Description et définition des diverses figures de cavitation observées dans les machines et conduits hydrauliques

Description and definition of cavitation figures observed in hydraulic machines and ducts

A report of Cavitation Working Group No. 3 of Société Hydrotechnique de France

PAR J. BEAUFRÈRE,

INGÉNIEUR AU DÉPARTEMENT ESSAIS D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Ce texte a été mis au point dans le cadre de la Commission de la Cavitation de la Société Hydrotechnique de France par le Groupe de travail n° 3, dont la composition était la suivante : MM. BEAUFRÈRE, ingénieur au Département Essais, E.D.F., HUGUENIN, chef du Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs des Arts et Métiers, MENEZ, ingénieur du Génie maritime en service au Bassin des carènes, et RATA, ingénieur au Département Essais, E.D.F.

Avant de décrire les différentes figures de cavitation, il est nécessaire de préciser quels sont les moyens d'observations utilisés pour faire cette description. Le premier chapitre indique quelles sont les précisions à ajouter aux caractéristiques des moyens optiques couramment utilisés.

Trois critères descriptifs ont été retenus pour classer les figures de cavitation : l'aspect, la localisation et la stabilité. Les deux premiers critères sont liés en général; le troisième est assez délicat à définir, car la stabilité doit être précisée dans l'espace et dans le temps. En plus de ces trois critères, il faut faire intervenir dans la description, les notions d'aspects principaux et secondaires de la cavitation.

Il est enfin proposé une liste de termes normalisés correspondant à l'utilisation des trois critères, ainsi qu'un code capable de représenter par un groupe de trois chiffres n'importe quelle figure de cavitation.

Before describing these various cavitation figures, it is also necessary to state the means of observation on which the description is based. The first section of the article details the characteristics required of currently used means of observation.

Aspect, localization and stability were the three descriptive criteria adopted in classifying the cavitation figures. The first two are generally interrelated, but the third, stability, is fairly difficult to define, as it has to be done in terms of both space and time. In addition to these three criteria, the notions of principal and secondary aspects of cavitation also have to be taken into account in the description.

The author also proposes a standard terminology for the use of the three descriptive criteria, and a code whereby any cavitation figure can be expressed by a group of three numerals.

INTRODUCTION

La Commission de Cavitation de la Section « Machines » de la Société Hydrotechnique de France a décidé, lors de sa réunion du 11 avril 1961, de former des groupes de travail pour trai-

ter un certain nombre de sujets. Les travaux du groupe n° 3 visent à définir un langage commun permettant de décrire sans ambiguïté les différents types de cavitation que l'on peut ren-

PHOTO 1
Coup de bélier dans un conduit.
Cavitation 514.

PHOTO 2
Coup de bélier dans un conduit.
Cavitation 114.

PHOTO 3
Diaphragme.
Cavitation 511.

contrer, de manière à normaliser les appellations qui leur sont généralement données.

Après discussion du rapport du groupe de travail n° 3 en Commission de Cavitation, le texte a été adopté sous la forme présentée ici. Ce texte, suffisamment général, doit permettre de pouvoir décrire et désigner de façon normalisée n'importe quelle figure de cavitation dans n'importe quelle machine hydraulique.

Il est souhaitable que les spécialistes utilisent les notations et symboles normalisés par la Commission de Cavitation de la Société Hydrotechnique de France, mais il est aussi indispensable que les utilisateurs futurs fassent connaître leurs observations s'ils rencontrent des cas qui puissent difficilement être identifiés, en vue d'améliorer et de généraliser la méthode de classification utilisée.

I. — MÉTHODES D'OBSERVATION DE LA CAVITATION

I.1. L'observation des différentes figures de cavitation en vue de leur définition et de leur description se fait par voie optique, et les différents moyens utilisés sont les suivants :

- l'œil,
- l'appareil photographique ou cinématographique,
- la cinématographie ultra-rapide,
- la télévision.

