

**5<sup>e</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE**

**22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN**

**ÉROSION DE CAVITATION  
PAR CHOC HYDRODYNAMIQUE**

---

**M.A. DOMINGUEZ-CORTAZAR - J.M. MICHEL**

---

**LABORATOIRE DES ÉCOULEMENTS GÉOPHYSIQUES ET INDUSTRIELS**  
Institut de Mécanique de Grenoble

LEGI/img, B.P. 53, 38041 GRENOBLE Cedex 9

---

**Résumé**

Nous présentons un nouveau moyen d'essai d'érosion de cavitation fondé sur l'idée d'implosion axiale d'un tourbillon cavitant et appelé "Cavermod". Il est constitué par une chambre tournante remplie initialement d'eau désaérée, dont le volume peut être d'abord légèrement augmenté, ce qui provoque la formation d'un cœur de vapeur au voisinage de l'axe de rotation, puis diminué ensuite brutalement, ce qui entraîne l'implosion cherchée. La fin de l'implosion est caractérisée par la création de très hauts pics de pression qui sont reçus soit sur des capteurs soit sur des éprouvettes d'érosion. Dans sa première réalisation, le Cavermod permet d'atteindre des vitesses d'implosion comprises entre 70 et 700 m/s environ. L'article décrit quelques caractéristiques de l'écoulement d'implosion et de rebond ; les figures d'érosion produites sur des matériaux divers après un seul tir sont ensuite présentées.

**Summary**

A new experimental device for the fundamental study of cavitation erosion is presented. It is named "Cavermod" and is based on the concept of cavitating vortex axial collapse. It is made with a rotating chamber initially filled with deaerated water, the volume of which can be slightly modified : its increase entails the formation of a vapour vortex whereas its sudden reduction results in the expected axial collapse. The end of the collapse is characterized by high pressure peaks which are received on special pressure transducers or erosion targets. In the first state of Cavermod, axial collapse velocities as large as 700 m/s can be obtained. The paper is devoted to the description of the main flow characteristics during implosion and rebound. The erosion figures produced by one shot on various materials are then presented.

## 1. Introduction

L'article que nous présentons expose une partie des résultats d'une recherche consacrée aux aspects hydrodynamiques fondamentaux de l'érosion de cavitation (Dominguez-Cortazar [1] et Dominguez-Cortazar *et al.* [2]). Ce sujet a déjà été traité dans un nombre considérable de travaux qui examinent la situation dans laquelle une bulle impluse et rebondit, produisant alors des ondes de choc dans son voisinage, ou émettant un jet rentrant en cas de défaut de symétrie sphérique. Ici, le point de vue est différent : prenant appui sur l'expérience qui montre l'efficacité érosive des tourbillons cavitants émis à l'arrière de poches de cavitation partielle, en même temps que sur l'expérience antérieure acquise dans l'exploitation de la veine-tourbillon (Lecoffre [3] et Lecoffre *et al.* [4]), on cherche à reproduire les caractères principaux du tourbillon cavitant tout en réalisant son implosion axiale, à l'image de ce qui est observé dans les écoulements industriels (Soyama, Kato & Oba [5]) ou dans la veine-tourbillon elle-même. On aboutit ainsi au concept de "Cavermod" (pour *modèle de l'érosion de cavitation*), constitué par une chambre tournante remplie d'eau désaérée, dont le volume peut être légèrement augmenté, ce qui permet d'obtenir initialement un cœur de vapeur analogue à un tourbillon cavitant au voisinage de l'axe de rotation, tandis que la réduction brutale ultérieure de ce volume produit l'implosion axiale recherchée. À la fin de l'implosion, le choc de l'interface sur la paroi qui limite le tourbillon s'accompagne de très hautes pressions et donne des indentations permanentes sur cette paroi. Ce modèle physique permet de contrôler les trois paramètres essentiels du tourbillon cavitant : sa taille initiale, son taux de rotation et sa vitesse d'implosion axiale. On en attend aussi d'autres avantages de moindre importance, par exemple la concentration des impacts sur une petite zone bien localisée et l'utilisation de liquides autres que l'eau.

