

ANALYSE DU MÉCANISME DE L'ÉROSION DE CAVITATION

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 17 novembre 1967

PAR R. CANAVELIS *

Introduction

Le phénomène bien connu de cavitation se manifeste dans tout écoulement liquide où la pression atteint des valeurs suffisamment basses pour donner lieu à une évaporation des micro noyaux gazeux en suspension. Une conséquence essentiellement dommageable de ce phénomène est l'érosion des surfaces solides en présence. Si le fait est communément observé dans beaucoup d'installations hydrauliques, il n'en est pas moins vrai que la nature même du mécanisme en cause reste encore obscure en beaucoup de points.

Parmi les méthodes de laboratoire utilisées pour l'étude de l'érosion de cavitation [1], certaines reproduisent réellement un écoulement cavitant dans un circuit. Une telle disposition nécessite cependant la réalisation d'une installation souvent encombrante et coûteuse. Dans le but de reproduire le phénomène d'érosion à l'aide de moyens beaucoup plus réduits et dans un délai plus bref, on a mis au point d'autres méthodes expérimentales dites « accélérées », telle la méthode d'érosion par choc que nous analyserons dans cette étude.

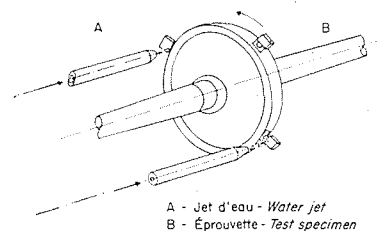
La méthode d'érosion par choc a été et est encore utilisée dans divers laboratoires [2], [3], [4], [5], [6] pour déterminer la résistance relative de différents matériaux à l'érosion de cavitation. Si l'utilisation

d'un tel procédé s'est répandue du fait même de la simplicité et de la rapidité des essais, un doute a cependant toujours subsisté quant à la nature de l'érosion ainsi obtenue et à la signification des résultats.

A la lumière des études les plus récentes nous nous attacherons donc à établir une analogie entre l'érosion de cavitation et l'érosion par choc. Nous montrerons ainsi dans quelle mesure l'emploi d'une installation relativement simple d'érosion par choc permet de simuler correctement le phénomène de cavitation.

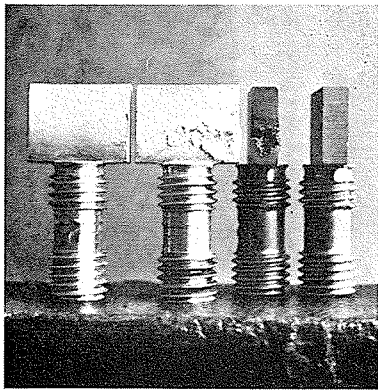
Mécanisme de l'érosion par choc

L'érosion par choc mentionnée dans cette étude est obtenue en faisant tourner à grande vitesse des éprouvettes métalliques fixées à la périphérie d'un disque. Ces éprouvettes viennent couper un ou plusieurs jets liquides parallèles à l'axe de rotation du disque, comme l'indique la figure 1. L'érosion des

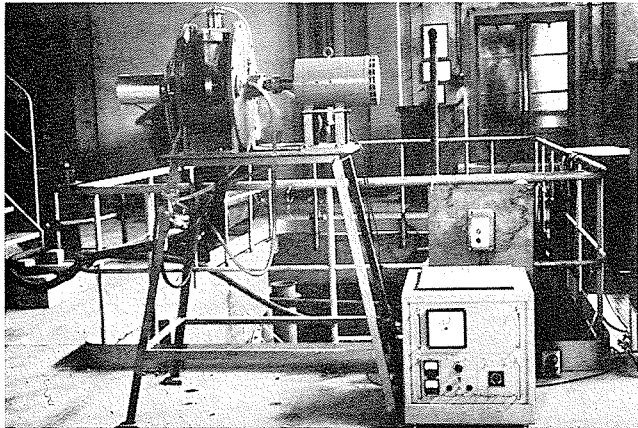


1/ Erosion par choc.
Impact erosion.

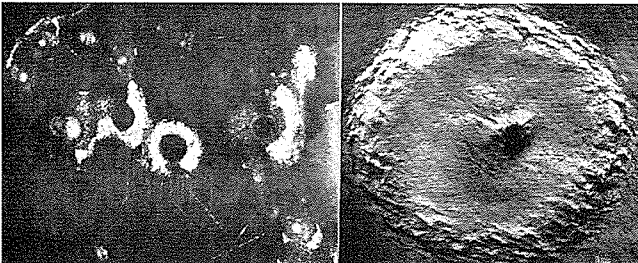
* Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, 6, quai Watier, 78-Chatou.



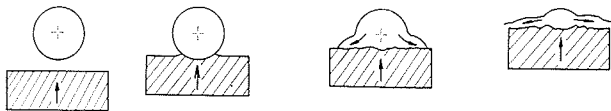
2/ Eprouvtes érodées par choc dans un jet (x 1,5).
 Test specimens eroded by jet impact (magnified 1,5x).



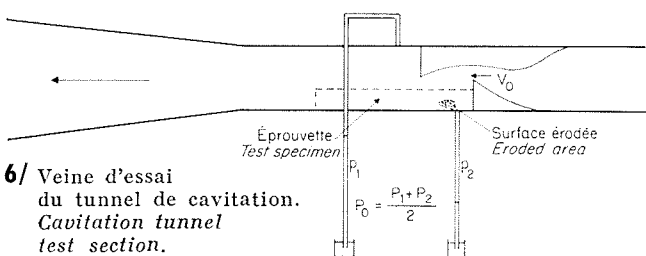
3/ Installation d'érosion par choc / The impact erosion rig.



