

**MOUVEMENT D'UNE BULLE DANS UN LIQUIDE**  
**APPLICATIONS DE L'EFFET FUSÉE (FONCTIONNEMENT DES POMPES**  
**ÉROSION DE CAVITATION, MODÈLES RÉDUITS, ÉBULLITION**  
**USINAGE PAR ÉLECTROÉROSION ET PAR ULTRASONS, etc.)**

Par LUCIEN CHINCHOLLE,

Faculté des Sciences de Paris, Chaire d'Électrotechnique, B.P. n° 1, 92-Fontenay-aux-Roses.

(Reçu le 7 mai 1968.)

**Résumé.** — Une bulle de gaz ou de vapeur de volume variable et en mouvement de translation dans un liquide est soumise à des accélérations importantes. Celles-ci entraînent des variations considérables de densité d'énergie cinétique de translation. Ce phénomène que nous appelons « l'effet fusée » trouve des applications dans les domaines les plus divers. Nous l'avons considéré successivement dans l'écoulement d'une émulsion à l'intérieur d'une pompe centrifuge, dans l'érosion de cavitation, dans quelques problèmes d'hydraulique, dans l'ébullition, dans l'usinage par ultrasons ou par électroérosion, dans la formation des aérosols et dans quelques autres cas possibles.

**Abstract.** — A gas or vapour bubble, of variable volume, having translation motion in a liquid, is submitted to considerable acceleration. This phenomenon, called the "rocket effect", finds applications in various fields. We study those relative to the flow of emulsions in centrifugal pumps, to cavitation erosion, to some problems of hydraulics, to ebullition, to machining by ultrasonics or electroerosion, to formation of aerosols, and to some other possible cases.

**I. Introduction.** — Une bulle de gaz ou de vapeur de volume variable et en mouvement de translation dans un liquide est soumise à des accélérations considérables. Ce phénomène que nous appelons « l'effet fusée » met en jeu une densité d'énergie importante et donne une grande autonomie aux bulles. Nous rappellerons quelques résultats que nous avons déjà établis, notamment le mécanisme de transfert de l'énergie par l'intermédiaire d'un jet de liquide. Nous définirons successivement le profil des vitesses de ce microjet et la variation de la densité d'énergie en fonction de l'évolution de la bulle. Ces considérations permettent d'envisager les applications de ce phénomène dans plusieurs domaines de la physique dont le seul point commun est la présence de bulles ou, plus généralement, l'existence de cavités de volume variable au sein d'un fluide.

Nous appliquerons cette étude au fonctionnement des pompes centrifuges où elle intervient à la fois dans l'évacuation des bulles de gaz et dans la cavitation. Nous verrons ensuite que certains problèmes d'hydraulique trouvent une explication s'ils sont abordés sous

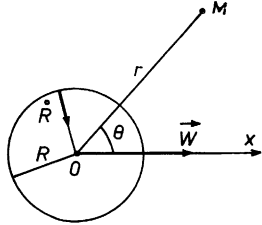
cet angle. Enfin, nous présenterons les renseignements qu'elle apporte dans la connaissance du phénomène de l'ébullition et de l'électroérosion.

**II. Autopropulsion des bulles par effet fusée.** — Depuis Lord Rayleigh qui a traité, en 1917, le problème de l'implosion d'une bulle immobile, de nombreux auteurs ont abordé l'étude de la dynamique des bulles [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Ils ont en général écrit l'équation du mouvement en tenant compte de tous les paramètres qui interviennent. Mais, dans un esprit de simplification qui leur permettait de déterminer des solutions, certains ont été conduits à négliger des termes qui leur ont paru du second ordre. D'autres les ont conservés mais n'ont pas exploité entièrement les résultats.

Ne pouvant pas traiter ce problème d'une façon complète, nous avons dû avoir recours également à des hypothèses. Nous avons conservé toutefois un paramètre qui est souvent négligé : la force d'inertie induite d'une bulle, dont cette étude a mis en évidence la valeur intrinsèque [8], [9].

Soit une bulle schématisée par une sphère souple de centre de gravité  $O$  et de rayon  $R$ . Elle se déplace avec une vitesse  $\mathbf{W}$  par rapport au fluide supposé immobile à l'infini.

Pour repérer un point  $M$  du plan, nous définirons un axe  $Ox$  de même direction que le vecteur  $\mathbf{W}$ , un rayon vecteur  $r$  et un angle  $\theta$  comme l'indique la figure 1. Sur la sphère, nous avons :  $r = R$ .



\* FIG. 1.

Une particule liquide située en  $M$  a une vitesse absolue  $\mathbf{v}$ . Nous définirons une vitesse radiale par :  $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ . La vitesse radiale d'un point de la surface sphérique sera  $\dot{R}$ . Deux cas se présentent :

- $\dot{R} > 0$  : la bulle grossit : il y a explosion.
- $\dot{R} < 0$  : la bulle se réduit : c'est l'implosion.

Nous avons supposé réalisées les conditions suivantes :

- Le liquide est incompressible et sans viscosité.
- L'écoulement est irrotationnel et la vitesse absolue  $\mathbf{v}$  de chaque particule fluide dérive d'un potentiel des vitesses  $\Phi$  qui est une fonction de l'espace et du temps.
- Les bulles, suffisamment petites (diamètre inférieur au millimètre), conservent une forme sphérique.
- Nous ne tenons pas compte explicitement de la tension superficielle dont les forces contribuent toutefois, indirectement, au mouvement de translation par l'intermédiaire de la variation de volume de la bulle.
- La pression intérieure de la bulle reste nulle ainsi que la masse de gaz ou de vapeur ( $M$ ) qu'elle contient.
- Les forces de gravité sont négligeables.

Le calcul se développe facilement à partir des équations suivantes :

- formule fondamentale de la dynamique :

$$M \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \Sigma \mathbf{F}$$

$\Sigma \mathbf{F}$  : somme des forces appliquées à la bulle,

- relation de Bernoulli généralisée :

$$\frac{p}{\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{v^2}{2} + \Omega + f(t)$$

- $p$  : pression en un point du fluide,
- $\rho$  : masse spécifique du fluide,
- $\Omega$  : potentiel des forces extérieures qui est fonction de l'espace,
- $f(t)$  : fonction arbitraire du temps, par exemple une pression que l'on impose à l'ensemble,

- valeur de l'énergie cinétique du liquide mis en mouvement :

$$T = -\frac{1}{2} \rho \iint \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} dS$$

- $\mathbf{n}$  : vecteur normal à l'élément de surface  $dS$ .

Le potentiel des vitesses s'écrit :

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

La résultante des forces de pression s'exerçant sur une bulle prend l'une des formes suivantes :

$$\mathbf{F} = - \left[ M' \frac{d\mathbf{W}}{dt} + \mathbf{W} \frac{dM'}{dt} \right] \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = - M' \left[ \frac{d\mathbf{W}}{dt} + \mathbf{W} \frac{3}{D} \frac{dD}{dt} \right] \quad (2)$$

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

$M'$  représente la moitié de la masse de la goutte de fluide ambiant qui remplirait une bulle de diamètre  $D$ .

