Essais en cavitation à bulles séparées

Méthodes de contrôle — Venturi de mesure de germes

Separate-bubble cavitation tests

Control-methods — Nucleation measurement by Venturi tube

Yves Lecoffre et Jean Marcoz

Ingénieurs à Neyrtec*

Introduction : similitude en cavitation à bulles séparées

Le paramètre de Thoma, classiquement utilisé en tant que critère de similitude lors d'essais en cavitation, et généralement noté σ

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

caractérise l'écoulement monophasique. L'égalité des σ entre deux écoulements de géométries homothétiques signifie que, lorsqu'elle est atteinte, la tension de vapeur l'est en des points homologues de l'écoulement.

La validité d'application de cette similitude, lorsque l'écoulement devient cavitant, dépend du type d'écoulement.

Dans le cas d'une cavitation à poche (Fig. 1.a), les phases liquide et vapeur sont limitées par une interface bien définie à pression constante, la tension de vapeur du liquide. L'égalité des σ signifie alors que ces interfaces ont même géométrie et le critère de similitude s'applique directement (sous réserve que les autres paramètres de similitude, particulièrement le nombre de Froude et le nombre de Reynolds, soient correctement représentés et que le liquide ne présente pas de retards thermodynamiques à la cavitation).

Dans le cas d'une cavitation dont les structures gazeuses sont initiées à partir de germes présents dans le liquide (cavitation de mélange ou cavitation à bulles séparées), la géométrie de l'écoulement diphasique, et par conséquent ses effets, sont fonction de la nucléation de l'eau utilisée (Fig. 1.b), et des niveaux absolus de pression et de vitesse.

On peut représenter la nucléation d'un liquide par un histogramme (nombre, pression critique) des germes qu'il contient (Fig. 2). Ces germes ne donnent naissance à des structures de vapeur (bulles, tourbillons) qu'à condition d'être soumis à une pression absolue locale, souvent négative, inférieure ou égale à leur pression critique.

Figure 1

Figure 2 — Histogramme de pressions critiques des germes contenus dans un liquide.

La pression critique d'un germe est la pression à laquelle il doit être soumis pour être destabilisé et connaître une évolution explosive.

Dans le cas de bulles de gaz, la valeur de la pression critique peut être calculée. Elle est fonction du rayon

(*) Etablissement de Grenoble d'ALSTHOM-ATLANTIQUE
(Etudes financées par la DRET)

Figure 3 — Courbes d'équilibre de Rayleigh.

de la bulle et est d'autant plus faible que ce rayon est petit. La figure 3 donne la valeur des pressions critiques de bulles d'air dans de l'eau à 15°C en fonction du rayon d'équilibre qu'elles ont lorsqu'elles sont soumises à la tension de vapeur du liquide.

Les impuretés présentent également une pression critique dont la valeur est probablement très différente de celle de bulles de taille équivalente. Des expériences sont en cours dans les laboratoires de Neyrtec sur ce sujet particulier.

Le champ hydrodynamique créé par l'écoulement est susceptible de donner naissance à la cavitation lorsque la pression locale atteint, de manière continue ou intermittente, la tension de vapeur du liquide. Cependant, ces conditions ne conduiraient effectivement à la formation de structures de vapeur que si les germes dont la pression critique est la plus proche de la tension de vapeur sont excités, c'est-à-dire, dans ce cas, s'il existe dans le liquide des germes ne présentant pas de retard à la cavitation.

Dans ces conditions, le σ de début de cavitation serait :

$$\sigma_{i.v} = \frac{P_{\infty} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

Si tel n'est pas le cas, il sera nécessaire, pour produire des structures de vapeur, de diminuer la valeur des pressions minimales dans l'écoulement par augmentation des vitesses ou diminution des pressions générales, jusqu'à ce qu'on atteigne localement la pression critique $P_{c \max}$ des germes les plus "fragiles". On obtient alors une valeur de σ de début de cavitation inférieure à la précédente qui est fonction de la population en germes, et du point de fonctionnement choisi. Elle n'est donc plus fonction de la seule configuration d'écoulement mais également de la qualité du liquide utilisé.