4/ a) Cratère de cavitation (d'après Hammit);
 a) Cavitation crater (Hammit);
 b) Cratère créé par un jet (d'après Bowden).
 b) Jet crater (Bowden).
 Comparaison entre l'érosion par cavitation et par choc.
 Cavitation and impact erosion.



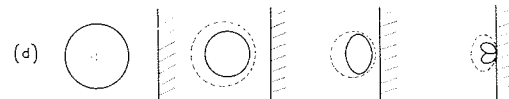
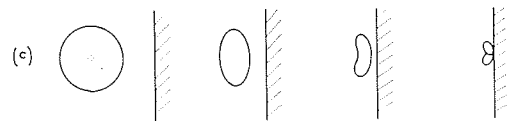
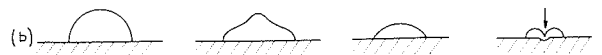
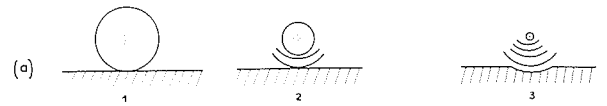
5/ Eprouvette coupant un jet cylindrique.
 Test specimen intersecting a round jet.



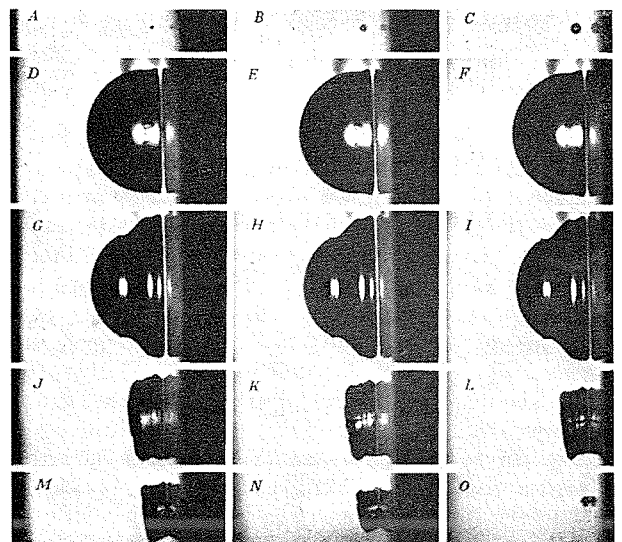
6/ Veine d'essai du tunnel de cavitation.
 Cavitation tunnel test section.



7/ Eprouvette érodée par cavitation.
 Test specimen eroded by cavitation.



8/ Différents modes de contraction des bulles de cavitation.
 Cavitation bubble contraction forms.



9/ Contraction d'une bulle contre une paroi.
 Bubble contraction against a wall.

éprouvettes se produit sur la face qui pénètre dans les jets comme le montre la figure 2.

L'ensemble de l'installation est représenté sur la figure 3. Elle comprend un disque de 40 cm de diamètre pouvant tourner à des vitesses comprises entre 0 et 3 000 tr/mn, ce qui fournit des vitesses de choc allant jusqu'à 65 m/s. Des expériences complémentaires ont été faites avec des disques de différents diamètres. On dispose d'un ou deux jets de 5 mm de diamètre.

Lors des premiers essais utilisant ce dispositif, on ne savait si l'érosion observée était imputable à un pur effet de choc liquide-solide ou à une cavitation secondaire lors de l'entrée de l'éprouvette dans le jet [2], [3], [4]. Le fait que les résultats soient peu dépendants de la teneur en air de l'eau du jet et varient avec la température de ce dernier d'une toute autre manière que dans le cas d'une cavitation réelle, permet cependant de conclure aujourd'hui à un phénomène de choc.

Si l'on tient compte de la compressibilité du liquide, la pression créée par le choc de l'éprouvette sur le jet est approximativement donnée par l'équation du coup de bélier [7] :

$$P = \rho C V$$

P : pression lors du choc;

ρ : masse volumique du liquide;

C : célérité des ondes de compression dans le liquide;

V : vitesse de choc.

Les travaux de nombreux auteurs [8], [9], [10], [11], [12], ont montré l'existence d'une onde de choc prenant naissance à la frontière liquide-solide. Le choc se trouve immédiatement suivi d'une surpression locale très élevée et dont la durée dépend du temps de réflexion de l'onde sur les surfaces libres du jet. Ce phénomène peut suffire à lui seul à créer une déformation de la surface solide ou un démantèlement de sa structure par fatigue.

Dans un second temps, la surpression initiale provoque un écoulement radial du liquide vers l'extérieur à des vitesses bien supérieures à la vitesse de choc créant ainsi des forces d'arrachement importantes sur toutes les irrégularités de la surface de l'éprouvette.

A la brève surpression initiale correspond un cratère central si le choc est suffisamment énergétique, tandis que l'écoulement radial à grande vitesse crée une érosion annulaire comme l'indique la figure 4 b. Le degré d'érosion dépend essentiellement, pour un matériau et un liquide donnés, de la vitesse de choc ainsi que des dimensions et de la forme du jet liquide. La vitesse de choc conditionnerait en effet le niveau de la surpression initiale, alors que les paramètres géométriques du jet influenceraient plutôt la durée de cette surpression.

