



ÉTUDE DE LA CAVITATION : MESURES DES GAZ CONTENUS DANS LES LIQUIDES

par F. DANIEL

Ingénieur ESO à Sogreah, Grenoble

Rôle des "gaz" dans l'apparition et le développement de la cavitation

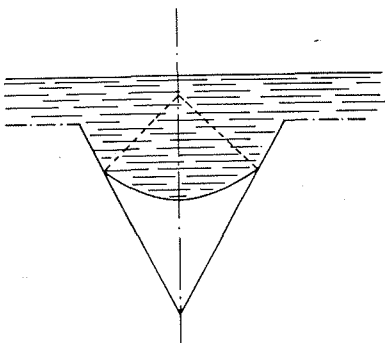
Lorsqu'un liquide est mis sous-tension par l'abaissement de la pression [1], la rupture de sa continuité et l'apparition d'une phase gazeuse développée, s'effectuent autour de zones préférentielles, points faibles de sa structure. Ces amorces de rupture conditionnent la nucléation, c'est-à-dire la phase initiale du développement de la cavitation, leur présence modifie ainsi fortement la propension d'un fluide à caviter.

Les points faibles de la structure d'un liquide sont constitués par des microdomaines gazeux qui se présentent soit

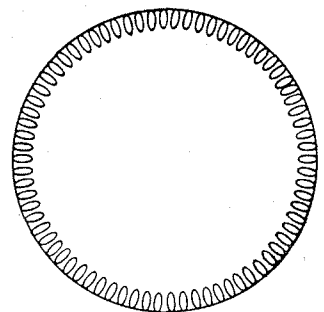
sous la forme de « cracks » [2] en paroi (ou liés à des particules solides en suspension), soit sous la forme de petites bulles stabilisées par la pollution de leur interface [3]. On les appelle « germes » ou « noyaux de cavitation » (en anglais : nuclei).

L'importance de l'influence des « gaz » dans le phénomène de la cavitation a motivé de nombreuses études [4, 5, 6 et 7]; l'analyse des résultats élémentaires obtenus est rendue très difficile par le nombre important des paramètres significatifs dont l'influence relative n'est pas séparée par l'expérience, de ce fait les résultats généraux restent encore très rares.

Nous donnons ici un aperçu des diverses méthodes de mesure des « gaz » au sein d'un liquide en essayant de préciser les possibilités de chacune d'elles. Une méthode



1/
Modèle
de noyau de
Harvey



2/
Macromolécules limitant
la diffusion et modifiant la
tension superficielle.

originale [8] a été aussi décrite, il s'agit d'une méthode de microscopie développée à Sogreah par l'auteur en collaboration avec le C.N.R.S. (*).

Difficultés des études expérimentales concernant l'influence des "gaz" dans le phénomène de la cavitation

Sans étudier les modifications de la structure moléculaire d'un liquide en présence de gaz, on peut distinguer les paramètres principaux suivants :

- le nombre et la nature des composants de la phase gazeuse;
- la partie dissoute de chaque composant;
- la répartition en nombre et en volume des germes de gaz libre.

Ces paramètres ne sont pas généralement indépendants et l'on peut mettre alors en évidence une loi reliant certains d'entre eux.

De nombreux essais ont cherché à corréler la nucléation de cavitation et un paramètre « gaz » unique; cette approche n'est pas licite, sauf s'il existe une loi permettant de lier l'ensemble des paramètres gaz à ce paramètre unique, l'absence de cette loi conduit à une divergence des résultats que l'on peut souvent expliquer par la variation des paramètres non pris en compte.

Dans les moyens d'essai spécialement conçus, on obtient pour une teneur en gaz dissous déterminée et pour chaque point de fonctionnement, un équilibre stable des paramètres « gaz » ce qui permet d'effectuer des essais reproductibles.

On peut penser, par une analyse de l'historique des germes dans un tunnel hydrodynamique, pouvoir prévoir quel sera l'équilibre des paramètres « gaz » obtenu pour un certain point de fonctionnement; un modèle mathématique adapté est en cours de développement à Sogreah.

Parmi les phénomènes qu'il prend en compte, les plus importants sont la diffusion et le passage des germes dans des éléments effectuant un triage comme les cuves à surfaces libres.

Souvent le réglage des paramètres « gaz » dans un tunnel agit aussi sur la cavitation par l'intermédiaire d'un autre paramètre que l'on ne soupçonnait pas : on a constaté, par exemple, qu'en changeant le niveau des pressions au-dessus des surfaces libres d'un moyen d'essai, on modifie l'amplitude et la fréquence des fluctuations de pressions, qui à leur tour influencent le développement de la cavitation.