I.2. L'œil, comme les appareils d'enregistrement par prise de vue directe (photo, cinéma) ou par l'intermédiaire de la télévision (photo, kinescope), ne peut être utilisé qu'avec un éclairage approprié. En effet, la cavitation se présente en général comme un ou une succession de phénomènes très rapides, et l'aspect qu'elle présente dépend au premier chef, pour une méthode d'observation donnée, du mode d'éclairage choisi. Il est souvent nécessaire, pour avoir une observation correcte des figures de cavita-

tion, d'opérer avec un temps d'exposition inférieur au temps critique d'observation, au-dessus duquel l'image commence à devenir floue. Ce temps critique d'observation est en général très court, ce qui impose pour les enregistrements et les observations à l'œil des conditions particulières d'éclairage : pour les enregistrements, il faut disposer d'un flash très bref ou d'une vitesse d'obturation très grande en éclairage continu et il est indispensable que tout document représentant une figure de cavitation soit accompagné de ses caractéristiques de prise de vue; pour les observations à l'œil, il faut utiliser un stroboscope donnant une série d'éclairs très brefs synchronisés ou non avec le phénomène à observer, suivant que celui-ci est périodique ou non; l'œil voit ainsi la moyenne d'instantanés de la figure de cavitation. Mais, dans certains cas, il peut être aussi intéressant de faire des observations pendant un temps supérieur au temps critique, pour obtenir l'allure générale de la figure moyenne de cavitation (photographies n°s 24 et 26).

II. — CRITÈRES DESCRIPTIFS DE LA CAVITATION

II.1. Les critères retenus pour définir et décrire les diverses figures de cavitation sont au nombre de trois :

- aspect,
- localisation,
- stabilité.

II.2. Le critère descriptif le plus naturel des figures de cavitation est fondé sur l'aspect visuel que présente la cavitation.

L'expérience montre que les aspects différents présentés par la cavitation peuvent être groupés en un nombre relativement réduit de catégories, énoncées dans la liste suivante :

- poches,
- bulles,
- lames,
- tourbillons et torches.

II.2.1. Les dimensions des poches sont de l'ordre de celles de l'installation. Ces cavités se rencontrent en général seules ou en nombre très limité. Un exemple typique de poche est donné par la photographie de coup de béliet (photographie n° 2). Mais on peut également en rencontrer dans les machines tournantes.

II.2.2. Un aspect très courant de la cavitation est la cavitation par bulles. Cette classe de cavitation peut se présenter sous des figures très différentes suivant la forme, la taille, le nombre et l'arrangement des bulles.

La forme est grossièrement sphérique, mais peut dans certains cas s'en écarter notablement sans toutefois qu'aucune dimension ne devienne très grande ou très petite par rapport aux autres.

Les dimensions de ces bulles sont petites vis-

PHOTO 4
Diaphragme.
Cavitation 511 et 411.

à-vis des dimensions de l'installation, ce qui les distingue des poches.

Le nombre de ces bulles peut être variable, depuis l'unité jusqu'à la multitude indénombrable.

La possibilité de les distinguer les unes des autres est liée à leur arrangement entre elles; on peut distinguer divers arrangements :

- les bulles isolées,
- les bulles en grappes,
- les bulles en nuages.

— Les bulles isolées sont en général en nombre très limité, et peuvent parfaitement être étudiées individuellement.

— Les bulles en grappes sont en nombre relativement grand. Elles peuvent être toutes distinguées les unes des autres et, pour la plupart, être étudiées individuellement.

— Les bulles en nuages sont de dimensions très petites et en nombre très grand. Il est parfois possible de les distinguer les unes des autres, suivant la densité du nuage, mais on ne

PHOTO 5
Déchargeur.
Cavitation 917.

peut jamais les étudier séparément. Le nuage de bulles a un aspect laiteux.

II.2.3. Les lames sont des poches dont une dimension est très faible vis-à-vis des autres.