L'énergie cinétique totale est la somme des énergies cinétiques de translation et d'implosion :

$$T = \frac{1}{2} M' W^2 + \frac{1}{2} M'' \dot{R}^2 \quad \text{en posant } M'' = 6M' \quad (4)$$

**Conclusions.** — En l'absence de forces autres que les forces d'inertie, il est intéressant de faire apparaître les faits suivants déduits des relations précédentes [8], [9] :

1. DÉFINITION DE LA PARTICULE ÉQUIVALENTE A LA BULLE DANS SON MOUVEMENT DE TRANSLATION : PÉBULLE. — La présence de  $M'$  dans toutes les formules suggère de 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 de translation.

2. DÉFINITION DE L'EFFET FUSÉE. — La relation (3) donne  $M'W = \text{constante}$ . Elle exprime la conservation de la quantité de mouvement du pébullon, ce qui revient à dire que celui-ci est soumis à une force :

$$W \frac{dM'}{dt} \tag{1}$$

ou à une accélération :

$$\Gamma_f = - \frac{3W}{R} \frac{dR}{dt}. \tag{2}$$

Les variations de volume d'une bulle entraînent des variations de sa masse induite. Par suite, le pébullon possède une masse  $M'$  variable. Comme une fusée, il éjecte la masse  $\frac{dM'}{dt}$  par unité de temps et compense la perte de la quantité de mouvement correspondante par un accroissement de sa vitesse.

De même, puisqu'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. Au cours de l'implosion par exemple, ce sont des particules du fluide ambiant retrouvant la vitesse nulle du liquide à l'infini qui contribuent à la variation de la masse induite. La conservation de la quantité de mouvement  $M'W$  implique un accroissement de la vitesse d'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 rétrofusée.

Le principe de conservation de l'énergie amène à établir, pour le pébullon, une équivalence entre la variation  $m'$  de sa masse et la variation de l'énergie mise en jeu, soit à un instant donné :

$$m' \Leftrightarrow m' W^2.$$

3. CARACTÉRISTIQUES DU « JET » QUI SUIT UNE BULLE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION. — Le potentiel des vitesses donne facilement les trajectoires des particules liquides mises en mouvement par le passage d'une bulle [10]. Les calculs effectués sur ordinateur permettent de suivre les variations de vitesse du fluide en fonction de différents paramètres tels que la vitesse d'implosion ou la distance à l'axe de translation, pour les conditions initiales suivantes : diamètre de la bulle, 0,10 m; vitesse de translation, 0,10 m/s.

Deux résultats nous paraissent importants. Le premier concerne 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  $+\infty$ .

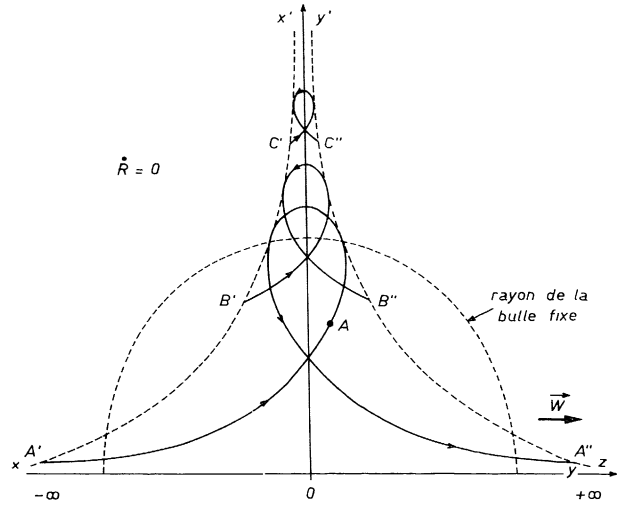


FIG. 2.

La trajectoire correspondante  $A'A''$  montre que la particule A effectue la translation résultante  $\overrightarrow{A'A''}$  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 de 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 trajectoires de la figure 3 où  $\dot{R}$  est différent de zéro.

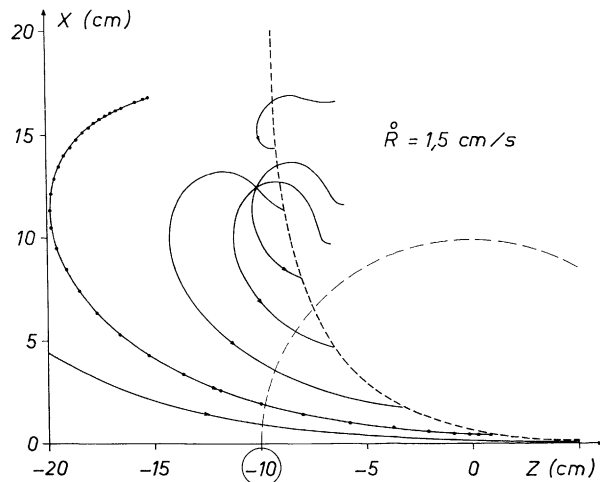


FIG. 3.

Leur allure dessine la forme d'un similijet que nous nommerons souvent un microjet étant donné les dimensions qu'il prend lors de la cavitation. L'appellation du jet, employée pour simplifier le langage, est incorrecte. On doit l'utiliser avec prudence. Tandis que, dans un jet classique, les particules fluides conser-

vent approximativement leur position et leur vitesse, on observe, dans le cas étudié, une succession continue des éléments constituants. A chaque instant une particule nouvelle remplace la précédente.

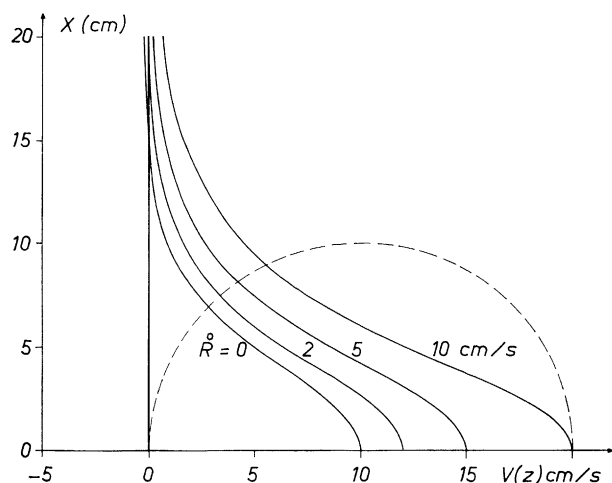


FIG. 4.

Sur la figure 4, nous avons tracé, dans un plan perpendiculaire à l'axe du mouvement et tangent à l'arrière de la bulle, le profil des composantes axiales des vitesses des particules fluides formant le microjet. 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 son extrémité : il est bien inférieur au diamètre de la bulle. Une photographie de Benjamin et Ellis [2] le met en évidence au moment où il transperce la bulle qui lui a donné naissance.

