exemple d'un réservoir, on augmente le débit, et donc la vitesse au col du Venturi, la pression au col diminuera selon la figure ci-dessous.

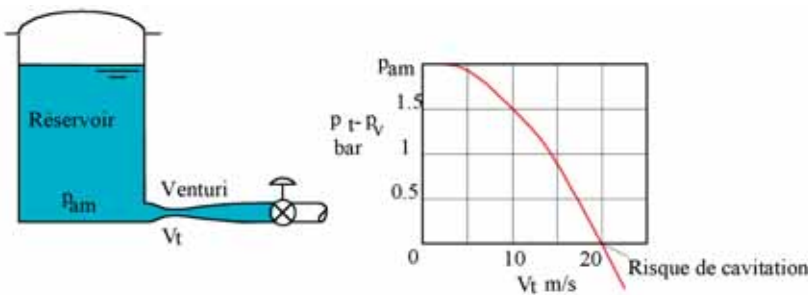


Fig. 3 : Installation d'un Venturi à l'aval d'un réservoir

A débit nul, cette pression est égale à la pression amont. A mesure que la vitesse V_t augmente en raison de l'ouverture de la vanne, la pression p_t diminue. Pour une certaine valeur critique de V_t , cette pression p_t atteint la tension de vapeur du liquide. Des bulles ou de cavités de vapeur quasi permanentes apparaissent. Le liquide se vaporise. C'est le phénomène de cavitation.

Dans notre exemple, la pression à l'amont du Venturi est de 2 bar (200 kPa). La cavitation apparaît donc pour une vitesse de l'ordre de 20 m/s.

Le même processus peut se produire sur un profil d'aile ou sur un aubage de machine tournante. Ceci résulte de

ce que la pression à l'extrados décroît lorsque la vitesse augmente selon une loi analogue à la précédente.

Cavitation de mélange

La cavitation dite de mélange apparaît dans les couches de cisaillement de jets liquides. Il se crée dans un tel écoulement des turbulences très importantes qui se traduisent par la formation de structures tourbillonnaires. Au centre de ces tourbillons fugitifs, dont la formation est aléatoire, la pression est inférieure à la pression générale de l'écoulement. On a donc cavitation alors que la pression moyenne est largement supérieure à la tension de vapeur, souvent de plusieurs bar dans les installations classiques d'adduction d'eau, allant jusqu'à atteindre plusieurs centaines de bar dans les installations hydrauliques de puissance.

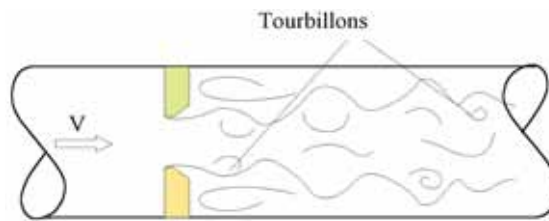


Fig. 4 : Cavitation de mélange

Une telle configuration se rencontre en particulier dans les vannes et, plus généralement, dans les couches de cisaillement des dissipateurs d'énergie. Certains auteurs ont joliment qualifié ce phénomène de «tourbillon fulgurant».

Coups de bélier et ondes de dépression

On rencontre également le phénomène de cavitation lorsque le liquide est soumis à des pulsations rapides de pression. La fermeture brutale d'une vanne sur un circuit, par exemple provoque un coup de bélier d'intensité égale à ρcV , le produit de l'impédance acoustique de la ligne ρc ($1.5 \cdot 10^6$ pour l'eau) par la vitesse d'écoulement avant fermeture, V . Cette mise en dépression peut être suffisamment importante pour provoquer, à l'aval de la vanne, une vaporisation du liquide. Le choc en retour de la colonne de liquide peut alors engendrer des dégâts et des bruits considérables. Stopper un écoulement à 1 m/s conduit à abaisser la pression locale d'environ 15 bars ! Il arrive que ce phénomène soit auto entretenu, comme par exemple dans certaines tuyauteries d'eau domestique qui peuvent être mises en vibration de manière spectaculaire et particulièrement bruyante.

Dans tous ces exemples, dont la liste n'est pas exhaustive, on constate systématiquement que la cavitation ne se produit qu'à partir d'une valeur critique de l'un des paramètres (vitesse d'écoulement, amplitude de vibrations, temps de fermeture de vanne par exemple).