II.2.4. Le tourbillon cavitant consiste en une cavité ou un ensemble de cavités dont une dimension est très grande vis-à-vis des deux autres. Cependant, dans certains cas, un tourbillon cavitant peut s'observer comme un arrangement linéaire de bulles.

Les tourbillons cavitants peuvent se ranger en deux classes :

- des tourbillons de grandes dimensions, à l'aspect de torsade brillante, ou de torche;
- des tourbillons de très petites dimensions, très brillants, semblables à des filaments fulgurants.

II.3. Le critère descriptif des figures de cavitation qui consiste à étudier ces diverses figures d'après le lieu où elles apparaissent est aussi très naturel.

PHOTO 6

Vanne. Cavitation 411 et 511.

PHOTO 7

Vanne. Cavitation 411 et 511.

Nous proposons de ranger toutes ces figures de cavitation en trois grands types :

- la cavitation qui apparaît au sein d'un écoulement;
- la cavitation qui apparaît au voisinage d'une surface;
- la cavitation accrochée à une surface;

et nous donnerons dans ce paragraphe, qui complète le paragraphe II.2., des exemples se rapportant aux documents photographiques joints.

II.3.1. Au sein d'un écoulement, les aspects de la cavitation que l'on rencontre sont : les poches, les bulles et les tourbillons.

— Les poches qui apparaissent dans un écoulement sont dues en général à un coup de bélier : une partie de conduite soumise à ce coup de bélier peut se vider partiellement ou même totalement, comme on le voit sur la photographie 2.

— Si l'on met à part les bulles d'air entraînées dans le courant, on peut considérer que les bulles n'apparaissent jamais seules dans un écoulement; elles apparaissent soit en nuages

PHOTO 8
Turbine supercavitante.
Cavitation principale 641.

PHOTO 9
Hélice marine.
Cavitation (6+7) (3+4) (1+1).

PHOTO 10
Hélice marine.
Cavitation 741 et 841.

PHOTO 11
Hélice marine.
Cavitation 325 et 641.

PHOTO 12
Hélice marine.
Cavitations principales 641 et 631.

PHOTO. 13
Pompe hélice.
Cavitation (6+9+4)
(3+1+1) (1+2+7).

PHOTO 14

Pompe hélice.
Cavitation 631.
Temps de prise de vue :
1/1 000 000^e.

soit en grappes. Les nuages de bulles s'observent dans les conduites soumises à un coup de bélier (photographie 1), dans les diaphragmes (photos n°s 3 et 4), dans les machines tournantes (photos n°s 8, 16, 17, 20, 21, 22, 23), ainsi que dans le sillage de certains profils fixes, dans les vannes (photos n°s 6 et 7) et dans les déchargeurs.

— Les tourbillons cavitants observés dans un écoulement peuvent appartenir aux deux catégories citées en II. 2.4 :

- des tourbillons d'intensité finie, semblables à des torsades ou à des torches, continus ou discontinus;
- des tourbillons de petites dimensions qui apparaissent de façon aléatoire dans l'espace, dans le sillage d'un corps.

Des exemples de ces petits tourbillons cavitants sont donnés par les photographies n°s 5 (sillage dans un déchargeur), 8, 12 et 13 (sillage d'un profil tournant). Nous appellerons ces petits tourbillons cavitants des filaments fulgurants, à cause de leur aspect.

II. 3. 2. La cavitation qui apparaît au voisinage d'une surface peut se décomposer en deux classes :

- cavitation dans la couche limite d'une surface,
- cavitation entre deux surfaces.

Dans la première classe, on exclut toute figure de cavitation qui aurait une attache fixe avec la surface. Cette classe ne comporte en fait

qu'un seul aspect de cavitation, la cavitation par bulles, que l'on trouve sur le dos de profils fixes ou mobiles. Ces bulles ont une forme presque sphérique, elles sont en nombre limité et peuvent être relativement grosses. Ces bulles apparaissent sur les profils des machines tournantes, comme le montre la photographie 11, et sur des profils fixes comme : distributeurs de turbines, redresseurs de pompes, appendices de navires, ailettes de coude...