Il est d'ailleurs à noter que, dans ce cas, plus les essais sont réalisés à grande vitesse d'écoulement, et plus on se rapproche des valeurs de début de cavitation obtenues

avec des germes de pression critique proche de la tension de vapeur.

Le début de cavitation mesuré est en effet alors caractérisé par un σ_i de début de cavitation :

$$\sigma_i = \frac{P_\infty - P_{c \max}}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

L'écart par rapport au $\sigma_{i,v}$ défini ci-dessus s'écrit :

$$\sigma_i - \sigma_{i,v} = \frac{P_v - P_{c \max}}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

et est d'autant plus faible que V_∞ est grand.

Les écarts ainsi déterminés sur le début de cavitation mesuré peuvent être importants. C'est ainsi que Oldenziel et Teijema [1] ont pu obtenir lors d'essais industriels de vannes des différences de $P_{c \max}$ allant jusqu'à 1 bar.

Lorsque, dans un écoulement présentant une cavitation à bulles séparées, les valeurs de σ sont graduellement abaissées, sa géométrie et ses effets sont fonction, non plus de la seule population des germes les plus fragiles, mais de l'ensemble de la population de germes dont la pression critique est comprise entre la tension de vapeur du liquide et le minimum de pression régnant dans l'écoulement.

On peut alors montrer [2], dans le cas d'un profil portant, que la baisse de performances engendrée par cette cavitation est fonction du σ de fonctionnement et du nombre de bulles de vapeur initiées à partir de germes, présentes à un instant donné sur ce profil. Les variations de portance pouvant résulter d'un changement de la nucléation d'une eau sont, dans des cas extrêmes, du même ordre de grandeur que la portance nominale du profil [3].

En résumé, il importe donc de savoir mesurer les valeurs $P_{c \max}$ de la nucléation des eaux modèle et prototype si l'on désire déterminer les débuts de cavitation. Il est nécessaire, de plus, dans le cas d'essais en cavitation développée à bulles séparées, d'être en mesure, connaissant le spectre complet de germes prototype, de contrôler le spectre modèle.

Méthodes de contrôle de la nucléation

Production de germes

Afin de réaliser des essais en similitude de cavitation à structures (bulles ou tourbillons) séparées, une technique utilisable consiste à injecter dans le fluide des populations de microbulles connues [4].

En ce qui concerne la détermination des débuts de cavitation, il suffit, pour déterminer $\sigma_{i,v}$, de disposer de bulles de diamètre suffisamment important, de façon que la différence $P_v - P_{c \max}$ de la pression de vapeur

du liquide à leur pression critique soit faible, ou du moins, pratiquement d'un ordre de grandeur très inférieur aux pressions dynamiques de l'écoulement. Le paramètre de début de cavitation $\sigma_{i,v}$ est alors extrapolable, aux effets visqueux près, à d'autres fluides fonctionnant dans des géométries semblables sous réserve que l'on puisse mesurer dans chaque cas la valeur de $P_{c \max}$.

Dans le cas d'essais en cavitation développée de profils portants, la similitude impose que le même nombre de bulles de vapeur pour un σ donné, soit présent à un instant donné sur le modèle et sur le prototype. On montre alors que, dans la plupart des cas d'essais pratiques, on peut représenter une population quelconque de germes prototype par une population de germes modèle, dont la pression critique est peu différente de la tension de vapeur du liquide (spectres à raies). L'intermédiaire nécessaire est la connaissance directe ou indirecte de la répartition de pression dans la zone d'initiation des germes et d'autre part la mesure du spectre de germes prototype [2 et 4].

Les méthodes actuellement utilisées pour produire des germes sont de deux types : détente d'eau sursaturée au travers de vannes cavitantes et électrolyse de l'eau. Un contrôle de l'engazage en air dissous des circuits d'essais et un dimensionnement adapté des résorbeurs s'avèrent nécessaires lors de la mise en œuvre de ces techniques [4].

Mesure des germes

Diverses techniques de mesure de germes ont été développées et on peut les classer en deux groupes principaux : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Par méthode indirecte, on entend des méthodes donnant accès à une dimension caractéristique du germe. La caractéristique utile d'un germe du point de vue de la cavitation étant sa pression critique, il est alors nécessaire de passer par un intermédiaire théorique ou expérimental pour la déterminer.