*Énergie du jet.* — L'énergie cinétique de ce jet présente une grande importance. Comme elle est concentrée dans une sphère de rayon connu (quelquefois la valeur de celui de la bulle), nous pouvons déterminer une densité d'énergie cinétique. Un simple calcul numérique montre que celle-ci croît rapidement au cours de l'implosion de la bulle pour atteindre jusqu'à  $10^8$  fois la densité d'énergie initiale, soit par exemple  $5 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Cette énergie cinétique donne naissance à des tourbillons et les frottements la transforment en chaleur. Toutefois, si le jet heurte une paroi avant de se désagréger, la pression consécutive au choc est susceptible d'égaliser  $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $10\,000 \text{ kgp/cm}^2$ ), car le diamètre de sa pointe prend des valeurs de l'ordre du micron et même du centième de micron. Les forces de liaison intermoléculaires ne résistent pas à ces efforts et le jet pénètre à l'intérieur du cristal.

On imagine dès maintenant l'importance des applications qui résulteront de l'autopropulsion des bulles, notamment en régime de cavitation.

4. VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES. — Les résultats théoriques montrent que l'existence de l'effet fusée implique un mouvement de translation de la bulle et une variation de son volume. Celle-ci se produira sous l'influence d'un champ de pression ou d'un champ de température.

Les vérifications expérimentales suivant ces deux voies confirment les conclusions théoriques. Nous rappe-  
lons les plus caractéristiques [8].

a) *Évolution d'une bulle dans un champ de pression.* — Soit une bulle d'air en ascension dans l'eau. Elle est soumise à une poussée d'Archimède qui tend à la faire monter. Par contre, la viscosité du liquide freine ce mouvement. Très rapidement, les deux forces s'équilibrent et la bulle atteint une vitesse limite proportionnelle au carré de son rayon.

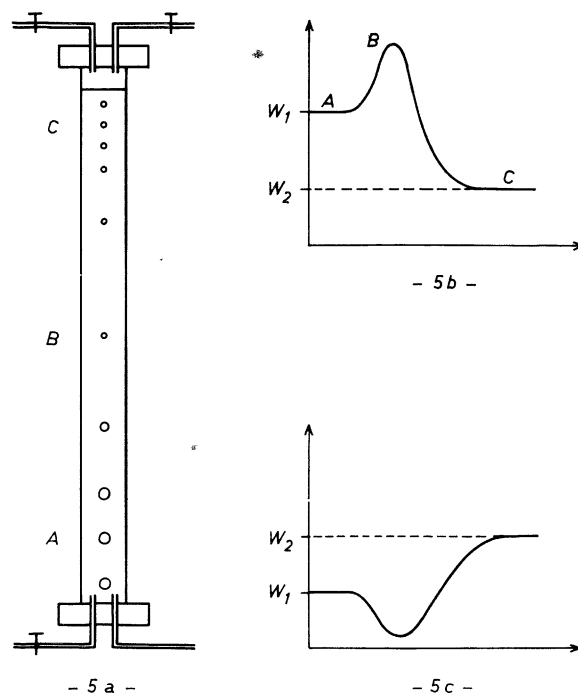


FIG. 5.

La figure 5 a schématise la photographie d'une bulle éclairée par un stroboscope, dont le volume varie. On observe deux valeurs de vitesses limites : en A où la bulle est grosse, en C où elle est petite. Le graphique 5 b traduit ces résultats par deux segments de droite A et C représentant les vitesses constantes  $W_1$  et  $W_2$ .

La région B correspond à un état transitoire durant lequel une surpression brutale a réduit le volume de la bulle. L'effet fusée direct qui en a résulté a provoqué une augmentation de vitesse.

Le graphique 5 c traduit l'effet d'une dépression. La bulle a grossi. Par suite, sa vitesse  $W_1$  a diminué avant d'atteindre la vitesse limite  $W_2$  relative à une grosse bulle : il y a eu effet rétrofusée.

b) *Évolution d'une bulle dans un champ de température.* — Le phénomène de l'ébullition constitue un terrain de choix pour l'observation du développement de l'effet fusée. Une bulle de vapeur qui se forme sur le fond d'un vase chauffé va, au cours de son ascension, rencontrer des couches de liquide à des températures différentes. La condensation de la vapeur par exemple provoquera une diminution du diamètre de la bulle et par suite une accélération, tandis que la vaporisation aura un effet contraire.

En donnant la position d'une bulle de vapeur en fonction du temps, le cinéma ultrarapide ou bien la photographie avec un éclairage au stroboscope permettent de déterminer la vitesse et l'accélération [7]. On relève ainsi des accélérations supérieures à  $200 \text{ m.s}^{-2}$ , soit à 20 g. Elles atteignent certainement des valeurs plus importantes.

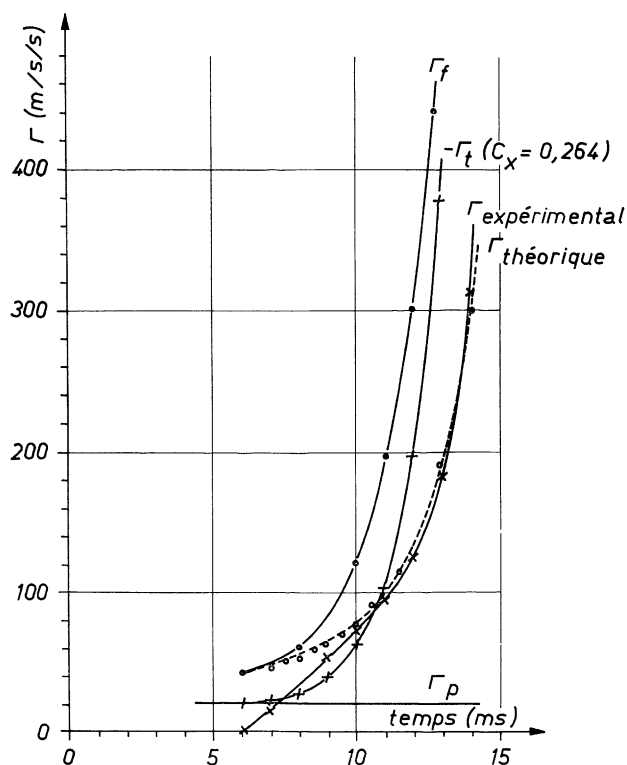


FIG. 6.

Nous avons rassemblé sur le diagramme de la figure 6 les différentes accélérations qui interviennent :

- $\Gamma_{\text{exp}}$  : accélération expérimentale,
- $\Gamma_a$  : accélération due à la poussée d'Archimède,
- $\Gamma_f$  : accélération consécutive à l'effet fusée,
- $\Gamma_t$  : accélération correspondant aux forces de frottement avec  $C_x = 0,264$ , valeur en accord avec celles que publient les expérimentateurs [11].

Outre la concordance des résultats théoriques et expérimentaux, nous noterons la faible importance de la poussée d'Archimède devant les forces d'inertie qui seules expliquent les grandes vitesses atteintes par une bulle.

En mécanique des fluides, il est bien connu que le mouvement d'une bulle dépend de ce qu'on appelle communément « l'histoire de la bulle ». Le processus précédemment décrit constitue un élément de cette histoire.

