

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 94 (1968)
Heft: 19

Artikel: L'effet fusée et l'érosion mécanique de cavitation
Autor: Chincholle, Lucien
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-69660>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgrin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosan-
dey, ing.; J. Favre, arch.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire,
arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et
M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 450.—
1/2 » » 238.—
1/4 » » 120.—
1/8 » » 62.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

L'effet fusée et l'érosion mécanique de cavitation, par Lucien Chincholle.
Bibliographie. — Les congrès. — Société suisse des ingénieurs et des architectes.
Documentation générale. — Informations diverses.

L'EFFET FUSÉE ET L'ÉROSION MÉCANIQUE DE CAVITATION¹

par LUCIEN CHINCHOLLE²

Résumé

L'étude théorique du déplacement d'une bulle de gaz ou de vapeur animée simultanément d'un mouvement de translation et d'un mouvement radial a permis de mettre en évidence des accélérations considérables et l'existence d'un microjet particulièrement actif: c'est l'effet fusée. Lorsque des bulles évoluent dans un milieu liquide propice à son développement, il se crée dans le fluide des zones où la densité d'énergie cinétique est importante. C'est pourquoi une bulle qui heurte une paroi peut facilement provoquer une érosion mécanique. Dans le cadre des applications de l'effet fusée, l'auteur présente le mécanisme de ce type d'érosion.

Introduction

L'étude de l'érosion de cavitation et, plus généralement de la cavitation, consiste le plus souvent à réaliser des essais de pompes afin d'établir des corrélations entre l'intensité de l'érosion et les divers paramètres auxquels il semble qu'elle soit sensible. La comparaison de résultats expérimentaux parfois contradictoires ne permet

guère d'obtenir de conclusions nettes. C'est pourquoi, abandonnant cette technique de travail, nous avons considéré le nuage de bulles de cavitation et étudié d'abord plus particulièrement, d'une manière théorique, l'évolution d'une simple bulle de gaz ou de vapeur à l'intérieur d'un liquide.

Lorsque cette bulle est animée simultanément d'un mouvement de translation et d'un mouvement radial elle s'autopropulse à la manière d'une fusée. Sous l'action unique des forces existant dans le liquide elle acquiert des accélérations importantes. Par suite, sa vitesse varie ainsi que la densité d'énergie cinétique en des zones que nous définirons. Pratiquement, le mouvement de la bulle s'accompagne d'un microjet extrêmement efficace qui permet d'expliquer l'érosion mécanique de cavitation.

¹ Cet article est le premier d'un ensemble de textes publiés par le *Bulletin technique* dans le cadre du symposium AIRH (Association internationale de recherches hydrauliques) qui aura lieu à Lausanne du 8 au 11 octobre 1968.

² Maître-assistant à la chaire d'électrotechnique de la Faculté des sciences de Paris, 33, avenue du Général-Leclerc, 92 Fontenay-aux-Roses (France).

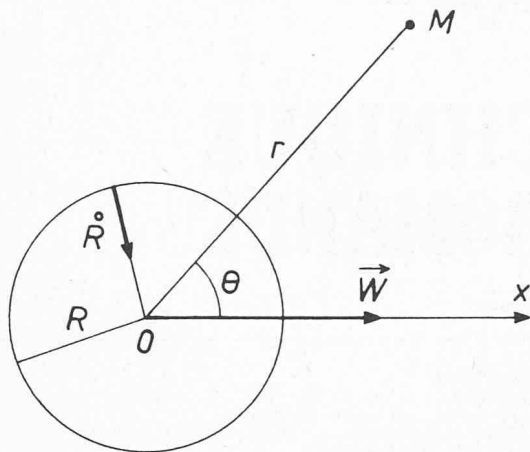


Fig. 1.

Après avoir résumé l'aspect théorique de cette étude que nous appelons *l'effet fusée*, nous l'appliquerons à l'action néfaste des bulles de cavitation dans les pompes. Nous aborderons également certains problèmes relatifs à ce sujet ainsi que les moyens susceptibles d'éviter l'érosion de cavitation.

1. Aspect théorique

1.1 Rappels

L'étude détaillée du mécanisme de l'effet fusée ayant déjà fait l'objet de publications [1] [2] [3], nous nous bornerons à exposer le problème et à présenter l'allure générale de la solution.

Ne pouvant analyser le mouvement d'une bulle de façon complète, nous avons eu recours à quelques hypothèses classiques : liquide parfait, pression constante à l'intérieur de la bulle, absence de forces de gravité et de tension superficielle. Nous avons supposé également que les bulles d'un diamètre inférieur au millimètre restaient sphériques et que la vitesse du liquide autour d'elles dérivait d'un potentiel. Nous avons conservé toutefois les forces d'inertie induite. En effet, ce paramètre souvent négligé constitue le thème de notre étude qui a mis en évidence sa valeur intrinsèque.

Soit une bulle sphérique de diamètre D et de centre O se déplaçant à la vitesse \vec{W} (fig. 1). Un point de la surface est animé par rapport à O d'une vitesse radiale \dot{R} . Celle-ci peut être positive (la bulle grossit : explosion) ou négative (la bulle se réduit : implosion).

Le calcul se développe à partir de l'équation fondamentale de la dynamique, de l'équation de Bernoulli généralisée et de l'expression différentielle de l'énergie cinétique du liquide mis en mouvement. On obtient ainsi l'expression de la pression en un point de la surface de la bulle. L'intégration de toutes ces forces de pression sur la surface mouillée donne la force résultante appliquée. Elle prend l'une des formes suivantes qui sont identiques entre elles.

$$\vec{F} = -M' \frac{d\vec{W}}{dt} + \vec{W} \frac{dM'}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{F} = -M' \frac{d\vec{W}}{dt} + \vec{W} \frac{3}{D} \frac{dD}{dt} \quad (2)$$

$$\vec{F} = - \frac{d(M'\vec{W})}{dt} \quad (3)$$

M' représente la moitié de la masse de la goutte du liquide qui remplirait la bulle. Cette masse, appelée masse induite, joue un rôle très important souvent méconnu. Elle donne à la bulle qui est une entité géométrique, une existence réelle. Comme les équations le suggèrent, nous montrerons qu'une bulle dispose d'une masse effective, d'une énergie cinétique de translation

$$T' = \frac{1}{2} M' W^2 \text{ et d'une énergie cinétique d'implosion}$$

$$T'' = \frac{1}{2} M'' \dot{R}^2 \text{ soit au total d'une énergie cinétique égale à :}$$

$$T = \frac{1}{2} M' W^2 + \frac{1}{2} M'' \dot{R}^2 \quad (4)$$

$$M'' = 6 M'$$

Par l'interprétation des trois premières relations, nous tenterons de mieux concevoir l'existence et le mode d'évolution d'une bulle. En l'absence de toute autre force extérieure, seules subsistent les forces d'inertie ci-dessus.

La présence du terme M' dans toutes les formules conduit à remplacer le mouvement complexe de translation d'une bulle dans un fluide par celui d'une particule de masse M' située dans le vide. Lorsque la bulle se déplacera dans un liquide réel, nous appellerons cette particule *la pébulle* et, quand il s'agira d'un liquide parfait, ce sera *le pébullen*. Le pébullen évolue donc dans le vide avec des caractéristiques de mouvement identiques à celles de la bulle en translation : même masse effective, même vitesse, même accélération, même quantité de mouvement et même énergie cinétique. La pébulle est donc la particule équivalente à la bulle dans son mouvement de translation.

