Communication présentée
au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1964

RECENSEMENT ET EXAMEN CRITIQUE DES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE A L'ÉROSION DE CAVITATION

PAR
R. CANAVELIS *

LA PRODUCTION D'UN ÉTAT D'ÉROSION PAR CAVITATION

Introduction

La cavitation est un phénomène assez connu pour que nous n'insistions pas sur sa définition. Nous n'ignorons pas non plus les effets néfastes qu'elle engendre : baisse de rendement dans les machines hydrauliques, bruits et vibrations, altération des surfaces par déformation ou enlèvement de matière. La dernière de ces manifestations touche tout particulièrement les exploitants, qui doivent parfois faire face à des réparations fort importantes. Aussi, loin d'être clos, le problème de la résistance des matériaux à l'érosion de cavitation donne-t-il lieu à d'incessantes recherches.

Nous exposerons donc les différentes méthodes utilisées dans ces travaux en examinant la question d'un double point de vue théorique et pratique. C'est-à-dire que nous examinerons aussi bien les expériences qui conduisent à l'étude de l'influence de divers facteurs sur l'intensité d'érosion que celles qui n'ont pour but que d'établir un rapport de résistance entre divers alliages. Il nous faut d'autre part faire une distinction d'ordre expérimental.

Lorsque l'on fait une expérience relative à l'étude de l'érosion de cavitation, on effectue deux opérations différentes. On crée d'une part des conditions

qui entraînent pour l'« éprouvette » étudiée un état d'érosion. D'autre part on apprécie le résultat obtenu à l'aide d'une mesure. Nous étudierons successivement les méthodes employées dans ces deux phases expérimentales en essayant de porter sur chacune d'elle un jugement de valeur.

I. — Recensement des méthodes expérimentales de reproduction du phénomène de cavitation

Nous pouvons reprendre la classification qui distingue méthodes statiques et méthodes dynamiques. Les premières utilisent une éprouvette fixe placée dans un liquide soumis à la cavitation. Les secondes permettent d'observer le phénomène sur une éprouvette mobile.

A - LES MÉTHODES STATIQUES.

L'éprouvette n'étant pas en mouvement, la cavitation est créée par une dépression locale au sein du liquide, due soit à un accroissement de sa vitesse, soit à une diminution de la pression environnante. Les deux possibilités se trouvent réunies dans l'emploi du tunnel hydrodynamique. La méthode par ondes ultra-sonores ne fait appel qu'au second moyen.

1. Emploi du tunnel hydrodynamique de cavitation. a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

Le tunnel hydrodynamique est constitué par un circuit hydraulique dont une partie possède une

* E.D.F., Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

forme appropriée, ou peut recevoir un profil immergé : c'est la veine d'essai, dans laquelle l'écoulement perturbé donne naissance au phénomène de cavitation. Celui-ci se produit sur les parois de la veine ou directement sur le profil. Une éprouvette judicieusement placée en subit les effets. Voyons la constitution de l'ensemble.

b) CARACTÉRISTIQUES CONSTRUCTIVES.

α Les divers types de tunnels hydrodynamiques [1].

Il est possible de faire une première distinction selon les différents modes d'alimentation. Dans les tunnels à « circuit ouvert », l'eau qui circule est continuellement renouvelée à partir d'une source suffisante pour ne pas s'épuiser durant le temps d'opération. Dans les installations à « circuit fermé », la même eau est recyclée, ce qui nécessite des quantités moindres de liquide.

Dans un autre ordre d'idées, on peut caractériser les différents tunnels d'après la constitution de la veine d'essai. Celle-ci permet, dans certains cas, le passage d'un jet d'eau à travers une masse liquide au repos, éliminant ainsi les effets de paroi. On peut aussi réaliser un jet traversant une atmosphère gazeuse raréfiée et donnant lieu à des états poussés de cavitation. On emploie également des veines d'essai à surface libre pour étudier l'effet de cette dernière. Mais, le plus souvent, on étudie l'écoulement limité par des parois solides dans une veine à section circulaire ou polygonale.

Il n'existe donc pas de tunnel type, chacun étant construit pour une étude plus particulière. Il n'en reste pas moins que le problème de la cavitation impose certaines conditions générales de réalisation.

β) Réalisation d'un tunnel

hydrodynamique [2] [3] [4] [5] [6].

Dans le cas précis où l'on se propose d'étudier l'érosion de cavitation sur un profil ou un obstacle, il est recommandé de respecter les trois points suivants :

- 1° Il faut obtenir dans la veine d'essai un écoulement aussi uniforme que possible;
- 2° Il faut empêcher la production de toute cavitation secondaire en amont ou près du profil ou de l'obstacle étudié;
- 3° Il faut pouvoir régler les différents paramètres qui affectent le phénomène. A savoir la pression, la vitesse d'écoulement, la température et la teneur en air du liquide.

Ces exigences déterminent en gros les différents éléments constitutifs d'un tunnel hydrodynamique.

— La première de ces conditions conduit à prévoir une zone de tranquillisation de l'écoulement avec grilles, nids d'abeilles, et aubes de guidage dans les coudes. Elle entraîne ensuite la mise en place d'un convergent bien étudié donnant à sa sortie un profil de vitesse uniforme et une très faible couche limite.

— La seconde condition oblige à étudier tout particulièrement les points délicats où des dépressions locales pourraient créer une cavitation secondaire. Ainsi en va-t-il de la zone de transition entre convergent et veine d'essai, et du support du profil, s'il est mal conçu.

— Le troisième point, qui permet d'analyser le phénomène, entraîne à lui seul de grosses complications. Le réglage de la pression se fait à l'aide d'une pompe à vide ou d'un compresseur agissant sur le fluide par l'intermédiaire d'une surface libre. Il peut également se faire par l'emploi d'une colonne hydrostatique.

La vitesse peut être réglée soit à l'aide d'un variateur de vitesse conditionnant la rotation de la pompe d'entraînement, soit par un jeu de vannes ou un bypass.

Il faut également, dans certains cas, prévoir un système de réfrigération du liquide étant donné que l'énergie fournie par la pompe se dissipe, pour sa plus grosse part, sous forme de chaleur dans le circuit.

Enfin, la teneur en air du liquide doit pouvoir être fixée à une certaine valeur. D'où l'emploi de résorbeurs dont le rôle est de redissoudre à chaque passage les bulles gazeuses qui se sont formées dans la zone de cavitation [7]. Parfois on utilise un système de désaération et réaération simultanées.

L'ensemble d'une telle installation est représenté sur la figure 1. Il faut voir à présent les possibilités d'expériences offertes par l'emploi d'un tunnel hydrodynamique.

c) EXPÉRIENCES D'ÉROSION.

Nous allons examiner brièvement les principales expériences effectuées jusqu'à ce jour dans les laboratoires de divers pays.

α) Diffuseur de Schröter et Mousson [8].

Dans cet appareil, la veine d'essai comporte un déflecteur de forme spéciale assurant une grande intensification du phénomène de cavitation. Voir figure 2. L'essai est fait sur deux éprouvettes planes disposés latéralement à l'aval du déflecteur. Cette position les soustrait au choc direct du jet tout en favorisant une érosion accélérée. Ce dispositif fut employé par Schröter à la centrale de Walchensee, par Mousson au Laboratoire de Haltwood aux U.S.A. Un modèle semblable a été installé au Laboratoire d'Hydraulique de l'E.N.A.M. à Paris.

β) Erosion sur obstacle cylindrique [9].

M. Rasmussen a présenté des expériences faites au Danemark. Il opéra dans un tunnel à veine rectangulaire. Voir figure 3. L'éprouvette est ici constituée par un obstacle cylindrique dont l'axe est perpendiculaire à l'écoulement. Celle-ci est érodée le long de deux génératrices diamétralement opposées, à l'emplacement des cavités gazeuses. On a pu ainsi comparer la résistance de différents matériaux.

γ) Erosion derrière un obstacle cylindrique [10] [11].

On peut citer les essais de M. Shalnev en U.R.S.S. et de MM. Govinda Rao et Thiruvengadam aux Indes. Ils ont étudié l'érosion sur une éprouvette plane disposée derrière un obstacle cylindrique, dans une veine d'essai rectangulaire. Pour des nombres de Reynolds assez grands, une cavité se forme derrière le cylindre. Des bulles gazeuses se trouvent entraînées par la turbulence à la frontière de la cavité, créant une figure d'érosion sur l'éprouvette. Voir figure 4.