La deuxième classe concerne essentiellement la cavitation dans les joints de machines tournantes. Cette cavitation, appelée cavitation marginale, est en réalité la composition de plusieurs aspects simples de la cavitation : grappes de bulles, filaments fulgurants et lames. Des exemples sont donnés par les photographies n°s 13, 19, 20, 21, 22 et 23.

II.3.3. Les figures de cavitation accrochées à une surface peuvent avoir les aspects suivants :

- poches,
- lames,
- tourbillons.

— La formation de poches accrochées sur des surfaces fixes ou mobiles peut être de deux sortes :

- formation de poches dont l'aspect est essentiellement lié à la surface sur laquelle elles sont accrochées. Cette figure se rencontre dans des sillages d'aspérité, ou dans des zones telles que les congés de raccordement d'une surface à une autre;

PHOTO 15
Turbine Kaplan.
Cavitation 841.

— formation de poches en forme de grosses bulles aplaties sur une surface, qui se produisent en un point bien déterminé de la surface sans que les caractéristiques géométriques de celle-ci influent directement sur l'aspect et l'évolution de la poche. Cette figure de cavitation s'apparente aux lames et aux bulles situées dans la couche limite d'un profil. Elles diffèrent des lames par le fait qu'aucune de leurs dimensions n'est faible devant les autres, et des bulles par le fait qu'elles sont accrochées en un point bien précis de la surface.

On peut observer des exemples de la première figures sur les photographies n°s 16, 19, 20, 21, 22, 23 et des exemples de la deuxième figure sur les photographies n°s 17 et 22.

— La cavitation par lame est accrochée sur un corps profilé ou non, fixe ou mobile, le long d'une ligne qui dans le cas d'un corps profilé, est en général le bord d'attaque du profil. Les lames se rencontrent dans les machines tournantes, comme le montrent les photographies n°s 8, 9, 10, 11, 12, 14 et 18, ainsi que sur des profils fixes, ou sur des irrégularités linéaires de surface obliques par rapport à un écoulement.

— La localisation de la cavitation par tourbillons suit en gros les lois générales de formation de ces tourbillons, et nous pourrions ainsi trouver des tourbillons qui prennent naissance sur une surface et se terminent sur une surface, ou des tourbillons qui prennent naissance sur une surface et vont à l'infini.

Le premier type se rencontre par exemple sur

les ogives de turbines Francis à aspirateur coudé, et le deuxième sur les ogives de turbines Kaplan ou d'hélices marines, ainsi que sur les extrémités de profils fixes ou mobiles.

A noter que les tourbillons observés sur les extrémités de profils sont appelés couramment « tourbillons d'extrémité » et que ceux qui prennent naissance sur les ogives sont ordinairement appelés « torches ».

Des exemples sont donnés par les photographies n°s 9, 10, 11, 15, 24, 25, 26 et 27.

II.4. Quand on observe un écoulement cavitant dans une machine ou un conduit quelconque, il est rare que l'on n'observe qu'une seule des figures décrites au chapitre II. En général, il apparaît :

- un ou plusieurs aspects principaux,
- des aspects principaux combinés,
- des aspects secondaires.

Dans tout projet de normalisation du langage, il faut bien préciser quels sont les termes correspondant aux aspects principaux de la cavitation et ceux correspondant aux aspects secondaires.

La figure principale de cavitation est celle qui lui donne son aspect d'ensemble, celle, qui, géométriquement, est la plus importante. Plusieurs figures d'égale importance peuvent apparaître simultanément, et même se combiner. Souvent, surtout quand la cavitation est bien développée, ces figures principales donnent naissance à des figures de dimensions beaucoup plus petites : ce sont les aspects secondaires de la cavitation,

PHOTO 16

Turbine Kaplan. Cavitation 411, 421, 131 et 741.
Temps de prise de vue : 1/50 000°.

aspects qui n'ont en général que peu d'importance.