Définition de l'effet fusée

La relation (3) donne : $\vec{M}'\vec{W} = \text{constante}$. Elle exprime la conservation de la quantité de mouvement du pébullen. Certes, cette loi peut paraître évidente à posteriori. Mais ce résultat spécifie la forme que prend la quantité de mouvement. Nous la précisons davantage quand nous étudierons la formation du microjet.

On peut dire également que le pébullen est soumis à une force $\vec{W} \frac{dM'}{dt}$ (1) ou encore à une accélération que nous appelons accélération de l'effet fusée (2) :

$$\vec{\Gamma}_f = \frac{3\vec{W}}{R} \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

Le pébullen éjecte la masse $\frac{dM'}{dt}$ par unité de temps. Comme une fusée, il compense la perte de la quantité de mouvement correspondante par une valeur égale et opposée, ce qui accroît sa vitesse.

De même, puisque une bulle présente les mêmes caractéristiques dynamiques, nous pouvons dire qu'elle s'autopropulse par effet fusée. Une variation de son volume entraîne une variation de sa vitesse de translation. Tout se passe comme si elle éjectait une partie de

sa masse induite. En effet, au cours de son implosion par exemple, certaines particules du fluide ambiant retrouvent la vitesse nulle du liquide à l'infini. La conservation de la quantité de mouvement $\vec{M}'\vec{W}$ implique un accroissement de la vitesse des autres particules en mouvement, c'est-à-dire finalement une accélération de la bulle.

En résumé, une bulle peut s'autopropulser par variation de volume :

- une diminution de volume l'accélère : effet fusée direct ;
- une augmentation de volume la freine : effet rétro-fusée.

Nous signalons également que le principe de conservation de l'énergie amène à établir, pour le pébullen, une équivalence entre la variation m' de sa masse effective M' et la variation de l'énergie cinétique mise en jeu, soit à un instant donné :

$$m' \longleftrightarrow m'W^2$$

1.2 Théorie du jet

La connaissance du potentiel des vitesses rend facile le calcul des trajectoires des particules liquides mises en mouvement par le passage d'une bulle [4] ainsi que la détermination de la valeur de l'énergie cinétique mise en jeu. Nous insisterons particulièrement sur les caractéristiques du microjet qui prend naissance.

1.2.1 Allure du simili-jet

Le potentiel des vitesses s'écrit avec les notations de la figure 1 :

$$\Phi = \frac{WR^3 \cos \Theta}{2r^2} + \frac{R^2 \dot{R}}{r}$$

Connaissant la vitesse d'une particule M de liquide, nous avons défini sa trajectoire par l'intermédiaire d'un ordinateur. On peut suivre ainsi les variations de la vitesse du fluide en fonction de différents paramètres tels que la vitesse d'implosion ou la distance à l'axe de translation, pour des conditions initiales données : diamètre de la bulle 0,10 m, vitesse de translation : 0,10 m/s.

Deux résultats nous paraissent importants. Le premier confirme la réalité de la masse M' . La figure 2 représente la trajectoire d'une particule fluide A de masse m . Elle est mise en mouvement par le passage d'une bulle de volume constant, de centre O et parcourant l'axe Oz de $-\infty$ à $+\infty$.

La trajectoire correspondante $A'AA''$ montre que la particule A effectue la translation résultante $A'A''$ et qu'il y a transfert de la masse m . A chaque instant, la somme de toutes ces masses m , pondérées suivant leur énergie cinétique de translation, donne la masse résultante M' . C'est la masse du pébullen, la particule équivalente à la bulle dans son mouvement de translation. M' correspond bien à une masse réelle en mouvement.

Une seconde conclusion découle de l'examen des courbes des figures 2 et 3 représentant des trajectoires de particules liquides pour des valeurs croissantes de la vitesse d'implosion \dot{R} . Sur la figure 2 où $\dot{R} = 0$ on relève trois trajectoires correspondant aux particules A' , B' , C' de plus en plus éloignées de l'axe Oz .

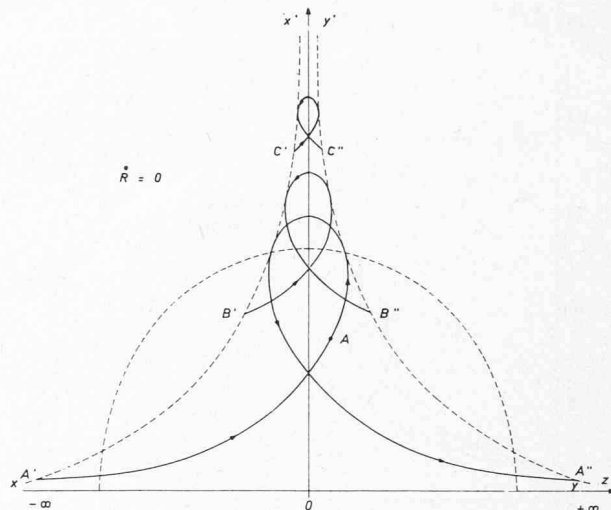


Fig. 2.

Considérons la particule A' . La bulle de volume constant, située alors à l'infini à gauche, se rapproche du point O . Elle oblige la particule A' à s'éloigner vers A pour décrire une boucle afin de lui livrer le passage. Dans la deuxième partie de sa trajectoire, après le point O , la bulle est suivie par cette particule qui atteindra le point A'' lorsqu'elle sera à l'infini à droite.

xx' et yy' sont des asymptotes qui caractérisent successivement les positions de départ et d'arrivée des particules liquides correspondant à des bulles situées à $-\infty$ et à $+\infty$.

Sur les figures 3 on peut suivre l'évolution de ces asymptotes et des trajectoires au fur et à mesure que la vitesse d'implosion augmente. Les trajectoires tendent à se rapprocher de l'axe Oz en prenant la forme d'un simili-jet que nous nommerons souvent un *microjet* étant données les dimensions qu'il prend lors de la cavitation. L'appellation de jet, employée pour simplifier le langage est incorrecte. On doit l'utiliser avec prudence. Nous allons spécifier cet écoulement de liquide. Tandis que, dans un jet classique, les particules fluides situées à la pointe conservent approximativement leur position et leur vitesse, on observe, dans le cas étudié, une succession continue des éléments constitutifs. A chaque instant, une particule nouvelle remplace la précédente dans sa position par rapport à la bulle.

Sur la figure 4, nous avons tracé le profil des vitesses du microjet dans un plan perpendiculaire à l'axe du mouvement et tangent à la bulle. L'allure convergente de sa pointe s'accroît avec des valeurs croissantes de la vitesse d'implosion \dot{R} . On pourrait définir un diamètre de l'extrémité : il est bien inférieur au diamètre de la bulle.

Les figures 5a et 5b traduisent les variations de la vitesse axiale des particules liquides en fonction de leur abscisse sur l'axe Oz . A l'origine, les particules considérées se trouvent successivement à 1 mm et à 1 cm de l'axe à l'abscisse -10 cm. Enfin, la figure 6 présente l'évolution de la vitesse axiale en fonction du temps. Ces diagrammes aident mieux à définir les caractéristiques du simili-jet par l'intermédiaire de la vitesse en chaque point du liquide, cette vitesse étant définie en fonction du temps et de l'espace. La vitesse axiale passe

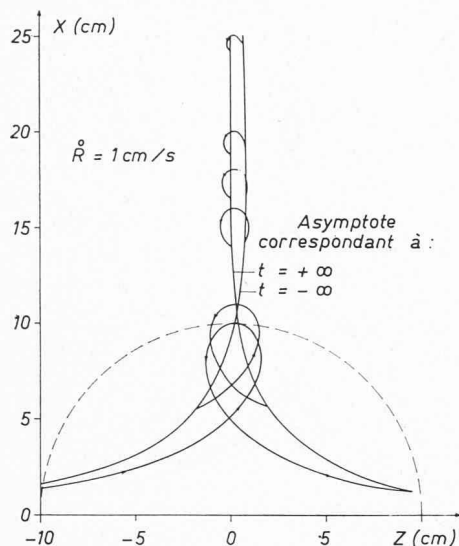


Fig. 3a.