1/ Schéma de tunnel hydrodynamique (California Institute of Technology).
Hydrodynamic test tunnel layout.

2/ Forme du diffuseur employé par Schröter et par Mousson, pour leurs essais de corrosion par cavitation.
Shape of the diffuser used in Schröter and Mousson's cavitation corrosion experiments.

3/ Vue de profil et en plan de la veine d'essai avec obstacle cylindrique.
Profile and plan view of experimental flow past a cylinder.

8/ Erosion sur un profil à symétrie axiale [12].

M. Knapp a examiné l'érosion subie par un corps immergé de forme cylindrique à génératrices parallèles au courant avec une tête hémisphérique. Une

cavité se forme le long de la surface, entraînant des piqûres dans le métal.

Nous avons ainsi une idée des diverses possibilités offertes par le tunnel hydrodynamique. Ce fut d'ailleurs la première installation qui s'imposa à l'esprit des chercheurs. Mais grâce à une analyse plus poussée du mécanisme de la cavitation, d'autres procédés ont pu être imaginés, telle la méthode qui va suivre.

4/ Schéma du dispositif expérimental pour les essais d'érosion derrière un obstacle cylindrique.

Diagrammatic rig layout for experiments on erosion in the wake of a cylinder.

2. Méthode par ultra-sons.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

On produit des ondes ultra-soniques dans une masse liquide par l'intermédiaire d'un transformateur électro-acoustique. La surface de l'éprouvette à éroder est placée sur le trajet d'un train d'ondes, se trouvant ainsi soumise à des variations alternatives et rapides de pression qui provoquent la formation et l'implosion successives de cavités.

b) APPAREILLAGE.

La partie électrique de l'installation comprend un oscillateur et un amplificateur distribuant une tension alternative aux bornes d'un transducteur. Ce dernier se présente sous la forme d'un anneau au titanate de baryum recouvert intérieurement et extérieurement d'une lame conductrice. On le place à l'intérieur d'un vase en intercalant entre les deux, une couronne de caoutchouc qui permet de sélectionner la fréquence de vibration. Voir figure 5.

Le vase ainsi muni de l'anneau vibrateur est rempli de liquide. L'éprouvette peut être placée dans le fond du récipient de deux façons différentes : ou bien sa face supérieure est au même niveau que le fond, ou bien elle émerge, provoquant ainsi une concentration de l'attaque.

c) EXPÉRIENCES D'ÉROSION [13] [14].

M. Ellis a mis au point cette méthode au California Institute of Technology. Il utilisa une source de tension de 200 V et des fréquences de l'ordre de 20 kHz. La forme particulière d'émission des ondes dans une cavité cylindrique fait apparaître des

nœuds et ventres de pression le long de la zone axiale. L'anneau est fixé à une hauteur telle que la fréquence fondamentale de résonance soit excitée. On dispose l'éprouvette de façon que la face expo-

5/

sée soit dans un plan correspondant à une variation maximale de pression. Un nuage de bulles prend alors naissance dans une région bien localisée au-dessus de l'éprouvette, dont on examine ensuite l'érosion.

Les deux méthodes que nous venons de décrire constituent l'essentiel des procédés statiques actuellement employés. Peut-être convient-il de citer pour mémoire l'expérience réalisée par Ackeret et de Haller : elle consiste à transmettre des coups répétés à un piston fermant la partie supérieure d'un cylindre rempli d'eau dont le fond est attaqué et sert d'éprouvette.

Il convient à présent d'exposer les méthodes dynamiques d'érosion. Nous allons voir qu'à chacune de deux méthodes précédemment étudiées, on peut faire correspondre des nouveaux procédés inspirés des mêmes principes, mais dans lesquels l'éprouvette étudiée est en mouvement.

B - LES MÉTHODES DYNAMIQUES.

L'éprouvette étant en mouvement, la cavitation est créée à partir d'une dépression locale due soit à un accroissement de la vitesse relative de l'éprouvette par rapport au liquide soit à une diminution de la pression environnante.

1. Erosion sur modèles de turbines.

Ce procédé constitue pour ainsi dire l'homologue de la méthode d'essai déjà vue dans l'emploi du tunnel hydrodynamique.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

On utilise un circuit hydraulique construit à échelle réduite ou même grandeur réelle. On se replace donc dans les conditions réelles de fonctionnement d'une machine hydraulique.

b) CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION.

Les caractéristiques générales restent identiques à celles du tunnel hydrodynamique.

c) EXPÉRIENCES D'ÉROSION.

Des expériences ont été faites en Allemagne. On y utilisait une turbine munie d'aubes de matériaux différents, soumise à l'action prolongée de la cavitation.

De nombreux modèles de turbines ont souvent été utilisés, notamment aux U.S.A., mais pour des expériences ne concernant pas des mesures d'érosion. S'inspirant du même principe, les expérimentateurs ont mis au point des appareils rotatifs d'un maniement simplifié.

2. Erosion sur la surface d'un disque immergé.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

Un disque plat tournant à grande vitesse dans un réservoir rempli de liquide présente une irrégularité de surface : en l'occurrence un trou. Cette dépression engendre une cavité. L'érosion attaque une éprouvette en forme de pastille, insérée dans le disque derrière le trou.

b) APPAREILLAGE ET FONCTIONNEMENT [11] [9].

Des essais systématiques furent entrepris par M. Rasmussen. Le disque tourne autour d'un arbre vertical et comporte des trous répartis symétriquement. Les éprouvettes affleurent au niveau de la surface du disque et peuvent être faites en différents métaux. Afin d'empêcher toute rotation importante du liquide par entraînement, des pales fixes sont disposées de part et d'autre du disque. On peut contrôler la vitesse de rotation du disque, la pression, la teneur en air. Le schéma de l'appareil de Rasmussen (fig. 6) représente le conduit d'amenée des bulles d'air permettant de faire varier le paramètre de teneur en gaz.

M. Govinda Rao fit une expérience à peu près semblable dans laquelle l'eau de la chambre d'essai circulait avec un débit et une pression réglés par deux vannes. Voir figure 7.

3. Erosion à la périphérie d'un disque immergé.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

Sur un disque immergé tournant à grande vitesse sont fixées des éprouvettes radiales périphériques. Sur le bord d'attaque, de chaque côté de l'éprouvette, se forme une cavité qui provoque de l'érosion.

b) APPAREILLAGE ET FONCTIONNEMENT.

L'expérience réalisée par M. Bradfield était faite avec des éprouvettes à section rectangulaire sur un disque tournant à environ 1 000 tr/mn, sous pression réglable.

4. Disque tournant dans un jet.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

Comme dans l'expérience précédente, des éprouvettes sont fixées à la périphérie d'un disque. Au cours de leur rotation, elles viennent couper un jet

APPAREIL TOURNANT

Section a a'

Section b b'

Ailettes fixes D

Ailettes fixes A et B

DISQUE TOURNANT AVEC ALIMENTATION EN AIR

6/ Appareil à disque tournant.
Rotating-disc rig.

7/ Schéma de montage de l'appareil à disque tournant.
Layout diagram the rotating-disc rig.

liquide parallèle à l'axe du disque qui attaque le métal sur la surface de contact.

b) APPAREILLAGE ET FONCTIONNEMENT [15] [16] [17] [18].

Le dispositif n'a rien de particulier. Comme dans toutes les expériences de disque tournant, il faut s'efforcer d'obtenir une régulation précise de la vitesse : la non-régularité du couple résistant, dans le cas présent, complique le problème.

Des essais de ce type furent réalisés par de Haller puis par Honegger, et repris récemment par M. Hobbs au N.E.L. en Ecosse. La vitesse périphérique, le diamètre du jet, la forme des éprouvettes sont autant de paramètres importants. Les résultats ont montré la possibilité d'obtenir une attaque très rapide avec des vitesses de 90 m/s même sur des aciers très durs.

Après avoir vu l'emploi des machines tournantes, il nous reste à examiner le procédé magnétostrictif.

5. Emploi de l'appareil magnétostrictif.

a) PRINCIPE DE LA MÉTHODE.

Un tube de nickel placé dans un champ magnétique alternatif est soumis à des vibrations. Une éprouvette métallique fixée à son extrémité et plongée dans un liquide se trouve soumise à une cavitation intense.

b) APPAREILLAGE ET FONCTIONNEMENT [19] [20] [21] [22] [23].

8/ Schéma de montage de la méthode magnéto-strictive.
Diagrammatic representation of the magnetostrictive method.

La figure 8 schématise l'installation.