L'effet fusée interviendra chaque fois que, dans un phénomène physique, des bulles satisfèrent aux conditions déjà énoncées. Nous avons établi une liste des applications possibles pour lesquelles nous pouvons proposer des explications d'aspect nouveau.

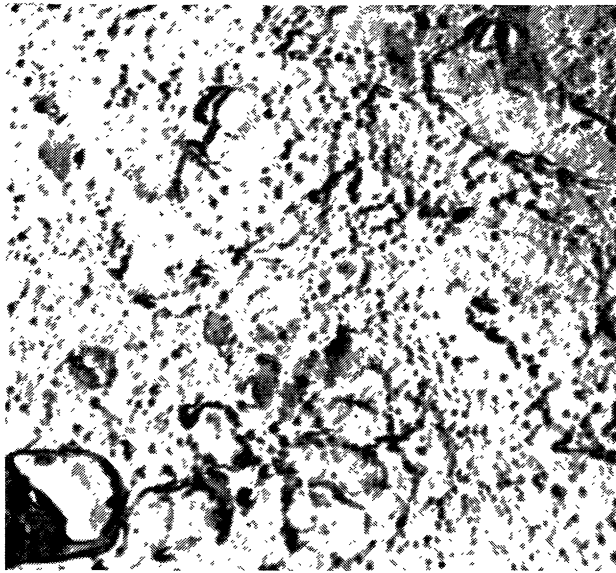
III. **L'effet fusée et l'érosion de cavitation.** — A cause de ses incidences financières, la cavitation préoccupe beaucoup les constructeurs de matériel hydraulique. Il n'est pas rare en effet qu'elle rende certaines roues de pompes inutilisables au bout de quelques mois de fonctionnement. Les progrès empiriques réalisés en ce domaine sont dus essentiellement à des observations expérimentales. On est encore loin de connaître parfaitement le développement de la cavitation.

Pourtant, de nombreux chercheurs ont essayé d'expliquer ce phénomène. En isolant un domaine autour d'une bulle et en appliquant le principe de la conservation de la quantité du mouvement, certains ont ainsi évalué l'importance du choc contre une paroi. D'autres ont photographié le jet. Mais les explications manquent de netteté.

Notre étude précise les remarques précédentes et autorise à poursuivre plus avant les investigations. Le processus initial et fondamental de l'érosion mécanique de cavitation se conçoit clairement en faisant intervenir le microjet liquide qui est bien défini. Lorsque sa pointe mesure quelques centièmes de micron, il pénètre facilement dans l'édifice cristallin en le disloquant. La multiplicité de ces fissures rend possibles ensuite l'arrachement du métal, la création de cratères et une érosion plus rapide [23].

La photographie 1 réalisée par F. Vasvari [14] au microscope électronique fait apparaître, sur un matériau érodé par cavitation, des trous dont le diamètre minimal relevé atteint  $0,01 \mu\text{m}$ . Ces cavités attestent de la puissance du microjet. On s'est souvent contenté d'attribuer, d'une manière assez évasive, l'érosion de cavitation à l'effet direct d'une onde de choc. Nous concevons difficilement qu'une telle onde puisse provoquer un début d'érosion par un écrouissage du métal. Son rôle se manifestera plutôt dans l'arrachement du matériau déjà disloqué lorsqu'il existera des cratères.

L'érosion mécanique initiale est donc la conséquence



Corindon 5 21400 ×

PHOTOGRAPHIE 1.

de l'impact d'une bulle contre la surface solide. Nous définirons trois types de chocs possibles :

— Le choc simple : la masse liquide mise en mouvement par le déplacement d'une bulle de volume constant heurte la paroi en abandonnant son énergie cinétique de valeur  $\frac{1}{2} M' W^2$ .

— Le choc du type charge creuse : à un instant donné, la bulle étant réduite à une demi-sphère aplatie contre la paroi, les trajectoires des particules liquides sont focalisées radialement en un point; c'est le cas de bulles pulsantes immobiles sur la surface.

— Le choc du type jet : nous pensons que c'est le plus efficace, son importance dépend de son évolution. Il correspond également à une focalisation de l'énergie.

Des conditions bien déterminées sont nécessaires pour que le microjet soit efficace :

- la bulle doit se diriger vers la paroi; notons que celle-ci attire les bulles [12],
- la bulle doit traverser des zones de liquide à gradient de pression positif,
- l'implosion doit se faire très près de la paroi afin que le jet possède le maximum d'énergie lorsqu'il vient la heurter.

Quand l'une de ces conditions n'est pas réalisée, la bulle n'intervient pas dans l'érosion de cavitation. Nombreuses sont celles qui restent sans effet. Toutefois, l'implosion d'une bulle loin d'une paroi joue parfois un rôle par l'intermédiaire de l'onde de choc qu'elle provoque. Comme le montrent certaines photographies [13], le passage de cette onde déclenche une cavitation secondaire dont les bulles de vapeur risquent d'être efficaces à leur tour.

**IV. L'effet fusée et l'écoulement d'une émulsion dans une pompe centrifuge.** — L'observation visuelle de l'écoulement à l'intérieur d'une pompe centrifuge fait apparaître de nombreuses bulles qui parsèment le liquide. Il paraîtrait normal qu'elles soient entraînées par viscosité. Or, le bilan des forces en présence, compte non tenu des forces d'inertie des particules mises en mouvement par le passage des bulles, prouve que celles-ci ne peuvent pas sortir de la pompe à moins que leur diamètre ne soit inférieur à quelques microns.

Par contre, la prise en compte dans le calcul des forces d'inertie du liquide montre qu'une bulle jouit d'une autonomie importante. Fait surprenant, loin d'être entraînée, c'est elle qui, en général, précède le liquide. Pratiquement elle sort de la pompe plus rapidement que lui.

Nous avons développé les calculs à partir de quelques hypothèses, en établissant la loi de variation du diamètre d'une bulle de gaz parcourant le champ de pression centrifuge [8], [9]. Les conclusions particulièrement simples prennent la forme de lois d'écoulement.

Suivant la valeur de  $\dot{R}$ , nous distinguons l'effet fusée lent (volume régi par la loi de Mariotte : la vitesse radiale  $\dot{R}$  est inférieure à un mètre par s) et l'effet fusée rapide (variations de volume rapides notamment lors de la cavitation :  $\dot{R}$  atteint plusieurs centaines de mètres par s).

LOIS D'ÉCOULEMENT D'UNE BULLE A L'INTÉRIEUR D'UNE POMPE CENTRIFUGE. — *Effet fusée lent.* — 1<sup>re</sup> loi : La vitesse radiale relative  $W$  de la bulle d'air par rapport au liquide est :

- proportionnelle à la vitesse de rotation  $\omega$  de la roue,
- proportionnelle à l'espace parcouru  $r$  par la bulle le long d'un rayon de la roue,
- indépendante du diamètre de la bulle, de la nature du liquide et de la pression à l'entrée :

$$W = a\omega r \quad a \simeq \sqrt{2}$$

2<sup>e</sup> loi : Le terme  $\frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$  dans (2) est proportionnel (dans un rapport voisin de 1) à la vitesse de rotation;

3<sup>e</sup> loi : Les trajectoires des bulles sont différentes des lignes de courant du liquide. Elles s'incurvent en arrière du sens de rotation de la roue.