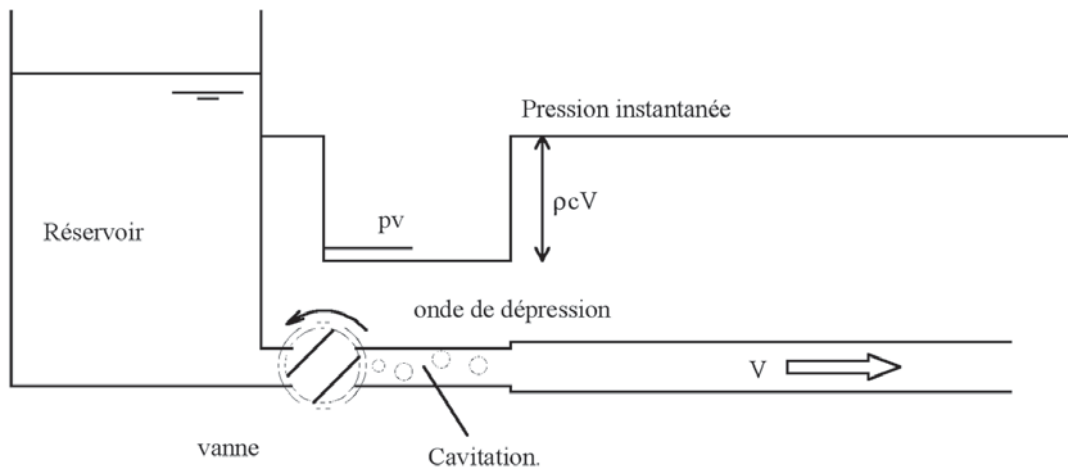


Fig. 5 : Cavitation par coup de bélier. Fermeture instantanée d'une vanne.

Ce comportement est caractéristique du phénomène et explique l'intérêt que l'on porte en laboratoire à détecter son apparition et à quantifier ses effets.

Les types de cavitation

La cavitation apparaît sous des formes très variées qui ont fait l'objet de classifications plus ou moins codifiées. Cet aspect du problème est important, car de la forme et de la dimension des cavités de vapeur dépend l'intensité et la fréquence des bruits engendrés.

La cavitation à bulles séparées

C'est la cavitation typique des profils à faible incidence. Elle se produit près du profil, sous forme de bulles sphériques ou hémisphériques, initiées à partir de «germes», assimilables à des microbulles, initialement présents dans le liquide.

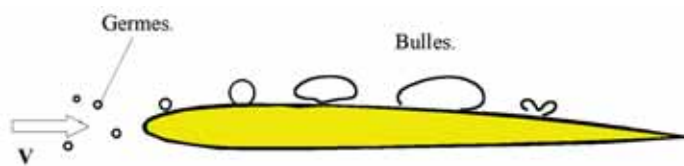


Fig. 6 : Cavitation à bulles séparées

Le nombre de bulles engendrées dépend donc de la teneur en germes. Avec peu de bulles, les bruits sont des impacts séparés très violents. Lorsque le nombre de bulles augmente, la fréquence de répétition de ces impacts augmente ainsi que le bruit. Le bruit passe ensuite par un maximum puis diminue lorsque le nombre de germes est tel que le grossissement des bulles est freiné par la présence de bulles voisines.

La cavitation à poches

Lorsque l'incidence d'un profil augmente, on constate que la cavitation à bulles se transforme brutalement en cavitation à poche. La cavitation à poche est liée à un décollement laminaire situé en général au bord d'attaque.

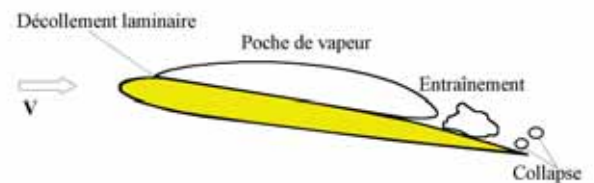


Fig. 7 : Cavitation à poche

Cette cavitation est auto-entretenu et est donc indépendante de la concentration en germes. Le bruit qu'elle produit, toujours moins intense que celui d'une cavitation à bulles, résulte d'un mécanisme d'entraînement de la vapeur à l'aval de la cavité. Les bulles ainsi formées se condensent brutalement et sont à l'origine de bruits. Ce bruit est d'ailleurs modulé par la fréquence des lâchers qui est caractérisée par un nombre de Strouhal.

