Cavitation in the mixing zone of a submerged jet

Cavitation dans la zone de mélange d'un jet noyé

PAR HUNTER ROUSE

IOWA INSTITUTE OF HYDRAULIC RESEARCH *

Whereas incipient cavitation at a streamlined boundary can be predicted by potential theory, that occurring at a surface of discontinuity depends upon correlation of the turbulent velocity and pressure fluctuations. Measurements of such fluctuations in a submerged jet are presented, together with direct observations of the cavitation phenomenon.

La théorie potentielle permet de prévoir l'apparition de la cavitation sur un profil aérodynamique; son apparition sur une surface de discontinuité est fonction de la corrélation des fluctuations turbulentes de vitesse et de pression. Mesure de ces fluctuations dans un jet noyé; observation globale du phénomène de cavitation.

INTRODUCTION

Whenever the pressure intensity within a flowing liquid is reduced locally to the point of vaporization, vapor cavities form, persist momentarily, and then collapse as the pressure intensity in their vicinity increases. This flow phenomenon, known as cavitation, is generally to be avoided, because of the energy loss, boundary damage, and noise which it entails. Means are hence required of predicting its occurrence in terms of known flow characteristics.

There are two inherently different conditions of flow which can produce the local pressure drop upon which cavitation depends. The first of these is the acceleration of a liquid as it passes along a curved boundary, the point of minimum intensity then lying at the boundary itself. The second is the generation of vortices within a liquid as it enters a zone of velocity discontinuity, the points of minimum intensity then being more or less remote from the boundary. In the former case the pressure change depends upon the characteristics of the mean motion,

Toutes les fois que, à l'intérieur d'un liquide en mouvement, la valeur de la pression s'abaisse localement jusqu'à celle de la tension de vapeur, il apparaît des bulles de vapeur qui se maintiennent un moment puis qui disparaissent lorsque la pression dans leur voisinage s'accroît : ce phénomène, connu sous le nom de cavitation, est en général à éviter, car il s'accompagne d'une perte d'énergie, d'une détérioration des parois et de bruit. On a donc cherché le moyen de prévoir son apparition en fonction des caractéristiques connues de l'écoulement.

Il existe deux cas d'écoulement tout à fait différents susceptibles de produire l'abaissement local de pression qui est à l'origine de la cavitation. Le premier cas correspond à l'accélération que subit un liquide lorsqu'il s'écoule le long d'une paroi courbe : le point de pression minimum se trouve alors sur la paroi même. Le second cas correspond aux tourbillons prenant naissance à l'intérieur d'un liquide lorsqu'il pénètre dans une zone de discontinuité de vitesse : les points de pression minimum s'écartent alors plus ou moins de la paroi. Dans le premier cas, la variation de pression dépend des caractéristi-

* State University of Iowa, Iowa City (U.S.A.)

whereas in the latter it is the secondary motion which is directly involved.

For patterns of steady flow which are governed in form by the boundary geometry, use of the potential theory has been found to permit rather accurate prediction of the flow conditions at which the vapor pressure of the liquid will be attained at any boundary point. It is possible, in other words, to determine by analytical means the magnitude of a general cavitation index at which the vaporization process can be expected to begin. This index is of the form

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho u_0^2/2},$$

in which p_0 and u_0 are the ambient values of the pressure intensity and the velocity, and p_v and ρ are the vapor pressure and the density of the liquid. Experiments by many investigators have shown that a close agreement exists between analysis and measurement for flow without separation. Once separation occurs, however, cavitation is found to commence at magnitudes of σ which are considerably greater than those indicated by the pressure distribution along the boundary itself [1]*, because far lower intensities of pressure then occur within the eddies generated in the zone of velocity discontinuity. As yet no analytical means of evaluating these pressure intensities is at hand.

Efflux from a submerged orifice or nozzle represents an extreme case of separation, for the resulting processes of eddy generation and diffusion control not only the secondary motion but the mean motion as well. In other words, the boundary form has essentially no effect upon the pressure distribution, and the ambient pressure intensity p_0 also represents with very close approximation the mean intensity at all points. In order to predict the conditions under which a submerged jet will begin to cavitate, it is essential that the pressure characteristics of the secondary motion be related in some manner to the mean velocity of the jet itself. Both the gross and the detailed aspects of this problem have been under investigation at the Iowa Institute of Hydraulic Research since 1949, and the present paper is a review of progress that has been made to date.

* Numbers between brackets refer to the list of references at the end.

* Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie à la fin de l'article.

ques du mouvement moyen; dans le second cas, au contraire, les fluctuations turbulentes sont directement en cause.