Par sa facilité de mise en œuvre, la mesure de l'oxygène dissous dans l'eau a été souvent choisie comme mesure de référence des gaz dissous; on supposait souvent que l'oxygène et l'azote représentaient la quasi-totalité des gaz dissous et étaient présents dans la proportion de 35 % d'oxygène pour 67 % d'azote. Ceci n'est vrai que s'il existe des surfaces de contact importantes entre l'eau et une phase gazeuse ayant la composition de l'air atmosphérique, sinon la grande réactivité de l'oxygène le fait généralement disparaître indépendamment de l'azote. La seule mesure de l'oxygène fait alors croire que l'eau est fortement dégazée quand elle peut contenir encore une grande quantité d'azote.

La masse de gaz libre sous forme de germes est souvent très faible dans l'eau en comparaison de la masse de gaz dissous. Les méthodes qui mesurent soit la partie dissoute, soit l'ensemble des gaz présents donnent des valeurs très proches, souvent confondues dans les marges d'erreur propres aux méthodes utilisées.

Les paramètres « gaz » étant variables à l'intérieur d'un même moyen d'essai, il faut généralement définir le point de référence où l'on définit le fluide utilisé. Souvent la teneur en gaz dissous peut être considérée comme une constante vu la faible quantité de gaz représentée par la population en germes, qui, elle, évolue considérablement à l'intérieur d'un même moyen d'essai et joue le rôle principal dans la nucléation. L'évolution des paramètres « gaz » entre le point de référence et la zone où se développe la cavitation doit faire alors partie intégrante de l'étude de la nucléation; on a de ce fait intérêt à choisir un point de référence proche et en amont de la zone de nucléation étudiée.

Précautions particulières de métrologie

Les notions habituelles de métrologie générale s'appliquent ici, mais certaines précautions méritent une attention particulière.

Le prélèvement des échantillons est relativement facile lorsque l'on veut connaître la teneur en gaz total d'un liquide en un point donné. Il existe des flacons spéciaux [9] qui permettent d'effectuer des prélèvements discrets et d'introduire, sans polluer ces échantillons, les réactifs nécessaires à leur analyse par voie chimique. Des appareils de mesure en continu qui se montent en by-pass d'une partie du moyen d'essai conviennent à la mesure des « gaz » dissous. Par contre, si l'on veut accéder aux paramètres définissant la population en gaz libre, il est presque impossible d'effectuer des prélèvements sans que l'échantillon soit altéré par les échanges entre la phase libre et la phase dissoute. On s'oriente alors vers des méthodes de mesures *in situ*; si cela est impossible, on s'efforce que l'historique du liquide entre le point de prélèvement et le point de référence soit le même qu'entre ce point de prélèvement et le point où s'effectue la mesure.

Le temps nécessaire au prélèvement d'un échantillon significatif varie beaucoup suivant les méthodes, il en est de même du temps de traitement des mesures, ces aspects sont des critères de choix importants, un temps de prélèvement court étant essentiel pour étudier un phénomène en évolution rapide, un temps de traitement court associé à un temps de prélèvement court permet de piloter la valeur des paramètres « gaz » si le moyen d'essai en a la possibilité.

Certaines méthodes modifient l'échantillon faisant l'objet de la mesure, il faut s'assurer que cette modification n'altère pas le fluide dans la zone où l'on étudie sa propension à caviter.

Principes et description des méthodes

De nombreuses méthodes pour passer du mesurande à la valeur mesurée utilisent une loi physique théorique difficile à contrôler expérimentalement, ces méthodes donnent des valeurs relatives intéressantes mais nécessitent un étalonnage préalable si l'on désire avoir des mesures

(*) Centre National de la Recherche Scientifique, MM. Nomarski et Bernstein.

absolues. Les méthodes par diffraction optique comme les méthodes acoustiques sont particulièrement affectées par ce problème.

Les erreurs aléatoires peuvent être généralement réduites [25], mais l'utilisation de plusieurs méthodes en parallèle montre qu'il est très difficile de s'affranchir des erreurs systématiques. Cependant on ne doit comparer les résultats de mesure donnés par deux méthodes qu'après s'être assuré que c'est effectivement bien la même quantité que mesurent ces méthodes; en effet, il est prudent de contrôler ce point, par exemple la méthode de Winkler souvent décrite comme une mesure de l'oxygène dissous, est en fait une mesure de l'oxygène total (dissous ou libre sous la forme de germes). Le temps nécessaire aux réactions chimiques permet à l'oxygène des germes de se dissoudre dès que l'oxygène préalablement dissous commence à disparaître par oxydation de l'hydroxyde manganéux et finalement c'est bien tout l'oxygène qui participe à la réaction.