La cavitation de mélange

Comme nous l'avons vu, cette cavitation se présente sous forme de bulles séparées. Elles dépendent donc de la teneur en germes. Ceci explique que le bruit émis dépend de la nature du liquide et du gaz qu'il contient sous forme libre ou dissoute.

De manière générale, quel que soit le type de cavitation, le bruit résulte de la croissance et de la décroissance des bulles, ce dernier phénomène étant largement prépondérant surtout en haute fréquence.

Mécanismes de création du bruit

Cycle des bulles

On assimilera tous les types de cavitation à une cavitation à bulles séparées et on s'intéressera à la pression engendrée par une telle bulle pendant son cycle de grossissement et de condensation.

Le mouvement d'une bulle de vapeur sphérique soumise à une pression extérieure égale à p est solution de l'équation de Rayleigh. R est le rayon de la bulle, R' et R'' ses dérivées première et seconde, ρ la masse volumique

du liquide.

$$RR'' + \frac{3}{2}R'^2 = \frac{p_v - p}{\rho}$$

Pour que la bulle puisse grossir, elle doit impérativement

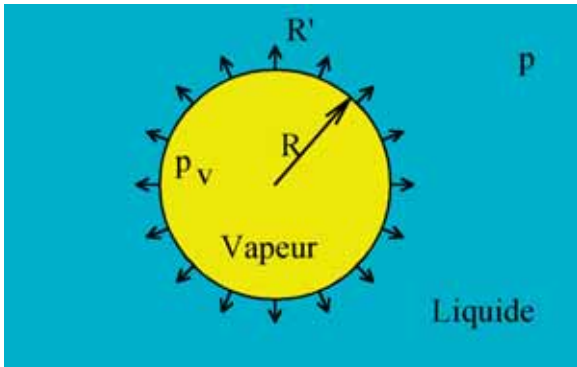


Fig. 8 : Bulle de vapeur en expansion

être soumise à une pression p inférieure à la tension de vapeur et en général négative. Cette zone de dépression est en général suivie d'une zone de recompression. Le grossissement de la bulle ralentit, puis s'inverse. Cette phase de condensation, extrêmement brutale, s'appelle le *collapse*.

On donne sur la figure ci-dessous le cycle de vie d'une bulle de vapeur soumise à une pression négative, puis à une pression positive.

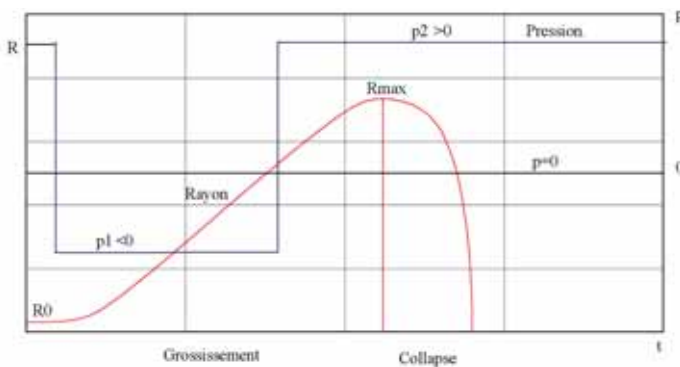


Fig. 9 : Evolution d'une bulle dans un champ de pression. Pression interne nulle.

L'analyse de cette courbe est intéressante pour les raisons suivantes :

- Le grossissement de la bulle est beaucoup plus lent que le collapse.
- Dans la phase collapse, les vitesses de paroi augmentent indéfiniment jusqu'à devenir théoriquement infinies. Le collapse crée donc un choc, et même une onde de choc qui se propage dans le liquide. Le pic de pression constitue une impulsion de Dirac, susceptible d'exciter toute structure avoisinante.