L'érosion par choc apparaît donc comme le résultat de l'action mécanique d'ondes de choc ou d'écoulements extrêmement rapides sur une surface, comme l'indique la figure 5. La surpression initiale atteint une valeur d'environ 1 500 atmosphères pour une vitesse de choc de 100 m/s. Sa durée est de l'ordre de la microseconde. L'écoulement latéral qui se produit ultérieurement engen-

dre des vitesses bien supérieures à la vitesse de choc et capables d'éroder toute partie proéminente de la surface solide.

Mécanisme de l'érosion de cavitation

Les expériences de cavitation que nous rapportons ont été effectuées dans le tunnel hydrodynamique de l'E.N.A.M. Il comporte une veine d'essai de section rectangulaire munie d'un étranglement représenté sur la figure 6. La vitesse d'écoulement V_0 varie entre 20 et 40 m/s, et la pression moyenne P_0 dans la veine d'essai entre 10 et 70 cm de mercure. Les éprouvettes sont des plaques planes métalliques insérées dans les parois latérales de la veine en aval de l'étranglement. La figure 7 montre l'aspect d'une éprouvette érodée.

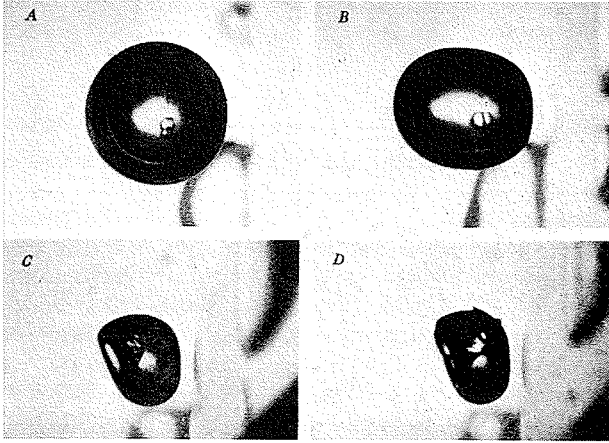
L'érosion de cavitation se produit dans une région de l'écoulement où les bulles de cavitation, se trouvant en déséquilibre dynamique du fait de la surpression ambiante, se recondensent en s'écrasant au voisinage des parois solides ou contre celles-ci.

L'étude théorique et l'observation d'un tel mécanisme permettent actuellement d'affirmer qu'il s'agit d'un processus essentiellement mécanique [13], [14], [15]. Plusieurs modes de contraction des bulles de cavitation paraissent cependant possible.

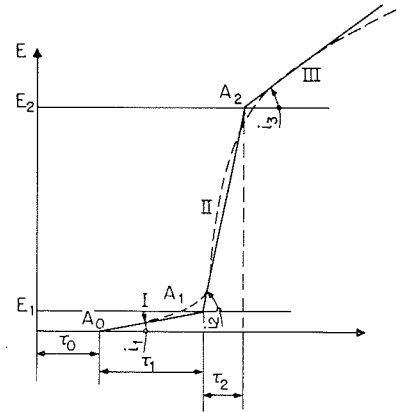
Les calculs de Lord Rayleigh [16] relatifs à l'effondrement d'un vide sphérique dans un liquide, puis les théories plus raffinées qui le suivirent [13], [15] mirent en évidence l'apparition de fortes pressions lors de la recondensation rapide des bulles de cavitation. L'érosion serait donc imputable aux ondes de choc émises par la contraction des bulles sphériques au voisinage des parois solides comme l'indique la figure 8 a. Bien qu'une telle explication paraisse valable, elle suppose que les bulles de cavitation disparaissent à une distance suffisamment faible des parois pour que l'onde de choc émise garde une efficacité suffisante. Or, les calculs et les observations faites dans ce cas [17] montrent que les bulles ne peuvent rester sphériques. En fait, dans la plupart des cas, la sphéricité des bulles ne peut se conserver tout au long de leur mouvement de contraction pour différentes raisons que nous allons examiner.

Tout d'abord, comme nous venons de le dire, la contraction d'une bulle initialement collée à une paroi entraîne une dissymétrie de l'écoulement qui détruit complètement la forme sphérique de la bulle pour donner naissance à un jet microscopique qui vient frapper la paroi [17]. Les figures 8 b et 9 décrivent un tel comportement.

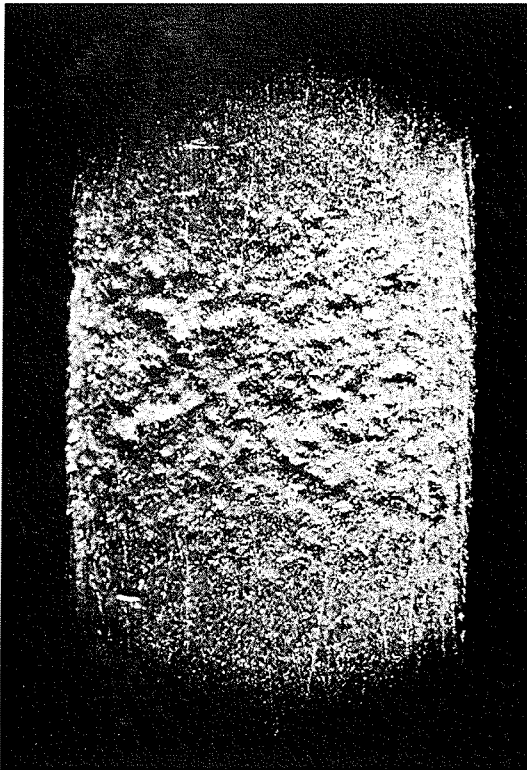
La déformation d'une bulle initialement sphérique peut également s'expliquer par la présence des gradients de pression [18] et par l'instabilité fondamentale du mouvement de contraction [19]. Un tel comportement est représenté sur les figures 8 c et 10. On voit que dans ce cas la bulle se déforme également en donnant naissance à un jet microscopique. La chance d'obtenir une érosion dépend donc du temps de déformation de la bulle par rapport à