Les méthodes utilisées peuvent se diviser en quatre classes principales :

- les méthodes chimiques;
- les méthodes mécaniques d'extraction, d'équilibre ou de comptage;
- les méthodes acoustiques;
- les méthodes optiques.

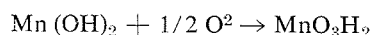
Méthodes chimiques [10, 11].

Généralement, on se limite à la mesure de l'oxygène et l'on vérifie que la teneur en oxygène est proportionnelle à l'ensemble des autres gaz.

MÉTHODE DE WINKLER [12, 13].

Elle est basée sur l'oxydation de l'hydroxyde manganéux obtenue par l'action d'une base (soude ou potasse) sur un sel manganéux (chlorure ou sulfate).

L'oxygène dissout dans l'eau l'hydroxyde manganéux $Mn(OH)_2$ fraîchement formé pour donner de l'hydroxyde manganique MnO_3H_2 :



L'oxydation de l'ion I par MnO_3H_2 libère de l'iode qui est titré par le thiosulfate de sodium en utilisant la coloration bleue du complexe iode-amidon.

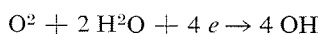
On peut déceler ainsi jusqu'à 0,02 ppm d'oxygène dissous, d'autres méthodes améliorées permettent d'étendre la mesure en dessous de cette valeur.

Pendant la réaction, les germes de gaz libre peuvent se dissoudre et l'on mesure en fait l'oxygène total.

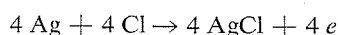
MÉTHODE POLAROGRAPHIQUE [14].

Nous prendrons comme exemple la méthode utilisée actuellement par Beckmann. Deux électrodes, une en or, l'autre en argent, sont séparées de l'échantillon par une paroi poreuse en Téflon et baignent dans le KCl qui sert d'électrolyte. L'oxygène diffuse au travers de la membrane et participe aux réactions

— à la cathode :



— à l'anode :



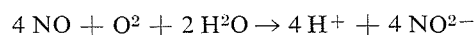
Le potentiel appliqué aux électrodes permet de réduire l'oxygène à la cathode, le courant produit est proportionnel à la quantité d'oxygène.

Les sondes « Beckmann » doivent être placées dans un écoulement de vitesse suffisante pour assurer le renouvellement de l'échantillon au droit de la membrane (0,6 m/s).

Le Beckmann est peu sensible au gaz libre et mesure effectivement l'oxygène dissous, cependant la mesure n'est valable qu'après un étalonnage sérieux à l'air atmosphérique. Le renouvellement de l'électrolyte et le nettoyage des électrodes doit être soigné si l'on veut atteindre les performances optimales qui sont de l'ordre de 1 % de l'échelle employée à température constante.

MESURE DE LA CONCENTRATION EN IONS [15].

Cette méthode a été développée par Beckmann. On mesure l'accroissement de la teneur en ions produits par l'action d'un réactif sur l'oxygène dissous :



De l'accroissement de la conductibilité électrique, on déduit la concentration en ion H^+ .

Méthodes mécaniques.

Ces méthodes dosent le gaz dissous, soit par extraction du liquide de ce gaz suivi de la mesure de la phase gazeuse obtenue, soit par la mise en contact avec le liquide d'une phase gazeuse, les pressions partielles des divers composants s'équilibrant dans cette phase et dans le liquide. On a aussi proposé de compter le nombre de bulles et de mesurer leur diamètre en mesurant l'obstruction provoquée par ces bulles lors de leur passage dans un petit orifice.

MÉTHODE DE VAN SLYKE [13, 16 et 17].

Une suite de détentes successives permet d'extraire le gaz dissous et libre d'un échantillon. On mesure le volume de gaz obtenu dans des conditions de pressions connues, on en déduit ainsi la concentration. Cette méthode due à Van Slyke a été modifiée par de nombreux auteurs; bien utilisée, on peut prétendre atteindre pour des concentrations voisines de celles de saturation à la pression atmosphérique une précision de l'ordre de 1 %.