Nous nous limitons ici à l'exposé des aspects physiques les plus significatifs du phénomène. La modélisation numérique de l'écoulement, incluant le suivi de l'interface lors de l'implosion du tourbillon cavitant, sera exposée lors du Symposium *CAV* 95 organisée à Deauville par le Bassin d'Essais des Carènes (Dominguez-Cortazar *et al.* [6]).

## 2. Le Moyen d'essai

L'élément principal de notre modèle physique dit Cavermod est une chambre tournante fermée à l'une de ses extrémités par un piston commandé de l'extérieur ; l'autre extrémité, sur laquelle nous faisons impluser le tourbillon, est destinée à recevoir une éprouvette à éroder ou des capteurs de pression. Les principaux paramètres de définition sont les suivants :

- longueur  $L$  de la chambre d'essais 156 mm
- rayon initial  $r_0$  du barreau de vapeur 0 à 3,3 mm
- déplacement  $a$  du piston 0 à 4mm
- vitesse de rotation  $\Omega$  0 à 4000 tpm
- pression motrice du projectile  $\Delta p$  0 à 6 bars

Le principe de son fonctionnement est assez simple : dans un premier temps la chambre d'essais est complètement remplie en eau désaérée et nous la faisons tourner à une vitesse constante (cf. figure 1 a). Puis le système de réglage retire le piston d'une amplitude  $a$ . L'augmentation de volume de la chambre conduit à la formation d'un cœur de vapeur centré sur

l'axe de rotation (cf. figure. 1 b). Enfin, le choc d'un projectile contre la tête du piston replace celui-ci de façon soudaine et cela conduit à l'effondrement du tourbillon (cf. figure 1 c). Le mode d'implosion du barreau de vapeur a été d'abord étudié à partir d'une modélisation simplifiée dans laquelle le piston joue le rôle d'un batteur à houles et l'accélération due à la rotation remplace celle de la pesanteur. L'analyse de la vitesse de propagation d'une intumescence sur la surface libre du tourbillon permet d'estimer la vitesse minimale du piston qui assure l'effondrement axial du tourbillon. Avec le système à choc mécanique, cette valeur minimale est facilement dépassée et la condition d'implosion axiale de la cavité est, de cette façon, garantie (Dominguez-Cortazar [1]).

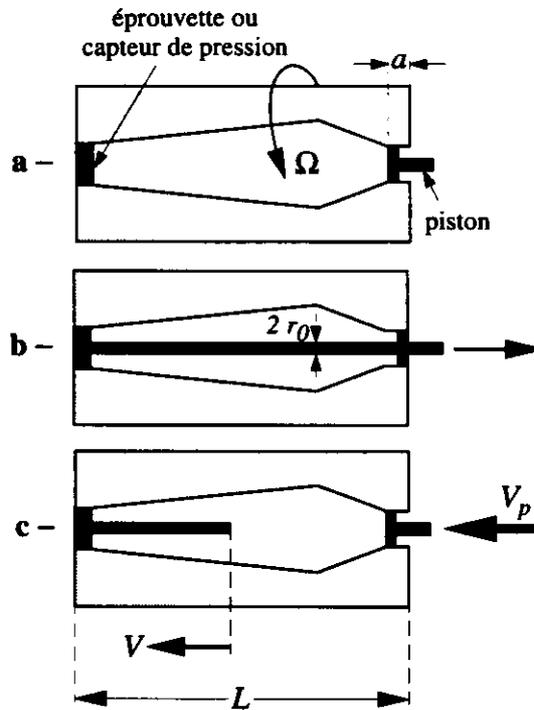


Fig. 1 – Schéma de principe

L'écoulement produit dans le Cavermod, fortement instationnaire, est caractérisé par une durée de vie totale de l'ordre de quelques millisecondes (vitesse d'implosion de 70 à 700 m/s sur une distance de 15 cm) : l'étude physique a alors nécessité l'utilisation d'instruments de mesure ou de visualisation à très court temps de réponse et déclenchés d'une manière précise à partir d'un signal de référence convenable.