II.4.1. Exemples d'aspects principaux de la cavitation :

- Cavitation par tourbillon d'extrémité et par torche sur l'ogive, photographie n° 10;
- Cavitation par lame et par bulles sur l'extrados d'un profil, photographie n° 11;
- Cavitation par lame sur l'intrados d'un profil, photographies n°s 14 et 18.

II.4.2. Exemples d'aspects combinés de la cavitation :

- Lame tourbillonnaire sur l'extrados : photographie n° 9. Le haut de la lame vient s'enrouler sur le tourbillon d'extrémité;
- Cavitation marginale : cette cavitation peut se manifester sous diverses formes : lames, filaments fulgurants et grappes de bulles, isolées ou combinées.

Ces trois types sont combinés sur la photographie n° 13.

Sur la photographie n° 19, on n'observe que des grappes de bulles sur l'extrados et une lame et des grappes de bulles sur l'intrados.

II.4.3. Exemples d'aspects secondaires de la cavitation :

Ces aspects secondaires se manifestent le plus souvent sous forme de grappes ou de nuages de

PHOTO 17

Turbine Kaplan.
Cavitation 232, 631 et 411.
Temps de prise de vue :
1/1 000 000°.

PHOTO 18

Turbine Kaplan. Cavitation 631.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000^e.

PHOTO 19

Turbine Kaplan. Cavitation 421 et 131.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000^e.

bulles, et sous forme de petits tourbillons cavitants (filaments fulgurants).

Sur la photographie n° 8, l'aspect principal est la cavitation par lame sur l'extrados. Les aspects secondaires sont : cavitation par grappes et nuages de bulles, et par filaments fulgurants.

Sur la photographie n° 12, les aspects principaux sont les cavitations par lame sur l'extrados et sur l'intrados. Les aspects secondaires sont : cavitation par nuage de bulles et filaments fulgurants.

II.5. La stabilité d'une figure de cavitation s'étudie dans le temps et dans l'espace. Au sens strict, toutes les figures de cavitation sont instables, car, en un lieu donné, la cavitation est un phénomène qui évolue en général très rapidement dans le temps, et ce lieu peut lui-même varier dans certaines conditions. On peut cepen-

dant distinguer, dans certains cas, une figure stable « en moyenne » d'une figure instable.

Une figure stable en moyenne est une figure dont les déformations sont très rapides dans le temps, mais très petites devant les dimensions de cette figure, de telle sorte que les frontières de la cavité varient peu.

Au contraire, dans une figure instable, les frontières de la cavité varient constamment dans de grandes proportions lorsqu'on l'examine pendant un temps suffisant. L'instabilité peut trouver son origine dans des perturbations du courant, ou dans le mécanisme même de formation de la cavitation. Dans le premier cas, on observe des figures stables en moyenne qui peuvent varier de façon aléatoire, soit brutalement, soit lentement; dans le second, on observe une figure qui varie constamment et parfois même de façon pseudo périodique.

PHOTO 20

Turbine Kaplan. Cavitation 421, 411 et 131.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000°.

PHOTO 21

Turbine Kaplan. Cavitation 421, 325, 411 et 131.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000°.

PHOTO 22

Turbine Kaplan. Cavitation 421, 641, 131 et 232.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000°.

PHOTO 23

Turbine Kaplan. Cavitation 421, 325, 131, 511 et 917.
Temps de prise de vue : 1/1 000 000°.

PHOTO 24
Turbine Francis.
Cavitation 841.
Temps de prise de vue :
1/100°.

PHOTO 25
Turbine Francis.
Cavitation 841.
Temps de prise de vue :
1/50 000°.