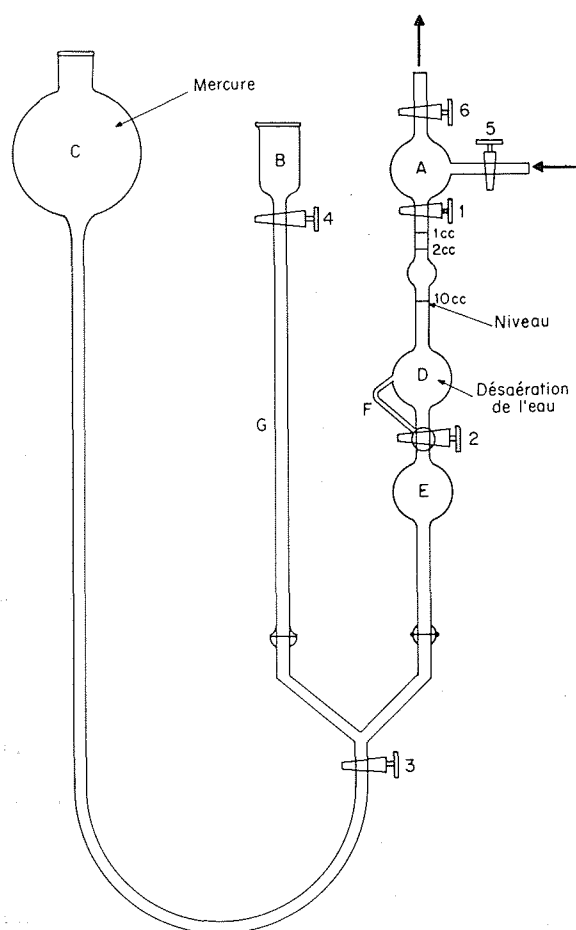
On doit prendre soin de purger soigneusement l'appareil et de dégazer le mercure qu'il contient. Son étanchéité est particulièrement critique. La mesure nécessitant des cycles de pressions nombreux est de ce fait assez fastidieuse.

MÉTHODE DE CAMBRIDGE [13, 20 et 22].

Cette méthode dérivée de celle utilisée pour le contrôle de l'eau des chaudières est basée sur le barbotage du liquide dans une chambre maintenue à pression constante par une alimentation d'hydrogène asservie. Les pressions partielles d'oxygène et d'azote s'équilibrent dans la phase gazeuse et dans le liquide, l'hydrogène complétant la pression. Une mesure de conductibilité thermique permet de connaître la proportion d'hydrogène contenue dans la chambre de mesure et d'en déduire la teneur en air dissous.

Cet appareil permet des mesures en continu, mais le temps de réponse est assez long (15 mn).

Certains problèmes d'exploitation limitent actuellement l'utilisation de cet appareil, qui marche très bien par ailleurs, les dispositifs de réglage du débit d'eau le traversant, doivent être améliorés.



3/ Appareil de « Van Slijke ».

A. Ballon de prélèvement / B.C. Ballons de réserves de mercure / D. Ballon de dégazage / E. Ballon tampon / F. Canal de dégazage / G. Tube manométrique / 1. Robinet d'isolement / 2. Robinet de dégazage / 3.4. Robinets d'isolement / 5.6. Robinets de prélèvements.

MÉTHODE DE COULTER [18].

On prélève une partie du liquide que l'on fait passer par un petit orifice, des électrodes placées de part et d'autre de l'orifice mesurant la conductibilité du fluide dans l'orifice. Le passage d'une bulle modifie cette conductibilité. Un analyseur multicanaux permet d'échantillonner la population de bulles passant par l'orifice. On mesure ainsi les caractéristiques de la population des germes dans le liquide.

Séduisante par sa simplicité, cette méthode pose des problèmes quant à sa mise en œuvre : le faible débit de l'orifice oblige les échantillons à séjourner un temps incompatible avec leur vitesse d'évolution dans un historique de conditions hydrodynamiques différentes de celles du moyen d'essai; d'autre part, le dispositif peut être obstrué par des particules solides qui, si elles passent, perturbent la mesure.

Méthodes optiques.

Ces méthodes sont essentiellement de deux types. On analyse soit la lumière diffractée par les bulles de gaz libre, soit leur image. On essaye actuellement aussi de développer des méthodes intermédiaires par holographie où la restitution de la lumière diffractée fournit une image que l'on analyse.

DIFFRACTION [19, 23].

En mesurant la répartition spatiale de la lumière diffractée, on peut accéder à la taille des bulles, l'intensité reçue donnant le nombre de ces bulles. La présence de bulles de diamètres très différents rend cette méthode difficile d'emploi. On peut aussi n'éclairer qu'un volume très petit du liquide et supposer qu'une seule bulle est présente à la fois dans ce volume. La présence du signal compte le passage d'une bulle, l'intensité donne alors le diamètre.

