

9^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

Cavitation et état de surface : Une nouvelle analyse des mécanismes d'attache d'une cavité à une surface.

Par :

Billard Jean-Yves*
IRENav

Farhat Mohamed
LMH/EPFL

Guennoun Faïçal
LMH/EPFL

Avellan François
LMH/EPFL

*Correspondance à adresser à Jean-Yves Billard, Ecole navale/IRENav, BP600, 29240 BREST NAVAL

Résumé :

La poche attachée est une des formes les plus pénalisante du phénomènes de cavitation dans les installations hydrauliques ou sur les propulseurs. Elle induit à la fois une augmentation du niveau de bruit, une dégradation des performances de l'installation et, éventuellement, des érosions sur les surfaces où elle se développe. Le mécanisme classique d'attache de la poche à la paroi met en avant un décollement de l'écoulement sub-cavitant derrière lequel la poche peut trouver des conditions de développement favorables. Sans remettre ce mécanisme en cause, car il est tout à fait valable pour les écoulements à Reynolds modéré, un autre mécanisme d'attachement, relié à l'état de surface du solide sur lequel la cavitation prend naissance, peut être décrit pour des écoulement à Reynolds élevé.

Abstract:

Attached cavitation is known to have important effects on performances of hydraulic facilities or propellers. It introduces an increase of noise level, a decrease of efficiency and in the most severe cases an erosion of surfaces where it occurs. The classical mechanism for a sheet cavity to attach on a surface implies a flow detachment behind which the sheet cavity can find favourable mechanical conditions for its development. This mechanism has been proved and is completely efficient in low Reynolds flow but for high Reynolds flow another mechanism, correlated with the smoothness of the surface on which the cavitation appears, can be implied. It is the purpose of this paper to describe this new mechanism.

Introduction

Les conditions d'attache d'une poche de cavitation sur une paroi impliquent nécessairement, d'après des auteurs tels qu'Arakeri [75] ou Franc et Michel [85], un détachement de l'écoulement sub-cavitant. Le scénario en est le suivant :

Derrière un décollement laminaire de la couche limite, et pour peu que la pression minimale sur le profil soit inférieure à la pression de vapeur du fluide à la température de l'écoulement, une poche de vapeur apparaît et se développe. La zone décollée, zone de recirculation, fournit à la poche les conditions mécaniques de sa persistance à un emplacement fixe sur le profil.

Dans cette description la cavitation attachée est donc, dans ses mécanismes, complètement différente d'une cavitation par bulles séparées qui est décrite comme étant une cavitation instationnaire prenant naissance à partir de germes, convectés par l'écoulement, qui trouvent, dans la zone de faible pression à la surface d'un profil, des conditions de pressions favorables à leur développement (Ceccio et Brennen [91], Kuhn de Chizelle *et al.* [95]). Dans certains cas (Farhat *et al.*, [02]) une cavitation par bulles peut se stabiliser localement sur un point du profil alors que partout ailleurs sur l'envergure de celui-ci l'écoulement reste exempt de toute forme de cavitation. Ce type de cavitation diffère dans ses mécanismes des deux précédents ; on ne retrouve plus le caractère bidimensionnel de la cavitation par poche et l'on n'a pas non plus le caractère aléatoire mais équiprobable en envergure de la cavitation par bulles. En se développant, ce type de cavitation peut donner naissance à une poche dont le mécanisme d'attachement est différent de celui décrit plus haut.

Observations de divers comportements cavitants stables

Les visualisations qui vont être présentées ici sont issues de campagnes d'essais réalisées dans le tunnel hydrodynamique du Laboratoire de Machines Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Cette installation possède une veine de section carrée de 15 cm de côté et permet d'atteindre des vitesses d'écoulement de 50 m/s. Ainsi, sur un profil de 10 cm de corde, il est possible d'atteindre des nombres de Reynolds allant jusqu'à $5 \cdot 10^6$.

Les visualisations présentées sur la figure 1 (a et b) ont été réalisées sur un profil NACA 16020 de 10 cm de corde à l'emplanture et de forme en plan elliptique placé à une incidence de $5,5^\circ$ pour un nombre de Reynolds de $1,5 \cdot 10^6$ et un nombre de cavitation, σ , variant de 0,7 à 0,8.