Il faut pouvoir contrôler avec autant de précision que possible la fréquence et l'amplitude des vibrations. L'oscillateur est réglé sur la fréquence propre de vibration du tube, de façon à obtenir une amplitude maximale. Celle-ci est mesurée à l'aide d'une jauge de contrainte fixée sur le tube ou contrôlée périodiquement par éclairage stroboscopique.

L'éprouvette présente ordinairement la forme

d'une capsule fixée à la partie inférieure du tube de nickel. Son poids doit se situer entre certaines limites pour ne pas perturber le mouvement vibratoire.

Le liquide risquant de s'échauffer rapidement, le vase expérimental se trouve placé dans une enceinte de refroidissement. On peut aussi faire circuler dans le tube un réfrigérant.

De tels essais avaient déjà été effectués par M. Gaines en 1932 et M. Schumb en 1937 avec des fréquences de l'ordre de 9 kHz. M. Plesset a mis au point en 1959 un dispositif un peu modifié, dans lequel le corps vibrant prend une forme de pavillon, ce qui permet d'augmenter l'amplitude des vibrations mécaniques avec une fréquence d'environ 15 kHz.

Telles sont les diverses méthodes employées actuellement. Nous allons les comparer les unes aux autres.

II. — Examen critique des différentes méthodes expérimentales de reproduction du phénomène de cavitation

Nous reprendrons l'étude des différentes méthodes déjà examinées, d'un point de vue, non plus descriptif, mais comparatif, en nous efforçant de déterminer d'une part la signification des résultats obtenus, d'autre part les avantages ou inconvénients pratiques qu'elles présentent.

A - LA SIGNIFICATION DES RÉSULTATS.

On ne peut s'empêcher de vouloir comparer entre eux les résultats des diverses méthodes proposées. Aussi étudierons-nous les paramètres et facteurs physiques qui caractérisent un état de cavitation afin d'analyser plus facilement, dans une seconde partie, le mécanisme du phénomène destructif dans chaque cas particulier, ce qui nous conduira à certaines conclusions sur le choix d'une méthode.

1. Paramètres et facteurs physiques.

a) PARAMÈTRES SANS DIMENSION.

Nombre de Leroux.

Pour que deux écoulements dynamiquement semblables le soient vis-à-vis de la cavitation, il faut établir l'égalité de rapports tels que :

$$L = \sigma = \frac{P - P_v}{\rho (V^2/2)}$$

P pression du liquide en un point de référence;

V vitesse de l'écoulement en un point de référence;

P_v tension de vapeur à la température de l'expérience;

ρ masse spécifique du liquide.

Coefficient de Thoma.

Dans le cas des turbomachines, on emploie plus communément le coefficient de Thoma :

$$\sigma_T = \frac{(P_a/\varpi) - H_a - (P_v/\varpi)}{H} = \frac{\Delta h}{H}$$

P_a pression absolue sur la surface libre;

H_a hauteur géométrique d'aspiration;

H hauteur nette de la machine.

Il faut toutefois remarquer, à propos des deux paramètres précédents, que l'on ne peut comparer que des coefficients de cavitation relatifs à des installations géométriquement semblables.

De plus, ces coefficients traduisent mal l'influence séparée des facteurs physiques qu'ils englobent : pression, vitesse, température. Par suite, à une même valeur de σ peuvent correspondre des conditions d'érosion totalement différentes. C'est ainsi que l'on observe sur un prototype de turbomachine, des érosions absolument inexistantes sur le modèle pour une même valeur de σ .

Enfin, les lois de similitude n'étant plus rigoureusement remplies lorsque la cavitation est établie, il faut s'attendre à une modification de leur expression. Ainsi, à la suite d'expériences faites sur une petite pompe hélice, Tenot a proposé la relation de similitude suivante [32] :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_c}{\sigma_2 - \sigma_c} = \frac{H_2}{H_1}$$

σ_c valeur critique de σ correspondant à l'apparition de la cavitation;

σ_1 et σ_2 correspondent respectivement à des points de fonctionnement sous une chute H_1 et H_2 .

Cette dernière relation qui peut encore s'écrire :

$$\Delta h_1 - \Delta h_{c1} = \Delta h_2 - \Delta h_{c2}$$

dans le cas de deux machines semblables, montre que la similitude de cavitation serait uniquement déterminée par l'écart de pression par rapport à la pression critique.

Critère thermique de cavitation.

Le développement de la cavitation peut se caractériser par le critère thermique de Stépanoff qui représente le rapport du volume de vapeur au volume de liquide par unité de masse de liquide.

Ce nombre s'écrit :

$$B = \frac{V_v}{V_L} = \frac{v_v \Delta h_f}{V_L L}$$

V_v volume de vapeur produite par unité de masse de liquide;

$V_L = v_L$ volume spécifique du liquide;

v_v volume spécifique de la vapeur;

L chaleur latente de vaporisation;

Δh_f différence d'enthalpie du liquide correspondant à une certaine dépression Δp .

La quantité Δh_f correspond à la quantité de chaleur $C_{pL} \Delta T$ cédée par le liquide ainsi qu'à la quantité rvL absorbée par la vaporisation,

ΔT variation de température correspondant à une variation Δp de la pression de saturation dans la zone déprimée;

- C_L chaleur spécifique du liquide,
 r_v fraction du liquide vaporisé par unité de masse de liquide;
 L chaleur latente de vaporisation.

Le nombre B traduit donc la quantité de chaleur qui se trouve disponible pour la vaporisation. Cette quantité de chaleur est prélevée sur l'enthalpie du liquide intéressé par les échanges thermiques.

Ceci laisse donc supposer que les volumes V_v et V_L se renouvellent parallèlement et qu'un équilibre thermique s'établit.

En fait, seule une fraction de la chaleur disponible est utilisée, car le liquide, traversant rapidement la zone déprimée, peut rester en partie dans un état de surchauffe.

Si l'on appelle W_v et W_L les volumes totaux de vapeur et de liquide participant aux échanges thermiques, on a :

$$B = \frac{W_v}{W_L}$$

Et dans le cas de machines géométriquement semblables, fonctionnant avec un *même liquide* à la *même température* :

$$B = k\Delta h_f$$

k étant une constante.

Si l'on appelle D une dimension caractéristique de la machine, il y aura une similitude des états de cavitation si l'on a :

$$\frac{W_v}{D^3} = \text{Cte}$$

soit : $k\Delta h_f (W_L/D^3) = \text{Cte}$.

Plusieurs hypothèses sont alors possibles.

- si $(W_L/D^3) = \text{Cte}$, la similitude de la cavitation se réduit à la condition : $\Delta h_f = \text{Cte}$, c'est-à-dire finalement $\Delta P = \text{Cte}$, ce qui rejoindrait les résultats de Tenot sur la similitude;
- si $(W_L/D^3) = \text{Cte}$, mais que les deux liquides ne soient pas à la même température, la condition $\Delta P = \text{Cte}$ n'est plus valable.

Il faudrait en fait expliciter W_L pour trouver une véritable relation de similitude.

Nombre de Strouhal.

Le nombre de Strouhal :

$$S = \frac{nD}{V}$$

- n fréquence de détachement des tourbillons;
 D dimension de référence du profil;
 V vitesse de référence dans l'écoulement.

d'abord employé dans l'étude des tourbillons alternés de Bénard-Karman, peut être utilisé pour une cavité, dans la mesure où il intéresse la fréquence des lâchés de bulles.

On sait que l'on peut écrire :

$$S = f(\mathcal{R})$$

$\mathcal{R}$ nombre de Reynolds et que l'on a $S = \text{Cte}$ dans un certain domaine.

Hunsaker a montré par ailleurs qu'on pouvait appliquer la même relation en remplaçant D par la longueur L de la cavité accrochée à un profil.

On peut alors écrire :

$$\frac{nL}{V} = \text{Cte}$$

n fréquence de pulsation ou de détachement des cavités.

Le nombre de Strouhal donne alors une indication sur la fréquence des impacts provoquant l'érosion.

Les paramètres définis ci-dessus s'attachent principalement à l'aspect microscopique de la cavitation, mais ils ne définissent pas à eux seuls une similitude complète car, au niveau de la bulle de vapeur, bien d'autres phénomènes interviennent, tels que l'effet de la tension superficielle, de la viscosité, de la compressibilité du liquide, la diffusion gazeuse ou le transfert de chaleur à travers les parois de la bulle. Une étude complète entraînerait donc l'introduction de bien d'autres paramètres adimensionnels.