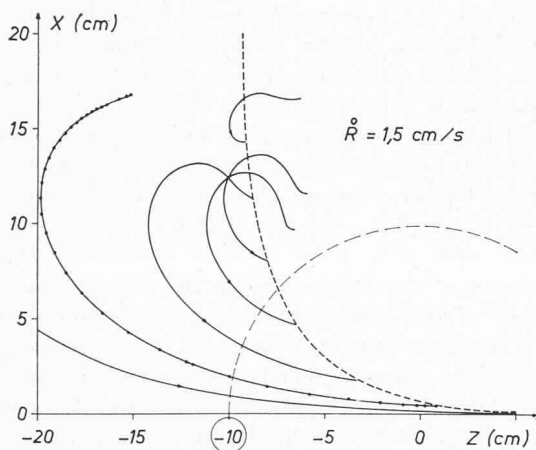


Fig. 3b.

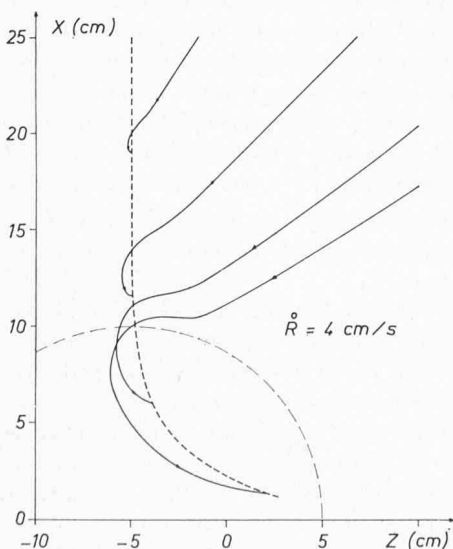


Fig. 3c.

par un maximum. Ce pic est plus ou moins prononcé suivant la grandeur de la vitesse d'implosion.

Nous avons supposé, pour la commodité du calcul, que la vitesse d'implosion restait constante. Pratiquement, au cours de la cavitation, elle croît. Les résultats s'amplifient dans le sens des vitesses \dot{R} croissantes.

D'autre part, nous n'avons pris que des valeurs très réduites. La vitesse pouvant être cent fois plus grande, on conçoit aisément l'importance du jet. Son diamètre, bien inférieur à celui de la bulle, devient de plus en plus acéré au fur et à mesure que celle-ci implode.

1.2.2 Energie du jet

De même que la masse induite d'une bulle est la « somme » de toutes les masses des particules liquides affectées d'un certain coefficient, l'énergie cinétique de la pèbulle est également la « somme » des énergies cinétiques des particules élémentaires considérées dans leur mouvement de translation axial. Les notions de masse induite et d'énergie cinétique de translation ne sont pas des grandeurs fictives. Elles ont, certes, un aspect d'équivalence mais elles sont concrètes tant par leur existence que par leurs effets.

Nous ne développerons pas le mécanisme théorique de transfert de l'énergie. Il est intéressant toutefois de signaler que lors de l'implosion d'une bulle l'énergie potentielle de pression se transforme en énergie cinétique d'implosion qui, à son tour, prend la forme d'une énergie cinétique de translation. L'effet fusée a donc comme conséquence de créer un flux d'énergie dirigé dans le sens du déplacement de la bulle.

Calcul de la densité d'énergie cinétique de translation

Considérons la relation (4) où nous ne retiendrons que le terme :

$$T' = \frac{1}{2} M' W^2$$

Il est facile de calculer numériquement cette énergie qui peut atteindre 10^{-4} joule.

Si x est le rapport entre le diamètre final et le dia-

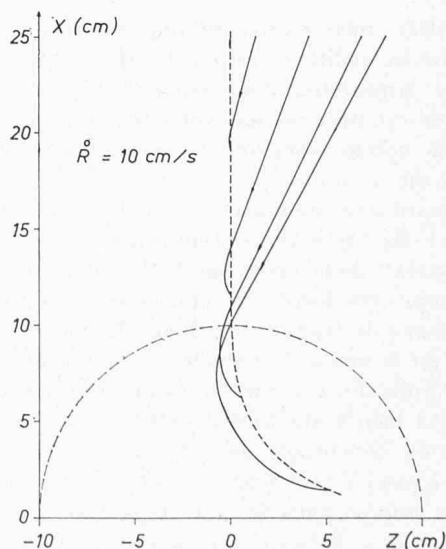


Fig. 3d.

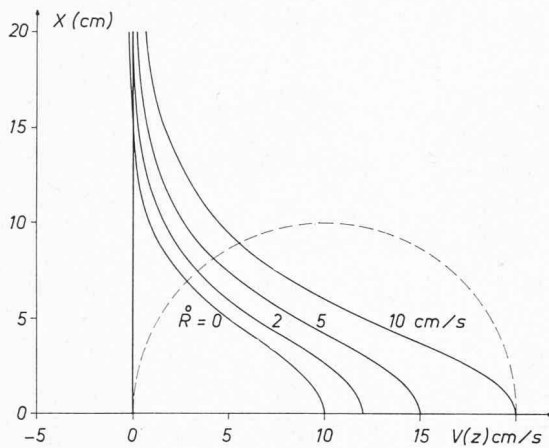


Fig. 4.

mètre initial et si T'_1 est l'énergie cinétique initiale, on montre que :

$$T' = \frac{T'_1}{x^3}$$

De plus, quand une bulle se déplace, l'énergie cinétique de translation se trouve pratiquement répartie à l'intérieur d'une sphère concentrique à la bulle et de rayon triple. Nous pouvons donc évaluer la densité moyenne d'énergie ainsi que le rapport k des densités moyennes finale et initiale :

$$k = \frac{1}{x^6}$$

En prenant : $x = 4 \cdot 10^{-2}$

on en tire : $k = \frac{1}{4^6 \cdot 10^{-12}}$ et $k \simeq 2,5 \cdot 10^8$

La densité moyenne d'énergie se trouve multipliée par un facteur considérable : $2,5 \cdot 10^8$.

La densité d'énergie cinétique initiale de translation correspond à $W_1 = 0,1$ m/s est égale à : $0,185$ j/m³.