Pour les réseaux d'écoulement permanent, dont le dessin est guidé par la disposition géométrique des parois, on a pu, en se servant de la théorie potentielle, prévoir de façon assez précise les conditions d'écoulement pour lesquelles la tension de vapeur du liquide se trouve atteinte en un point quelconque de la paroi. Il est, en d'autres termes, possible de déterminer analytiquement la valeur d'un coefficient général de cavitation pour laquelle on peut s'attendre à voir apparaître le processus de vaporisation. Ce coefficient est de la forme :

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho u_0^2/2},$$

où p_0 et u_0 sont les valeurs de la pression et de la vitesse dans le fluide ambiant, p_v et ρ la tension de vapeur et la masse spécifique du liquide. Un grand nombre de résultats expérimentaux ont montré que la théorie était en bon accord avec la réalité tant qu'il s'agissait d'écoulement sans discontinuité. Mais dès qu'une discontinuité apparaît, il s'avère que la cavitation prend naissance pour des valeurs de σ beaucoup plus grandes que celles que l'on déduit de la distribution des pressions le long de la paroi [1]*, par suite des pressions beaucoup plus basses qui se produisent à l'intérieur des tourbillons prenant naissance dans les zones de discontinuité de vitesse. Pour l'instant, on ne dispose d'aucun moyen analytique pour calculer la valeur de ces pressions.

L'écoulement, à la sortie d'un orifice noyé ou d'une buse, constitue un cas extrême de séparation, car les diverses réactions suivant la naissance et la diffusion d'un tourbillon se répercutent non seulement sur les fluctuations locales, mais aussi sur le mouvement moyen. En d'autres termes, la forme de la paroi n'a absolument aucun effet sur la distribution de pression, et la pression ambiante p_0 représente également, avec une très bonne approximation, la pression moyenne en tous les points. Si l'on veut prévoir les conditions dans lesquelles un jet noyé commencera à caviter, il faut nécessairement dégager une relation quelconque entre le champ de pression du mouvement turbulent et la vitesse moyenne dans le jet lui-même. Depuis 1949, l'Institut de Recherches Hydrauliques de Iowa se livre à des recherches sur l'ensemble et les détails de ce problème : la présente communication se propose de faire le point de l'avancement actuel de ces travaux.

VELOCITY AND PRESSURE FLUCTUATIONS IN THE MIXING ZONE FLUCTUATIONS DE VITESSE ET DE PRESSION DANS LA ZONE DE MÉLANGE

From numerous analytical and experimental studies of the mean flow in a submerged jet, the velocity distribution is known to have the characteristics indicated schematically in fig. 1 [2]. Because the modification of the velocity profile is caused entirely by the turbulent mixing, comparison of the successive profiles will show that

D'après de nombreuses études théoriques et expérimentales portant sur l'écoulement moyen dans un jet noyé, on sait que la distribution des vitesses se présente suivant le schéma de la figure 1 [2]. Etant donné que l'évolution des profils de vitesse est entièrement due au mélange turbulent, la comparaison de ces profils succes-

FIG. 1 — Definition sketch for characteristics of mean flow in a submerged jet.

Schéma de référence concernant les caractéristiques de l'écoulement moyen dans un jet noyé.
(Mixing zone = Zone de mélange.)

FIG. 2. — Stagnation-tube measurements of mean longitudinal component of velocity.

Valeurs de la moyenne de la composante longitudinale de vitesse d'après les mesures au tube à prise dynamique.

FIG. 3. — Hot-wire measurements of root-mean-square longitudinal velocity fluctuation.

Mesures au fil chaud de la racine de la moyenne carrée de la fluctuation longitudinale de vitesse.

sifs montre que la zone de mélange gagne à la fois vers l'intérieur et vers l'extérieur du jet, jusqu'à ce que le noyau original à vitesse constante ait complètement disparu. Après quoi la vitesse dans la zone centrale diminue régulièrement au fur et à mesure que se poursuit la diffusion vers l'extérieur. La succession des profils de vitesse (relevés avec un tube à prise dynamique dans un jet d'air de 150 mm) est donnée avec plus de détail à la figure 2.

Grâce à des études, à la fois théoriques et expérimentales, concernant les fluctuations turbulentes, on put recueillir au moins quelques indices relatifs au champ des vitesses dans la zone turbulente de mélange. Les valeurs caractéristiques de la racine de la moyenne carrée de la composante longitudinale sont indiquées sur la figure 3 (les mesures étaient faites avec un anémomètre à fil chaud dans un jet d'air de 150 mm). Les valeurs des deux autres composantes se répartissent suivant des profils très voisins, mais leur am-

the mixing zone spreads inward as well as outward until the original constant-velocity core entirely disappears, whereafter the velocity of the central zone steadily diminishes as the outward spread continues. The sequence of velocity profiles (measured with a stagnation tube in a 6-inch jet of air) is presented in more complete detail in fig. 2.

Both analytical and experimental studies of the secondary action have yielded at least partial information as to the velocity characteristics of the turbulence in the mixing zone. Typical root-mean-square values of the longitudinal component (measured in the 6-inch jet with a hot-wire anemometer) are indicated in fig. 3. Values of the other two components follow essentially similar profiles but have approximately two-thirds the magnitude. The maximum intensity of the turbulence is seen from the figure to coincide in radial location with the initial zone of discontinuity, to remain almost constant in magnitude over the length of the constant-velocity core, and then to diminish gradually as the mean velocity itself is reduced.