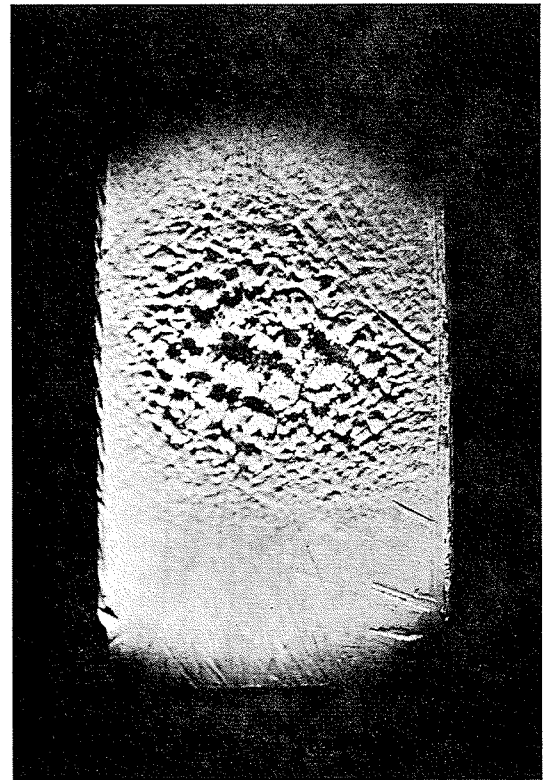
10/



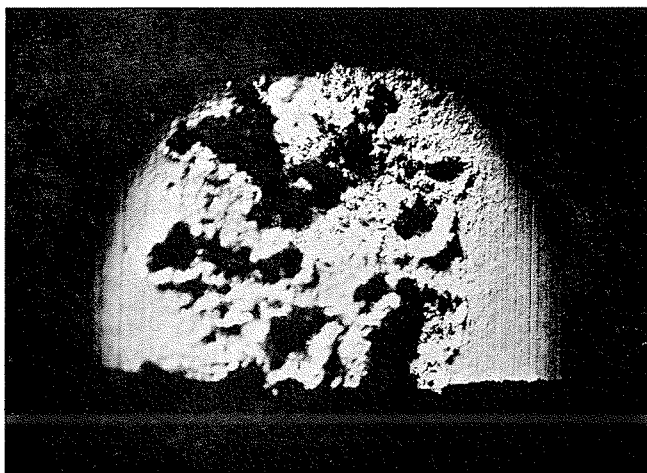
11/



12/



13/



14/

10/ Contraction d'une bulle au voisinage d'une paroi.
Bubble contraction near a wall.

11/ Evolution de l'érosion.
Development of erosion.

12/ Epreuve d'aluminium à la fin de la période d'incubation (x 18).
An aluminium test specimen at the end of the incubation period (magnified 18 x).

13/ Epreuve d'aluminium à la fin de la période (x 16).
An aluminium test specimen at the end of period (magnified 16 x).

14/ Erosion en profondeur d'une épreuve (x 16).
Deep erosion of a test specimen (magnified 16 x).

sa vitesse de translation vers la paroi solide, le cas favorable correspondant à une déformation du jet au moment précis où la bulle atteint la paroi.

La contraction asymétrique des bulles peut enfin se justifier du fait de leur accélération relative par rapport au liquide lorsqu'elles se contractent. Ellis [20] a montré comment la conservation de la quantité de mouvement dans le liquide permet d'expliquer la transformation d'énergie cinétique radiale de contraction en énergie cinétique de translation de la bulle. Celle-ci voyant en effet son volume et par conséquent sa masse ajoutée diminuer, doit accroître sa vitesse. Le calcul [21] montre alors que le champ de vitesse autour de la bulle tend vers celui d'un doublet en déformant la paroi de la bulle conformément à la figure 8 d. Là encore on peut observer la formation finale d'un jet qui, s'il est convenablement orienté, peut venir frapper les parois solides.

Les observations faites jusqu'à ce jour [17], [20], [22], [23], [24], [25] indiquent effectivement que le processus le plus probable de contraction correspond à une déformation asymétrique des bulles donnant naissance à un jet microscopique extrêmement rapide. L'érosion de cavitation peut donc être expliquée par un phénomène de choc entre un jet liquide et une paroi solide. Dans le cas présent, le jet final présente un diamètre de l'ordre du micron et des vitesses pouvant atteindre quelques milliers de m/s. Une différence évidente d'ordre de grandeur existe donc entre l'érosion par choc et l'érosion par cavitation. Mais le mécanisme de base apparaît identique. C'est pourquoi nous pousserons plus loin l'analogie qui permettra de relier les deux modes d'érosion.