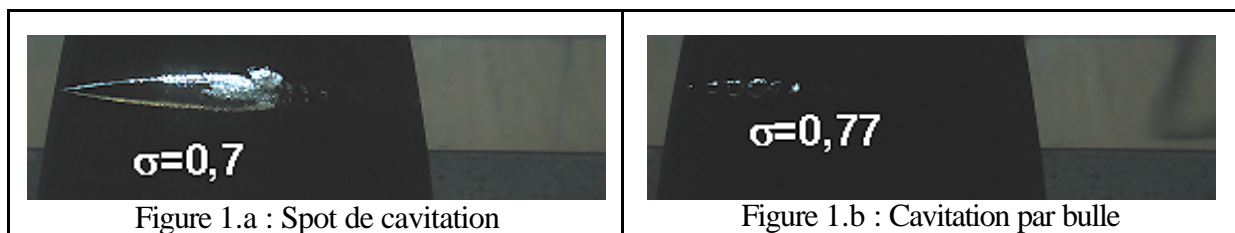


Figure 1 : Visualisations de cavitation attachée sur un profil NACA 16020.

La première photographie, figure 1.a, montre clairement, par la présence d'un spot de cavitation le long d'une corde du profil, que ce type de phénomène n'a plus le comportement bidimensionnel d'une poche de cavitation. De plus si la pression dans l'installation est progressivement remontée pour faire évoluer la valeur de σ de 0,7 à 0,77 le spot de cavitation se transforme progressivement en un chapelet de bulles émises de façon périodique à l'apex du spot, figure 1.b. La fréquence de l'émission, de l'ordre de 800 Hz, ne permet plus

d'imaginer que le phénomène observé soit lié à une cavitation par bulles séparées alimentée par des germes libres de l'écoulement. Il faut soit imaginer que les germes donnant naissance à cette forme de cavitation sont liés au profil (micro crique) ou bien qu'un phénomène local donne naissance à des germes qui évoluent ensuite dans le champ de pression lié à la géométrie et à l'incidence du profil.

De plus, la forme en plan du spot présenté sur la photographie de la figure 1.a correspond à l'enveloppe d'évolution d'une bulle calculée par le modèle de Rayleigh-Plesset. Il semble donc naturel d'imaginer le spot comme la forme limite d'une cavitation par bulles attachées lorsque les conditions d'écoulement ne permettent plus à celles-ci d'évoluer individuellement mais qu'elles les obligent à trouver un comportement collectif faisant apparaître la cavitation comme attachée au profil.

Pour certains régimes de cavitation par bulles séparées Ceccio et Brennen [91] ou Kuhn de Chizelle *et al.* [95] ont décrit des déformations de la bulle sous la forme de « queues » latérales ou de cortège de micros bulles d'accompagnement. Des observations réalisées sur un profil NACA 65012, figure 2, montrent que le spot de cavitation peut être accompagné d'une « traîne » de faible épaisseur pouvant être uni ou bi latéral.

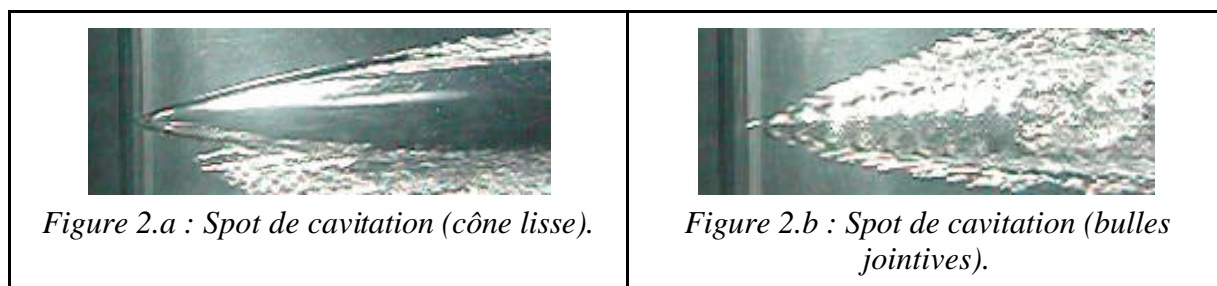


Figure 2 : Visualisations de cavitation attachée sur un profil NACA 65012.

Lorsque l'on diminue l'incidence on observe, figure 2.b, d'une part que le spot qui était initialement lisse se couvre d'oscillations faisant penser à des bulles en cours de coalescence et d'autre part que la traîne se scinde également pour faire apparaître les queues d'accompagnement individualisées de chaque bulle. Le même film, pour une incidence voisine de zéro, figure 3, montre que le spot s'est complètement transformé pour faire apparaître un chapelet de bulles clairement individualisées.



Figure 3 : Visualisations de cavitation par bulle sur un profil NACA 65012.

Face à ces visualisations la question du phénomène donnant naissance à cette forme de cavitation se pose. La localisation, identique à chaque démarrage de l'installation, exclue un phénomène aléatoire. C'est donc une propriété locale du foil qui doit être mise en cause.