— *Effet fusée rapide.* — 4<sup>e</sup> loi : La vitesse relative des bulles est une fonction de l'espace parcouru ( $r_0 - r$ ):

$$W = k(r_0 - r)^n \quad n \geq 2.$$

La quatrième loi s'applique aux zones de cavitation et à l'entrée de la pompe lorsque les bulles de gaz venant de traverser une zone de dépression retrouvent

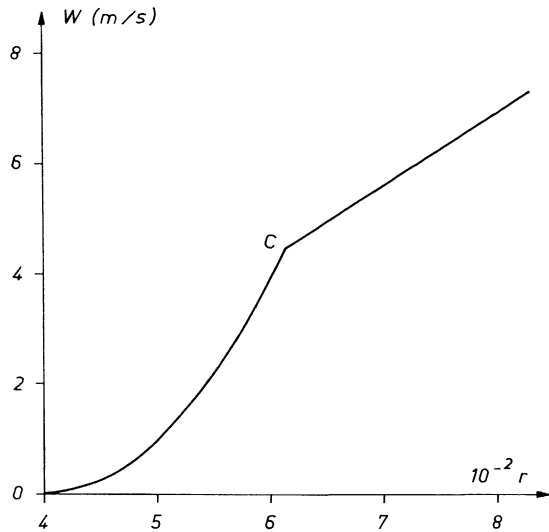


FIG. 7.

le champ de pression centrifuge. Le diagramme de la figure 7 concerne une bulle parcourant radialement une pompe centrifuge de rayon égal à  $10 \times 10^{-2}$  m. Il résume l'allure des variations de sa vitesse relative par rapport au liquide.

$0 < r < 4 \times 10^{-2}$  m : vitesse mal définie à cause de la dépression d'entrée et des tourbillons,  
 $4 \times 10^{-2}$  m  $< r < 6,2 \times 10^{-2}$  m : l'effet fusée rapide donne à la vitesse une variation d'allure parabolique,  
 $6,2 \times 10^{-2}$  m  $< r < 10 \times 10^{-2}$  m : variation linéaire de la vitesse.

Les résultats expérimentaux confirment bien la théorie.

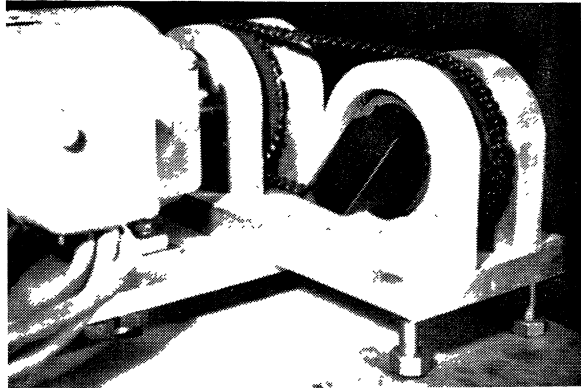
Une étude plus approfondie [8] a permis également de définir la vitesse de la bulle lorsqu'elle contient un mélange de gaz et de vapeur susceptible de se comprimer ou bien lorsque des circonstances fortuites perturbent son mouvement. Dans tous les cas, on peut dire que :

- l'effet fusée direct accélère la sortie des bulles,
- l'effet rétrofusée qui se développe lorsqu'une bulle remonte vers le centre de la pompe, la freine dans ce mouvement et favorise ainsi son entraînement par le liquide.

En résumé, l'évacuation d'une émulsion à l'intérieur d'une pompe centrifuge se trouve facilitée par l'action des forces d'inertie du liquide.

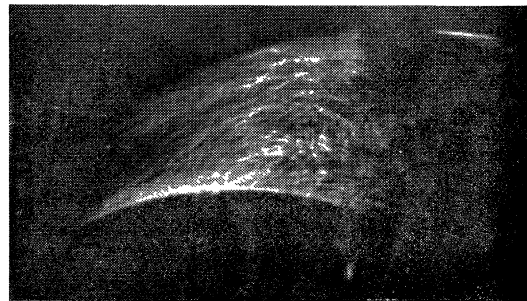
**V. L'effet fusée et quelques problèmes d'hydraulique.** — Certains problèmes d'hydraulique n'ont pas encore trouvé, à notre connaissance, une explication satisfaisante. En les présentant sous une optique nouvelle, cette étude les pose d'une manière plus précise et il est parfois possible de mieux les comprendre [23].

1. ÉROSION DE CAVITATION DANS LES POMPES CENTRIFUGES. — L'observation des bulles de cavitation à l'intérieur d'une pompe présente de nombreuses difficultés. Afin d'atteindre leur mouvement relatif par rapport aux aubes, nous avons réalisé un rotoscope [22]. Tandis que le stroboscope « arrête » le mouvement de rotation d'une manière discontinue, le rotoscope l'« arrête » de façon permanente. On peut alors utiliser un appareil photographique statique pour fixer les trajectoires des bulles. La vue n° 2 présente l'appareil



PHOTOGRAPHIE 2.

constitué par un prisme de Wollaston entraîné à une vitesse de valeur égale à la moitié de celle de la roue mobile. Sur la vue 3, on voit l'ensemble des trajectoires



PHOTOGRAPHIE 3.

relatives des bulles de gaz évoluant dans une pompe centrifuge. Elles ont tendance à « tomber » dans le champ de pression à gradient positif pour bombarder la pale.

Nous avons déjà étudié le mécanisme de l'érosion. C'est pourquoi nous nous contenterons de proposer quelques réponses à des questions que se posent les expérimentateurs devant certains faits d'apparence anormale. Par exemple, il existe parfois dans des zones de cavitation des parois non érodées. Ceci se conçoit fort bien si l'on suppose que les conditions nécessaires pour le développement du microjet ne sont pas toutes réalisées : gradient de pression positif et direction de

la vitesse initiale de la bulle. Des observations ou des mesures très précises permettraient de vérifier ces hypothèses. De même, il arrive qu'une érosion prolongée creuse une cavité traversant l'aube de part en part et que, par suite, toute érosion cesse. Le perçage de trous antérieurement à toute attaque a d'ailleurs les mêmes conséquences. Vraisemblablement, c'est la modification des champs de pression et de vitesse du fluide qui perturbe le mouvement des bulles et empêche la formation d'un microjet efficace. L'intensité de l'érosion de cavitation est très sensible aux variations de ces paramètres.

La connaissance de l'effet fusée ne suffit pas pour éviter la cavitation. En effet, en première approximation, le phénomène apparaîtra toujours dès que la pression en un point deviendra inférieure à la tension de vapeur à la température considérée. 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,
- 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 ou de la turbine; la réalisation de profils supercavitants correspond à cette remarque.