La densité d'énergie cinétique finale atteindra la valeur :

$$\delta \simeq 46 \cdot 10^6 \text{ j/m}^3 \text{ soit } 46 \text{ Mj/m}^3$$

Pression consécutive au choc du jet contre une paroi. Nous pouvons écrire que l'énergie cinétique de translation se transforme en énergie de pression.

$$p = \frac{1}{2} \rho W^2$$

Application numérique

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad W = 1500 \text{ m/s}$$

$$p \simeq 10^9 \text{ pascals soit } \boxed{p \simeq 10\,000 \text{ kgp/cm}^2}$$

Diamètre de l'extrémité du jet. Il est inférieur au diamètre de la bulle à l'état final. L'application numérique suivante :

$$D_1 = 10^{-3} \text{ m} \quad W_1 = 0,1 \text{ m/s} \quad \dot{R}_1 = 5 \text{ m/s}$$

$$\text{donne : } \boxed{W = 1500 \text{ m/s}} \quad x \simeq 0,04 \text{ et } \boxed{D = 40 \mu}$$

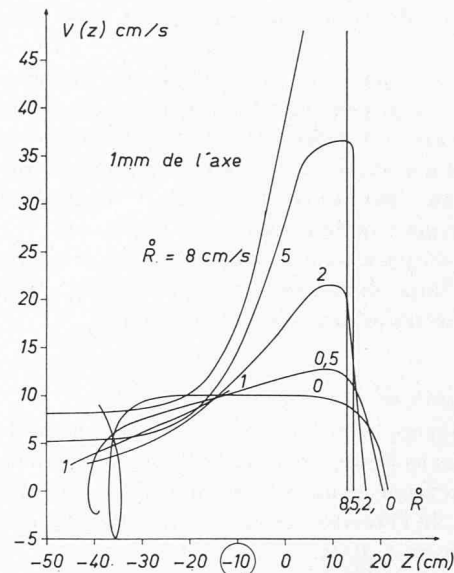


Fig. 5a.

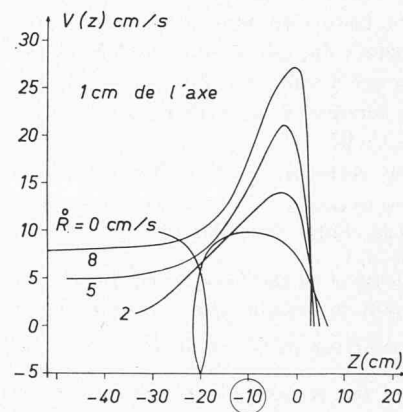


Fig. 5b.

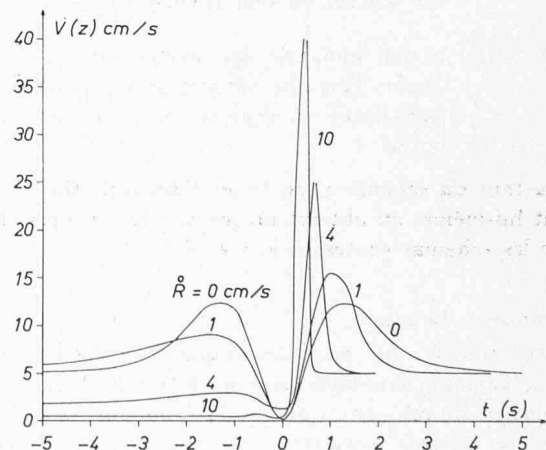


Fig. 6.

Les vitesses de translation atteignent des valeurs élevées.

Le diamètre du jet sera donc de l'ordre de 40 microns. Nous pensons qu'il peut être très inférieur. En effet, la valeur R choisie est faible. D'autre part, nous avons supposé qu'il n'y avait pas d'énergie de pression qui se transforme en énergie cinétique. Pratiquement, cet apport d'énergie supplémentaire est important.

La pointe du jet atteint certainement des dimensions comparables aux distances intermoléculaires, c'est-à-dire de l'ordre d'une centaine d'angströms.

1.3 Mécanisme de l'érosion

La connaissance de la structure du microjet précédent caractérisé par sa forme acérée et de l'importante densité d'énergie cinétique disponible permet d'aborder facilement l'étude de l'érosion mécanique au cours d'un choc entre le jet et une paroi.

Avant de définir les divers types de chocs, nous analyserons les figures 7 (a, b, c, d) afin de concevoir l'allure de quelques jets particuliers.

Implosion d'une bulle immobile (fig. 7a). Seule intervient l'énergie cinétique d'implosion. Les particules fluides ont une direction radiale. Considérons un secteur de la sphère ayant le même centre que la bulle, mais un diamètre beaucoup plus grand. Au cours de l'implosion, la surface liquide converge vers le centre, à la manière d'un jet de plus en plus acéré. Théoriquement, à la limite, lorsque la bulle disparaît, l'extrémité de ce jet est ponctuelle.

Ce raisonnement reste vrai si l'on étend le secteur à la sphère entière. L'implosion d'une bulle provoque donc un jet dirigé vers le centre de celle-ci.

Bulle en translation et en implosion simultanées. Le jet défini précédemment se dessine plus ou moins bien suivant les valeurs relatives de W et de \dot{R} .

$W = \dot{R}$: quand les vitesses de translation et d'implosion sont égales (fig. 7b) la particule liquide située au point de convergence des trajectoires reste fixe.

$W < \dot{R}$: c'est un cas intermédiaire entre les deux précédents. Le flux d'énergie dirigé est contrecarré par le choc des particules liquides venant en sens inverse (fig. 7c).

$W > \dot{R}$: le jet apparaît ici nettement (fig. 7d). Toute l'énergie cinétique d'implosion se transforme en énergie cinétique de translation.

Partant du schéma a, où le jet s'anéantit théoriquement lui-même, on obtient un jet de plus en plus effilé avec les schémas successifs c, b et d.

Mécanisme du choc

Choc simple : fig. 8a. Lorsqu'une bulle heurte une paroi, l'énergie cinétique de translation se transforme en énergie de pression. Comme un projectile, la pébule cède son énergie sous forme de choc simple. Notons qu'elle est attirée par la paroi, ce qui accroît l'intensité du choc.

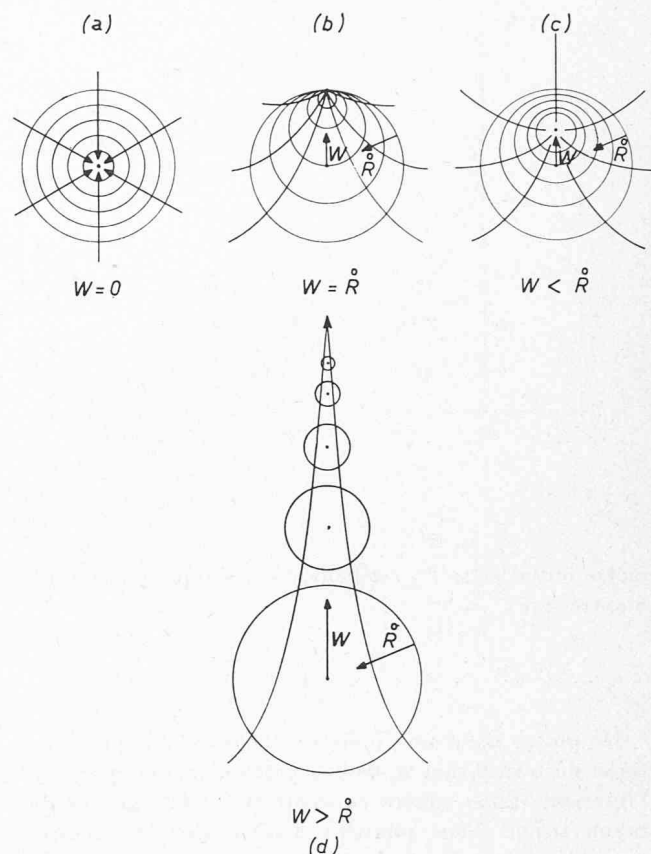


Fig. 7.

Choc du type charge creuse : fig. 8b. Soit une cavité hémisphérique sur une paroi. Durant l'implosion, l'énergie cinétique du liquide est focalisée sur un point de la paroi au centre de la sphère où la densité d'énergie s'accroît considérablement.

Choc du type jet : fig. 8c. Lorsque l'implosion de la bulle animée d'un mouvement de translation sera terminée, le microjet qui la suit transmettra son énergie cinétique à la paroi. Cette énergie est la somme des énergies cinétiques de translation et d'implosion.