Comparaison des deux modes d'érosion

1. Aspect de l'érosion.

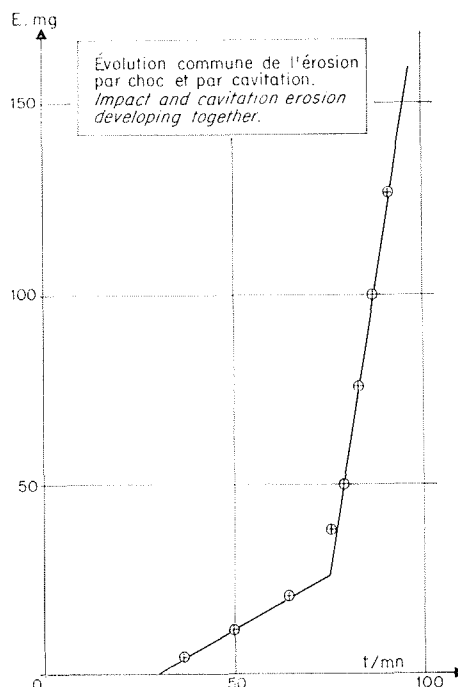
L'un des faits essentiels qui aient poussé à l'utilisation d'un disque tournant devant un jet pour simuler l'érosion de cavitation est sans nul doute l'aspect identique des éprouvettes érodées dans les deux processus comme le montrent les figures 2 et 7. Une observation détaillée de l'évolution de l'érosion laisse apparaître dans les deux cas des cassures par fatigue et des failles dans la structure cristalline [11], [13], [26].

Des expériences utilisant un canon à eau pour produire un jet minuscule animé d'une grande vitesse ont permis d'observer la formation de cratères individuels semblables à ceux produits par cavitation [8], [9], [27], [28], [29] comme le montre la figure 4.

2. Influence du temps d'essai.

Dans les deux modes d'érosion, la quantité E de métal érodé évolue en fonction du temps t selon une courbe présentant quatre périodes distinctes schématisées sur la figure 11.

Au cours d'une première période τ_0 , dite « période d'incubation », une déformation plastique de la surface est observée ainsi que la formation de petits cratères; la perte en poids est nulle ou tout



15/

au moins trop faible pour être appréciée. L'aspect d'une éprouvette d'aluminium à la fin de la période d'incubation est représenté sur la figure 12.

On peut ensuite distinguer une seconde phase d'évolution τ_1 pendant laquelle l'érosion E croît régulièrement, mais relativement lentement. La perte de poids nulle au départ, atteint une valeur E_1 , correspondant à une attaque superficielle de l'éprouvette qui prend un aspect granuleux ou piqueté comme le montre la figure 13.

Dans une troisième période τ_2 , l'érosion croît plus rapidement et attaque l'éprouvette en profondeur comme l'indique la figure 14.

Enfin, dès que l'érosion atteint une certaine profondeur, son intensité diminue et semble se stabiliser du fait de l'amortissement dû à la profondeur des cratères.

L'identité de l'évolution de l'érosion par cavitation et par choc semble donc bien indiquer l'existence d'un processus de destruction commun.

3. Idée du « jet équivalent ».

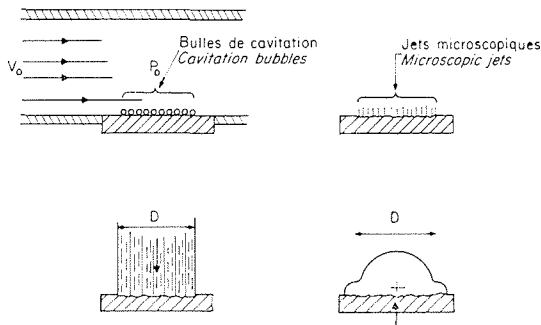
Afin de mettre pleinement en évidence la similitude des deux mécanismes d'érosion, nous avons tenté d'obtenir séparément par chacune des deux méthodes, la même évolution d'érosion en fonction du temps pour deux éprouvettes faites dans le même matériau. Les résultats reportés sur la figure 15 correspondent aux deux conditions d'essai suivantes :

1° pour l'érosion par choc :

- diamètre du disque..... $\varnothing = 40$ cm
- vitesse de rotation..... $N = 1\ 800$ tr/mn
- nombre de jets..... $J = 1$
- diamètre du jet..... $D = 5$ mm

2° pour l'érosion de cavitation :

- vitesse dans la veine d'essai. $V_0 = 38$ m/s
- pression moyenne. $P_0 = 50$ cm Hg



16/ Jets équivalents.
Equivalent jets.

Cette expérience prouve que dans ces conditions les deux méthodes produisent les mêmes effets.

Dans l'écoulement cavitant, chaque point de la surface érodée se trouve soumis à l'action des jets microscopiques des bulles de cavitation. Chaque point subit donc une contrainte de choc moyenne σ à une fréquence moyenne ν . Tout se passe comme si un jet plus gros attaquait l'ensemble de la surface en produisant une contrainte moyenne σ à la même fréquence ν . Ce « jet équivalent » produit donc les mêmes effets que le jet de la machine d'érosion par choc, comme l'indique la figure 16.

L'érosion E dépend des paramètres indépendants σ , ν , t et peut s'inscrire :

$$E = E(\sigma, \nu, t)$$

Des expériences effectuées en faisant varier indépendamment ces paramètres sur une machine d'érosion par choc [15] montrent qu'une même évolution dans le temps, représentée par l'identité :

$$E(\sigma_1, \nu_1, t) = E(\sigma_2, \nu_2, t)$$

σ_1 , ν_1 et σ_2 , ν_2 correspondant à deux conditions expérimentales différentes, entraîne les égalités :

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad \text{et} \quad \nu_1 = \nu_2$$

Ce qui signifie que le jet utilisé dans la machine d'érosion par choc est équivalent aux jets microscopiques des bulles de cavitation ou encore qu'il crée les mêmes contraintes σ à la même fréquence ν .