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

2. ABSENCE D'ÉROSION DE CAVITATION SUR LES MAQUETTES. — L'impossibilité de calculer sûrement les roues de pompes ou les hélices de bateau amène les constructeurs à réaliser des maquettes étudiées expérimentalement. Comme celles-ci ne sont pas érodées, on cherche à déterminer uniquement la naissance et le développement de la cavitation. Ensuite, l'examen des figures de cavitation qui se dessinent renseigne sur l'érosion réelle (problème de la corrélation entre le modèle et le réel [15]).

C'est le fait qu'il n'y a jamais d'érosion de cavitation sur les modèles que nous voudrions analyser. Il est évident qu'une maquette doit être la reproduction la plus fidèle possible du réel. Comme il existe plusieurs critères de similitude, l'expérimentateur choisit ceux qui, à son avis, tiennent compte des paramètres les plus importants. Malheureusement ce choix influe sur les réactions du modèle.

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

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

$p_{\infty}$  : pression statique du fluide,  
 $p_v$  : tension de vapeur.

Si la construction du modèle suivant ce critère donne une similitude acceptable pour 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  $T_c$  déjà établie lors de l'étude du mouvement de la bulle :

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

Deux termes interviennent : la quantité de mouvement initiale  $M'_1 \mathbf{W}_1$  et la vitesse finale  $\mathbf{W}$  de la bulle à l'instant du choc sur la paroi. Sachant que l'on réduit en général la pression et la vitesse du fluide, nous pouvons apprécier les variations de cette 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  $\mathbf{W}_1$  qui est fonction de la vitesse du fluide sera plus petite sur le modèle. De plus, bien que la valeur du gradient de pression se conserve, la réduction géométrique entraîne une diminution de l'accélération et de la vitesse finale de la bulle. Il en résultera un microjet dont l'énergie sera réduite et inefficace.

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 réaliser un modèle faisant apparaître l'érosion mécanique de cavitation. Cela imposerait le choix d'un matériau de résistance mécanique réduite calculable à partir de l'énergie cinétique mise en jeu par le déplacement des bulles.

3. ZONES SENSIBLES A L'ÉROSION DE CAVITATION. — Chaque fois qu'une bulle traverse un champ de pression à gradient positif et atteint une surface solide, il y a possibilité d'érosion de cavitation. Ainsi le brouillard de cavitation derrière une hélice de navire érode les surfaces qu'il rencontre. Au contraire, un obstacle mobile dans l'eau n'est pas érodé par les bulles de cavitation qu'il provoque derrière lui, car dans l'intervalle qui le sépare de la zone de cavitation le champ de pression n'est pas propice à l'accélération des bulles. C'est le cas du tourbillon d'extrémité des pales et du tourbillon d'ogive d'une hélice qui n'ont pas d'effet sur ces organes mais qui attaquent les haubans situés en arrière.

Le caractère sélectif de l'érosion mécanique de cavitation se manifeste aussi dans l'exploitation des sonars [16] 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 du microjet destructeur.

On peut également citer l'érosion des vannes des installations hydrauliques et l'érosion des gros axes des moteurs diesel. Celle-ci est due à la cavitation qui prend naissance dans l'huile et au fort gradient de pression qui accélère les bulles.

De même, les écoulements de liquides à l'intérieur des canalisations cylindriques sont souvent perturbés par des tourbillons parasites. Les vitesses résultantes induisent alors une cavitation détectable au bruit associé. Suivant le processus classique d'accélération des bulles, elle aboutit à l'érosion rapide des conduites. Ce type de problème se rencontre dans le transport des produits pétroliers souvent biphasiques.

Enfin, des essais systématiques font apparaître que certains corps, notamment les plastiques, protègent les hélices ou les turbines contre l'érosion mécanique de cavitation. Grâce à leur élasticité, ces matériaux absorbent l'énergie du jet en la répartissant sur une plus grande surface et la restituent ensuite.

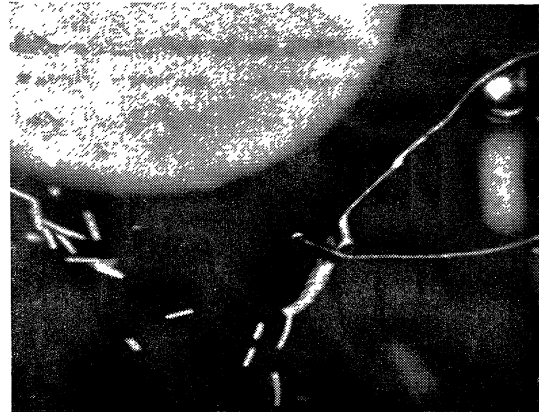
4. L'ÉROSION MÉCANIQUE PAR JET DE LIQUIDE OU PAR GOUTTES. — La similitude frappante des surfaces érodées par la cavitation et par l'impact d'un jet de liquide propulsé à grande vitesse intrigue les expérimentateurs. Certains d'entre eux [17], [18] profitent même de cette analogie pour étudier commodément l'érosion de cavitation par l'intermédiaire du jet. Il nous paraît 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 d'un millimètre de diamètre. Pour faire intervenir les microjets, nous admettrons l'existence de bulles à l'intérieur du jet incident. Deux raisons permettent d'émettre 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 qui se réduiront 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 peut s'expliquer l'existence des cavités microscopiques que l'on observe sur les éprouvettes.

VI. L'effet fusée et l'ébullition. — Le rôle de l'effet fusée est important dans le phénomène de l'ébullition. Comme cette question a déjà été considérée au paragraphe II.4 b, nous ne le citons que pour mémoire. Nous montrerons toutefois qu'il contribue, sous différentes formes, à accélérer le processus de transfert de la chaleur au cours de l'évolution d'une bulle.

— Quand celle-ci se détache de la surface chauffante, la rupture du cordon de vapeur la propulse dans une direction déterminée qui n'est pas obligatoirement ascendante (vitesse  $\mathbf{W}_1$ ) : la photographie 4 montre



PHOTOGRAPHIE 4.

une série de bulles de vapeur qui naissent sur le fil chauffé et qui se dirigent vers le bas en diminuant de volume.

— La bulle quittant une zone légèrement refroidie par la vaporisation du liquide traverse des régions plus chaudes où elle grossit. L'effet rétrofusée la ralentit et lui permet d'augmenter de volume au maximum (vitesse  $\mathbf{W}_2 < \mathbf{W}_1$ ).

— Enfin, la bulle rencontre un liquide plus froid qui entraîne sa condensation. Elle est alors projetée vivement loin des zones chaudes. L'influence du microjet s'ajoute à celle des mouvements de convection pour tendre à uniformiser la température de l'ensemble du liquide (vitesse  $\mathbf{W}_3 > \mathbf{W}_1$ ).

A chacun de ces stades par les modulations de sa vitesse, la bulle de vapeur contribue de façon différente à assurer le transfert de chaleur.

VII. L'effet fusée et l'usinage par ultrasons. — La propagation des ondes ultrasonores entraîne la cavitation. Il est donc normal de songer à expliquer l'érosion correspondante par un processus identique à celui que nous avons déjà rencontré dans l'étude de l'érosion mécanique de cavitation.