Ces méthodes supposent connues les lois de la diffraction par des bulles dans un liquide de la lumière. Or en consultant la bibliographie optique spécialisée, on constate que ces lois sont loin d'être établies. Certains auteurs utilisent comme source de lumière un laser, ce qui n'ajoute rien au principe de la méthode et complique même certaines interprétations, les lois de diffraction ayant été le plus souvent établies en lumière incohérente. Après étalonnage, ces méthodes ont l'avantage de leur grande souplesse d'utilisation.

HOLOGRAPHIE.

Cette méthode permet de figer un espace tridimensionnel du liquide à un instant donné. La restitution de l'holographie pouvant alors théoriquement donner l'accès au nombre, au diamètre et à la répartition spatiale des germes de gaz libre.

La densité d'informations stockables sur une plaque holographique étant limitée, un compromis doit être trouvé entre la résolution et le volume d'exploration; en pratique, on ne peut considérer que les bulles supérieures à 20 microns.

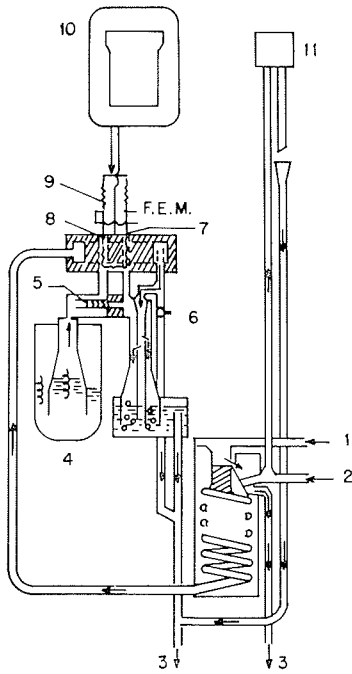
MICROSCOPIE [8].

Pour accéder à la mesure des gaz libres sous forme de germes, il semble qu'une solution normale soit de chercher à les observer *in situ*. Cette méthode nécessite le développement d'un objectif particulier permettant d'observer un champ important à une grande distance de la paroi. La résolution doit permettre de mesurer les plus petits germes que l'on juge significatifs, même si la vitesse d'écoulement est grande. On a adopté dans le prototype construit, les caractéristiques suivantes : un champ de diamètre 5 mm, une frontale libre (c'est-à-dire, distance du champ observée à la paroi) de 30 mm, une résolution d'un micron. Un hublot plan assure la continuité de la paroi, un éclairage à impulsion fournit des temps de pose de l'ordre de 10 ns. L'enregistrement est photographique et l'on a la possibilité de superposer les images données par de nombreux éclairs sur la même émulsion lorsque l'on recherche des bulles présentes seulement en faible nombre.

Le dépouillement peut être automatisé mais l'expérience montre qu'un décompte manuel sur les photos obtenues n'est pas trop long ni trop pénible.

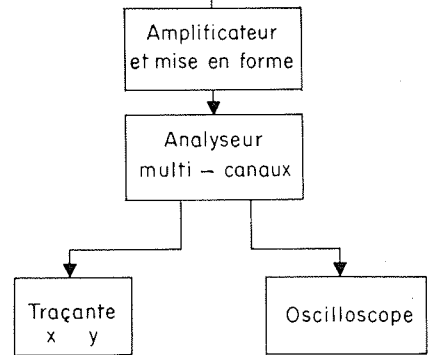
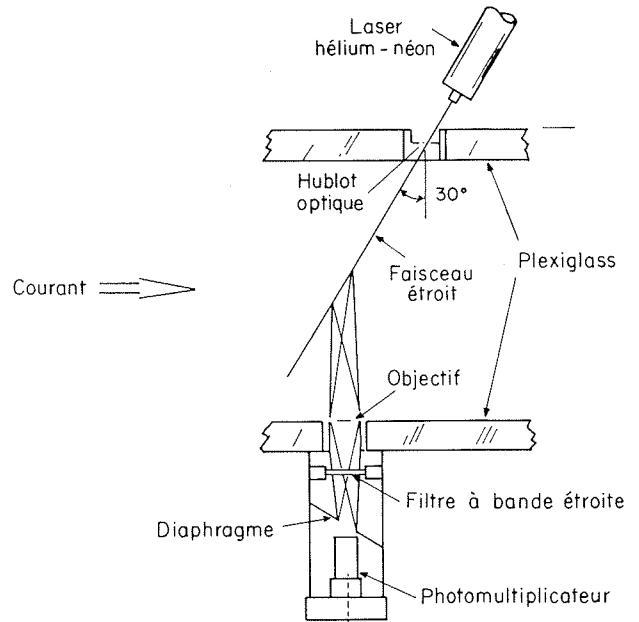
Le temps de prélèvement de l'information de la mesure est très court, mais le traitement de cette information est long (développement des photos et observation des résultats). Cette méthode est une méthode absolue dès que le diamètre des bulles atteint le double de la limite de résolution, soit 2 microns dans l'exemple cité.