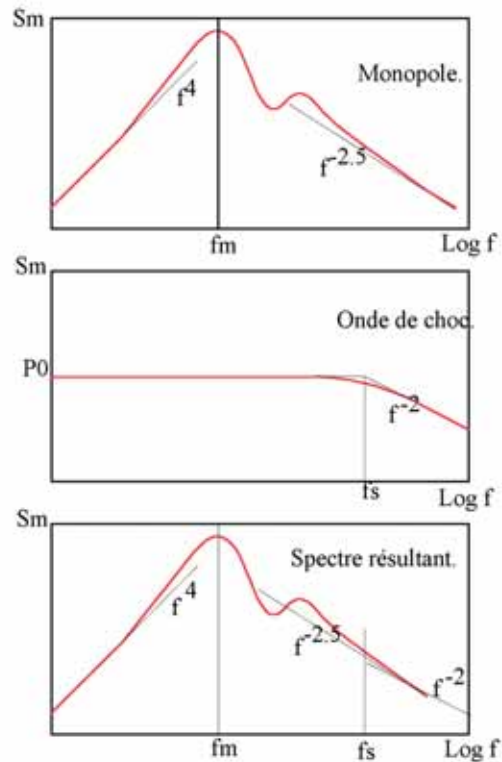


Fig. 10 : Densité spectrale d'énergie d'une bulle unique. [Lovik et al]

Bien que quelques mécanismes viennent freiner la fin du collapse, et plus particulièrement les gaz incondensables et la vapeur contenus dans la bulle ainsi que la compressibilité du liquide, ce modèle représente bien la vie d'une bulle et explique pourquoi elle est tellement bruyante.

Dans le domaine fréquentiel, on peut considérer que le bruit émis par une bulle est la somme de deux contributions, la source dite monopole qui correspond à la variation du volume et l'onde de choc générée lors de la fin du collapse. La figure 10 donne la contribution acoustique de chaque phénomène et leur somme sous forme d'une densité spectrale d'énergie.

Le maximum du spectre correspond à la fréquence f_m inverse de la durée de vie de la bulle. Le niveau du spectre de l'onde de choc et la fréquence f_s , pour laquelle la densité de puissance chute, sont fonction de la quantité de gaz présent dans la bulle avant le collapse.

Temps caractéristiques

Quelques exemples permettront de fixer les ordres de grandeur des fréquences caractéristiques f_m et f_s à considérer.

Les plus grandes machines hydrauliques ou les plus grandes hélices entraînent des masses de vapeur assimilables à des bulles sur des distances de quelques dizaines de centimètres à des vitesses typiques de 40 m/s. La durée de vie de ces structures est donc d'environ

1/100 s. Les fréquences fondamentales les plus basses seront par conséquent de 100 Hz. Le bruit de cavitation peut être aller d'une succession de chocs violents à un crissement modulé selon le développement et le type de cavitation.

Dans les robinets de réglage de circuits hydrauliques à haute pression, les bulles de quelques dixièmes de mm sont convectées sur des distances millimétriques. Il est courant de créer des pertes de charge de 100 bars sur un seul étage et donc d'atteindre des vitesses de 150 m/s. Les fréquences fondamentales f_m émises par la cavitation sont alors de 100 kHz. Le bruit de cavitation est alors un sifflement aigu.

On voit donc qu'il est nécessaire de calculer les ordres de grandeur relatifs à la machine ou à l'élément de machine étudiés avant de parler de hautes ou basses fréquences.

En ce qui concerne f_s , on a montré que les effets de compressibilité du liquide se font sentir typiquement pour des rayons de bulles égaux à environ 1/100 du rayon maximal R_{max} .

Sans entrer dans le détail des calculs, on peut donc considérer que le temps caractéristique de l'onde de choc est inférieur à 1 % du temps de Rayleigh τ , qui correspond à la totalité du collapse.

Dans les deux exemples ci-dessus, on considérera que les rayons des bulles et les pressions p_2 loin des bulles lors du collapse sont respectivement de 50 mm et 1 bar dans le cas de la grande machine et de 0.5 mm et 50 bars dans celui de la vanne de détente.

Le temps τ de Rayleigh est donné par :

$$\tau = 0,915R_{max}\sqrt{\frac{\rho}{p_2}}$$

Les temps de Rayleigh correspondants sont donc respectivement 4.6 ms et 6.5 μ s. Les fréquences caractéristiques de l'onde de choc, f_s seront donc, avec ces hypothèses, respectivement 22 kHz et 15 MHz.

Ceci confirme le fait que la présence de hautes fréquences dans un écoulement est quasiment synonyme de présence de cavitation, et ceci quelle que soit la taille de l'appareillage hydraulique considéré. Néanmoins, les fréquences à considérer dépendent à la fois des dimensions de la cavitation et de l'environnement dans lequel elle se produit.

Dans la pratique, le nombre de bulles est élevé et il est nécessaire d'ajouter les contributions de chaque bulle ou cavité de vapeur, mais la forme du spectre de puissance obtenu reste analogue à celle du spectre d'énergie.