C'est ainsi que pour tenir compte de la tension superficielle qui joue un rôle important dans l'apparition et le développement des bulles, on peut utiliser le *nombre de Weber* :

$$\mathcal{W} = \frac{A}{\rho D V^2}$$

A tension superficielle;

ρD et V ont les mêmes significations que précédemment.

Nowotny avait d'ailleurs montré l'importance de la tension superficielle en exprimant le volume d'érosion par la formule :

$$E = A + kA^2$$

où k est une constante et E , le volume d'érosion.

Cette brève revue de quelques paramètres de cavitation nous a donné une vision générale des principaux facteurs physiques à prendre en compte.

b) FACTEURS PHYSIQUES.

Vitesse de l'écoulement.

L'influence de la vitesse sur l'intensité de l'érosion a déjà été étudiée par de nombreux auteurs notamment; Schröter [33], Knapp [12], Ken et Rosenberg [34], Rata [24], Chalnev [35] qui s'accordent pour établir une relation du type :

$$E = kV^\alpha$$

où k est une constante et α un exposant variant entre 5 et 8 suivant les auteurs.

Ces essais ayant été effectués avec une valeur constante de σ ou de la longueur L de la cavité, il s'ensuit que la vitesse n'y était pas le seul facteur variable. Néanmoins, la valeur élevée de l'exposant α montre que le facteur V joue une grande influence que l'on ne sait pas encore très bien expliquer.

On conçoit aisément que le nombre de bulles passant sur la surface d'érosion soit proportionnel à la

vitesse d'écoulement. On a vu d'autre part l'influence de la vitesse sur la fréquence des lâchés de bulles. Ceci n'expliquerait qu'une valeur de $\alpha = 1$.

Il faut alors introduire d'autres hypothèses telles qu'une influence de la vitesse sur la distribution des diamètres des bulles ou bien une influence directe sur la convection thermique et par suite sur la vaporisation (fait qui a été négligé dans la théorie du nombre B).

Pression au sein de l'écoulement.

Pour mesurer l'importance de la pression, on peut se référer à l'équation du mouvement d'une bulle gazeuse au sein d'une masse liquide illimitée, non visqueuse, incompressible et au repos, dans des conditions isothermes, ces simplifications changeant peu la discussion qualitative du phénomène :

$$\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{2}{3} \frac{dR}{dt} = \frac{P(R) - P_\infty(t)}{\rho}$$

$R(t)$ rayon de la bulle à un instant donné;

$P(R)$ pression dans le liquide contre la paroi de la bulle à un instant donné;

P_∞ pression dans le liquide à l'infini, avec

$$P(R) = P_a + P_v - \frac{2A}{R};$$

P_a pression des gaz autres que la vapeur d'eau dans la bulle;

P_v tension de vapeur;

A tension superficielle.

On voit alors que le déséquilibre dynamique de la bulle est directement fonction de la différence $P_\infty(t) - P(R)$. D'où l'influence de la pression dans la zone déprimée sur le rayon maximal R_M des bulles qui s'y forment, ainsi que celle de la pression dans la zone de dégonflement sur l'énergie finale de la bulle qui, dans le cas du vide sphérique étudié par Lord Rayleigh, est égale à :

$$W = P_\infty R_M^3 \text{ avec } P_\infty = \text{Cte}$$

Température.

La température affecte les diverses caractéristiques physiques du liquide : ρ , A , P_a , P_v , etc. La

9/ Erosion d'une éprouvette en fonction de la température pour des intervalles de temps de 10 mn sur un appareil magnétostrictif.

Erosion of a test specimen at various temperatures for time intervals of 10 mn with magnetostrictive equipment.

variation de P_v semble essentielle car, pour une valeur donnée de P_∞ , le déséquilibre dynamique de la bulle s'atténue si la température augmente. En contre-partie, la vaporisation se fait plus facilement pour une pression donnée dans la zone déprimée. Le compromis qui s'établit entre ces deux tendances explique la courbe d'érosion en fonction de la température du liquide, trouvée par Nowotny (fig. 9) [36].

Teneur en gaz du liquide.

Les bulles de cavitation contiennent généralement des gaz autres que la vapeur, soit parce qu'elles se sont formées à partir d'un noyau gazeux, soit par suite de la diffusion qui a lieu lors de leur développement [37]. Aussi le terme P_a de l'équation de base peut-il devenir important puisque, dans le cas où l'on néglige la diffusion gazeuse pendant le très court instant du dégonflement d'une bulle, on a :

$$P_a = \frac{K}{R^3} \quad K = \text{Cte}$$

R devenant très faible. Cette quantité d'air peut alors arrêter le mouvement de la bulle pour une certaine valeur R_M du rayon et la soumettre à une série d'oscillations amorties [38].

On peut se faire une idée de l'effet de la teneur en air de l'eau sur l'érosion en examinant les résultats obtenus par Wheeler sur un disque tournant immergé [19] (voir fig. 10).

Géométrie de l'écoulement :

Forme des cavités. — La nomenclature proposée par M. Beaufrère et reproduite sur la figure 9 s'avère fort utile pour définir qualitativement l'aspect et le comportement des diverses figures de cavitation rencontrées dans les installations hydrauliques. Mais il est plus malaisé de répondre à la question : y a-t-il une relation définie entre une figure de cavitation et son potentiel destructif? Aussi faut-il rendre hommage à la tentative de synthèse faite en la matière par M. Huguenin [39] qui montre que certaines formes de cavitation sont plus dangereuses que d'autres.

Dimensions des cavités. — Nous avons déjà vu

10/ Erosion pour différentes teneurs en air sur un disque tournant immergé.

Erosion of a submerged rotating disc for various air contents.

dans quelle mesure la longueur d'une cavité attachée à un profil peut être reliée à son mouvement pulsatoire.

L'accroissement des dimensions peut correspondre d'autre part à une augmentation de la masse vaporisée par suite du nombre de bulles actives.

L'action opposée des deux phénomènes pourrait expliquer l'allure de la courbe trouvée par Chalnev qui traduit pour une vitesse d'écoulement donnée, le volume d'érosion en fonction de la longueur de la cavité (fig. 11).

On peut aussi remarquer qu'à partir d'un certain développement de la cavitation, le profil peut devenir supercavitant, ce qui le soustrairait à toute attaque.

Dimensions du profil ou de l'éprouvette.

Les dimensions de la cavité sont également influencées par celle du profil étudié. Aussi Chalnev a-t-il mis en évidence un effet d'échelle dû aux dimensions du profil dans le cas d'une cavité derrière un cylindre (fig. 12).

Il a trouvé d'autre part que, pour des profils géométriquement semblables de mêmes caractéristiques

11/ Erosion derrière un cylindre en fonction de la longueur relative de la cavité $\lambda = L/D$, pour différentes vitesses de courant. L = longueur de la cavité D = diamètre du cylindre.

Erosion behind a cylinder in terms of relative cavity length $\lambda = L/D$, for various flow velocities (L = cavity length, D = cylinder diameter).

12/ Effet d'échelle dû aux dimensions : longueur relative λ de la cavité formée derrière un cylindre en fonction du σ pour différents diamètres D ($\lambda = L/D$, L = longueur de la cavité).

Scale effect associated with dimensions : Relative length λ of the cavity forming behind a cylinder in terms of σ for various diameters D . ($\lambda = L/D$, L = cavity length).

aérodynamiques, pour une même vitesse d'écoulement et une même longueur relative de la cavité, le volume d'érosion pouvait se mettre sous la forme :

$$E = kD^3$$

k = constante;

D = dimension caractéristique du profil.

Nature du liquide et de l'éprouvette.

Ces facteurs, très importants du point de vue de l'érosion, n'interviennent pas dans la comparaison des diverses méthodes, puisque l'on peut utiliser le même liquide et le même matériau d'éprouvette.

Ayant passé en revue ces divers facteurs physiques et leur rôle possible dans le phénomène d'érosion, nous allons préciser de quelle manière ils interviennent dans les diverses méthodes proposées, afin de mettre en lumière pour chacune d'elle la nature du mécanisme destructeur.

2. Nature du phénomène destructif.

a) TUNNEL HYDRODYNAMIQUE ET MACHINES TOURNANTES IMMERGÉES.

Dans ces installations, il y a apparition de bulles de vapeur à partir d'une cavité née dans une zone de dépression. Entraînées par le courant, ces bulles vont imploser dans une région aval, sous une pression plus élevée, où elles se trouvent en état métastable.