Cette méthode nécessitant le développement d'un ensemble optique particulier, il n'est pas possible d'effectuer sa réalisation au niveau de chaque laboratoire; par contre, cette méthode est simple d'emploi.

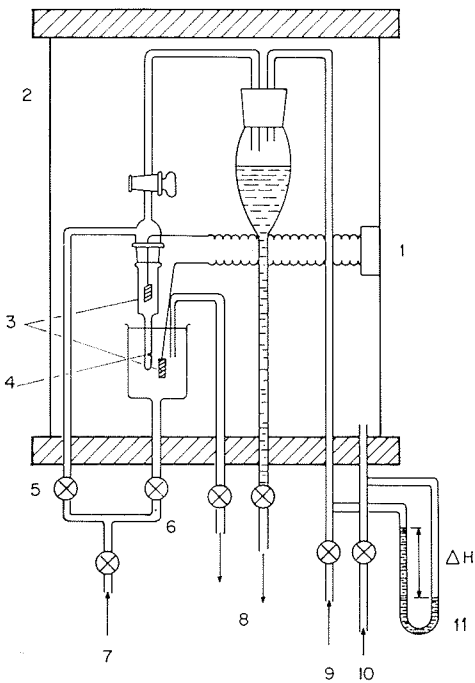


4/ Cambridge.

1. Eau de régulation de température / 2. Eau d'échantillon / 3. Evacuation / 4. Générateur d'hydrogène / 5. Filtre / 6. Vanne de zéro / 7. Filament de mesure / 8. Filament de référence / 9. Pont de conductivité thermique / 10. Enregistreur / 11. Cuve à niveau constant.

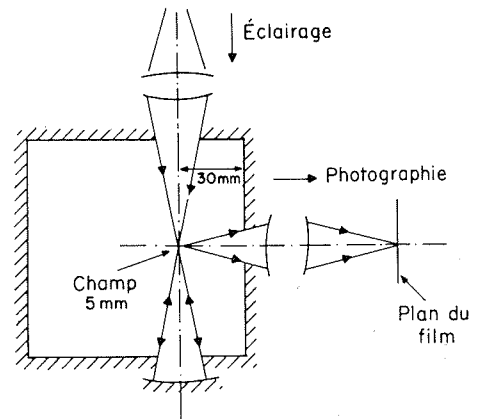


6/ Diffraction (I. Landa et E. S. Tebay).



5/ Coulter.

1. Signal d'entrée / 2. Pression chambre / 3. Electrodes / 4. Orifice de 100 μ / 5. Remplissage du tube / 6. Remplissage de l'éprouvette / 7. Arrivée de la boucle / 8. Retour vers la boucle / 9. Basse pression / 10. Haute pression / 11. Manomètre de réglage de débit.



7/ Microscope à bulle.

1. Eclairage / 2. Photographie / 3. Plan du film / 4. Champ 5 mm.

Méthode acoustique [27, 23 et 13].

La méthode repose sur le fait que les pertes d'énergie sonore dans un liquide contenant des bulles passent par un maximum lorsque la fréquence est égale à la fréquence de résonance des bulles qui s'écrit :

$$f_0 = \frac{1}{2 M R_0} \sqrt{\frac{3 \gamma (P + 2 \sigma / R_0)}{\rho}} \quad (1)$$

D'autre part, Vi Nyasishchev a montré que l'atténuation dans un milieu contenant des bulles de dimensions diverses peut s'exprimer par le facteur :

$$K_e = 1,5 \cdot 10^5 u(R_0) = 6,3 \cdot 10^5 n(R_0) R_0^3 \quad (2)$$

K_e : facteur d'atténuation en $d(O) m$;

$u(R_0)$: densité de distribution du volume de gaz de bulles par cm^3 de liquide;

$n(R_0)$: densité de distribution du nombre de bulles de gaz par cm^3 de liquide;

$N = n(R_0) dR$: nombre de bulles de rayons compris entre R_0 et $R_0 + dR$;

$u = u(R_0) dR$: volume occupé par les bulles de rayons compris entre R_0 et $R_0 + dR$.