Comment diminuer le bruit de cavitation ?

Diminuer le bruit de cavitation est intéressant pour le confort des opérateurs ou pour éviter la détection acoustique sous-marine. Il est également intéressant, car

il permet de limiter les risques d'érosion, qui résulte elle-même de l'effet cumulé des impacts des bulles.

Les techniques pratiques sont malheureusement limitées et sont toujours coûteuses.

La première méthode consiste à augmenter la dimension des machines. Il est bien entendu évident qu'une machine de plus grande taille effectuant un même travail aura ses aubages moins chargés que ceux d'une machine plus petite. Dans le domaine de la discrétion acoustique sous marine, réduire la vitesse des bâtiments ou des engins produit le même effet pour les mêmes raisons.

La seconde méthode consiste à mettre en œuvre plusieurs étages de composants. Cette technique est souvent utilisée pour les vannes de détente ou pour certaines pompes et pompes turbines.

On appelle σ de début de cavitation de la vanne le paramètre adimensionnel suivant :

$$\sigma_i = \left(\frac{p_{av} - p_v}{\Delta p} \right)_i$$

p_{av} étant la pression à l'aval de la vanne, p_v la tension de vapeur du liquide et Δp la perte de charge de la vanne. L'expérience montre que le début de cavitation apparaît pour des valeurs de σ_i de l'ordre de 1.

Lorsque le taux de détente de la vanne dépasse 1, on est amené à mettre en œuvre un certain nombre d'étages en série, chacun ayant un taux de détente de 2. Si σ est le coefficient de cavitation de la vanne prise dans son ensemble, on montre que le nombre n d'étages à mettre en œuvre est égal à :

$$n = \frac{\text{Log} \left(1 + \frac{1}{\sigma} \right)}{\text{Log} \left(1 + \frac{1}{\sigma_i} \right)}$$

C'est ainsi qu'il suffit d'utiliser une vanne à 7 étages pour éviter toute cavitation lorsque le taux de détente global est de 100 (ou le σ de 0.01).

La figure 11 donne un exemple d'une telle vanne, appelée «Multivar».

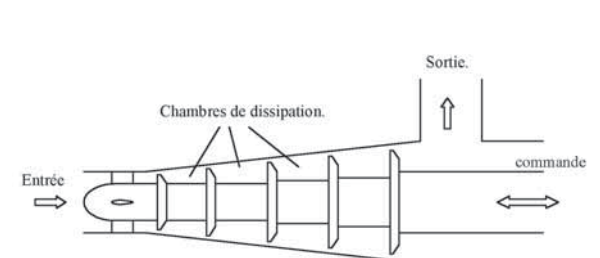


Fig. 11 : Vanne multi-étagée «Multivar».

Détecteur de cavitation par glissement des fréquences

La seule manière pratique d'être certain qu'un écoulement est le siège de cavitation est de s'assurer que le bruit qu'il produit contient des fréquences élevées, c'est à dire généralement supérieures à 50 kHz.

Les méthodes de traitement du signal modernes et souvent onéreuses consistent à mesurer les spectres de bruit, voire des spectres glissants qui permettent de relier la phase d'un phénomène au bruit qu'il émet.

Une idée originale due à Danel permet de réaliser à moindre coût un détecteur de cavitation transportable, fiable et facile à utiliser. Cet appareil permet de détecter la cavitation à l'oreille.

L'appareil est constitué d'une céramique piézo-électrique placée à l'extrémité d'un tube guide d'ondes, cette céramique recevant le signal acoustique émis par la cavitation. Ce signal est amplifié. Un générateur sinusoïdal à fréquences discrètes permet d'obtenir des signaux à haute fréquence ω , par exemple 20, 50 et 100 kHz. Il suffit alors de multiplier ce signal de référence par le signal provenant de l'écoulement cavitant pour rendre audible le bruit de cavitation haute fréquence.