L'aspect des cavités est fort semblable à celles rencontrées dans les turbomachines. Ainsi, les essais concernant un profil d'aile ou un corps à symétrie axiale créent une cavitation du type 632

(voir tableau ci-dessous). L'expérience relative à un obstacle cylindrique donne une cavitation du type 241. Le diffuseur de Shröter et Mousson engendre des nuages et tourbillons de bulles du type 515 ou 715.

On utilise, pour définir le phénomène avec plus de précision, les paramètres de cavitation déjà énumérés tels que σ , σ_T , B. Les facteurs physiques qui interviennent sont essentiellement la vitesse d'écoulement, la pression, la température, la teneur en air.

Notons que ces grandeurs physiques peuvent avoir des valeurs tout à fait comparables à celles obtenues dans les installations hydrauliques industrielles et que, par conséquent, les conditions reproduites sont peu différentes des conditions réel-

les d'érosion. Seul l'effet d'échelle dû aux dimensions du modèle introduit une distorsion dans les résultats.

b) CAVITATION PAR ULTRA-SONS.

Comme nous l'avons expliqué dans le fonctionnement de l'appareil, il se forme à l'emplacement d'un maximum d'amplitude de l'onde de pression, un nuage de bulles qui implosent à chaque alternance. On crée donc artificiellement en un point un phénomène qui, dans un circuit hydraulique, se déroule le long du parcours des bulles. Qualitativement, on serait en présence d'une cavitation du type 525.

Mais on ne peut plus définir de vitesse d'écoulement ni de pression constante en un point. Chaque état de cavitation est défini par la fréquence de vibration, la température et la teneur en air. De plus les conditions aux limites interviennent de façon importante : nature et grandeur du vase, épaisseur des parois, profondeur et densité du fond, emplacement de l'anneau transducteur.

La fréquence de vibration transforme totalement, dans l'équation du mouvement de la bulle le terme $P_\infty(t)$, qui devient une fonction pratiquement sinusoïdale à période très brève. Ceci peut conduire à une vitesse bien plus grande de dégonflement de la bulle et une cadence très élevée du martelage de la paroi de l'éprouvette.

Il faut de plus considérer le rapport de la fréquence de vibration à la fréquence de résonance des bulles. Si ce dernier est supérieur à 1, le dégonflement des bulles peut se faire selon des oscillations complexes qui diffèrent complètement de celles observées en cavitation ordinaire comme l'indique l'étude théorique de B.E. Noltingk and E.A. Neppiras [25] (fig. 13). Ainsi ces expériences peuvent-elles

13/ Rayon d'une bulle en fonction du temps pour différentes fréquences ω de vibration.
Bubble radius' variation in time, for various vibration frequencies ω .

Critère	Appellation	Symbole
Aspect. (1 ^{er} chiffre)	Poche dont l'aspect dépend essentiellement des limites de l'écoulement (1).	1
	Poche dont l'aspect dépend essentiellement des caractéristiques de l'écoulement (1).	2
	Bulle isolée.	3
	Bulles en grappes.	4
	Bulles en nuages.	5
	Lame.	6
	Tourbillon.	7
	Torche (2).	8
	Filament fulgurant.	9
Localisation. (2 ^e chiffre)	Au sein d'un écoulement.	1
	Au voisinage d'une surface.	2
	Accrochée à une surface, se termine sur une surface.	3
	Accrochée à une surface, va l'« infini » (au sein de l'écoulement).	4
Stabilité. (3 ^e chiffre)	Stable.	1
	Stable dans l'espace (3), évolution pseudo-périodique rapide (4) dans le temps.	2
	Stable dans l'espace, évolution pseudo-périodique lente (4) dans le temps.	3
	Stable dans l'espace (3), instable dans le temps, évolution aléatoire lente (4).	4
	Stable dans l'espace (3), instable dans le temps, évolution aléatoire rapide (4).	5
	Instable dans l'espace et dans le temps, évolution lente (4).	6
	Instable dans l'espace et dans le temps, évolution rapide (4).	7

(1) Nous avons donné deux numéros à l'aspect en poche de la cavitation pour pouvoir distinguer deux types assez différents :

— les poches dont l'aspect dépend essentiellement des limites de l'écoulement sont les poches qui remplissent une partie du conduit (coup de béliet), ou bien sont accrochées à une singularité de ce conduit (sillage d'une aspérité ou d'un obstacle non profilé);

— les poches dont l'aspect dépend essentiellement des caractéristiques de l'écoulement sont les poches qui dépendent au premier chef du champ de pression dans l'écoulement, qui lui-même dépend des limites de l'écoulement. Mais nous considérons que l'effet de ces limites n'est pas direct, et qu'il est beaucoup moins sensible que dans le premier cas. (Exemple : poche pseudo-périodique sur l'extrados d'une pale de turbomachine.)

(2) Le terme de torche est réservé au tourbillon qui apparaît sur les ogives des machines tournantes.

(3) Par stable dans l'espace, nous entendons : figure de cavitation qui se déforme en un lieu donné, ou se produit toujours de façon pseudo-périodique ou aléatoire, au même endroit.

(4) Par rapide ou lent, nous entendons un phénomène dont les vitesses de variations sont à l'échelle de la milliseconde et de la seconde.

aboutir à des résultats très particuliers tendant à prouver que l'action chimique et mécanique ne se produirait qu'en cavitation gazeuse [26].

c) ESSAIS AU VIBRATEUR MAGNÉTOSTRICTIF.

Le facteur vitesse disparaît comme précédemment pour laisser place à la fréquence et à l'amplitude des vibrations de l'éprouvette. La hauteur d'immersion de cette dernière affecte également l'érosion.

Une différence avec la méthode ultrasonore vient de ce que, l'éprouvette étant soumise à de fortes accélérations, les particules de métal sont plus facilement arrachées.

La nature du phénomène reste cependant très proche de celle de la cavitation par ultra-sons. Lors du mouvement ascendant de l'éprouvette, la dépression créée fait naître un nuage de bulles qui, soumises ensuite à une brusque compression, implodent lors du mouvement descendant. La fréquence et l'amplitude des vibrations règlent donc la pression $P_{\infty}(t)$ comme dans le cas précédent. De plus, si l'on tient compte du rôle chimique du milieu ambiant qui semble être en partie à la base du phénomène d'érosion, ces expériences de cavitation accélérée comme les précédentes introduisent une distorsion entre action chimique et mécanique.

Ainsi les études de M. S. Plesset [27] montrent-elles qu'en soumettant alternativement l'éprouvette à un régime vibratoire et à une période de repos laissant place à une certaine action chimique du liquide, on favorise l'érosion pour une même durée de la cavitation effective, du moins en ce qui concerne les alliages sensibles à la corrosion.

d) EROSION DANS UN JET.

Le problème a été longtemps discuté de savoir si l'on était, dans ce cas, en présence d'une érosion réellement imputable à la cavitation. Certains prétendent que l'érosion est due au choc direct du jet contre le métal. D'autres imaginent qu'une cavitation cachée peut se produire sur les rugosités de l'éprouvette [28]. Il est effectivement constaté que pour des vitesses très grandes de rotation, une cavitation latérale se produit de chaque côté de l'éprouvette. Cependant l'érosion principale se produit au contact du jet, sans cavitation évidente.

On a également remarqué que la température et la teneur en air de l'eau n'influencent pas les résultats. De plus, le fait que la surface de contact de l'éprouvette dans le jet soit soumise uniquement à une pression de choc laisse peu de place à l'hypothèse de la formation de cavités.

Néanmoins, si nous ne sommes pas en présence de cavitation, l'état de surface des éprouvettes soumises à une telle érosion reste fort comparable à celui obtenu par cavitation. Aussi pensons-nous qu'il puisse y avoir une relation entre les deux phénomènes.

Il faut, pour l'expliquer, faire appel d'une part à la théorie de Poulter [29], selon laquelle l'érosion de cavitation serait due à la pénétration et au relâchement brusque du liquide dans les porosités du métal sous l'influence d'une variation rapide de pression, d'autre part, à l'étude de C. F. Naude and A. T. Ellis [30], qui montre que l'érosion est due

14/ Dégonflement théorique d'une bulle contre une paroi selon C.F. Naude et A.T. Ellis.

Theoretical bubble deflation against a wall according to C.F. Naude and A.T. Ellis.

principalement aux bulles situées contre une paroi métallique, lesquelles, en se dégonflant, donneraient naissance à un jet liquide (fig. 14). Aussi l'éprouvette traversant un jet reproduirait à grande échelle ce qui se passe au moment de la disparition d'une bulle contre une paroi, la vitesse périphérique de l'éprouvette simulant la vitesse de dégonflement de la bulle, mais à une échelle différente.