Cette conclusion paraît essentielle dans l'utilisation du phénomène d'érosion par choc comme simulation de l'érosion de cavitation, puisqu'elle permet de s'assurer non seulement d'une vague ressemblance physique entre les deux phénomènes mais encore d'une identité des paramètres mécaniques fondamentaux qui déterminent l'érosion observée.

4. Effet d'échelle.

Si l'on arrive à déterminer des conditions d'érosion équivalentes à l'aide des deux méthodes, il subsiste cependant des différences très nettes entre les deux processus d'érosion, à savoir : les dimensions et la forme des jets. Cet écart entre les deux phénomènes entraîne une différence dans le mécanisme même d'attaque du matériau solide, bien qu'il y ait choc dans les deux cas.

Nous avons dit que les contraintes σ créées par

le choc dépendent de la vitesse de choc V et des paramètres de forme du jet et du matériau, que nous désignerons globalement par F :

$$\sigma = \sigma(V, F)$$

Si l'on affecte respectivement des indices 1 et 2 les paramètres relatifs à l'érosion par choc et par cavitation il apparaît que l'inégalité :

$$F_1 \neq F_2$$

entraîne :

$$V_1 \neq V_2$$

Des expériences relatives à l'influence de la vitesse V et du diamètre D du jet [2], [11], [26], permettent d'exprimer approximativement l'érosion par une relation de la forme :

$$E = kV^\alpha D^\beta$$

$$\alpha \neq 4 \text{ ou } 5 \quad \beta \neq 1 \text{ ou } 2$$

Ce qui permet de conclure à une vitesse du jet microscopique des bulles de cavitation, d'environ 1 000 m/s. On voit que la diminution énergétique d'un tel jet du fait de ses dimensions extrêmement petites se trouve compensée par la vitesse avec laquelle il frappe la paroi.

Il est également probable que les dimensions du jet affectent non seulement l'intensité ou la durée des suppressions, mais également la manière dont le matériau est attaqué au niveau des grains qui le constituent.

Conclusion

Les quelques éléments de comparaison entre l'érosion par choc et l'érosion de cavitation fournis par cette étude permettent d'entrevoir les divers avantages d'une telle analogie.

— Il s'avère tout d'abord intéressant de pouvoir remplacer dans certains cas l'installation complexe d'un circuit hydrodynamique par l'utilisation du dispositif beaucoup plus simple d'érosion par choc.

— L'identité d'évolution de l'érosion pour des conditions déterminées dans chacune des deux installations permet en outre d'analyser les paramètres mécaniques fondamentaux d'un état cavitant. Nous avons vu en effet comment déterminer les contraintes et la fréquence moyennes des chocs créés par les bulles de cavitation.

Voici un exemple d'utilisation de ce résultat dans l'analyse du mécanisme de la cavitation. L'expérience d'érosion par choc dont les conditions ont été précisées plus haut fournissent une fréquence de 30 chocs par seconde. Nous en déduisons que la fréquence des chocs créés par les bulles de cavitation dans l'écoulement étudié est la même. L'observation de l'écoulement cavitant indique qu'à la vitesse de 38 m/s les bulles de cavitation arrivant dans la zone d'érosion sont distantes d'environ 1 mm, ce qui laisse supposer le passage d'environ 38 000 bulles par seconde en chaque point de la paroi. Si nous comparons ce nombre à celui des bulles qui créent effectivement des chocs, il apparaît qu'une bulle sur 12 750 est réellement efficace.

Ce résultat est tout à fait comparable aux observations d'autres auteurs [27], [30].

— L'utilisation la plus courante de la méthode d'érosion par choc consiste en la comparaison de la résistance à l'érosion de divers matériaux. Cette méthode s'avère donc d'un grand secours pour le métallurgiste. Nous pouvons préciser à ce sujet certains faits qui ont pu faire planer un doute sur la validité d'une telle méthode, mais qui ne présentent en fait aucune preuve à l'encontre de celle-ci. Des expériences faites parallèlement sur différents matériaux à l'aide des deux méthodes d'érosion ont montré que les matériaux très différents se classent de façon semblable à l'aide de chaque méthode, mais qu'à l'intérieur d'une famille d'alliages, des interversions peuvent se produire en ce qui concerne les matériaux ne différant que par le pourcentage de leurs composants.

Il n'y a là rien d'étonnant puisque la même dispersion s'observe entre des classements effectués à l'aide d'installations de cavitation différentes. Nous avons vu en effet que le comportement d'un matériau à l'érosion dépend des paramètres mécaniques σ et ν (contraintes et fréquences) lesquels varient d'une expérience à l'autre. Il n'y a donc aucune raison pour que des conditions d'érosion caractérisées par des valeurs différentes de ces paramètres fournissent des résultats identiques. De plus, différents alliages d'une même famille présentent une granulométrie et une structure différentes susceptibles de différencier le comportement des matériaux dans un sens ou dans l'autre selon les conditions auxquelles ils sont soumis.

Nous dirons donc que, de façon générale, la comparaison de matériaux différents ne reste valable que dans des conditions déterminées par une même valeur des paramètres fondamentaux σ et ν .