Ce dernier type de choc est le plus efficace. En effet, le jet est suffisamment acéré et puissant pour s'infiltrer dans l'édifice cristallin du matériau. Les forces mises en jeu sont supérieures aux forces de liaison moléculaires : il y a dislocation.

Remarques

- Pratiquement ces trois types de chocs sont confondus avec, en général, prédominance de l'effet du jet.
- Plusieurs chercheurs ont suggéré que l'érosion mécanique pourrait être due à la multiplicité des ondes de choc qui écouissent le métal. Il semble que ce phénomène soit secondaire durant la période initiale et qu'il n'intervienne que plus tard. Le processus d'extrusion de matière est considérablement facilité par le travail de minage intérieur effectué par les jets.
- La présence d'air dans la bulle diminue la puissance du choc. D'une part la compression et les réactions électrochimiques absorbent de l'énergie. D'autre part, l'existence d'une bulle freine la propagation du jet. Le choc se rapproche du type choc simple.
- Nous avons toujours supposé que la bulle restait sphérique. Pratiquement elle peut se déformer considérablement. Divers auteurs ont considéré cette possibilité. De plus, on doit tenir compte des frottements.

Choc simple.

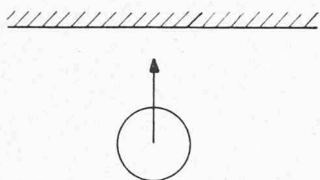


Fig. 8a.

Choc du type charge creuse

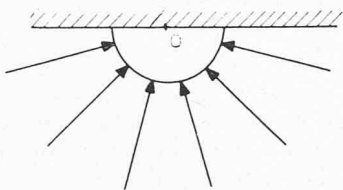


Fig. 8b.

Choc du type jet

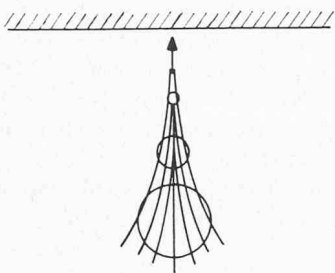


Fig. 8c.

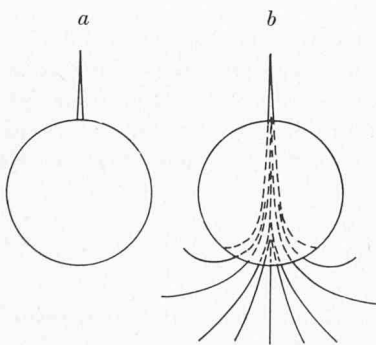


Fig. 9.

Moyennant quelques hypothèses sur la fréquence des chocs des bulles sur les parois dans les zones de cavitation, on peut évaluer la puissance de ce bombardement qui atteint plusieurs centaines de watts par centimètre carré.

L'étude théorique du mouvement d'une bulle en implosion démontre bien l'existence d'un microjet d'une puissance suffisante pour provoquer une érosion mécanique.

2. Aspect physique

2.1 Vérifications expérimentales

2.1.1 Effet fusée

Chaque fois qu'une bulle change de volume, sa vitesse varie suivant les lois de l'effet fusée. Que ce soit dans un champ de pression (bulle en ascension dans l'eau, bulle à l'intérieur d'une pompe centrifuge) ou dans un champ de température (ébullition), nous avons toujours observé nettement l'effet fusée [2]. Des accélérations de 250 et même de 3000 m/s.s ont été relevées.

2.1.2 Jet

L'existence du similitjet apparaît sans équivoque sur une photo de bulle réalisée par T. B. Benjamin et A. T. Ellis [5]. Elle représente une sphère surmontée d'un cône (fig. 9 a). Nous expliquerons cette forme à partir de l'effet fusée. Soit une bulle de gaz qui implose. En se réduisant, elle accélère, donne naissance à un jet qui la suit et, par l'intermédiaire du gaz inclus, emmagasine de l'énergie potentielle de pression. A un instant donné, la vitesse radiale s'annule et l'explosion s'amorce : c'est le rebond. Alors, la bulle grossit et l'effet rétrofusée réduit sa vitesse qui devient inférieure à celle du jet. Poursuivant sa trajectoire, ce dernier perce la bulle suivant le schéma de la figure 9 b.

Erosion mécanique due à une bulle de cavitation. L'observation à l'œil nu d'un matériau érodé par cavitation fait apparaître des cratères profonds de l'ordre du centimètre. Ceci ne présente guère d'importance théorique. On imagine facilement la croissance d'une cavité initiale facilitée par la présence permanente de gaz soumis à des surpressions successives. Ces cavités donnent aux surfaces un aspect buriné très perturbé. Elles peuvent même se creuser à l'intérieur du matériau : il est nécessaire de faire une coupe pour les voir.

Plus intéressante pour nous est l'observation du point d'impact d'une bulle. M. Vasvari a pu en déterminer le diamètre à l'aide de photographies prises au microscope ordinaire et au microscope électronique (fig. 10 et 11).

Sur ces photos, les diamètres des cratères d'impact des bulles varient depuis 0,01 micron jusqu'à 2 microns [7].

M. Vasvari a relevé également au microscope électronique des cavités filiformes perpendiculaires à la surface. Elles pénètrent assez profondément et semblent se frayer un chemin en tortillon dans le matériau.

Ces observations confirment les résultats obtenus à partir de l'effet fusée et de la théorie du jet.

2.1.3 Trajectoires des bulles à l'intérieur d'une pompe centrifuge

Pour que les microjets entraînent une érosion mécanique de cavitation, ils doivent se diriger vers les parois. Comme la théorie prévoit que les bulles tendent à heurter ces parois, il n'est pas surprenant que l'érosion de cavitation soit aussi brutale.

Nous avons vérifié expérimentalement ce résultat par photographie en utilisant un rotoscope [6]. Cet appareil « arrête » le mouvement de rotation de la roue de la pompe, ne laissant subsister que le mouvement relatif des bulles par rapport aux aubes. Il suffit alors de prendre une photo en pose pour obtenir les trajectoires des bulles. Elles apparaissent sur la figure 12 ; on voit

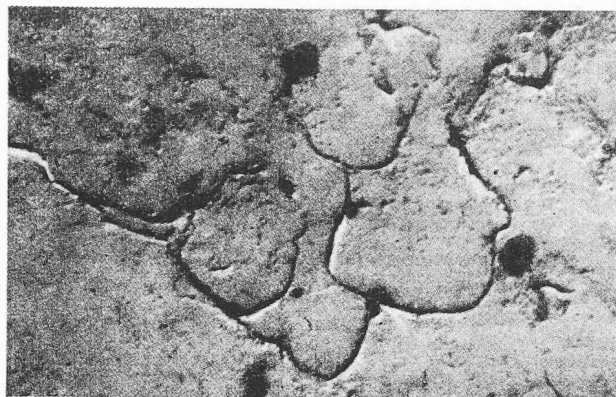


Fig. 10. — Surface d'aluminium érodée (vues identiques lorsque la cavitation est due aux ultrasons ou à l'impact d'un jet).
— grossissement : 10 000 \times .