En effet, dans l'expérience décrite, la vitesse de rencontre de l'éprouvette avec le jet ne dépasse pas 100 m/s, alors que le jet qui se produirait dans la phase finale du dégonflement d'une bulle aurait une vitesse de quelque 1 000 m/s. Mais, en contrepartie, la bulle attaque une surface beaucoup plus petite que celle de l'éprouvette. Or, on a remarqué, en changeant les dimensions du jet, que l'éprouvette résiste d'autant mieux que la surface de contact est plus faible; ce qui explique que, dans l'expérience du disque, on puisse avoir des dégâts importants avec des vitesses plus réduites.

De plus, l'éprouvette qui traverse le jet se trouve martelée à une fréquence déterminée, alors que l'on ignore quelle peut être la probabilité pour que des bulles de cavitations attaquent un point déterminé avec une certaine fréquence.

Il est difficile d'évaluer avec précision les pressions créées par le choc d'une éprouvette contre un jet. Cependant, si l'on se réfère à la formule donnant la pression de choc entre deux corps élastiques :

$$P = \frac{V \rho_1 V_1 \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}$$

V vitesse de rencontre;

ρ_1 et ρ_2 masses spécifiques des deux corps;

V_1 et V_2 vitesse du son dans chaque corps.

on peut entrevoir des pressions variant autour de 1 000 atmosphères.

Ici, encore, l'action corrosive possible du liquide se trouve atténuée par le fait même que l'éprouvette traverse le jet pendant un très court intervalle de temps.

3. Choix d'une méthode.

Les précédentes discussions ont montré les différences fondamentales qui existaient dans la nature

même de l'érosion relative à chaque méthode. Ainsi voyons-nous que le choix d'une méthode dépendra surtout du but recherché.

Si l'on étudie l'érosion de cavitation dans le but de dégager des lois générales concernant les facteurs physiques qui influencent le phénomène dans les machines hydrauliques il est évident que seules les expériences en tunnel de cavitation sur modèle de turbine ou sur disque immergé donneront une juste image de la réalité.

Si l'on étudie la résistance à l'érosion, dans le but de comparer la tenue de divers matériaux, on peut alors utiliser les autres méthodes. On est d'abord tenté de le faire en raison de la courte durée des essais. Mais on a vu que si l'on produit ainsi de la cavitation ou un phénomène qui peut s'y ramener, il y a lieu de faire plusieurs restrictions, notamment en ce qui concerne l'action chimique du liquide et la fréquence des chocs. Des essais comparatifs faits par Beeching [31] avec un appareil magnétostrictif, dans un tunnel de cavitation et par érosion dans un jet, montrent que le classement des différents alliages peut être légèrement différent selon la méthode employée.

B - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS PRATIQUES.

Certains avantages sont relatifs à la construction elle-même de l'installation, d'autres aux facilités de manipulation.

1. Le tunnel hydrodynamique de cavitation.

a) CONSTRUCTION.

La description que nous en avons donnée suffit à montrer qu'une telle installation comporte des prix de revient élevés.

Les dimensions en sont souvent énormes, ce qui pose des problèmes d'encombrement.

Il ne faut pas non plus négliger les délais de construction, qui donnent à réfléchir lorsqu'on a une étude à effectuer.

b) MANIPULATION.

Le réglage des différents paramètres peut être relativement long, étant donné leur nombre et les moyens utilisés.

D'autre part, la durée d'une expérience est souvent de l'ordre d'une heure.

C'est pourquoi, ce procédé expérimental est réservé aux laboratoires disposant de moyens importants.

2. La méthode par ultra-sons.

a) CONSTRUCTION.

Cette méthode nécessite au contraire un appareillage réduit et assez peu coûteux. La partie électrique consomme assez peu d'énergie.

b) MANIPULATION.

Le réglage se limite à une variation de fréquence. Le temps d'essai est extrêmement court, de l'ordre de quelques minutes.

3. Modèle turbines.

Remarques identiques à celles du tunnel hydrodynamique.

4. Disques tournants.

a) CONSTRUCTION.

Ces expériences nécessitent un appareillage relativement réduit. La réalisation pratique pose cependant des problèmes mécaniques de résistance et d'étanchéité.

b) MANIPULATION.

Le réglage de la vitesse de rotation est facile, sinon toujours précis. Les montages et démontages des éprouvettes le sont moins.

Chaque expérience doit durer environ une heure dans le cas des disques immergés. Nous avons vu que l'érosion dans un jet peut être, au contraire, très rapide.

5. Le vibreur magnétostrictif.

a) CONSTRUCTION.

La réalisation est un peu moins simple que dans le procédé par ultra-sons, notamment en ce qui concerne la partie électronique, et par conséquent plus onéreuse.

L'installation est peu encombrante.

b) MANIPULATION.

Le réglage de la fréquence de vibration est aisé. Celui de l'amplitude est plus délicat.

Cette méthode a l'énorme avantage de permettre des essais rapides, de l'ordre de quelques minutes.

Ainsi avons-nous passé en revue l'ensemble des méthodes utilisées pour produire l'érosion de cavitation. Cette première partie définissait les éléments pouvant entrer en jeu lors de la première phase expérimentale d'une telle étude. Comme nous l'avions annoncé, la seconde phase envisagera les problèmes de mesure de l'érosion obtenue.

LA MESURE DE L'ÉROSION DE CAVITATION

I. — Recensement des méthodes de mesure de l'érosion

Lorsqu'une éprouvette présente une certaine érosion, il faut pouvoir l'apprécier. Que l'on veuille comparer différents états d'érosion sur un même matériau ou sur différents alliages, il faut définir des grandeurs mesurables, caractéristiques de chaque état, qui serviront de base à la comparaison. Nous allons exposer les différentes grandeurs pouvant servir de critère.

A - MESURE DE LA PERTE MASSIQUE.**1. Perte massique de l'éprouvette mesurée sur l'éprouvette.**

La méthode la plus répandue consiste à peser l'éprouvette étudiée, avant et après l'essai d'érosion. Le principe en est simple.

L'exécution doit être faite avec soin pour ne pas fausser les mesures et exige en toute rigueur :

- une manipulation délicate de l'éprouvette;
- un nettoyage parfait des dépôts superficiels;
- le séchage de l'éprouvette avant chaque pesée;
- l'emploi d'une balance de précision.

2. Perte massique mesurée sur les débris [19].

Lorsque l'on travaille dans un vase, il est possible de recueillir par filtration les fines particules qui se sont détachées. M. Wheeler employa cette méthode en redissolvant les particules dans une solution acide qu'il dosait ensuite par colorimétrie.

B - MESURE DE LA PERTE VOLUMIQUE.

Lorsque l'on utilise une éprouvette érodée sur une face plane, il est possible de faire pénétrer un liquide dans les porosités créées, de faire coïncider sa surface avec celle de l'éprouvette non atteinte et d'en mesurer le volume. Cette méthode se rapprocherait de l'opération industrielle qui consiste à déterminer le poids ou le volume de soudure nécessaire à la recharge des pales.

C - MESURE DE LA PROFONDEUR D'ÉROSION [14].

La méthode, exposée par M. Ellis, consiste à enlever à la surface de l'éprouvette une couche de métal telle que toute trace d'érosion disparaisse. On détermine ainsi l'épaisseur de la couche qui avait été atteinte.

L'opération peut se faire par usinage ou par polissage électrolytique. Il est possible de compléter l'examen par une visualisation à l'aide d'un faisceau de rayons X.

D - MESURE D'UN RAYONNEMENT.

Ken et Rosenberg [34] déterminèrent l'intensité de l'érosion à laquelle étaient soumises des pales de turbine Francis en appliquant sur celles-ci une peinture contenant un isotope de l'arsenic. Un compteur décelait la diminution progressive de l'intensité du rayonnement.

E - MÉTHODE DES JAUGES RÉSISTANTES.

Cette méthode a donné lieu à des essais au Laboratoire Hydraulique de Chatou.

Elle consiste à soumettre à la cavitation une lamelle métallique qui, insérée dans le circuit de mesure d'un pont de Wheatstone, permet de faire des mesures de résistance pendant que l'érosion se propage. Les variations de résistance relative peu-

vent être lues ou enregistrées. La description de l'appareillage et des essais a été exposée par M. Rata [24].

Le nombre des critères adoptés pour mesurer un état d'érosion nous amène naturellement à nous demander quelle est leur valeur et quel lien il peut y avoir entre eux.