Since the velocity fluctuations at a given point of observation can be considered to result from the transit of successive eddies, and since the variation in velocity across any eddy entails a particular variation in the intensity of pressure, for every sequence of velocity fluctuations there must exist a specific — albeit unknown — sequence of pressure fluctuations. For the case of isotropic turbulence the correlation between the two has been expressed analytically, and Batchelor has found that the ratio of the root-mean-square pressure fluctuation to one-half the product of the density and the mean-square velocity fluctuation — i.e., $\sqrt{p'^2}/(\rho \bar{u}^2/2)$ — should have the value 1.17 [3].

Unfortunately, the point of incipient jet cavitation cannot at once be predicted from a value such as this for three pertinent reasons: First of all, the turbulence in a mixing zone is far from isotropic. Secondly, it is not the root-mean-square pressure fluctuation which is significant in cavitation so much as the average-negative peak. Thirdly, the theory has been neither checked nor extended experimentally, because instrumentation for the measurement of pressure fluctuations within a mixing zone is still practically nonexistent. Further advancement in the analysis of this phase of turbulence must depend to a considerable degree upon experimental evidence, and the matter of instrumentation has hence played an important part in the Institute program.

Preliminary results of this nature, which had just become available at the time of writing,

plitude est réduite d'environ un tiers. D'après les figures, l'intensité maximum de la turbulence s'avère coïncider dans une section donnée avec la zone initiale de discontinuité; son amplitude demeure à peu près constante le long du noyau conique à vitesse constante, puis elle diminue petit à petit en même temps que la vitesse moyenne elle-même diminue.

Puisque les fluctuations de vitesse en un point d'observation déterminé peuvent être considérées comme résultant du passage d'une succession de tourbillons, et puisque la variation de vitesse au sein de chaque tourbillon entraîne une variation locale de la valeur de la pression, on en déduit que, pour chaque série de fluctuations de vitesse, il doit exister une série de fluctuations de pression bien définie mais inconnue. Dans le cas d'une turbulence isotrope, la corrélation entre ces deux phénomènes a pu être exprimée analytiquement, et BACHELOR a trouvé que la racine de la moyenne carrée de la fluctuation de pression et le demi-produit de la masse spécifique par la moyenne carrée des fluctuations de vitesse — c'est-à-dire $\sqrt{p'^2}/(\rho \bar{u}^2/2)$ — étaient dans le rapport 1,17 [3].

Malheureusement, et pour trois bonnes raisons, une relation de ce genre ne permet pas de déterminer directement le point d'apparition de la cavitation dans le jet :

La première de ces raisons, et la plus importante, réside en ce que la turbulence dans une zone de mélange est loin d'être isotrope. En second lieu, ce n'est pas la racine de la moyenne carrée des fluctuations de pression qui est déterminante pour la cavitation, mais bien la moyenne des minima de pression. Enfin, troisième raison, la théorie n'a été ni vérifiée ni élargie expérimentalement, l'appareillage de mesure des fluctuations de pression à l'intérieur d'une zone de mélange étant encore pratiquement inexistant. Les progrès dans l'étude théorique de ce type de turbulence sont, pour une large part, conditionnés par l'obtention de résultats expérimentaux; c'est la raison pour laquelle les problèmes d'appareillage tiennent dans les programmes de l'Institut d'Iowa une place importante.

Les premiers résultats dans ce domaine — ils viennent juste d'être dégagés au moment où nous écrivons — ont été obtenus sur le jet d'air de 150 mm à l'aide d'un tube de 6 mm renfermant une prise de pression électromécanique, à l'extrémité de laquelle peuvent être montées deux têtes hémisphériques. L'une de ces têtes comporte un petit orifice à la pointe, l'autre est munie de 4 orifices répartis de 90° en 90° sur le cercle défini par le demi-angle au centre de 47°5. D'après les essais faits sur un appareil combiné à beaucoup plus grande échelle, on admettait que l'orifice de la pointe permettait la lec-

were obtained in the 6-inch air jet with a 1/4-inch tube enclosing an electro-mechanical pressure cell, at the end of which two hemispherical heads could be mounted interchangeably. The one was provided with a small tip opening, and the other with four openings at 90° intervals around a circle 47 1/2" from the tip. On the basis of tests made on a composite field instrument at much larger scale, the tip opening was assumed to yield the instantaneous reading $1/2 \varphi (\bar{u} + u')^2 + p' - p_0$ and the side openings the instantaneous reading $p' - p_0$. By suitable electronic circuits connected to the pressure cell, the two primary curves plotted dimensionlessly in fig. 4 were determined: the root-mean-square longitudinal velocity fluctuation, and the root-

ture instantanée de $1/2 \varphi (\bar{u} + u')^2 + p' - p_0$ et les orifices latéraux la lecture instantanée de $(p' - p_0)$. Grâce à des circuits électroniques convenables branchés sur la prise de pression, on a pu tracer les deux premières courbes qui sont représentées sur la figure 4 (sans dimensions) : ces deux courbes donnent respectivement la fluctuation longitudinale de la racine de la moyenne carrée des vitesses et la fluctuation de la racine de la moyenne carrée des pressions. Les résultats concernant la fluctuation de vitesse s'avèrent coïncider d'assez près avec ceux obtenus avec l'anémomètre à fil chaud; les résultats concernant la fluctuation de pression montrent une tendance analogue. Des renseignements complémentaires relatifs à la précision de l'appareillage sont fournis

par les deux autres courbes de la figure dont les éléments ont été obtenus grâce aux deux mêmes têtes combinées avec un manomètre à liquide. La courbe de vitesse moyenne est pratiquement identique à celle qui avait été obtenue précédemment à l'aide d'une aiguille hypodermique très fine; par contre, la pression moyenne décelée s'écarte légèrement de la valeur zéro prévue, l'écart se révélant lié

FIG. 4. — Velocity and pressure measurements obtained with tube and hemispherical heads.