PHOTO 26
Turbine Francis.
Cavitation 841.
Temps de prise de vue :
1/100°.

PHOTO 27

Turbine Francis.

Cavitation 841.

Temps de prise de vue :
1/50 000°.

TABLEAU RÉCAPITULATIF

CRITÈRE	APPELLATION	SYMBOLE
ASPECT	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.	— 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 à l'« infini » (au sein de l'écoulement)	4
STABILITÉ	— 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 bélier) 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 ou de la seconde.

III. — CONCLUSIONS - NORMALISATION

Nous sommes amenés à proposer une normalisation des termes relatifs aux diverses figures simples de cavitation, ainsi que des modes de description des figures simples et complexes que peut présenter la cavitation.

III.1. Les critères à utiliser pour décrire une certaine forme de cavitation sont : aspect, localisation, stabilité. Ces critères donnent une décomposition en un certain nombre d'éléments simples de l'ensemble des figures que peut présenter la cavitation dans les turbomachines et les conduits hydrauliques. Nous donnons dans le tableau récapitulatif de la page précédente la liste des termes qui ont été retenus pour normaliser l'appellation des aspects généraux de la cavitation, ainsi que les symboles qui permettent, en utilisant les trois critères descriptifs précités, de préciser l'aspect, la localisation et la stabilité de la figure observée : chacun de ces critères est représenté par un chiffre, et chaque figure de cavitation est représentée par un groupe de trois chiffres, dans l'ordre : aspect, localisation, stabilité.

III.2. Précisions à apporter au cours d'une description :

— Il faut tout d'abord bien préciser de quelle façon on observe la cavitation, quels sont les moyens utilisés, et en particulier quels sont les temps d'observation.

— Il faut ensuite bien distinguer les aspects principaux des aspects secondaires : ces derniers sont en général des conséquences des aspects principaux, et ils ne doivent être qu'énumérés. Il faut indiquer aussi comment plusieurs figures simples de cavitation peuvent se combiner, et pouvoir donner un symbole à la figure composée observée. Ainsi, la normalisation, en s'appliquant aux exemples cités en II.4.2., donne les symboles :

$$(6 + 7) (3 + 4) (1 + 1)$$

pour une lame tourbillonnaire (photographie n° 9);

$$(6 + 9 + 4) (3 + 1 + 1) (1 + 2 + 7)$$

pour la cavitation marginale la plus générale (photographie n° 13).

III.3. Nous pensons que le procédé de classification et d'appellation des différentes figures de cavitation proposé dans le présent rapport est suffisamment général pour permettre d'identifier n'importe quel type de cavitation. Mais nous rappelons que, s'il est souhaitable que tous les spécialistes de la cavitation utilisent ces nouvelles notations, il est indispensable qu'ils fassent connaître leurs observations si la méthode se trouve en défaut pour une figure de cavitation qu'ils auraient rencontrée.

DISCUSSION

Président : M. BERGERON

M. le Président remercie tout particulièrement M. BEAUFRÈRE, ainsi que les membres du groupe qu'il a constitué, pour leur rapport précis, présenté avec une grande clarté et comportant des propositions originales.

Il informe le Comité qu'au sein de la Commission pour l'étude de la cavitation, la classification des figures de cavitation en quatre catégories : poches, bulles, lames et tourbillons, n'a soulevé aucune critique. Par contre, il y a eu discussion à propos des trois critères : aspect, localisation et stabilité, ainsi que sur les notations à adopter pour caractériser chaque figure, soit avec des lettres, soit avec des chiffres.

M. le Président souligne l'importance de ce rapport, qui constitue non seulement un élément de base appelé à permettre d'adopter un langage commun entre spécialistes, mais aussi le point de départ de travaux ultérieurs. C'est ainsi que le groupe de recherche constitué pour l'étude de l'influence des diverses figures de cavitation sur les bruits, érosions et écoulements va être le premier utilisateur de la classification et des critères

proposés par M. BEAUFRÈRE, puisque le but de ce nouveau groupe est justement d'essayer de préciser les effets des différentes figures de cavitation.