### 3. Hydrodynamique de l'écoulement

Les essais de visualisation (cinématographie rapide ainsi que prises de vues photographiques) ont permis de caractériser l'écoulement au cours de l'effondrement du tourbillon. Au total quatre rebonds ont été observés après la première implosion. Celle-ci se produit d'une manière fondamentalement axiale alors que les suivantes se font plutôt de façon radiale. La figure 2 montre l'évolution du tourbillon durant la toute première implosion. On observe que le tourbillon s'effondre avec une vitesse sensiblement constante. Au cours des premiers instants, la surface libre du tourbillon se montre non perturbée en dehors de la zone de fermeture. Celle-ci se manifeste toujours par une tache blanchâtre qui, en se propageant dans la

direction de l'effondrement, envahit rapidement toute la longueur de la cavité. La propagation de ces taches forme au voisinage de la paroi côté éprouvette une espèce de tore blanchâtre probablement diphasique.

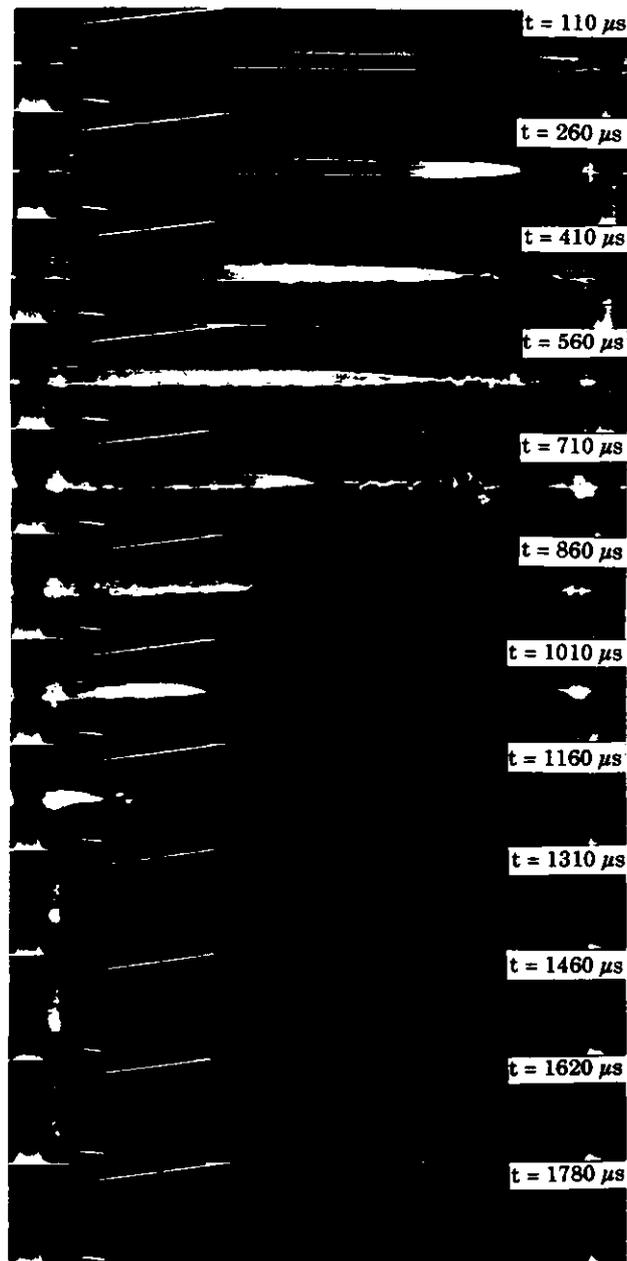


Fig. 2 – Évolution de l'implosion axiale du tourbillon  
( $\Omega = 3500 \text{ tr/mn}$  ;  $r_0 = 2,9 \text{ mm}$  et  $\Delta p = 1 \text{ bar}$ )