— Nous rappellerons enfin que l'emploi de la méthode d'érosion par choc permet d'établir un lien non seulement entre la cavitation et la coupure des jets, mais également avec de nombreux autres phénomènes similaires qui posent également des problèmes métallurgiques de résistance à l'érosion. Nous voulons parler entre autres de l'usure des ailettes de turbines à vapeur par les gouttes de condensation et de l'érosion à la pluie de certaines parties des avions et missiles supersoniques. Il n'est donc pas impensable d'établir entre ces phénomènes des correspondances suffisamment précises pour les simuler en laboratoire par des expériences simplifiées et accélérées de coupure de jet ou de cavitation ultrasonore.

Bibliographie

- [1] CANAVELIS (R.). — Recensement et examen critique des méthodes de détermination de la résistance à l'érosion de cavitation. *La Houille Blanche*, n° 5 (août-septembre 1964).
- [2] DE HALLER (P.). — Recherches sur les corrosions dans les turbines hydrauliques. *Bulletin Escher-Wyss*, n° 3 (1933).
- [3] HONEGGER (E.). — Test on erosion caused by jets. *Revue Brown-Boveri* (1936).
- [4] BEECHING. — Resistance to Cavitation Erosion. *Trans. Inst. Eng. and Shipbuilders in Scotland*, vol. 65 (1941).
- [5] HOBBS (J.M.). — Cavitation Erosion Techniques. N.E.L. Report n° 69 (nov. 1962).
- [6] HOBBS (J.M.). — Problems of Predicting Cavitation Erosion from Accelerated Tests. A.S.M.E., Publication Paper n° 62, HYD 19 (March 1962).
- [7] BOWDEN (F.P.) and BRUNTON (J.M.). — The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds. *Proc. Roy. Soc.*, series A, vol. 263 (1961).
- [8] BRUNTON. — High Speed Liquid Impact. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [9] FIELD (J.E.). — Stress Waves, Deformation and Fracture caused by liquid Impact. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [10] SIR GEOFFREY TAYLOR. — Oblique Impact of a Jet on a plane Surface. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 360 (1966).
- [11] HANCOX (N.L.) and BRUNTON (J.M.). — The erosion of Solids by the repeated Impact of liquid drops. *Phil. Trans. Roy. Soc.* series A, vol. 260 (1966).
- [12] THOMAS (G.P.). — The initial Stages of deformation in metals subjected to repeated liquid impact. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [13] EISENBERG (P.). — Cavitation Damage. *Hydronautics*, Techn. Rep. n° 233 (December 1963).
- [14] THIRUVENGADAM. — Intensity of Cavitation Damage encountered in field installations. *Symposium A.S.M.E.*, Chicago (November 1965).
- [15] CANAVELIS (R.). — Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation dans les turbomachines hydrauliques. Thèse de Doctorat, Université de Paris (juin 1966).
- [16] LORD RAYLEIGH. — On the Pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical Cavity. *Phil. Mag.*, vol. 34 (1917).
- [17] NAUDE (C.) and ELLIS (A.T.). — On the Mechanism of Cavitation Damage by nonhemispherical cavities collapsing in contact with a solid Boundary. *Trans. ASME*, vol. 88 (1961).
- [18] ELLIS (A.T.). — Observations on cavitation Bubbles Collapse. *C.I.T. Report*, Hydrodynamics Lab. (December 1952).
- [19] PLESSET (M.S.) and MITCHELL (T.P.). — On the Stability of the Spherical Shape of a Vapor Cavity in a liquid. *Quart. Appl. Math.*, 13 (1956).
- [20] BENJAMIN (T.B.) and ELLIS (A.T.). — The Collapse of Cavitation Bubbles and the Pressure Thereby produced against solid Boundaries. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [21] CHINGHOLLE. — Etude de l'écoulement d'une émulsion. Thèse, Université de Paris (10 juin 1967).
- [22] SHUTLER (N.D.) and MESLER (R.B.). — A photographic Study of the Dynamics and Damage Capabilities of Bubbles collapsing near solid Boundaries. *Trans. A.S.M.E.*, J. Basis Engrd, D 87 (1965).
- [23] FLOR-SCHUETZ (L.W.) and CHAO (B.T.). — On the mechanism of vapor bubble collapse. *Trans. ASME*, Heat Transfer, C 87 (1965).
- [24] ELLIS (A.T.). — On Jets and Shock Waves from Cavitation. *Proc. Sixth Nav. Hydr. Symp.* (Octobre 1966).
- [25] IVANY (R.D.), HAMMITT (F.G.) and MITCHELL (T.M.). — Cavitation Bubble Collapse Observations in a Venturi. *Trans. A.E.M.E.*, J. Basis Engrs, vol. 88, series D (September 1966).
- [26] BAKER (D.W.C.), JOLLIFFE (K.H.) and PEARSON (D.). — The Resistance of Materials to Impact Erosion Damage. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [27] HAMMITT (F.G.). — Turbine Droplet impingement and related Phenomena. The University of Michigan, Techn. Rep. 07738-4-T (February 1967).
- [28] HAMMITT (F.G.). — Damage to Solids caused by Cavitation. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [29] SHALNEV (K.K.), VARGA (I.I.) and SEBESTYEN (D.). — Investigation of the Scale Effects of Cavitation Erosion. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, series A, vol. 260 (1966).
- [30] OLSON (M.G.). — High Speed photographic Studies of ultrasonically induced Cavitation and Detailed Examination of Damage to selected materials. Ph. D. Thesis (1966).