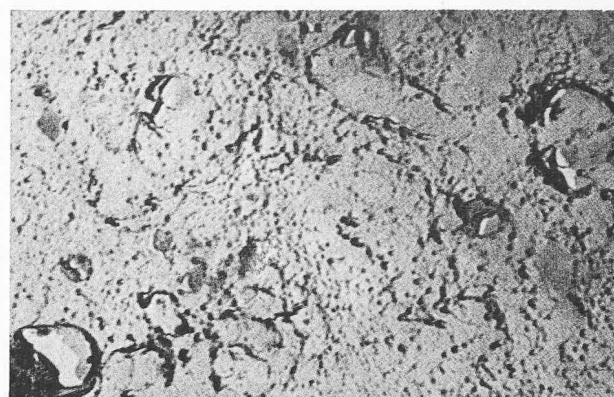


Fig. 11. — Surface d'or érodée par ultrasons. Vue identique pour une surface de corindon attaquée au jet.
— grossissement : 16 000 \times .

notamment qu'elles s'incurvent pour aller bombarder les pales.

L'application de l'effet fusée à l'écoulement d'une émulsion à l'intérieur d'une pompe centrifuge a permis en outre d'énoncer des lois d'écoulement des bulles. Nous les avons vérifiées également [2] [3].

On doit noter un fait très surprenant. Les bulles de gaz sortent de la pompe plus rapidement que le liquide (deux fois plus vite environ). Les bulles ne sont donc pas entraînées par le liquide. C'est l'inverse qui se produit. La présence d'une certaine quantité de vapeur formée durant la traversée d'une zone de cavitation, accroît l'accélération par effet fusée. Il en résulte une valeur élevée de la vitesse (une dizaine de mètres par seconde). Les bulles de gaz peuvent alors contribuer, à leur tour, à l'érosion mécanique.

2.2 Analyse de quelques types d'érosion caractéristiques

La diversité de l'aspect des surfaces ayant séjourné dans des zones de cavitation dérouté l'observateur. Tantôt le matériau reste intact, tantôt il est érodé uniformément ou bien suivant des directions privilégiées. Ces phénomènes apparemment aléatoires s'interprètent bien à l'aide de la théorie de l'effet fusée.

Pour qu'il y ait érosion, il faut que le microjet liquide bombarde le matériau. Ceci nécessite la présence de

bulles de vapeur en implosion, qui « tombent » dans un champ de pression à gradient positif au voisinage de la paroi. Tant que ces conditions ne seront pas remplies, la cavitation restera sans effet.

2.2.1 Zones de cavitation ne causant pas d'érosion

Cas des modèles. Au cours des essais de machines hydrauliques sur modèles on n'observe pas d'érosion de cavitation bien qu'il existe des bulles de cavitation. En fait, une maquette doit être la reproduction la plus fidèle possible du réel. Comme il existe plusieurs critères de similitude, l'expérimentateur retient ceux qui, à son avis, tiennent compte des paramètres les plus importants, au détriment des autres. Ce choix influera sur les réactions du modèle.

Considérons, par exemple, le coefficient de Thomas qui définit le paramètre de cavitation :

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

Si la construction du modèle suivant ce critère donne une similitude acceptable dans l'apparition de la cavitation, il n'en sera pas de même pour l'érosion mécanique de cavitation. En effet, celle-ci nécessite la formation d'un microjet liquide possédant l'énergie cinétique réelle :

$$T_c = \frac{1}{2} M' W^2 = \frac{1}{2} M' W \cdot W = \frac{1}{2} M'_1 W_1 \cdot W$$

Deux termes interviennent : la quantité de mouvement initiale $M'_1 W_1$ et la vitesse finale W à l'instant du choc sur la paroi. Sachant que l'on réduit en général la pression et la vitesse, nous pouvons apprécier les variations de l'énergie cinétique lors du passage du réel au modèle. Supposons que les conditions d'apparition de la cavitation soient respectées : situation de la zone perturbée, pression, température ainsi que les paramètres régissant l'évolution de la cavitation. La vitesse initiale W_1 qui est fonction de la vitesse du fluide va décroître. De plus, admettons que la valeur du gradient de pression se conserve. L'accélération sera identique, mais la vitesse finale diminuera également. Il en résultera un microjet dont l'énergie sera réduite et inefficace.



Fig. 12.

Pratiquement, le problème est plus complexe car certains facteurs caractéristiques des bulles ne subissent pas la réduction imposée au modèle : diamètre, vitesse, espace parcouru. De plus, de faibles fluctuations de la pression imposée provoquent des variations importantes de la masse induite M' et perturbent la similitude.

En résumé, la réduction imposée par le modèle affecte la puissance du microjet en freinant sa formation.

Il serait intéressant de déterminer un coefficient sans dimension assurant la conservation de l'énergie cinétique du microjet, mais cela paraît difficile à réaliser, car une réduction géométrique imposerait une augmentation du gradient de pression. Il est possible également de choisir pour le modèle un matériau dont la dureté serait réduite dans un rapport facile à fixer.

Influence des perforations dans les pales. Il arrive que des aubes perforées par l'érosion de cavitation voient l'usure s'arrêter net. L'effet fusée fournit encore une explication satisfaisante. En effet, en assurant au point considéré l'équilibre des pressions entre l'intrados et l'extrados de l'aube, la présence du trou perturbe le champ de pression, notamment au point où il était particulièrement propice au développement de l'effet fusée puisqu'il avait provoqué une érosion intense. Le forage de trous dans les régions critiques constitue donc un artifice efficace pour s'opposer au développement de l'effet fusée et par suite pour lutter contre l'érosion de cavitation.

Absence d'érosion derrière un corps en mouvement. Lorsqu'un objet se déplace rapidement dans un liquide il provoque souvent, derrière, une zone de tourbillons sans danger pour lui. C'est le cas notamment des torpilles et des extrémités de pales ou d'ogives des hélices de navires. Certes, il existe des bulles de cavitation qui implosent. Mais, comme au voisinage des parois le champ de pression n'est pas à gradient positif, elles se dirigent dans d'autres directions. L'effet fusée ne pouvant se développer vers l'objet considéré, il n'y a pas d'érosion.

2.2.2 Zones d'érosion privilégiées

Haubans derrière les hélices. Nous venons de voir que les bulles de cavitation s'éloignent de certaines régions peu propices à une implosion. Quand elles rencontreront des zones à gradient de pression positif, elles « tomberont » dans ce champ. L'effet fusée pourra se développer. Il en résultera éventuellement une érosion mécanique de cavitation si le microjet rencontre un obstacle.

Erosions singulières par ultra-sons. Les utilisateurs d'ultra-sons observent parfois des érosions surprenantes sur des surfaces assez éloignées du générateur. Pour les expliquer, il suffit de penser aux systèmes d'ondes stationnaires qui s'établissent. Lorsque, dans un domaine voisin d'une paroi, il existe à la fois des bulles de cavitation et un champ de pression à gradient positif, c'est-à-dire des conditions favorables au développement de l'effet fusée, il en résultera encore une érosion de cavitation.