Les principales méthodes de ce type s'appuient sur des procédés optiques (holographie, diffraction locale ou globale, microscopie [5 et 6]), des procédés électriques [7], ou des procédés acoustiques par atténuation de faisceaux ultrasonores. A l'heure actuelle, la méthode la plus simple et dont l'automatisation est la plus aisée nous semble être la méthode de mesure par diffraction locale. Cette technique applicable aux liquides transparents, est en particulier bien adaptée à la mesure des germes en moyens d'essais lorsque l'on connaît leur nature (bulles de gaz). Elle est utilisable pour des dimensions de germes comprises entre 1 et 200 μ environ et permet de mesurer des populations de quelques millions de germes par cm^3 .

Les autres méthodes optiques (holographie et microscopie) permettent d'avoir accès à la nature des germes, mais sont d'un dépouillement fastidieux.

Quant à la méthode de diffraction globale et à l'atténuation des ultrasons, elles sont encore actuellement au stade de développement. L'utilisation des ultrasons est

cependant prometteuse car elle permet des mesures en fluides non transparents.

Le principe des méthodes directes est de mesurer la pression critique des germes contenus dans le liquide, ou leurs effets sur la géométrie d'un écoulement, ou les performances d'un profil. Parmi les systèmes utilisés, outre les venturis qui font plus précisément l'objet de cet article, plusieurs types de veine étalon ont été réalisés [8].

Venturi de mesure de germes

Principe du système

Le principe de base du système consiste à réaliser un échelon de pression d'intensité réglable P_s dans un volume de liquide connu.

Lorsqu'un germe, de pression critique P_c est soumis à cette pression P_s , il subira un développement explosif et donnera naissance à une bulle de vapeur lorsque P_c sera supérieure à P_s . Dans le cas contraire ($P_c < P_s$), le germe ne sera pas excité. Connaissant le volume V de liquide soumis à cet échelon de pression et le nombre $N(P_s)$ de germes qui s'y sont développés, on en déduit la concentration dans le liquide de germes dont la pression critique est supérieure à P_s , soit :

$$C_{(P_s)} = \frac{N(P_s)}{V}$$

Lorsque l'on fait varier la valeur de P_s , on obtient ainsi par échelons successifs la population en germes du liquide considéré.

Utilisation de tubes de venturi (*Appareil breveté*)

Afin de satisfaire aux conditions ci-dessus décrites, on utilise des tubes de venturi (Fig. 4) de faible section au col, dont le divergent assure une récupération d'énergie en l'absence de tout décollement local et dans lesquels passe le liquide à analyser.

Par action sur les niveaux de pression amont et aval, on crée au col des zones de pression quasi constante P_s inférieure à la tension de vapeur du liquide et donc des conditions susceptibles de destabiliser les germes.

Le comptage du nombre $N(P_s)$ des bulles de cavitation produites peut s'effectuer par méthode optique dans le cas de venturi et de liquides transparents ou par méthode acoustique dans tous les cas.

Connaissant le temps T de comptage et le débit Q de liquide, on obtient, pour la pression P_s réalisée, la concentration en germes de pression critique supérieure à P_s :

$$C_{(P_s)} = \frac{N(P_s)}{Q T}$$

Dimensionnement du système

Outre la nécessité de disposer d'un divergent efficace, complètement exempt de décollements locaux qui donneraient naissance à une cavitation locale à poche, limitant la valeur de la pression minimale P_s , un certain nombre de problèmes se pose quant au dimensionnement du col de ces venturis.

Ceux-ci doivent en effet permettre de faire grossir les bulles de cavitation jusqu'à une taille pour laquelle elles deviennent détectables (soit $R_{\min}$ le rayon correspon-

Figure 4 — Evolution des pressions le long du venturi.

dant). D'autre part, le rayon final atteint par ces bulles doit être inférieur à une certaine valeur au-delà de laquelle des fluctuations de pression se produiraient dans la zone d'initiation des germes, perturbant ainsi la valeur de P_s .