Pour ces différentes raisons, il serait très désirable que le plus grand nombre de personnes expriment leur opinion.

M. le Président ouvre alors la discussion.

M. BINDEL souligne l'intérêt présenté par le rapport du groupe de travail de M. BEAUFRÈRE, qui constitue probablement la première tentative des hydrauliciens de toutes origines pour parler un langage commun.

Il craint cependant que la nomenclature proposée soit trop compliquée pour devenir d'usage courant. Il pense, par exemple, qu'il est inutile d'introduire deux types de poches, alors qu'un seul suffirait et que, de même, le terme « tourbillon » et le terme « torche » correspondent à un même phénomène, bien que ne se présentant pas aux mêmes endroits. M. BINDEL pense également qu'il vaudrait mieux, pour la localisation, dire « au sein de l'écoulement » plutôt qu'« à l'infini ».

Mais il lui semble surtout que le troisième critère devrait comporter moins de rubriques; compte tenu de ce qu'il ne s'agit pas en fait de stabilité au sens strict du terme, M. BINDEL propose, pour troisième critère, la nomenclature suivante :

- cavitation permanente,
- cavitation périodique ou pseudo-périodique,
- cavitation à variations aléatoires.

M. BINDEL insiste enfin sur l'importance des moyens d'observation dans la façon même de caractériser une cavitation donnée : en éclairage continu par exemple, une grappe peut très bien être qualifiée de nuage et un écoulement à variations périodiques rapides qualifié de permanent. Mais on alourdirait probablement inutilement la nomenclature en ajoutant un quatrième chiffre aux trois proposés (*).

M. BEAUFÈRE répond aux observations de M. BINDEL :

— Pour ce qui est des poches, il est apparu nécessaire de faire une distinction entre les deux types de poches. Les poches qui dépendent vraiment des conditions aux limites de l'écoulement sont celles qui apparaissent dans un coup de bélier ou derrière une aspérité au sein d'un écoulement. C'est la forme géométrique des limites de l'écoulement qui impose celle de la poche, quelles que soient les conditions de l'écoulement. Les autres poches dépendent au deuxième degré des formes de la surface, mais elles dépendent essentiellement des conditions de l'écoulement sur le point de la surface.

— Il est probable qu'il n'y aura jamais d'appareil d'observation suffisamment puissant pour observer les nuages comme on observe les grappes. La distinction entre grappes et nuages repose essentiellement sur la densité des bulles. Si l'on a un nuage très dense de bulles, il sera impossible d'aller observer, derrière le rideau de petites bulles, l'évolution des autres bulles. (**) et (**).

— On a donné un numéro différent aux tourbillons et aux torches, car celles-ci ont un aspect particulier. D'ailleurs, les tourbillons sont surtout observés par les constructeurs d'hélices et il n'y a aucun inconvénient à ce que ces deux aspects aient le même numéro, le critère de localisation ne permet pas toutefois de distinguer les tourbillons des torches.

— Il est exact que le mot « stabilité » est imparfait. La définition de la stabilité devrait être telle que, si l'on imprime à une figure une petite variation élémentaire, cette figure ne subisse qu'une variation élémentaire du même ordre. Il y aurait instabilité si la figure grossissait indéfiniment pour une variation élémentaire, soit des champs de pression, soit des champs de vitesse. Il vaut mieux retenir le critère de permanence. Enfin, il est nécessaire, pour caractériser les genres d'évolution (pseudo-périodiques ou périodiques, aléatoires) de préciser si l'évolution est lente ou rapide.