N et u peuvent être déterminés à partir des équations (1) et (2).

La méthode ne s'applique qu'à des milieux ne contenant pas trop de bulles.

En utilisant une méthode de réverbération pour mesurer l'atténuation du son, on peut d'après M. Gavrilov, déterminer des concentrations en gaz libre allant jusqu'à 10^{-10} en volume.

D'autre part, M. Gavrilov donne des résultats d'essais montrant une bonne concordance de la méthode avec celle qui est citée par un autre auteur comme M. Cormault.

La mise en œuvre de ces méthodes est très délicate. Si l'on parvient à faire marcher l'instrumentation, il reste deux points délicats, d'une part les valeurs obtenues le sont par intermédiaire d'une théorie de la transmission acoustique qu'il est difficile de contrôler, d'autre part les germes peuvent présenter des pollutions de leur interface modifiant considérablement leur fréquence propre, ce qui conduirait à des résultats erronés. Cependant, ces méthodes dans le cas où on les munit d'un traitement associé convenable sont d'une utilisation séduisante, la population de germes dans une section étant décrite presque instantanément.

Conclusion

En insistant sur les difficultés des mesures des « gaz » dans les liquides, nous leur avons associé les problèmes propres à l'étude de la cavitation. Les méthodes décrites sont essentiellement adaptées à la mesure des gaz dans l'eau, mais certaines sont transposables à l'étude d'autres liquides. Ces méthodes peuvent être aussi appliquées à l'étude de phénomènes proches de la cavitation comme l'ébullition flash.

Généralement, le développement de la cavitation n'est pas défini par un paramètre unique, la configuration de l'écoulement biphasique dans la zone cavitante variant de manière complexe avec les paramètres « gaz ». Le début de cavitation peut représenter une bonne référence si on le

définit bien par l'apparition locale du phénomène et non par un effet global comme la perte de portance d'un profil ou la chute de rendement d'une turbine.

Le temps de séjour possible des germes dans la zone de nucléation représente bien la sensibilité d'une configuration d'écoulement aux paramètres « gaz ». L'écoulement cavitant à bulles sur un profil à faible incidence est aussi très influencé par les variations de la population des germes de gaz libre. Il en est de même pour un vortex cavitant, tandis que la poche continue issue du bord d'attaque d'un profil en incidence sera, elle, très peu sensible à ces mêmes paramètres. Des lois générales ne peuvent pas être déterminées ni pour l'étude d'une seule configuration d'écoulement, ni par une approche globale de machines où plusieurs types de développement de la cavitation coexistent.

Un choix de références doit permettre au lecteur de trouver les détails qui n'ont pu figurer ici.

Nous espérons que cet aperçu facilitera la tâche de ceux qui comme nous cherchent à améliorer la connaissance de la cavitation.

Bibliographie

- [1] BLAKE (F.G.). — "The Tensile Strength of Liquids: A review of the Literature." *Harvard Univ. Acous. Soc. Am.*, 26, n° 6, 984-989 (1949).
- [2] HARVEY, McEBROY, WHITELEY. — "On Cavity Formation in Water". *J. Appl. Phys.* 18.162, (1947).
- [3] FOX (F.E.) and HERZFELD (K.F.). — "Gas Bubbles with Organic Skin as Cavitation Nuclei". *J. Acoust. Soc. Amer.*, 26 (6), 984-989 (1954).
- [4] RIPKEN (J.E.) and KILLEN (J.M.). — "Gas Bubbles, Their Occurrence, Measurement, and Influence in Cavitation Testing". *Sympos. Cavitation and Hydraulic Machinery*, Sendai, Japan, vol. A-3, 37-54 (1963).
- [5] EISENBERG (P.). — "A critical Review of Recent Progress in Cavitation Research: Cavitation in Hydrodynamics." *N.P.L.*, London (1956).
- [6] KNAPP (R.T.). — "Cavitation and Nuclei". *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 80, 1315-1324 (1958).
- [7] NUMACHI (F.). — "Ueber die Kavitationsentstehung mit besonderem Bezug auf den Luftgehalt des Wassers". *Technology Reports*, Tohoku Imperial University, vol. 12, 422-461 (1948).
- [8] NOMARSKI, BERTRAND, DANIEL, DUPORT. — « Méthode optique de mesure et de dénombrement des bulles de gaz au sein d'un écoulement ». *Euromech*, Grenoble (avril 1968).
- [9] KANELLOPOULOS (E.V.). — "Methods of Sampling Water for Measuring the Gas Content." *M.E.R.L.*, Fluids note n° 78 (1959).
- [10] ROUMY (R.). — « Détermination de l'oxygène dissous dans l'eau ». *C.E.A. Saclay*, n° 36 (1963).
- [11] American Public Health Association, Standard Methods. — "For the Examination of Water Sewage, and Industrial Wastes." (1955).
- [12] WINKLER (L.W.). — "The Determination of Dissolved Oxygen in Water". *Ber. 21*, 2843 (1888).
- [13] CORMAULT (P.). — « Contribution à l'étude de l'influence des teneurs en gaz de l'eau sur la cavitation dans les turbomachines hydrauliques ». Deuxième partie: Méthodes de mesure des teneurs en gaz de l'eau et appareillage. *Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou*, supplément au n° 2 (décembre 1962).
- [14] ECKENFELDER (W.N.) and BURRIS (C.T.). — "Polarographic Measurement of Dissolved Oxygen ASTM. Special Technical Publication n° 219, 1957, 18-29". Donne une bibliographie sur les méthodes polarographiques (précision 0,02 ppm).