Nous noterons en plus l'influence de la poudre abrasive. Il semble qu'elle joue un double rôle : c'est à la fois le germe à partir duquel se forme la bulle de cavitation et le projectile qui va bombarder le matériau à usiner. Le grain de poudre inclus dans la bulle se trouvant à la pointe du microjet rend le choc plus efficace.

Les observations relevées au cours de l'utilisation des appareils de nettoyage ou d'usinage par ultrasons prouvent que leur efficacité ne dépend pas uniquement de leur puissance ou du bruit mais également de la température et du gradient de pression, donc de la

disposition relative du générateur et du récepteur. Nous retrouvons encore une fois la nécessité de respecter les conditions de développement optimales du microjet si l'on veut que l'action mécanique de la cavitation se trouve accrue. Ces conclusions expliquent également la difficulté qu'éprouvent les constructeurs pour proposer des appareils de mesure de l'efficacité de tous les dispositifs à ultrasons.

#### VIII. L'effet fusée et l'usinage par électroérosion.

Le problème complexe de la décharge à travers un diélectrique liquide n'étant pas résolu, on ne peut pas espérer traiter facilement celui de l'usinage par électroérosion. Toutefois, à partir de certains faits expérimentaux, il est possible de prévoir le rôle des bulles. Bien qu'il reste peut-être secondaire, il prend une forme intéressante à analyser.

La technique d'usinage par électroérosion utilise l'énergie de l'arc de décharge. Nous ne considérerons que son aspect thermique. Le liquide diélectrique se vaporise le long de son trajet. De même, les points des électrodes métalliques touchés par l'arc se liquéfient et une partie du métal passe à l'état de vapeur.

L'augmentation soudaine de volume provoque une surpression suivie aussitôt d'une implosion brusque. Ces phénomènes s'accompagnent d'ondes de choc génératrices de cavitations secondaires. L'effet fusée intervient sous différentes formes :

- l'implosion des bulles de vapeur du diélectrique au sein du liquide donne naissance à des microjets simples,
- l'implosion des bulles de vapeur de métal forme des microjets porteurs en leur extrémité d'un corpuscule métallique condensé microscopique.

L'existence de ces microjets a deux conséquences :

- une érosion mécanique identique à celle qui intervient dans l'érosion par ultrasons avec ou sans poudre abrasive,
- l'évacuation des particules solides arrachées au matériau et qui deviendraient des impuretés nuisibles au bon fonctionnement de la machine.

Plusieurs théories tentent d'expliquer l'électroérosion en la présentant sous différents aspects : électromécanique (Williams : U.S.A.), thermomécanique (Mandelstamm et Raïsky : U.R.S.S.) et électrothermique [19], [20], [21].

Les résultats de notre étude s'accordent avec chacune d'elles en apportant un complément explicatif à certains phénomènes annexes :

- existence de cratères secondaires de dimensions inférieures au micron (voir érosion mécanique de cavitation),
- éjection de particules liquides ou solides à des vitesses pouvant atteindre 1 000 m/s; on a relevé des diamètres de 1 à 100 microns, mais nous pensons qu'il en existe sûrement de plus petits (voir création de gouttes dans l'ébullition : IX),

— fissuration du métal en profondeur dans certaines conditions de décharge; c'est peut-être une conséquence de l'onde de choc, mais il ne faut pas écarter la possibilité d'une dislocation consécutive à un microjet (voir érosion mécanique de cavitation).

Tout en conservant un caractère secondaire, l'influence des bulles se manifeste sous divers aspects dans l'usinage par électroérosion.

IX. L'effet fusée et les aérosols. — Les déplacements de bulles au sein d'un liquide entraînent la formation de gouttelettes qui jaillissent au-dessus de la surface libre. On attribue souvent ce phénomène à l'éclatement des bulles en surface ou plus vaguement encore à la conséquence d'une onde de choc. Si ces raisons sont parfois acceptables, elles restent insuffisantes dans la plupart des cas. Nous leur préférons alors une explication différente.

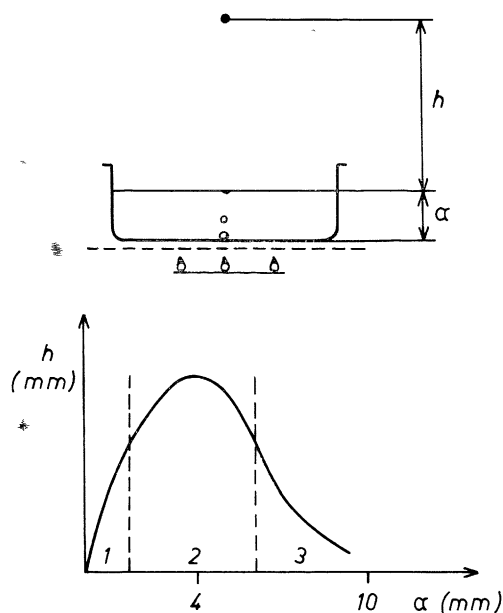


FIG. 8.

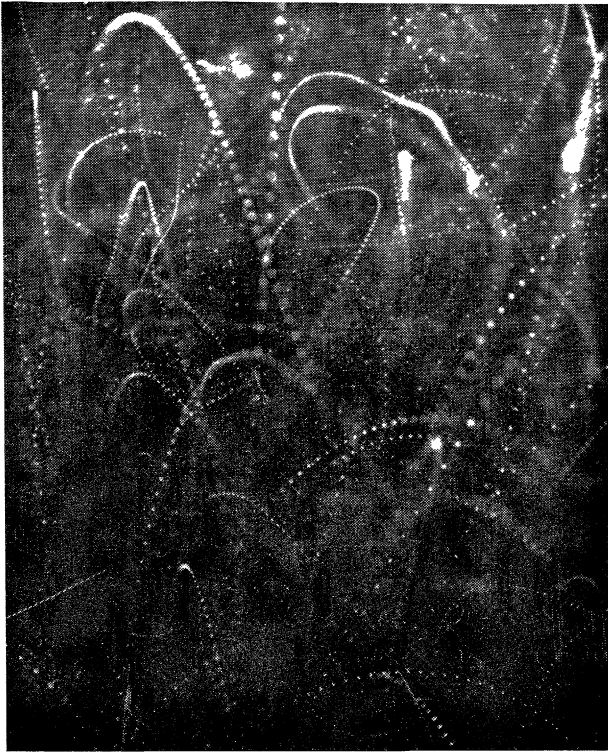
Une expérience facile à réaliser donne rapidement une idée du processus de formation des gouttes (*fig. 8*) (photographie 5).

Considérons un béccher contenant de l'eau portée à l'ébullition (nous éviterons l'ébullition à gros bouillons qui fausse les résultats).

Nous avons porté sur un diagramme les variations de la hauteur maximale  $h$  atteinte par ces gouttes en fonction de la hauteur d'eau  $\alpha$ .

Nous distinguerons trois cas différents suivant la valeur de  $\alpha$  :

*Région 3* : les bulles se condensent et accélèrent, mais elles perdent leur énergie cinétique par frottements avant d'atteindre la surface.