M. WEGNER pense que la méthode proposée par M. CANAVELIS ne peut résoudre l'ensemble du problème tel qu'il est posé au constructeur de turbines et de pompes. Il souligne que dans ces dernières machines en service industriel, on observe que la modification apportée à l'écoulement par le début de l'érosion a des conséquences plus importantes que celles de la cause première de cette érosion. La perturbation due à l'érosion de départ crée en effet, des décollements et des tourbillons qui vont produire le long des aubes, des cavitations à répétition.

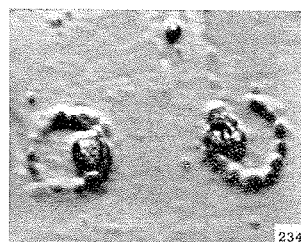
Pour résumer, l'érosion produite par un écoulement réel comporte une sorte de processus d'autoaccélération que ne semble pas pouvoir reproduire la machine à érosion par jet. En effet, dans ces machines, le jet incident est parfaitement indépendant de l'état de l'échantillon. M. WEGNER ne pense donc pas que des machines d'essais de type puissent résoudre le problème pratique de la prévision de l'usure à long terme.

M. CANAVELIS reconnaît que la cavitation secondaire produite par l'érosion elle-même, n'existe pas dans la machine d'érosion. S'il y a modification du phénomène de cavitation dans la turbine du fait de « l'érosion secondaire » visée plus haut, on devrait, en principe, pour réaliser une bonne « simulation » de la réalité, modifier parallèlement le réglage de la machine d'érosion par choc. Toutefois, l'expérience montre, même pour des durées assez longues, une concordance raisonnable entre les résultats obtenus par les deux processus; dans la machine d'érosion par choc, la formation de gros cratères entraîne aussi un accroissement de l'érosion, non par formation de bulles secondaires mais par transmission d'ondes de choc.

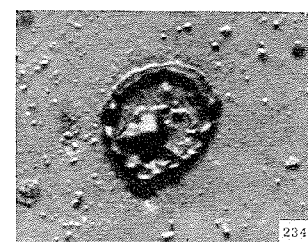
M. le Président donne la parole à M. le Professeur HAMMITT de l'Université de Michigan et spécialiste de ces recherches, qui apporte les informations suivantes tendant à prouver que l'érosion de cavitation est bien due à des microjets :

« M. CANAVELIS a montré une microphotographie de cratères de cavitation prise dans mon laboratoire de l'Université du Michigan, sur de l'acier inoxydable revêtu d'une mince plaque de cadmium. L'aspect de ces cratères suggère fortement l'idée qu'ils ont été créés par un microjet plutôt que par le mécanisme classique de l'onde de choc de Rayleigh.

« J'aimerais ajouter une plus récente preuve de ce mécanisme de la formation des cratères de cavitation sur du plexiglass, soumis dans notre laboratoire à un essai sur un



a/ Cratères de cavitation sur le plexiglas d'un Venturi cavitant ($\times 1000$).
Cavitation craters on the plexiglas of cavitating Venturi (magnified 1000 \times).



b/ Cratère de cavitation sur le plexiglas d'un Venturi cavitant ($\times 2000$).
Cavitation crater on the plexiglas of cavitating Venturi (magnified 2000 \times).

Venturi cavitant (Cf. photos a et b ci-dessus). L'aspect de l'érosion produite, avec sa zone centrale annulaire non endommagée, entourée par un anneau érodé et sa petite zone centrale érodée, est tout à fait semblable — bien qu'à plus petite échelle, à l'image de l'érosion par choc d'une goutte sur du plexiglass, présentée par M. CANAVELIS dans son mémoire. »

Parmi les 30 000 bulles dénombrées, combien y a-t-il de bulles de gaz et de bulles de vapeur, et quel est leur diamètre moyen, demande M. DEGROIS? M. CANAVELIS pense que les premières étaient plus nombreuses que les secondes, mais ne peut donner la proportion exacte des unes et des autres; leur diamètre était de l'ordre de 1 mm au droit de l'éprouvette.

Se référant aux expériences poursuivies au Centre d'Essai de Chatou, M. DOMERGUE estime qu'il existe un bon parallélisme entre les deux méthodes d'essai citées plus haut car, dit-il, la propagation du phénomène d'érosion s'effectue de façon continue aussi bien dans le cas de l'érosion par jet et choc à grande vitesse que dans le cas de l'érosion par cavitation hydrodynamique.

M. le Président remercie M. CANAVELIS et donne la parole à M. CHINCHOLLE pour l'exposé de sa communication.

Abstract

An analysis of cavitation erosion

by R. Canavelis *

Use of the impact erosion method with a specimen in the path of a jet to study resistance to cavitation erosion is attractive because it is simple and its results are visibly similar to the effects of cavitations, but its limits of applicability still remained to be determined.

With the impact erosion installation used, the results obtained could be related to existing data on water impact against a solid wall. The process involved in jet erosion is described.

The crushing process of cavitation bubbles is discussed, showing that microscopic jets form and that the principle of their action is similar to that of impact erosion.

Detailed comparison of both erosion methods shows identical wear appearance and similar development of wear over a period of time, and it also yields an equivalence relationship between the microscopic bubble jets and the macroscopic jet produced by the impact erosion machine.

It can be concluded from this analogy that the impact erosion method is suitable for cavitation erosion analysis and the investigation of the relative erosion resistance of materials.

* *Electricité de France*, Direction des Etudes et Recherches, 6, quai Watier, 78 - Chatou.