Afin de disposer d'un schéma de calcul simple, les cols de venturis sont dimensionnés de telle sorte que la pression au col soit constante. On compense la perte de charge due aux frottements par une très légère divergence.

Si l'on suppose que le glissement relatif des bulles par rapport au liquide est faible, l'écoulement étant par ailleurs nettement turbulent, on peut déterminer leur temps de passage dans la zone de basse pression. En négligeant les effets de confinement dus au diamètre limité du col (ce qui n'est vrai qu'en début d'expansion, lorsque le diamètre des bulles est nettement inférieur à celui du col), on peut, par application de la formule de Rayleigh-Plesset, déterminer le rayon final atteint par les bulles.

Les valeurs de $R_{\min}$ et $R_{\max}$ ne peuvent être déterminées qu'expérimentalement, $R_{\min}$ étant la limite

basse de détection, $R_{\max}$ la limite haute correspondant à la présence de fluctuations de pression au col du venturi.

La pression régnant à l'amont du venturi dans l'échantillon de liquide à analyser étant connue, on détermine la vitesse d'écoulement à réaliser pour obtenir au col la pression P_s désirée. Le calcul d'évolution d'une bulle soumise à cette pression P_s (et supposée être en milieu infini) permet de déterminer le temps de séjour dans la zone de basse pression conduisant à un rayon final compris entre $R_{\min}$ et $R_{\max}$.

On constate pratiquement qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs tubes de venturi en parallèle pour mesurer le spectre complet de nucléation d'une eau.

Lorsque la pression P_s est peu différente de la tension de vapeur P_v du liquide à analyser, le temps de grossissement nécessaire à l'obtention du diamètre $R_{\min}$ est relativement long, ce qui conduit à des venturis de grande longueur au col.

Par contre, lorsque P_s est très basse (de l'ordre de grandeur de - 1 bar, par exemple), le grossissement des bulles est très rapide et des fluctuations de pression

Figure 5

apparaîtraient dans la zone d'initiation si les longueurs de col n'étaient pas nettement diminuées.

A titre d'exemple, la figure 5 donne le dimensionnement de tels tubes de venturi pour $R_{\min} = 0,5$ mm, $R_{\max} = 1$ mm et pour divers niveaux de pression P_s . t représente le temps de séjour de l'échantillon de liquide dans la zone de pression P_s . Sa connaissance permet donc, connaissant la pression régnant à l'amont du venturi de déterminer la longueur du col.

Etalonnage

Les méthodes d'approche ci-dessus décrites permettent de déterminer le dimensionnement global des tubes de venturi pour chaque gamme de fonctionnement. Il s'avère cependant nécessaire d'étalonner chacun de ces tubes avant leur utilisation. Les raisons d'effectuer ce préétalonnage sont liées, d'une part à la non-uniformité de la répartition de vitesse au col bien que l'écoulement y soit nettement turbulent, et d'autre part à d'éventuels défauts sur la précision de réalisation des venturis.

L'étalonnage des venturis destinés à mesurer des germes de pression critique élevée s'effectue en utilisant un liquide chargé de microbulles de gaz calibrées produites par exemple par détente d'eau sursaturée. L'étalonnage des venturis de faible longueur se fait par comparaison avec des venturis de longueur plus importante dans la zone de chevauchement de leurs gammes de fonctionnement respectives.

Limitation

La limitation essentielle de ce système de mesure est liée à la concentration maximale des germes qu'ils sont susceptibles de mesurer.

Le volume de liquide mis en dépression à un instant donné est relativement important, beaucoup plus par exemple que le volume de contrôle d'une méthode par diffraction locale. A titre d'exemple, pour un venturi de diamètre 2 mm et de longueur au col 2 cm, le volume en dépression est de $0,0628 \text{ cm}^3$.

On peut considérer qu'un venturi fonctionne correctement si une seule bulle, en moyenne, est présente dans le col, ce qui limiterait ces concentrations mesurables à environ 15 par cm^3 pour les germes de taille importante et à 50 par cm^3 pour les germes de très faible pression critique.

On constate en fait, pratiquement que l'on ne peut mesurer que des populations légèrement inférieures, de l'ordre de 10 germes/ cm^3 .

La photo n° 1 montre une bulle en phase de grossissement dans le col du venturi.