Mesures de vitesse et de pression obtenues avec le tube à tête hémisphérique.

mean-square pressure fluctuation. The velocity-fluctuation data are seen to agree closely with those obtained by the hot-wire anemometer, and the pressure-fluctuation data follow a similar trend. Further indications as to the accuracy of the instrument are given by the other two curves, the data for which were obtained with the same two tips in conjunction with a liquid manometer. The curve of mean velocity is practically identical to that previously obtained with a very slender hypodermic needle; however, the indicated mean pressure intensity departs from the expected value of zero by a small amount which appears to depend upon the intensity of the velocity fluctuations.

Although these preliminary measurements are merely qualitative, they permit at least a rough evaluation of the pressure fluctuations accompanying jet diffusion. The maximum root-mean-square pressure deviation—like the maximum root-mean-square velocity deviation—was found

à l'amplitude des fluctuations de pression.

Bien que ces mesures préliminaires soient seulement qualitatives, elles permettent au moins une évaluation approximative des fluctuations de pression qui accompagnent la diffusion du jet. La déviation maximum de la racine de la moyenne carrée des pressions — de même que la déviation maximum de la racine de la moyenne carrée des vitesses — présente la propriété de demeurer à peu près constante dans la zone initiale de transition : ceci résulte d'un certain nombre d'essais de sondage réalisés par la suite. Sur la base des valeurs maxima de $\sqrt{u'^2}/u_0$ et de $\sqrt{p'^2}/(\varphi u_0^2/2)$ déduites de la figure 4, on trouve que la quantité $\sqrt{p'^2}/(\varphi u_0^2/2)$ vaut environ 2,15, valeur à rapprocher de la valeur 1,17 calculée par BATCHELOR dans le cas de la turbulence isotrope. La valeur initiale $\sqrt{p'^2}/(\varphi u_0^2/2) = 0,055$ est donc significative pour la prévision de la cavitation seulement si elle est multipliée par un coef-

from further exploratory tests to remain essentially constant through the initial zone of establishment. If the peak values of $\sqrt{u^2}/u_0$ and $\sqrt{p^2}/(\rho u_0^2/2)$ are taken from fig. 4 as representative, it will be found that the quantity $\sqrt{p^2}/(\rho u^2/2)$ then has a magnitude of about 2.15, in comparison with that of 1.17 predicted by Batchelor for isotropic turbulence. The primary value $\sqrt{p^2}/(\rho u_0^2/2) = 0.055$ is significant for the prediction of cavitation, however, only if multiplied by a numerical factor embodying the frequency of occurrence.

In arriving at a magnitude for this frequency factor, not only the temporal [4] but also the spatial distribution of the turbulence must be considered. The temporal distribution at any point may be assumed to agree with the normal-probability function, so that definition of incipience as that condition at which cavitation occurs during a specified percentage of time will permit a particular multiplying factor to be evaluated. For example, if it is arbitrarily assumed that cavitation has begun when negative fluctuations reach the vapor magnitude 5 % of the time, this factor will have the magnitude $C_t = 1.6$. On the other hand, not only a single point but the mixing zone as a whole is involved. Thus, since combination of the temporal frequency with the mean velocity would yield a spatial distribution along only an elementary segment of the mixing zone, this must be multiplied by an additional spatial factor C_s representing the number of such segments included in the jet. Although this number is evidently controlled by either the relative scale of the eddy structure or that of the cavities themselves, there is at present no means of determining its magnitude except by observation of the cavitation phenomenon itself. For the present, therefore, the index for incipient cavitation must be written simply as

$$\sigma_i = C_s C_t \frac{\sqrt{p^2}}{\rho u_0^2/2}$$

ficient numérique tenant compte de la fréquence de son apparition.

Pour parvenir à une valeur numérique de ce coefficient de fréquence, il convient de prendre en considération la distribution de la turbulence non seulement dans le temps, mais dans l'espace. Pour ce qui est de la distribution dans le temps en un point quelconque, on peut supposer qu'elle respecte la loi normale de probabilité; dès lors, si l'on définit l'apparition de la cavitation comme le moment à partir duquel la cavitation se produit pendant une fraction déterminée du temps, on peut calculer un coefficient de correction correspondant. Par exemple, si l'on convient arbitrairement que la cavitation prend naissance lorsque les fluctuations négatives atteignent la tension de vapeur 5 % du temps, ce coefficient aura pour valeur $C_t = 1.6$. Par ailleurs, ce n'est pas seulement un point isolé, mais l'ensemble de la zone de mélange qui intervient. Ainsi, étant donné que la superposition de la fréquence dans le temps et de la vitesse moyenne se traduit par une certaine distribution dans l'espace limité à un segment élémentaire de la zone de mélange, il convient d'adopter un autre coefficient de correction, dit coefficient spatial C_s , représentant le nombre de tels segments compris dans le jet. Bien que ce coefficient dépende évidemment soit de l'échelle relative des tourbillons, soit de celle des cavités elles-mêmes, il n'existe pour l'instant aucun moyen de calculer sa valeur si ce n'est par l'observation du phénomène de cavitation lui-même. Pour l'instant, par conséquent, le critère d'apparition de la cavitation doit être simplement écrit :