II. — Examen critique des différentes méthodes de mesures de l'érosion de cavitation

A - MESURE DE LA PERTE MASSIQUE.

L'usage répandu de cette méthode tient sans doute à sa simplicité, mais aussi au fait qu'elle paraît *a priori* répondre le mieux à la question suivante : quelle quantité de matière faut-il remplacer par soudure sur une pale érodée? Pourtant, la connaissance de la perte massique présente quelques inconvénients.

La connaissance d'une telle grandeur ne tient pas compte des déformations plastiques sans perte de métal et dont l'importance varie avec la malléabilité du matériau. On a pu observer des déformations considérables d'éprouvettes en plomb sans qu'il y ait pour cela perte de métal. Il faut cependant reconnaître que les matériaux couramment employés dans la fabrication hydraulique sont généralement peu malléables.

D'autre part, la mesure de la perte massique ne permet pas de comparer des matériaux de densité variable bien qu'on rencontre couramment le fait. C'est cette seconde remarque qui a fait penser à mesurer la perte volumique.

B - MESURE DE LA PERTE VOLUMIQUE.

L'opération est peu employée vu sa difficulté. Car il faut un liquide pénétrant parfaitement dans les porosités métalliques et présentant une surface plane. La précision d'une telle mesure laisse sans doute à désirer.

C - MESURE DE LA PROFONDEUR D'ÉROSION.

La méthode ne permet de connaître l'érosion qu'en profondeur, c'est-à-dire dans une seule dimension. Il serait bon de pouvoir définir une profondeur moyenne d'érosion.

L'exécution est longue, malaisée, et applicable surtout à une surface plane.

D - MESURE D'UN RAYONNEMENT.

Cette méthode, élégante en elle-même, présente cependant une faiblesse en ce sens que la couche de peinture, une fois détruite, ne permet plus de faire de mesures ni par suite de déterminer l'évolution progressive de l'érosion.

On a aussi reproché à ce procédé d'employer une matière présentant une résistance peu comparable à celle du métal des pales.

E - MÉTHODE DES JAUGES RÉSISTANTES.

Cette méthode présente, par rapport aux précédentes, un avantage primordial : elle permet une mesure instantanée et pratiquement continue. La jauge étant continuellement reliée au pont de mesure, on peut à tout instant suivre l'évolution de l'érosion.

D'autre part, la résistance est affectée à la fois par la perte de matière et la déformation du métal. Elle est également sensible à la corrosion de sorte que l'on mesure une destruction globale.

Un autre avantage tient au fait que l'on peut mettre l'érosion en évidence sans changement appréciable de l'état de surface de la jauge, c'est-à-dire sans grande perturbation du phénomène de cavitation.

L'appareillage et le montage sont évidemment plus compliqués que dans les autres mesures. Mais on doit surtout faire les objections suivantes :

— La lamelle métallique soumise à l'érosion possède une résistance différente de celle d'une pièce pleine. D'une part, sa réduction à l'état de feuille mince lui confère des caractéristiques particulières de surface. D'autre part, sa fixation par collage introduit un élément non métallique. Mais l'objection tombe si l'on regarde la jauge comme un matériau ayant des caractéristiques propres et servant uniquement à comparer différents états de cavitation ;

— On peut enfin reprocher à cette méthode sa difficulté d'emploi sur une machine tournante, vu l'existence de connexions électriques.

L'examen de ces méthodes nous montre qu'aucune d'entre elles n'est parfaite et que la comparaison des résultats fondés sur différents critères peut se montrer délicate.

Conclusion

Nous ferons part, pour terminer cet exposé, des quelques réflexions que nous a inspirées la lecture des articles scientifiques relatifs au sujet qui nous occupe.

L'abondance des recherches effectuées depuis nombre d'années en la matière traduit assez bien l'intérêt qu'un problème tel que celui de l'érosion de cavitation a pu susciter. Des efforts dépensés dans les divers laboratoires sont nés les différentes méthodes que nous avons présentées. Nous sommes alors en droit de nous poser les questions suivantes : que valent ces différentes méthodes ? Peut-on les relier entre elles et comparer leurs résultats ?

L'étude des procédés de production de l'érosion nous a montré qu'il fallait avant tout définir entièrement les conditions auxquelles l'éprouvette est soumise. Les facteurs physiques qui effectent le phénomène sont nombreux et la tâche restera ardue tant que l'on n'aura pas explicitement mis en évidence leur rôle.

Nous avons également pu voir que dans l'état actuel des connaissances, il fallait choisir judicieusement sa méthode en fonction du but recherché. Car le vocable de cavitation peut cacher des méca-

nismes profondément différents donnant eux-mêmes des résultats quelque peu dissemblables.

Enfin, l'étude des méthodes de mesure de l'érosion, nous a montré qu'aucune des grandeurs choisies n'était pleinement satisfaisante et que leur diversité introduit une difficulté supplémentaire pour comparer les résultats. Il serait donc bon de définir un critère unique traduisant au mieux la détérioration des matériaux.

C'est pourquoi nous pensons que les recherches ultérieures devraient s'orienter davantage vers un effort de synthèse et même de normalisation.

Références citées dans le texte

- [1] ROBERTSON. — Water Tunnels for Hydraulic Investigation. *Trans. A.S.M.E.*, 78 (1) : 95-100, 1958.
- [2] DAILY (J.W.). — The Water Tunnel as a Tool in Hydraulic Design. *Proceeding of the Third Hydraulics Conference*, Univ. of Iowa, Studies in Engineering, bulletin n° 31, 1947.
- [3] RIPKEN (J.F.). — Design Studies for a Closed-Jet Water Tunnel. Univ. of Minnesota, *St. Anthony Falls Hydr. Lab.*, Techn. Pap. n° 9, Série B, August 1951.
- [4] SAUNDERS (M.E.). — The variable Pressure Water tunnel of the U.S. Experimental Model Basin. *Trans. of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, (S.N.A.M.E.) vol. 38, pp. 205-217, 1930.
- [5] MUMMA (A.G.). — The Variable Pressure Water Tunnel at the David Taglar Model Basin. *Trans. S.N.A.M.E.*, vol. 49, 1941.
- [6] ROSS (D.), ROBERTSON (J.M.) and POWER (R.B.). — Hydrodynamic Design of the 48-Inch Water Tunnel at the Pennsylvania State Collège. *Trans. S.N.A.M.E.*, vol. 56, pp. 5-29, 1948.
- [7] BROWN (F.B.). — Air Resorption in Water Tunnels. *Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology*, Report N 62, March 1949.
- [8] SCHMIDT DI FRIEDBERG. — La cavitation dans les machines hydrauliques. *L'Energia Elettrica*, n° 6, pp. 344-367, 1949.
- [9] RASMUSSEN. — Some Experiments on Cavitation Erosion in Water Mixed with Air. *Symposium London*, 1956, 20.
- [10] SHALNEV (K.K.). — Experimental Study of the Intensity of Erosion due to Cavitation. *Proc. Symposium, Path.-Phys. Lab.*, London, 1956.
- [11] GOVINDA RAO (N.S.), THIRUVENGADAM (A.). — Prediction of Cavitation Damage. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 87, n° HY 5, sept. 1961.
- [12] KNAPP (R.T.). — Further Studies of the Mechanics and Damage Potential of Fixed Type Cavities. *Symposium London*, 1956, 19.
- [13] ELLIS (A.T.). — « Production of Accelerated Cavitation Damage by an Acoustic Field in a Cylindrical Cavity ». *J. Acoustic Soc. Am.*, 27 (5), pp. 913-921, 1955.
- [14] PLESSET (M.S.), ELLIS (A.T.). — On the Mechanism of Cavitation Damage. *Trans. A.S.M.E.*, vol. 77, 1955.
- [15] DE HALLER. — Recherches sur les corrosions dans les turbines hydrauliques. *Bulletin Escher Wyss*, n° 3, 1933.
- [16] HOBBS (J.M.). — Cavitation Erosion Techniques. *N.E.L.*, Report n° 69, nov. 1962.