En effet, si on appelle ω_c l'une des fréquences émises par la cavitation, le signal $S(t)$ résultant de la multiplication s'écrit :

$$S(t) = a \sin \omega t \times b \sin(\omega_c t + \varphi)$$

On connaît la relation trigonométrique relative aux produits de sinus :

$$\sin A \times \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)]$$

On peut donc écrire :

$$S(t) = \frac{ab}{2} [\cos((\omega - \omega_c)t - \varphi) - \cos((\omega + \omega_c)t + \varphi)]$$

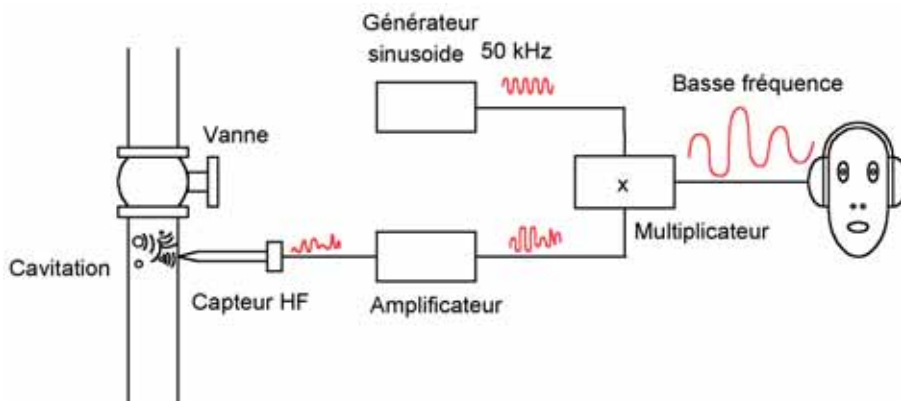
On voit finalement que le signal est la somme de deux signaux, l'un de fréquence élevée égale à :

$$f_1 = \frac{\omega - \omega_c}{2\pi}$$

Le second contenant des composantes à basse fréquence autour de la fréquence du générateur,

$$f_2 = \frac{\omega + \omega_c}{2\pi}$$

Le signal de fréquence f_2 est ultrasonore et inaudible. Il est d'ailleurs filtré par le casque d'écoute. Au contraire, que le signal de fréquence f_1 est parfaitement détectable.



Ce système a été réalisé chez Neyrtec il y a quelques années et s'est avéré particulièrement efficace et facile à utiliser. Il a ensuite été construit sous la forme d'un appareil de poche par la société AID à Grenoble.

••• Une telle vanne est entièrement calculable en utilisant des codes spécifiques. Elle permet de résoudre les problèmes de bruit de cavitation de manière optimisée avec un minimum d'encombrement. Elle a été mise en oeuvre sur des circuits d'eaux chaude et froide, des boucles d'essais en sodium ou dans des circuits hydrauliques de puissance fonctionnant en huile. Dans cette dernière application, une vanne à 8 étages de 30 mm de diamètre nominal a permis de détendre un débit de 7 l/s de 120 bars à 1 bar sans aucune cavitation et donc sans aucun bruit.

D'autres vannes multiétagées, telle la vanne «Optivalve» de Ylec Consultants, peuvent être utilisées dans le même but.

Pour réduire le bruit de cavitation, on peut avoir recours lorsque c'est possible, à des traitements spécifiques du fluide. Par exemple, on peut injecter un gaz à l'amont des zones cavitantes, ce qui a pour effet supplémentaire de réduire l'érosion. Dans le cas de boucles fonctionnant en circuit fermé, les moteurs d'automobiles par exemple, on peut ajuster les teneurs en air dissous de telle sorte que les cavités de vapeur se chargent de petites quantités de gaz libres, ce qui a pour effet d'atténuer les collapsés.

Conclusion

L'étude du bruit de cavitation a fait l'objet de nombreux développements dans les 50 dernières années en raison des critères de discrétion des engins sous marins. Malheureusement, il n'existe pas de solutions autres que la suppression totale du phénomène pour éviter la brusque montée du bruit.

Dans les applications industrielles, les utilisateurs prennent rarement le bruit comme critère dimensionnant, sauf dans certaines applications particulières comme les réacteurs surgénérateurs. Le critère industriel est plus souvent l'absence d'érosion.

Dans les applications domestiques, la cavitation est présente dans les circuits de distribution d'eau et crée des bruits qui peuvent être gênants malgré les petites dimensions des composants. Des solutions basées sur l'utilisation de composants multiétagés pourraient être envisagées.

Comme dans tout problème de bruit, il faut considérer les chemins de transmission des bruits et les méthodes de protection classiques peuvent évidemment être appliquées.

Notons enfin que la prédiction effective du bruit de cavitation passe par l'utilisation de techniques expérimentales sur modèle réduit ou non et l'application de règles de similitude et de transposition adaptées.