Erosion des dômes de sonars. Le caractère sélectif de

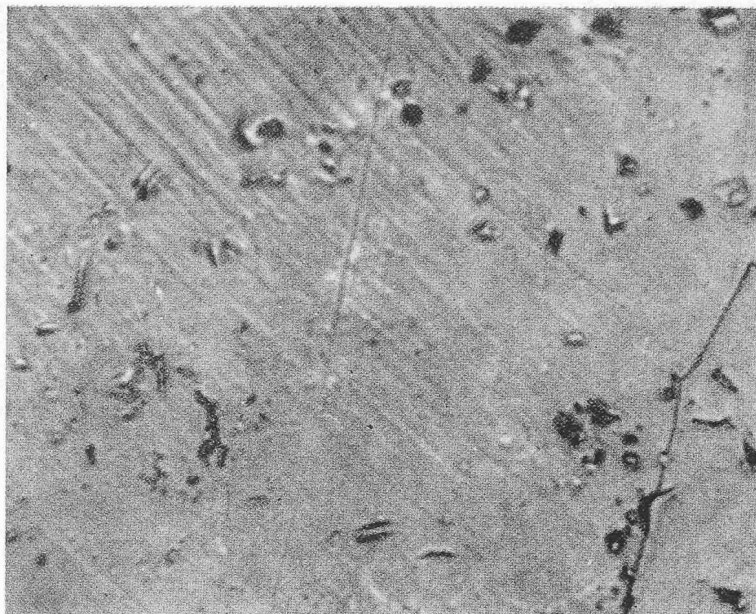


Fig. 13.

l'érosion mécanique de cavitation se manifeste aussi dans l'exploitation des sonars [10] en détériorant d'une manière caractéristique les dômes de protection. Ceux-ci sont constitués par une armature interne supportant un revêtement métallique. L'érosion dessine, sur la surface extérieure, les cellules carrées de l'armature. Elle affecte donc particulièrement les zones où le manque d'élasticité de la paroi accentue le gradient de pression et facilite le développement de l'effet fusée, donc du microjet destructeur.

Rôle des impuretés. Les impuretés existent naturellement dans le liquide ou bien elles sont introduites, par exemple, sous forme de poudre abrasive comme c'est le cas dans l'usinage par ultra-sons. Il semble qu'elles jouent un double rôle : d'une part, elles sont le germe à partir duquel se forme la bulle de cavitation, d'autre part, elles constituent le projectile qui bombardera le matériau à usiner. Le grain de poudre inclus dans la bulle se trouvera à la pointe du microjet et rendra le choc plus efficace.

2.2.3 Autres types d'érosion

Nous avons comparé des photographies de matériaux soumis à diverses techniques d'érosion : cavitation dans les pompes, usinage par ultra-sons (fig. 10 et 11), électro-usinage, érosion par gouttes (fig. 13) et par jets (fig. 14). Il existe parfois une telle similitude dans ces érosions que les spécialistes ne parviennent pas à les différencier. C'est pourquoi nous avons tenté d'apporter une explication commune à ces phénomènes à l'aide de la théorie de l'effet fusée. Elle s'applique directement aux cas déjà considérés des érosions de cavitation dans les pompes ou par ultra-sons. Son rôle apparaît moins nettement dans les domaines de l'électro-usinage et de l'érosion par jets ou par gouttes. Bien que ces questions paraissent être en marge du sujet, nous les signalons tout de même étant donné leur lien de parenté avec les cas précédents.

Pour l'électro-érosion, il est évident que l'action de l'arc de décharge électrique reste prépondérante. Si

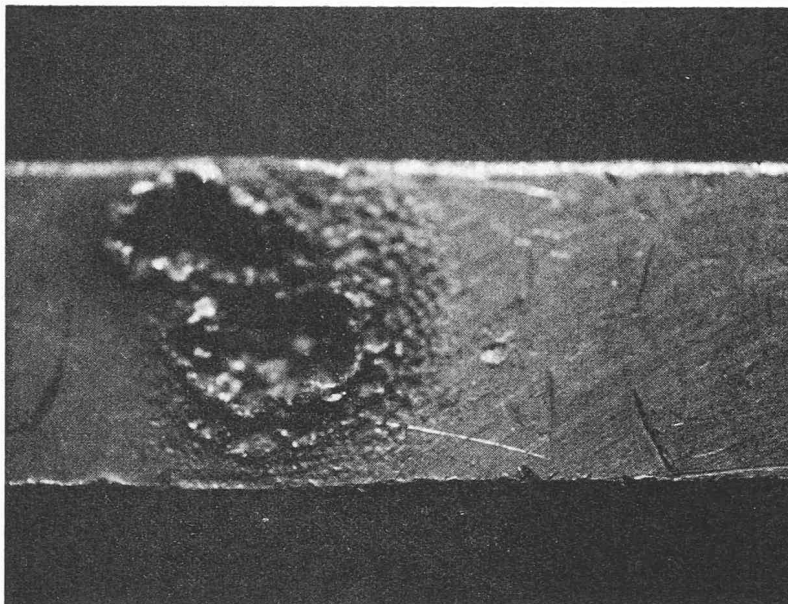


Fig. 14.

l'érosion par effet fusée intervient, ce ne sera qu'un phénomène secondaire, mais non négligeable. Il prendra différentes formes suivant qu'il mettra en jeu des bulles de vapeur du *diélectrique* ou des bulles de vapeur du *métal vaporisé* par la décharge électrique. Mais, dans tous les cas, le microjet qui prendra naissance provoquera une érosion mécanique puissante.

Au sujet de l'érosion par jet ou par gouttes, il est intéressant d'analyser non pas les grandes cavités de plusieurs centimètres de profondeur, mais l'attaque initiale du matériau. La surface de celui-ci présente des points d'impact de l'ordre du micron, qu'il est difficile d'imputer à une goutte de liquide de plusieurs millimètres de diamètre. Pourquoi ne pas faire intervenir les microjets de l'effet fusée ? Ceci implique l'existence de bulles à l'intérieur du jet incident. Deux raisons confirment cette hypothèse. La première concerne le gaz préalablement contenu dans le liquide ou adsorbé par le jet. La deuxième est relative à la cavitation qui apparaît au cours du mouvement. On dispose donc de bulles de gaz et de bulles de vapeur. Elles vont se réduire rapidement sous l'effet de la pression consécutive au choc. Il en résultera des microjets liquides très destructeurs qui amorceront l'érosion mécanique plus grossière du jet expérimental.

Ainsi l'effet fusée explique l'existence des cavités microscopiques que l'on observe sur les éprouvettes.

2.3 Amélioration du fonctionnement des machines hydrauliques

Amélioration du profil des aubes. La théorie de l'effet fusée explique le mécanisme de l'érosion de cavitation et satisfait ainsi le chercheur. Toutefois, les constructeurs de machines hydrauliques aimeraient y trouver des éléments susceptibles d'assurer une amélioration des projets.

La connaissance de l'effet fusée ne permet, en aucun cas, d'éviter la cavitation. En effet, ce phénomène apparaîtra toujours dès que la pression en un point sera inférieure à la tension de vapeur à la température consi-

dérée. Toutefois, le processus de l'érosion mécanique de cavitation étant connu, on peut espérer dessiner des profils s'opposant à son développement, en s'imposant les règles suivantes :

- éviter la présence de champs de pression à gradient trop important entre les zones de cavitation et les parois ou bien les perturber par des artifices convenables (perçage de trous, amorce de courants ou de tourbillons parasites, etc.) ;
- empêcher la formation de tourbillons capables de donner aux bulles une vitesse initiale dirigée vers les parois ;
- orienter l'écoulement des bulles vers l'intérieur du liquide ou vers l'extérieur de l'hélice ; la réalisation de profils supercavitants correspond à cette remarque.

Les bulles propulsées par effet fusée porteront alors leurs méfaits dans des régions où n'existent pas d'organes de machine.

Amélioration du matériau. S'il est impossible d'empêcher le bombardement des aubes par les bulles on peut essayer de lutter contre l'effet destructif du microjet. Le problème consiste à absorber cette énergie avant qu'elle ne disloque le réseau cristallin du matériau (métal, carborundum, béton, etc.).

Vue sous un aspect macroscopique, la paroi doit être assez élastique pour répartir l'énergie sur une plus grande surface et pour l'emmagasiner sous forme potentielle afin de la restituer ensuite. Il semble que certains essais systématiques sur des hélices recouvertes de matières plastiques donnent de bons résultats et confirment ce point de vue [8].