La partie du tourbillon qui a déjà implosé laisse un fin résidu de vapeur qui s'enroule en hélice autour de l'axe de rotation. Sa durée de vie est plus courte que celle de la cavité principale. La configuration cavitante que l'on observe (zone de fermeture prenant la forme d'une ogive plus un filament de vapeur qui se prolonge vers l'aval) est en accord avec la conservation du moment cinétique à tout instant de l'implosion du tourbillon. Cette conservation est assurée par le jeu des forces de Coriolis ce qui conduit à une accélération angulaire des particules les plus proches de l'axe de rotation.

La fin de la première implosion est accompagnée par l'apparition d'une dizaine de pics de pression sur un capteur dont le diamètre est de 5 mm. En dépit de la diminution de leurs amplitudes, due à un effet de surface et de fréquence (Dominguez [1]), les pics identifiés semblent avoir les caractéristiques de ceux qui sont produits par l'implosion des structures cavitantes classiques. D'autre part, le suivi simultané de la phase vapeur, de l'évolution de la cavité et des signaux de pression a permis de cerner les instants auxquels se produit l'érosion. La figure 3 montre en effet les instants d'apparition des pics de pression par rapport à l'évolution de la cavité. Il apparaît que le premier pic de pression est associé à l'impact de l'interface vapeur-liquide contre la paroi côté éprouvette. Les pics successifs seraient peut être la conséquence de l'implosion du nuage de vapeur mentionné plus haut.

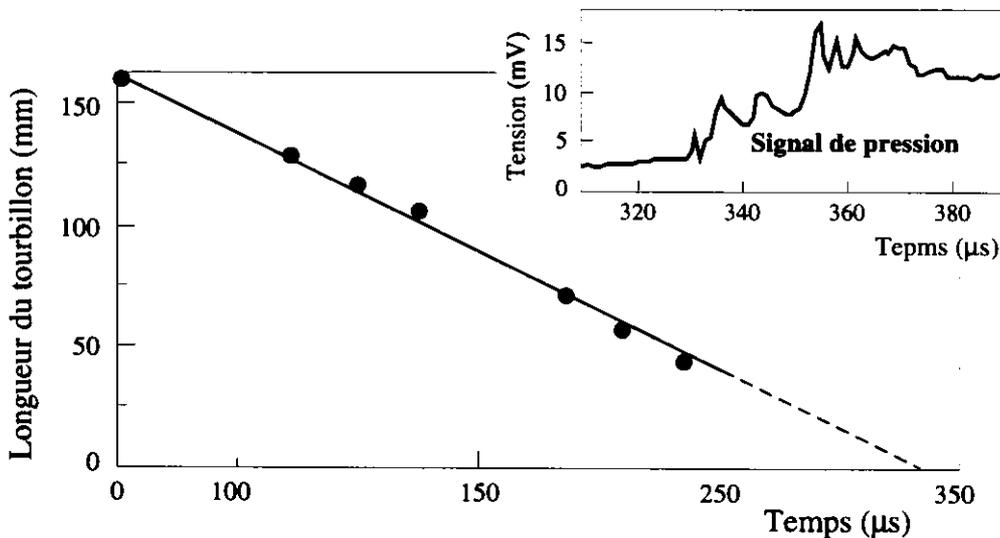


Fig. 3 – Évolution de la longueur du tourbillon et apparition des pics de pression  
( $\Omega = 3500$  tr/mn ;  $r_0 = 1,6$  mm et  $\Delta p = 1$  bar)

#### 4. Résultats sur l'érosion

L'observation et l'analyse des indentations d'érosion trouvées sur des éprouvettes métalliques apporte quelques renseignements sur la phase critique de l'écoulement. On retiendra à cet égard les principaux faits suivants :