- [15] FINNEGAN (T.) and TUCKER (R.C.). — "The Beckmann Dissolved Oxygen Analyser ASTM. Special Technical Publication n° 219, 1957, 30-39. Echelle de mesure 0,005-0,02 ppm. Erreur 0,002 ppm.
- [16] Van SLYKE (D.D.) and NEILL (J.M.). — "The Determination of Gases in Blood and Other Solutions by Vacuum Extraction and Manometric Measurement". *J. Biol. Chem.*, 61, 523-575 (1924).
- [17] KANELLOPOULOS (E.V.). — "Mechanical Engineering Research Laboratory Fluid Mechanics Division. New Method for Measuring the Gas Content of Water" *Fluids Report* n° 69 (April 1958).
- [18] AHMED (O.), BHATT (N.R.) and HAMMITT (F.G.). — "Preliminary Coulter-Counter Measurements in High Speed Cavitation Tunnel". Report n° U-MICH 01357-17-T (June 1970).
- [19] LANDA (I.), TEBAY (E.S.), JOHNSON (V.) and LAWRENCE (J.). — "The Measurement of Bubble Size Distribution Using Scattered Light" *Tech. Report* 707, 4, Hydronautics (June 1970).
- [20] BORDEN (A.), (Ph. D.). — "Design, Operation, and Maintenance of a Meter for Recording the Air Content of Water in the David Taylor Model Basin Water Tunnels". *Report* 549 (December 1946).
- [21] WILLIAMS (E.E.). — "Investigations into Three Methods of Determination the Dissolved Gas Content in Water". M.E.R.L., Fluids Report n° 15. East Kilbride Glasgow, *Mechanical Engineering Research Laboratory* (1953).
- [22] FITZPATRICK and HARKLEROAD. — "A Meter for Continuous Indication of Dissolved Air in Water". *D.T.M.B. Report* 867 (October 1954).
- [23] IYENGAR (K.S.) and RICHARDSON (E.G.). — "The Optical Detection of Cavitation Nuclei". *Mechanical Engineering Research Laboratory Fluid Mechanics Division*, Fluids Note n° 55 (January 1958).
- [24] IYENGAR (K.S.) and RICHARDSON (E.G.). — "The Role of Cavitation Nuclei". M.E.R.L., Fluids Report n° 57, East Kilbride, Glasgow, *Mechanical Engineering Research Laboratory* (1957).
- [25] KANELLOPOULOS (E.V.). — "Errors in Measuring the Gas Content of Water". *M.E.R.L.*, Fluids Report n° 173 (December 1958).
- [26] KANELLOPOULOS (E.V.). — "A critical Survey of Methods for Measuring the Total Gas Content of Water" *M.E.R.L.*, Fluids Note n° 77 (1959).
- [27] RICHARDSON (E.G.). — "Detection of Gaseous Nuclei in Liquid Using an Ultrasonic Reverberation Chamber". *Mechanical Engineering Research Laboratory*, Fluids Note n° 38 (February 1956).
- [28] GAVRILOV (L.R.). — "Free Gas Content of a Liquid and Acoustical Techniques for its Measurement". *Soviet Physics Acoustics*, vol. 15, n° 3 (January-March 1970).