Une solution permettant d'augmenter les concentrations mesurables consiste à diminuer le diamètre des tubes, au détriment de la valeur de $R_{\max}$ et donc de la gamme de pressions critiques mesurables.

Le meilleur compromis est en fait de disposer de venturi de section relativement importante (ϕ 2 à 3 mm)

Photo 1 – Venturi en plexiglas ϕ 2 mm – Bulle en expansion

Photo 2 – Réalisation industrielle

lorsque les germes à mesurer ont une pression critique peu différente de la tension de vapeur et de venturi de faible section pour les germes de faible pression critique.

La précision absolue de l'appareil est fonction de la gamme de germes pour laquelle il est dimensionné.

L'ordre de grandeur des imprécisions à attendre sur la valeur absolue de P_s est de 10^3 à 2.10^3 pascals. Un soin particulier doit donc être apporté à l'étalonnage de l'appareil lorsqu'il est destiné à effectuer des mesures de germes de pression critique élevée ($P_s \approx P_v$).

Conclusion

Les essais d'écoulements cavitants à structures de vapeur séparées peuvent être entachés d'incertitudes importantes s'ils sont effectués sans contrôle de la nucléation de l'eau.

Des résultats cités dans la littérature [1 et 3] ou des mesures de nucléation effectuées à l'aide de tubes de venturi, montrent que les écarts de $P_{c_{max}}$ de l'ordre de 1 bar peuvent se rencontrer couramment.

Les techniques décrites dans cet article permettent de mesurer les nucléations modèle et prototype et de contrôler artificiellement les populations de germes modèle dans le cas de liquides ne présentant pas de retards thermodynamiques importants à la cavitation.

L'utilisation des tubes de venturi permet un accès direct aux pressions critiques des germes. Cette technique est donc particulièrement bien adaptée aux mesures de nucléations prototype et à l'évaluation des caractéristiques d'un moyen d'essai tout particulièrement en ce qui concerne ses possibilités de résorption.

Dans le cas d'essais modèle proprement dits, le contrôle de la nucléation nécessite la mise en œuvre simultanée de générateurs de germes artificiels et de moyens de mesure. Les germes artificiels peuvent être introduits à l'amont des zones cavitantes par électrolyse de l'eau ou par détente d'eau sursaturée, sous forme de microbulles de gaz. Leur mesure peut alors se faire indifféremment par des méthodes directes ou indirectes, la connaissance des pressions critiques à partir des résultats des méthodes

indirectes se faisant dans ce cas par simple application des équations d'équilibre de Rayleigh.

Notons enfin que Neyrtec étudie actuellement des appareils de principe voisins permettant un accès aux nucléations de liquides présentant des retards thermodynamiques appréciables à la vaporisation : eau à haute température et liquides cryogéniques.

Références

- [1] OLDENZIEL, TEIJEMA – Cavitation on Valves in Correlation to Liquid Properties, *8^e Symposium AIRH Leningrad* 1976.
- [2] DANIEL, LECOFFRE – Influence de la nucléation de l'eau sur la cavitation à bulles séparées, *AIRH Grenoble* 1976.
- [3] BJORHEDEN & ALBRECHT – On the Application of Micro Air Bubble Control in a Free Surface Cavitation Tunnel, *14th ITTC* 1975 Ottawa Vol 2.
- [4] LECOFFRE – Contrôle de la nucléation d'une eau en moyen d'essai, *8^e Symposium AIRH Leningrad* 1976.
- [5] PETERSON, KELLER, DANIEL & LECOFFRE – Comparative Measurements of Bubble and Particulate Spectra by Three Optical Methods, *14th ITTC* 1975 Ottawa Vol 1.
- [6] KELLER – Investigations Concerning Scale Effects of the Inception of Cavitation, *Proc. Conf. of Cavitation Inst. of Mech. Eng. Herriot Watt University*, Sept. 74.
- [7] HAMMIT. – Determination of Particle Population Spectra from Water Tunnel Using Coulter Counter, *Cavitation Forum ASME* 1969.
- [8] DANIEL – Cavitation Nuclei Development of a Nuclei Measurement Standard, *13th ITTC* 1972.