- chaque implosion axiale du tourbillon est caractérisée par une tache érodée de forme presque circulaire et qui correspond approximativement à la section initiale du barreau de vapeur ; cette tache est formée par un grand nombre d'indentations. Les plus gros impacts se trouvent toujours sur la périphérie de la section endommagée ;
- les indentations sont localisées de manière complètement dissymétrique, c'est-à-dire qu'elles sont distribuées préférentiellement sur 2/3 de la section polaire totale (cf. figure 4) ;
- quelles que soient les vitesses d'implosion axiale, au moins 70% des indentations ont un diamètre égal ou inférieur à  $10 \mu\text{m}$  (cf. figure 5) ; cependant, ce sont les gros impacts qui contribuent le plus à l'endommagement de la surface de l'éprouvette ;
- enfin, pour tous les matériaux testés, le rapport entre la profondeur et le diamètre des indentations varie entre 0,85% et 1,5%.

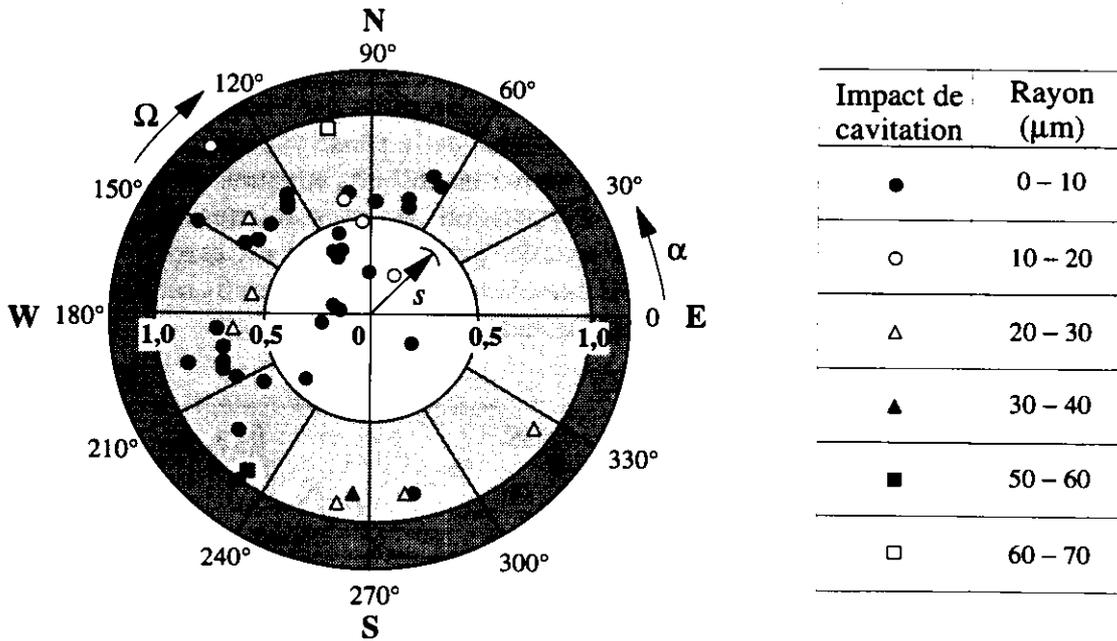


Fig. 4 - Répartition spatiale des impacts - La section initiale du tourbillon correspond à  $s = 1$  ( $\Omega = 3500$  tr/mn ;  $r_0 = 1,6$  mm ;  $\Delta p = 3$  bars ; 45 indentations)