$$\sigma_i = C_s C_t \frac{\sqrt{p^2}}{\rho u_0^2/2}$$

DIRECT OBSERVATIONS OF JET CAVITATION

OBSERVATIONS DIRECTES DE LA CAVITATION DANS UN JET

For want of quantitative relationships between the fluctuations of velocity and pressure intensity in a mixing zone, preliminary observations were made in 1949 on the cavitation of a jet produced by a supplementary pumping system in the test section of the smaller Institute water tunnel [5]. Although pronounced cavitation

Afin de rechercher des relations quantitatives entre les fluctuations de vitesse et la pression dans une zone de mélange, quelques observations préliminaires avaient été réalisées en 1949 sur la cavitation d'un jet obtenu grâce à une station de pompage additionnelle dans le tronçon d'essais du plus petit des tunnels hydrodynamiques de

could readily be obtained, the limited length of the test section was believed to influence the pattern of diffusion to such an extent that measurements were at best merely qualitative. Moreover, unaccountable effects of temperature upon the incipient cavitation index were noted, even though every effort was made to hold the air content of the water to a minimum. For these reasons a special jet-cavitation tank was constructed the following year.

This tank was 5 feet in diameter and had an overall length of 10 feet, with convex ends. Nozzles could be mounted interchangeably on a 3-inch inlet pipe located on the axis at one end, and a 6-inch outlet pipe was connected at the center of the other end. A Chrysler-Hale fire-boat pump was used to provide the required discharge at the necessarily high base pressure. Means of controlling the hydrostatic load on the tank, removing air, and either heating or cooling the water were similar to those on the Institute water tunnels [1]. Overall pressures and rates of flow were measured with a large Bourdon gage and a mercury manometer connected to suitable piezometer openings in the walls of the tank and the inlet pipe. The intensity of cavitation was observed through use of a crystal-type Massa hydrophone mounted below the jet on the floor of the tank, the hydrophone being connected through an amplifying circuit to a pen recorder. Background noise was largely eliminated by using a narrow frequency band centered at 25 kilocycles.

From previous cavitation investigations it was known that the apparent point of incipience is controlled to a variable degree by the amount of air carried in suspension as minute bubbles on particles of foreign matter. Although the presence of such nuclei in limited numbers is considered necessary to the onset of cavitation, when present to an excessive degree they tend to form cavities within the fluid before the pressure intensity falls to its true vapor magnitude. This corresponds, in effect, to replacing the term p_v in the cavitation index with a quantity p_c which depends to an unknown extent upon the amount and nature of the air carried in suspension. Evidently, if both p_0 and v_0 are low, this term can play a predominant role in controlling the apparent magnitude of σ . On the other hand, if both ambient values are high, the magnitude of p_c — as well as that of p_v — becomes relatively unimportant. For this reason, every series of cavitation measurements was preceded by 2 or 3 hours of de-aeration at a low rate of flow and a very low (i.e., a large negative) hydrostatic pressure, the air collecting at the top of the tank being removed continuously. The hydrostatic load was then increased by nearly

l'Institut d'Iowa [5]. Quoiqu'une cavitation bien établie ait pu être facilement obtenue, on fut amené à penser que la longueur limitée du tronçon d'essais influençait l'organisation de la diffusion à un degré tel que les mesures étaient tout au plus qualitatives. De plus, on put remarquer certains effets inexplicables de la température sur l'apparition de la cavitation, et ceci même lorsqu'on mettait tout en œuvre pour réduire à son minimum la teneur en air de l'eau. Telles sont les raisons qui justifient la construction, l'année suivante, d'une chambre spéciale pour l'étude de la cavitation des jets.

Cette chambre, convexe à ses deux extrémités, avait un diamètre de 1,50 m et une longueur hors tout de 3 m. Diverses buses pouvaient être indifféremment montées sur la conduite d'alimentation de 75 mm de diamètre située dans l'axe de la chambre, à l'une de ses extrémités; au centre de l'autre extrémité était branchée une conduite de vidange de 150 mm de diamètre. Une pompe de bateau à incendie (CHRYSLER-HALE) permettait d'assurer le débit demandé sous toute la pression de base nécessaire. Le contrôle de la charge hydrostatique sur la chambre, l'élimination de l'air, le chauffage ou le refroidissement de l'eau étaient assurés par un appareillage semblable à ceux qui équipent les tunnels hydrodynamiques de l'Institut [1]. Les pressions d'ensemble et les débits étaient mesurés avec un gros manomètre Bourdon et un manomètre à mercure, branchés sur des orifices de prises de pression convenablement disposés dans les parois de la chambre et de la conduite d'amenée. L'intensité de la cavitation était décelée par un hydrophone à cristal Massa, disposé sous le jet, sur la paroi inférieure de la chambre: cet hydrophone était relié à un enregistreur à plumes par l'intermédiaire d'un amplificateur. Le bruit de fond était en grande partie éliminé grâce à l'adoption d'une bande de fréquence étroite centrée sur 25 kilocycles.