A l'échelle moléculaire, le problème revient à empêcher l'extrémité du microjet de pénétrer à l'intérieur du cristal. Pour cela, les forces moléculaires doivent être supérieures aux forces de pression consécutives au choc. Il faudra donc choisir des matériaux répondant à cet impératif.

Rôle de l'aération du liquide véhiculé. Dans de nombreux cas, les exploitants réduisent les conséquences néfastes de la cavitation en ajoutant un peu de gaz dans le liquide véhiculé. Il se forme d'abord une émulsion fine favorable à la formation des bulles de cavitation. Généralement, le fonctionnement de la pompe n'en est pas affecté. Ensuite, quand les bulles implosent en donnant naissance au microjet, elles ne disparaissent pas complètement. Leur présence joue alors un double rôle. D'une part, l'énergie du microjet est réduite d'une valeur égale à l'énergie absorbée par le gaz intérieur. D'autre part, lors du choc, la bulle sert de tampon entre le microjet et la paroi.

La nocivité des bulles de cavitation se trouve ainsi très réduite.

Protection cathodique. Des essais effectués sur des hélices de navires tendent à montrer qu'une protection cathodique réduit parfois considérablement l'érosion de cavitation [9]. Plusieurs explications se présentent, les

unes ayant un aspect électrique, les autres un aspect purement mécanique. Des recherches actuellement en cours nous permettront peut-être de préciser ce problème et d'envisager des moyens de protection plus efficaces.

Conclusion

La propriété qu'a une bulle de s'autopropulser par effet fusée et de donner naissance à un microjet liquide d'une puissance énergétique considérable, nous a permis de proposer une explication sérieuse du phénomène de l'érosion mécanique de cavitation. La connaissance théorique du problème était indispensable pour déterminer le processus de cette érosion : tout d'abord la cause (implosion d'une bulle de vapeur), ensuite les moyens (densité d'énergie importante), et enfin le mécanisme (microjet). Nous avons pu également aborder la question de la protection contre cette érosion.

Il est vraisemblable que l'érosion mécanique n'est pas la seule à intervenir. Les causes de l'érosion de cavitation peuvent prendre des aspects calorifiques, chimiques, électriques ou électrolytiques que nous n'aborderons pas dans cette communication.

D'autre part, nous nous sommes limités à l'application de l'effet fusée au cas de l'érosion mécanique de cavitation. Son champ d'action est pourtant bien plus large. Il couvre les domaines les plus variés. Chaque fois que des bulles de volume variable interviennent, l'effet fusée joue un rôle d'autant plus important qu'il est méconnu. Son principal intérêt est de donner des explications communes à des phénomènes physiques ne présentant en apparence aucune similitude.

BIBLIOGRAPHIE

FORTRAN IV (2^e édition), par M. Dreyfus. Dunod, Paris, 1968. — Un volume de 192 pages, ill. Prix : broché, 28.80 F.

Epuisée en une année, la première édition de cet ouvrage a rendu déjà de très grands services. Ce livre peut être recommandé à toute personne désireuse d'apprendre à pratiquer la programmation d'ordinateur en langage FORTRAN ; il insiste bien sur ce qui est essentiel ; il viendra en aide à ceux qui ont à surmonter les quelques difficultés qui surgissent quand on doit passer d'un ordinateur à un autre. C. B.

LES CONGRÈS

Séminaire sur l'aménagement communal

La Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF) et l'Association suisse pour le plan d'aménagement national (ASPAN) organisent à La Sarraz (VD), les 3, 4 et 5 octobre 1968, un *Séminaire sur l'aménagement communal*.

Ce cours consiste en un travail pratique d'élaboration d'un plan parallèlement aux opérations de remaniement parcellaire. Il comporte, en outre, quelques conférences qui seront présentées par MM. L. Veuve, urbaniste ; C. Stern, urbaniste ORL ; R. Sennhauser, ingénieur rural EPF ; J.-C. Aquarone, attaché à l'Institut de technique des transports de l'EPUL ; R. Haeblerli, ingénieur agronome EPF.

La direction technique du cours a été confiée à M. C. Wasserfallen, architecte EPF/SIA, chef de l'Office cantonal vaudois d'urbanisme.

Le séminaire est ouvert aux géomètres, urbanistes, architectes et aux autres professions techniques ayant

L'évolution d'une bulle ou plutôt de cette absence de matière qui la caractérise constitue à l'échelle macroscopique l'image des particules que l'on rencontre en électricité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. CHINCHOLLE : *Etude de l'écoulement d'une émulsion*. Thèse présentée à la Faculté des sciences de Paris. 1967.
- [2] L. CHINCHOLLE : « Etude théorique du mouvement d'une bulle. Effet fusée. Pébullon. » *La Houille Blanche* n° 5, 1967, pp. 515, 529.
- [3] L. CHINCHOLLE : *Etude de l'écoulement d'une émulsion. Applications de l'effet fusée*. *La Houille Blanche*, n° 2, 1968.
- [4] L. CHINCHOLLE — G. QUICHAUD : *Etude du microjet qui suit une bulle animée d'un double mouvement de translation et d'implosion*. C. R. Académie des sciences, t. 265, 1967, p. 882, série A.
- [5] T. B. BENJAMIN — A. T. ELLIS : *Cavitation*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A. Vol. 260, 1966, pp. 221-240.
- [6] L. CHINCHOLLE : « Visualisation des écoulements relatifs dans les machines tournantes. Rotoscope. » *La Houille Blanche* n° 1, 1968, pp. 51, 58.
- [7] F. VASVARI : « The phenomena arising with the cavitation process. » *Acta Techn. Hung.* 51, 1965.
- [8] « Recherche sur la prévention des dommages dus à la cavitation au moyen d'un revêtement de surface sur des safrans de gouvernail. » *Schiff und Hafen* n° 5, 1961, pp. 456, 458.
- [9] PLESSET M. S. : *On cathodic protection in cavitation damage*. Rapport n° 80, 12 juillet 1959, Calif. Instit. of Techn.
- [10] A. W. CIZEK — N. J. PETITO : « Development of improved protective coatings for sonar domes. » *Naval Engineers Journal*. August 1967, p. 593.

un rapport avec l'aménagement ainsi qu'aux autorités communales.

Les demandes de renseignements, de programmes, ainsi que les inscriptions sont à adresser à la Société vaudoise des ingénieurs géomètres et du génie rural, avenue Agassiz 2, 1000 Lausanne.

La finance d'inscription se monte à Fr. 130.— pour les membres de la SSMAF et de l'ASPAN, Fr. 150.— pour les non-membres.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Cours de dimensionnement plastique

Lausanne, automne 1968

Actuellement, les méthodes de calcul des constructions traitant de leur solidité et de leur rigidité se développent avec succès dans de nombreux pays et tiennent compte davantage des conditions réelles du travail des constructions.

Le but du cours professé par M. J.-C. Badoux, docteur ès sc. techn., professeur à l'EPUL, et présenté par la Commission romande SIA de la formation universitaire continue des ingénieurs et des architectes, est de faire connaître aux ingénieurs la situation actuelle de la question du calcul des constructions au-delà de la limite d'élasticité, ainsi que de les mettre au courant des problèmes qui se posent actuellement aux chercheurs dans ce domaine de la théorie des constructions.

En général, l'élaboration et l'introduction des méthodes du calcul des constructions dans le stade qui précède immédiatement leur destruction et sur lequel est basée la détermination de leur état de travail, c'est-à-dire de l'état toléré de tension des constructions, doivent con-