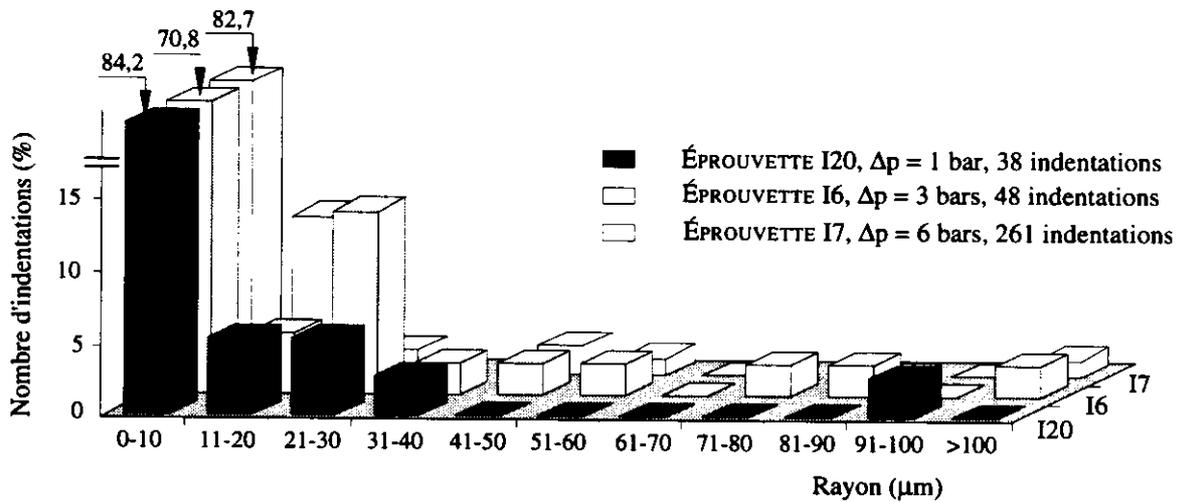


Fig. 5 - Histogramme en taille pour 3 éprouvettes en inox 316L ( $\Omega = 3500$  tr/mn ;  $r_0 = 1,6$  mm)

## 5. Conclusion

Un appareil entièrement original, le Cavermod, destiné à l'étude fondamentale de l'érosion de Cavitation et fondé sur le concept d'implosion axiale d'un tourbillon cavitant, a été réalisé. Cet appareil crée un écoulement transitoire à temps de vie extrêmement court (quelques ms). La vitesse d'implosion axiale s'étale, selon la violence du choc marteau-piston qui engendre son effondrement, entre 70 et 700 m/s. À l'aide d'un capteur de pression placé dans la zone de l'effondrement, on a établi la séquence des divers événements cinématiques et

dynamiques et on a déterminé, dans cette séquence, l'intervalle de temps le plus favorable aux dégâts d'érosion qui se situe à la fin de la toute première implosion du cœur de vapeur. La figure d'érosion qui en découle est alors caractérisée par un grand nombre d'indentations, qui augmente avec la violence du choc, c'est-à-dire avec la vitesse d'implosion.

L'ensemble des observations conduit à penser que, dans sa phase ultime, le processus d'érosion passe par des mécanismes qui relèvent de l'implosion et rebonds de bulles sphériques isolées dans l'espace mais peut être soumises à des interactions réciproques. Cette recherche a permis d'établir la fenêtre, spatiale et temporelle, dans laquelle apparaissent les événements critiques de l'érosion. C'est sur cette fenêtre que la suite de notre recherche doit se concentrer.

## Références

- [1] DOMINGUEZ-CORTAZAR M.A., Thèse, Université Joseph Fourier – Grenoble, Juillet 1994.
- [2] DOMINGUEZ-CORTAZAR M.A., FRANC J.P., MICHEL J.M., 3ème Conf. Int. I MechE, Cambridge, Déc. 1992.
- [3] LECOFFRE Y., ASME Cav. and Polyphase Flow Forum, 1978.
- [4] LECOFFRE Y., MARCOZ J., VALIBOUSE B., ASME Fluids Eng. Conf., Boulder, 1981.
- [5] SOYAMA H., KATO H., Oba R., 3ème Conf. Int. I Mech E, Cambridge, Déc. 1992.
- [6] DOMINGUEZ-CORTAZAR M.A., CANOT E., *CAV95* Conference, Deauville, Mai 1995.

Étude financée par la DRET (Conventions 89-072 et 91-115).