D'après des recherches antérieures sur la cavitation, on savait que le point d'apparition de ce phénomène était, dans une certaine mesure, discernable d'après la quantité d'air transportée en suspension sous forme de très petites bulles fixées sur des particules solides. Bien que la présence de telles particules, en nombre limité, soit considérée comme nécessaire pour le déclenchement de la cavitation, elles ont tendance, lorsqu'elles deviennent excessivement nombreuses, à former des cavités à l'intérieur du fluide avant que la pression se soit abaissée réellement jusqu'à la tension de vapeur. En fait, ceci revient à remplacer le terme p_v du critère de cavitation par une quantité p_c qui dépend, dans une certaine mesure que l'on ne connaît pas, de la quantité et de la nature de l'air charrié en suspension.

two atmospheres, so that as much as possible of the remaining air would be dissolved. The hydrostatic pressure during the subsequent measurements was held at least 0.5 foot of mercury above that of the de-aeration run.

Observations with the hydrophone recorder indicated in general that the noise level remained constant with decreasing values of σ until the point of incipience was reached, whereupon the noise rapidly increased toward a maximum

FIG. 5. — Schematic indication of change in noise level with intensity of cavitation.

Forme schématique des variations du niveau sonore en fonction de l'intensité de la cavitation.

(fig. 5) and then gradually diminished. Use of a loud-speaker instead of the pen recorder showed the noise just below the point of incipience to be a very sharp crackling; however, at advanced stages it became progressively more mushy, indicating either that the collapse of the cavities was cushioned by air or that interference of the dispersed cavities affected the noise transmission.

FIG. 6. — Experimental data for determination of incipient cavitation index.

Résultats expérimentaux concernant la détermination de l'indice de cavitation naissante.

Observations were hence restricted to the zone of incipience, for which mean levels of the cavitation noise were determined at various jet velocities, hydrostatic pressures, and water temperatures.

A typical plot of the observed mean noise levels against σ is shown in fig. 6 for the jet from a 1½-inch nozzle with a short cylindrical tip.

Evidemment, si p_0 et v_0 sont l'un et l'autre petits, ce terme p_c peut jouer un rôle prédominant dans le contrôle de la grandeur apparente de σ . Par contre, si les deux grandeurs d'ambiance sont élevées, la valeur de p_c — de même que celle de p_v — prend une importance relativement faible. Pour cette raison, chaque série de mesures de cavitation était précédée par deux ou trois heures de désaération à faible débit sous très faible pression hydrostatique (c'est-à-dire à valeur négative élevée), l'air recueilli au sommet de la chambre étant continuellement évacué. La charge était alors augmentée d'environ deux atmosphères afin d'assurer la dissolution de la plus grande partie de l'air restant. La pression, durant les mesures ultérieures, était maintenue au moins 15 cm de mercure au-dessus de celle adoptée dans la phase de désaération.

Les observations faites à l'hydrophone enregistreur montrèrent, en général, que le niveau sonore demeurait constant pour des valeurs décroissantes de σ , jusqu'à ce que le point d'apparition de la cavitation soit atteint; le bruit s'amplifiait alors rapidement, atteignait un maximum (fig. 5) puis décroissait graduellement. Si l'on remplace l'enregistreur à plumes par un haut-parleur, on constate, juste en dessous du point d'apparition de la cavitation, un crépitement très aigu; cependant, au fur et à mesure que l'on se rapproche de ce point, ce bruit devient progressivement plus gras, ceci signifiant soit que la résorption des cavités est amortie par l'air, soit que la transmission du bruit est affectée par des interférences liées à la dispersion de ces cavités. Les observations furent par suite limitées à la zone d'apparition de la cavitation, dans laquelle les niveaux sonores étaient mesurés pour diverses valeurs de la vitesse du jet, de la pression hydrostatique et de la température de l'eau.

La figure 6 représente un graphique caractéristique des niveaux sonores moyens observés en fonction de σ , dans le cas d'un jet issu d'une buse de 38 mm munie d'une petite tête cylindrique. En dépit d'une certaine dispersion, on ne relève aucun écart systématique lié à la pression ou à la vitesse (l'une de ces grandeurs était maintenue constante); de même, quelques essais complémentaires, menés en faisant varier la température, ne révélèrent aucune influence thermique autre que celle s'exerçant sur la tension de vapeur. La courbe tracée selon les points relevés donne 0,55 comme grandeur de σ , ce qui correspond, pour le produit de C_i et de C_{σ} , à 10 environ. Il convient d'insister sur le fait que la courbe relevée correspond seulement à des niveaux sonores moyens, et que l'on observe des intensités sonores instantanées corres-

Despite a certain amount of scatter, no systematic deviation with either pressure or velocity (the other being held constant) was noted, nor did supplementary runs in which the temperature was varied show thermal influences beyond that upon the vapor pressure. The line drawn through the plotted points indicates a value of 0.55 for the magnitude of σ_i , corresponding to a product of C_l and C_s of about 10. The fact should be emphasized that the plotted curve represents mean levels only, and that intermittent flashes of noise were observed at values of σ as high as 0.7. Regarded in this light, designation of the point of incipience is just as arbitrary as the selection of a limiting frequency of pressure fluctuation.