M. DUPORT comprend bien l'hésitation de M. BINDEL au sujet des définitions assez précises proposées par M. BEAUFÈRE. Il est évident que, dans certains cas d'expérience ou de mesure, on pourra hésiter entre les aspects 1 et 2 ou entre les diverses acceptions possibles concernant les notions de stabilité ou de permanence. S'il y a un doute, on peut toujours dire que c'est « l'un ou l'autre ». Il vaut mieux essayer d'avoir un langage aussi précis et complet que possible, même si on ne peut, en certains cas, l'utiliser que partiellement.

D'autre part, M. DUPORT pense que la distinction entre « grappe de bulles » et « nuages de bulles » correspond à une différence réelle de nature et non à un effet des moyens d'observation. On peut penser qu'en plus de leur taille relative plus grande, les bulles constituant une grappe diffèrent de celles d'un nuage par le fait qu'elles ont une existence individuelle nettement caractérisée. Les bulles constituant le nuage, au contraire, ne sont pas nettement individualisées; elles donnent lieu à de nombreux phénomènes de fragmentation ou de coalescence. C'est probablement ce que montreraient des observations à l'échelle microscopique.

M. HUG rappelle l'un des points de vue initiaux de cette étude. Il est très difficile en effet de faire l'unanimité *a priori* sur une telle nomenclature et c'est seulement l'expérience pratique qui permet de faire les discriminations nécessaires. Il faut donc essayer cette nomenclature et si, dans un certain délai, deux ans par exemple, on s'aperçoit que l'on a trop précisé un point ou pas assez un autre, rien n'empêche d'y revenir avec, cette fois, la sanction de l'expérience.

M. le Président trouve la remarque de M. HUG très justifiée et exprime les conclusions suivantes :

— Il sera vraisemblablement nécessaire de maintenir la notion d'évolution lente et rapide (demandée par M. HUGUENIN) qui doit avoir une répercussion sur l'intensité du bruit.

— S'il y a des discriminations surabondantes, elles seront éliminées par la pratique.

— Le rapport tel qu'il est présenté peut être considéré comme déjà utilisable, sinon définitif.

— Il y a lieu de remercier M. BINDEL des interventions qu'il a formulées tant aujourd'hui qu'au cours des réunions de la Commission de la Cavitation, interventions pertinentes dont il a toujours été tenu compte. On peut noter avec plaisir que les remarques de M. BINDEL ne portent plus aujourd'hui que sur des précisions dans les définitions et non sur les principes de base.

M. le Président remercie à nouveau M. BEAUFÈRE et les personnes ayant pris part à la discussion.

Les astérisques sont relatifs à des observations et réponses faites postérieurement à la discussion du 15 mars 1962.

(*) M. BINDEL indique que la nomenclature (critère 3) fait état de la « rapidité » ou de la « lenteur » des évolutions de la cavitation, mais ces notions demanderaient à être précisées. Il semble que le mieux serait de se référer à un « temps propre », qui pourrait être de l'ordre de grandeur du temps mis par une particule fluide à parcourir l'obstacle cavitant. Dans le cas d'une machine, on pourrait prendre, par exemple, le temps standard égal à $1/n$ (n , nombre de tours de la machine par unité de temps); ou à D/V (D diamètre, V vitesse) s'il s'agit d'une « machine » non tournante (vanne par exemple). On pourrait alors dire que l'évolution est lente si sa

période moyenne était largement inférieure au temps propre; avec ce critère, les évolutions rapides seraient d'ailleurs probablement sous la seule dépendance de la turbulence.

(**) M. BEAUFÈRE pense qu'une grappe et un nuage de bulles peuvent effectivement avoir le même aspect en éclairage continu, mais craint qu'en éclairage continu, toutes les figures de cavitation présentent le même aspect de brouillard flou. Ce qui distingue les nuages des grappes c'est, sur des observations nettes et non floues, l'aspect laiteux et l'aspect granuleux. La transition entre nuage et grappe est cependant continue.

(***) M. DEGROIS utilise couramment la distinction entre les bulles en nuages et les bulles en grappes dans la description de la cavitation par ultrasons.