- [17] HOBBS (J.M.). — Problems of Predicting Cavitation From Accelerated Tests. *A.S.M.E. Publications*, paper n° 62, HYD 19, March 1962.
- [18] HONEGGER. — Test on Erosion Caused by jets. *Revue Brown Boveri*, 1927 et 1936.
- [19] WHEELER. — Mechanism of Cavitation Erosion. Symposium London, 1956.
- [20] SCHUMB, PETERS (M.), MILLIGAN (L.H.). — A new method for studying Cavitation Erosion of Metals. *Metals and Alloys*, vol. 8, 1937.
- [21] LOGAN KERR. — Determination of the Relative Resistance to Cavitation Erosion by the Vibratory Method. *Trans. A.S.M.E.*, vol. 59, n° 5, Jul. 1937.
- [22] RHEINGANS (W.J.). — Accelerated Cavitation Research. *Trans. A.S.M.E.*, 72 (5), pp. 705-719, 1950.
- [23] PLESSET (M.S.). — On Cathodic Protection in Cavitation Damage. *Calif. Inst. Techn., Eng. Div. Dept.*, 85-12, July 1959.
- [24] RATA (J.M.). — Erosion de Cavitation, mesure de l'érosion par jauges résistantes. *S.H.F. Symposium de Nice*, sept. 1960.
- [25] NOLTINGK (B.E.) and NEPPIRAS (E.A.). — Cavitation Produced by Ultrasonics. *Proc. of the Physical Society*, section B, vol. 63, 1950.
- [26] DEGROIS (M.) et BADILIAN (B.). — Etude sur l'érosion produite par un rayonnement ultrasonore haute fréquence. *Acad. Sc. Paris*, nov. 1963.
- [27] PLESSET (M.S.). — The Pulsation Method for Generating Cavitation Damage. *Calif. Inst. Techn.*, Report n° 85-22, Dec. 1962.
- [28] BEECHING. — Resistance to Cavitation Erosion. *Trans. Inst. Eng. and Shipbuilders in Scotland*, vol. 65, 1941-1942.
- [29] POULTER. — The Mechanism of Cavitation Erosion. *Journal Applied Mech.*, 1942.
- [30] NAUDE (C.E.) and ELLIS (A.T.). — *Journal of Basic Engineering*, dec. 1961.
- [31] BEECHING. — Selecting Alloys to Resist Cavitation Erosion. *Product. Eng.*, vol. 19, 1948.
- [32] TENOT. — Phénomènes de la cavitation. *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France*, 1934.
- [33] SCHRÖTER. — La corrosion par cavitation. *V.D.I.*, août 1933.
- [34] KERR and ROSENBERG. — An Index of Cavitation Erosion by Means of radioisotopes. Symposium London, 1958.
- [35] K.K. SHALNEP. — L'effet d'échelle dans l'érosion de cavitation. *J. Prikl. Mekh. i Tekh. Fiz.*, 1962, n° 4.
- [36] H. NOWOTNY. — Werkstoffzerstörung durch Kavitation, Berlin, 1942.
- [37] P. S. EPSTEIN and M. S. PLESSET. — Stabilité des bulles de gaz dans des solutions liquide-gaz. *The Journ. of Chem. Phys.*, vol. 18, 1950.
- [38] L. PODE. — The diffusion of air into a pulsating bubble. *David W. Taylor Model Basin*, R 804, 1955.
- [39] R. HUGUENIN. — Influence des divers types de cavitation sur les bruits, érosions et performances des machines hydrauliques. *Conférence S.H.F.* du 20 mars 1964.

Discussion

Président : M. BERGERON,

M. le Président félicite M. CANAVELIS de son exposé très clair, malgré une présentation que l'ordre du jour a rendu hâtive.

M. CHAIX se réfère à la méthode pour l'étude accélérée de l'érosion sur modèle réduit essayée en 1960 aux Ateliers des Charmilles (1). Est-ce que M. CANAVELIS, qui s'est documenté d'une manière très complète, a eu connaissance de résultats obtenus par ladite méthode dans d'autres laboratoires? Est-ce que le procédé a pu être développé de manière à accroître la fidélité des essais?

M. CANAVELIS dit qu'on utilise cette méthode pour déterminer une plage d'érosion, et non mesurer une destruction : c'est la raison pour laquelle il ne l'a pas mentionnée. M. CANAVELIS n'a jamais eu une connaissance exacte des résultats obtenus par cette méthode dans les divers laboratoires.

M. CHAIX indique que, justement, il s'intéresse à ce qui aurait pu être fait ailleurs, car on a de grandes difficultés à reproduire la pâte.

M. MÉNARD demande si le classement des divers métaux est le même, quelle que soit la méthode de production du phénomène de cavitation.

M. CANAVELIS dit que cette question est primordiale et qu'il l'a passée sous silence faute de temps.

Le classement de différents métaux a été fait par quelques auteurs, notamment par Beeching qui a fait des expériences de cavitation par ultrasons dans un tunnel et également dans un jet. Il a trouvé que les différents métaux se classaient de la même manière, mais qu'à l'intérieur d'un même groupe d'alliages, il pouvait y avoir des permutations entre ces alliages; ceci pourrait s'expliquer par la distorsion entre l'action chimique et l'action mécanique. Cela tendrait à prouver, tout de même, que les méthodes sont pratiquement semblables lorsqu'elles sont bien utilisées.

M. MÉNARD pense que, si des inversions se produisent entre métaux très voisins, cela ne peut pas réduire l'intérêt du classement obtenu entre ces deux métaux du point de vue sensibilité à la cavitation; une cause secondaire peut devenir prépondérante et provoquer cette inversion.

M. le Président félicite personnellement M. CANAVELIS qui a présenté un travail répondant parfaitement à ce que laissait espérer le titre du rapport. C'est un document auquel il est désormais possible de se référer et qui, en faisant bien le point de la question, évitera des discussions ultérieures.

(1) Intervention de M. FAUCONNET au Symposium de l'A.I.R.H. à Nice (1960). — *Informations techniques Charmilles*, n° 8 (1961). — Intervention de M. CHAIX aux VII^{es} Journées de l'Hydraulique, à Paris (1962).

Abstract

Review and critical examination of methods for the determination of resistance to cavitation erosion The production of a state of erosion by cavitation

by R. Canavelis *

The trouble cavitation erosion has always been to hydraulic machine manufacturers and users explains why so much laboratory research has been carried out on the subject. Methods of studying the problem fall within two categories, one in which erosion effects are reproduced by cavitation, and the other in which the actual amount of erosion is measured.

I — The production of a state of erosion by cavitation.

A) *Review of methods*—Methods used to reproduce cavitation are either static with a fixed "wearing" sample, or dynamic with a mobil test piece. The first is used in the following cases:

1. For tests in an experimental hydrodynamic cavitation research tunnel, to study erosion of a profile, or behind an body in the flow (Figs. 1, 2, 3 & 4).
2. For ultrasonic cavitation research.

The second type of method is used as follows (Fig. 7):—

1. In turbine plants or with immersed test pieces in rotary machines (Figs. 5 and 6).
2. In magnetostrictive apparatus, which subjects the test piece to intense vibration.
3. In shock erosion tests in which test pieces on the periphery of a disc cut across a fluid jet.

B) *Critical examination*.—In order to be able to compare cavitation states produced by these various methods and to discuss their value, it is necessary to accurately define characteristic quantities and parameters for the considered effect.

Numerous parameters are available for this purpose, for instance Leroux number, Thoma coefficient, Stepanoff thermal criterion, Strouhal of Weber numbers, etc. In fact, a complete definition should allow for the value of all the various physical factors affecting erosion, e.g. flow velocity, pressure gas content of the cavitating fluid, its temperature, flow geometry, etc. As the role of these factors varies depending on the method considered, however, the mechanisms involved are obviously bound to undergo very deep modification.

II — Measurement of cavitation erosion.

The various methods used for this are based on the choice of a characteristic criterion for the degree of destruction suffered by the material. Thus, the following can be measured:—

- (i) Loss of mass.
- (ii) Loss of volume.
- (iii) Changes in radiation from a radioactive surface.
- (iv) Changes in the resistance of a metal blade under cavitation.

All these procedures suffer from certain disadvantages, either because the considered criterion is only of limited significance, or because of measurement inaccuracy, or else because of difficult application. The advantage of electrical gauges must be emphasised, however, for they provide a means of continuously observing the propagation of cavitation erosion.

This study shows that, above all, it is necessary to completely define a state of cavitation. Furthermore, as different mechanisms are associated with the various experimental procedures, the choice of a cavitation research method will, therefore, depend on the aim in view.

Where the measurement of erosion is concerned, an additional difficulty arises in the comparison of results, due to the great diversity of the criteria involved.

It follows, therefore, that an effort should be made towards more comprehensive analysis of the cavitation phenomenon while attempting to achieve a satisfactory degree of standardisation of the research methods used.

* E.D.F., Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.