Since it is the initial discontinuity between the jet and the surrounding liquid which leads to the generation of the low-pressure eddies, it is to be expected that any variation in approach conditions which would decrease the velocity gradient around the jet periphery would also decrease the intensity of the eddy formation and hence lower the magnitude of σ_i . This was demonstrated experimentally by extending the parallel portion of the nozzle tip about 8 diameters, the resulting boundary-layer growth reducing the magnitude of σ_i by 15 %. However, complete elimination of the parallel tip (the nozzle then producing a 60° converging jet) — also reduced the value of σ_i , but for reasons which are not yet clear. The presence of air in suspension, on the other hand, gave rise to the pseudo-cavitation already discussed, the apparent magnitude of σ_i then varying with the magnitude of p_0 and with the air concentration over a wide range. Under these circumstances, a design value of 0.6 for σ_i seems a reasonable average.

Efforts to photograph the cavitation pockets in the diffusion zone further emphasized many of the points which have been discussed. In order to eliminate blurring of the image, high-speed (1/20,000 second) illumination was used. Just below the point of incipience, the chance of catching a readily visible vapor pocket with a single exposure was found to be negligible. At a sufficiently low value of σ , of course, representative cavities were always recorded, as shown in the upper photograph of fig. 7 obtained with rear illumination. In order to reveal the radial distribution of the cavities, a condensing lens and slot were used to produce a thin (1/4-inch) sheet of light at right angles to the camera axis. Then, however, multiple exposures were necessary to ensure the presence of cavities in sufficient density. The second photograph, obtained in this manner, shows clearly the outline of the cavitation zone. Noteworthy is the fact that — although the zone of maximum cavitation

pendant à des σ valant jusqu'à 0.7. Vue sous cet angle, la détermination du point d'apparition de la cavitation est tout aussi arbitraire que le choix d'une fréquence limite de la fluctuation de pression.

Etant donné que c'est la discontinuité initiale entre le jet et le fluide environnant qui provoque l'apparition des tourbillons à basse pression, il faut s'attendre à ce que toute modification des conditions aux limites tendant à réduire le gradient de vitesse à la périphérie du jet ralentisse la formation des tourbillons et finalement abaisse la valeur de σ_i . Ceci fut confirmé expérimentalement en allongeant jusqu'à 8 diamètres la portion cylindrique de la tête de buse : il en résulte un épaississement de la couche limite provoquant lui-même une réduction de σ_i de 15 %. Cependant, l'élimination totale de la tête cylindrique (la buse produit alors un jet convergent à 60°) provoque également une réduction de σ_i , mais pour des raisons qui sont encore obscures. Par ailleurs, la présence d'air en suspension donnait naissance à la pseudo-cavitation dont nous avons déjà parlé; la valeur apparente de σ_i variait alors dans de larges proportions suivant la grandeur de p_0 et la concentration en air. Dans de telles conditions, il semble raisonnable d'assigner comme valeur moyenne à σ_i : 0,6.

Les tentatives faites en vue de photographier les poches de cavitation dans la zone de diffusion permirent de mettre en lumière beaucoup des points discutés. Afin d'éviter un brouillage de l'image, on opère avec des éclairs extrêmement brefs (1/20.000° de sec). En se plaçant légèrement en dessous du point d'apparition de la cavitation, on avait constaté que la chance de saisir, avec une seule prise de vue, une poche de vapeur aisément visible, était négligeable. Pour une valeur suffisamment faible de σ , on relevait évidemment toujours des cavités caractéristiques, ainsi que le montre la photographie supérieure de la figure 7 obtenue avec un éclairage à l'arrière-plan. Afin de faire apparaître la distribution radiale des cavités, un jeu de fentes et de lentilles permettait de réaliser une nappe lumineuse mince (6 mm), normale à l'axe de l'appareil photographique. Mais alors, il fallait de nombreuses expositions pour s'assurer la présence d'une densité suffisante de poches de cavitation. La seconde photographie de la figure 7, obtenue suivant cette méthode, montre clairement le contour de la zone de cavitation. Un fait est remarquable : bien que la zone de cavitation maximum coïncide généralement avec la zone de turbulence maximum, on ne décèle pas de formation de vapeur tout le long d'un tronçon initial d'environ 1 diamètre. Les caractéristiques de la zone de résorption — en dehors du champ de ces photographies — demandent encore des recherches.

coincides in general with the zone of maximum turbulence — no vapor formation is evident over an initial length of about one diameter. The characteristics of the zone of collapse — beyond the range of these photographs — have yet to be investigated.