PHOTOGRAPHIE 5.

*Région 1* : le gradient de température leur donne une accélération considérable, mais la faible hauteur de liquide ne leur laisse pas le temps d'accroître la vitesse, donc d'acquiescer de l'énergie.

*Région 2* : les conditions de développement optimal du microjet sont réalisées et la bulle termine son implosion en touchant la surface. L'énergie cinétique de translation concentrée dans le jet qui la suit sert à arracher une certaine quantité d'eau et à lui donner une énergie potentielle. Le jet poursuit donc sa course en prenant la forme d'une goutte. Les résultats expérimentaux confirment les prévisions théoriques. Des gouttes d'eau s'élèvent à des hauteurs supérieures à 40 cm.

On relève de nombreux exemples d'apparition de

gouttelettes au-dessus d'un liquide, notamment lorsque les bulles contiennent initialement de la vapeur :

*Bulles d'électrolyse* : le départ d'une bulle est parfois suivi de la formation d'un arc électrique qui vaporise momentanément l'électrolyte.

*Bulles de vapeur de liquide diélectrique ou de métal au cours de l'usinage par électroérosion* : on observe la projection de gouttelettes de liquide et de particules métalliques.

*Bulles de cavitation en présence d'ultrasons* : elles permettent d'obtenir les plus fins des aérosols connus.

Cette technique de préparation des aérosols pourrait servir à obtenir de la poudre métallique. L'excitation ultrasonore d'un métal liquide au voisinage de l'ébullition entraînerait la cavitation et le microjet formerait l'aérosol. La possibilité de transformer un métal en poudre fine trouverait de nombreuses applications par exemple en peinture, dans la technique du frittage ou dans l'analyse spectrographique car il suffirait de peu de chaleur pour vaporiser ces corpuscules.

On pourrait multiplier les exemples pris dans des domaines les plus variés depuis l'érosion par les vagues jusqu'aux anomalies, relevées sur les photos des chambres à bulles ou aux effets Doppler décelés en présence de cavitation.

**Conclusion.** — Les forces de pression appliquées sur la surface d'une bulle se traduisent au sein du liquide par des forces d'inertie particulièrement efficaces. La bulle acquiert une grande autonomie et peut s'auto-propulser. Dans son mouvement, elle engendre un microjet d'une puissance considérable, consécutive à une focalisation de l'énergie.

A partir de ces remarques, nous avons pu proposer des explications communes à de nombreux phénomènes physiques ne présentant, en apparence, aucune similitude. Chaque fois qu'un expérimentateur est en présence de bulles de volume variable évoluant dans un liquide, il peut être intéressant pour lui de tenir compte des forces d'inertie induite. Même des microbulles ont des effets mécaniques difficiles à imaginer.

Sous une allure bénigne, une bulle ou plutôt cette absence de matière qui la caractérise cache une réalité puissante.

Nous tenons à remercier vivement M. le Professeur Raymond Comolet de ses précieux conseils.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] MILNE THOMSON (L. M.), *Theoretical Hydrodynamics*, London, Macmillan Co., Ltd.
- [2] BENJAMIN (T. B.) et ELLIS (E. T.), *Cavitation, Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1966, A 260, 221-240.
- [3] KNAPP (R. T.), *Recent Investigation of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage, Transactions A.S.M.E.*, oct. 1965, 77.
- [4] IVANY (R. D.), HAMMIT (F. G.) et MITCHELL (T. M.), *Cavitation Bubble Collapse. Observations in a Venturi, J. of Basic Engineering*, sept. 1966, 649 (*Trans. of the A.S.M.E.*, série D).
- [5] PLESSET (M. S.) et ELLIS (A. T.), *On the mechanism of cavitation damage, Trans. Am. Soc. Engrs.*, 1955, 77, 1055.

- [6] NAUDE (C. F.) et ELLIS (A. T.), On the mechanism of cavitation damage by non hemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs., J. Basic Eng.*, 1961, **83**, 648.
- [7] JANSEN (F.), Mécanique des Fluides. Influence de la condensation sur le mouvement ascensionnel des bulles de vapeur, *C. R. Acad. Sc.*, 22 juin 1964, **258**, Groupe 2.
- [8] CHINCHOLLE (L.), Étude de l'écoulement d'une émulsion, Thèse présentée à la Faculté des Sciences de Paris, 1967.
- [9] CHINCHOLLE (L.), Étude de l'écoulement d'une émulsion, Première partie : Étude théorique du mouvement d'une bulle. Effet fusée. Pébullen, *La houille blanche*, 1967, **5**, 515.
- CHINCHOLLE (L.), Étude de l'écoulement d'une émulsion, Deuxième partie : Applications de l'effet fusée. Mécanisme de l'érosion de cavitation, *La houille blanche*, 1968, **3**, 197, 212.
- [10] CHINCHOLLE (L.) et QUICHAUD (G.), Étude du microjet qui suit une bulle animée d'un double mouvement de translation et d'implosion, *C. R. Acad. Sc.*, 1967, **265**, 882, série A.
- [11] PEEBLES et GARBER, *Chem. Eng. Progr.*, 1953, **49**, 88.
- [12] LAMB (H.), *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 1963.
- [13] NASLIN (P.) et VIVIE (J.), Photographie et cinématographie ultrarapides, *Actes du 2<sup>e</sup> Congrès Intern.*, Paris, sept. 1954, p. 377.
- [14] VASVARI (F.), The phenomena arising with the cavitation process, *Acta Techn. Hung.*, 1965, **51**.
- [15] BINDEL (S.), La corrélation entre le navire et le modèle dans le domaine de la cavitation, Extrait des « Nouveautés Techniques Maritimes », 1967.
- [16] CIZEK (A. W.) et PETITO (N. J.), Development of improved protective coatings for sonar domes, *Naval Engineers Journal*, August 1967, p. 593.
- [17] CANAVELIS (R.), Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation dans les turbo-machines hydrauliques, Thèse, Université de Paris, 1966.
- [18] JOLIFFE (K. H.), The development of erosion damage in metals by repeated liquid droplet impacts, *Proc. Roy. Soc.*, 1968, A **303**, 193.
- [19] MIRONOFF (N.), Introduction à l'étude de l'électroérosion, Microtecnic Scriptar, 1001. Lausanne Suisse, 1967.
- [20] LAZARENKO, Théorie électro-dynamique de l'érosion électrique des métaux, Édition de l'Académie des Sciences d'U.R.S.S., Moscou, 1962.
- [21] ZOLOTYCH (B. N.), Les processus thermiques sur les surfaces des électrodes au cours de l'usinage par électroérosion, Recueil de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1960.
- [22] CHINCHOLLE (L.), Visualisation des écoulements relatifs dans les machines tournantes. Rotoscope, *La houille blanche*, 1968, **1**, 51, 58.
- [23] CHINCHOLLE (L.), L'effet fusée et l'érosion mécanique de cavitation, *Bulletin Technique de la Suisse Romande*, 1968, **19**, 269, 279.
-