En résumé, il convient de noter que les éléments rassemblés jusqu'à maintenant sont surtout des sondages indiquant, plutôt que des résultats définitifs utilisables de suite en pratique, les directions dans lesquelles doivent être menées des observations plus détaillées.

FIG. 7. — Photographs of jet cavitation at $\sigma = 0.2$. Above, single exposure with rear illumination. Below, 25 exposures with only central plane illuminated.

Photographies de la cavitation dans le jet pour $\sigma = 0.2$. En haut, une seule exposition avec éclairage à l'arrière-plan. En bas, 25 expositions mais en éclairant seulement un plan central.

By way of summary, it must be noted that accomplishments to date have been largely of an exploratory nature, indicating directions for more refined observations rather than final values for immediate use. The pressure tube shows promise of permitting a quantitative study

Le tube de prise de pression semble permettre d'envisager l'étude quantitative des fluctuations instantanées, à condition que la tête puisse être réalisée suffisamment petite par rapport à la zone de diffusion et suffisamment exempte d'erreur systématique; comme le tube dynamique, il pré-

of the instantaneous fluctuations, provided that the tip can be made sufficiently small relative to the diffusion zone and free from appreciable bias; like the velocity tube, it has the particular advantage of being adaptable to use in both air and water. The matter of the spatial distribution of cavities will probably require an investigation of scale as well as intensity, by methods which are still far from obvious. And for an analysis of the complete history of a typical cavity, it will be necessary to carry both pressure measurements and photographic observations from the nozzle itself to the point of collapse. The only numerical result now at hand is that determined empirically for the point of incipient cavitation of an initially parallel jet with even velocity distribution and minimum air content; under these conditions, the design value $\sigma_i = 0.6$ is considered to represent a dependable figure.

All experiments described herein were conducted at the Iowa Institute of Hydraulic Research under Contract N8onr-500 with the Office of Naval Research. Measurements of the velocity characteristics were made by H. C. Hsu and those of the pressure characteristics by S. C. Ling, with instruments developed under the direction of P. G. Hubbard. Investigations of the cavitation itself were conducted as a graduate thesis project by J. P. Whitehouse [6]. The paper was presented by the author at the Eighth International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Istanbul, 1952.

sente l'avantage considérable de pouvoir être utilisé aussi bien dans l'eau que dans l'air. En ce qui concerne la distribution spatiale des poches de vapeur, il faudra probablement se livrer à des recherches d'échelle et d'intensité, par des méthodes qui sont encore loin d'être au point. Pour ce qui est de l'analyse de l'évolution complète d'une poche caractéristique, il faudra nécessairement mener de front des mesures de pression et des observations photographiques depuis l'extrémité de la buse elle-même jusqu'au point de résorption. Le seul résultat numérique dont on dispose actuellement est celui qui a été déterminé empiriquement pour le critère d'apparition de la cavitation dans un jet primitivement parallèle, avec distribution régulière de vitesse, et concentration en air minimum; dans de telles conditions, on peut, avec une certaine confiance, assigner à σ_i la valeur de 0,6.

Tous les essais décrits ci-dessus ont été réalisés à l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa, par contrat N 8 onr-500 passé avec l'Office de Recherches Navales. Les mesures des caractéristiques de vitesses sont dues à H. C. Hsu et celles des caractéristiques de pressions à S. C. LING; l'appareillage a été mis au point sous la direction de P. G. HUBBARD. Les recherches sur la cavitation elle-même étaient effectuées par J. P. WHITEHOUSE [6] dans le cadre d'un projet de thèse. Cette note a fait l'objet d'une Communication au 8^e Congrès International de Mécanique Théorique et Appliquée, en 1952, à Istanbul.

REFERENCES

- [1] ROUSE, H., and MCNOWEN, J. S., « Cavitation and Pressure Distribution - Head Forms at Zero Angle of Yaw », Bulletin 32, Studies in Engineering, State University of Iowa, 1948.
- [2] ALBERTSON, M. L., DAI, Y. B., JENSEN, R. A., and ROUSE, HUNTER, « Diffusion of Submerged Jets. » *Trans. A.S.C.E.*, Vol. 115, 1950, p. 639, 1948.
- [3] BATCHELOR, G. K., « Pressure Fluctuations in Isotropic Turbulence, » *Proc. Camb. Phil. Soc.* 47, part 2, p. 369, April 1951.
- [4] ROESLER, F. C., « Ueber Kavitationsvorgänge in turbulenten Mischzonen, speziell an der Grenze schneller Flüssigkeitsstrahlen », *Oest. Akad. Wiss. math-nat. Kl. Anz.* 87, 287-290, 1950.
- [5] ROUSE, H., HUBBARD P. G., and SPENGO, A. C., « Cavitation of Submerged Jets, » Iowa Institute of Hydraulic Research, Interim Report to Office of Naval Research, March 1950.
- [6] WHITEHOUSE, J. P., « An Investigation into the Point of Incipient Cavitation of Submerged Jets, » M. S. thesis, State University of Iowa, February 1952.