Pour apporter quelques éléments de réponse à cette question des indentations de petites tailles (10 μ m) ont été apportées sur un profil lisse et l'attachement de la cavitation sur ces indentations a été étudié.

Apparition de la cavitation sur une indentation de 10 μ m

Sur un profil parfaitement lisse (rugosité moyenne de l'ordre de 0,05 μ m) nous avons fait réaliser trois indentations de 10 μ m de taille caractéristique conformément au schéma de la figure 4. Ces indentations sont de forme pyramidale et possèdent un angle d'ouverture de la pyramide de 136°. Elles ont été réalisées sur une machine d'essai de dureté Vickers avec une pointe en diamant. Ces trois indentations sont notées R1, R2 et R3.

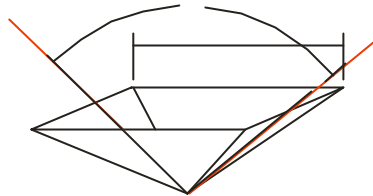


Figure 4 : Schéma d'une indentation implantée sur le profil NACA 65012.

Les indentations ont été implantées sur le profil aux emplacements indiqués sur la figure 5 respectivement à 0,35, 2,33 et 4,62 % de la corde par rapport au bord d'attaque du profil. Sur cette figure nous avons représenté la courbe des coefficients de pression au voisinage du bord d'attaque déterminée à partir d'un calcul potentiel. Le choix de ces positions place la première indentation légèrement en amont du point de C_p minimum et les deux autres en aval de ce point. La seconde indentation est dans la zone de fort gradient adverse et la troisième au début de la zone de gradient modéré.

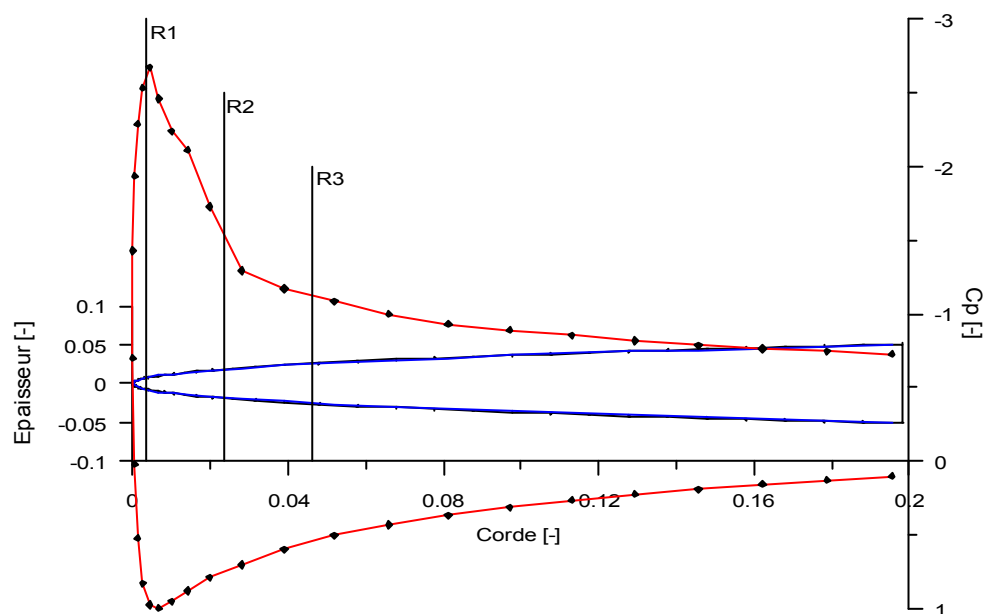


Figure 5 : Positions des trois indentations (R1, R2, R3) réalisées en aval du bord d'attaque du profil NACA 65012 et courbe de coefficient de pression correspondante pour une incidence du profil de 5°.

Les photographies présentées à la figure 6 ont été réalisées sur le profil avec indentations pour une valeur du nombre de cavitation égale à 1 et une incidence du profil égale à 4°. Sur la première photographie, figure 6.a, pour une vitesse de l'écoulement de 16 m/s la cavitation se développe de façon bi dimensionnelle sur le profil. Elle vient se placer dans une éventuelle recirculation de l'écoulement. Pour une vitesse légèrement supérieure, de

17 m/s, figure 6.b, la cavitation apparaît sur l'indentation R1, sous forme d'une pointe, en avant de la poche principale et déterminant localement un épaississement de celle-ci. Comme le signalent Knapp et al. [70] la rugosité d'une surface peut jouer un rôle de déclencheur sur l'apparition de la cavitation et ceci en fonction d'un nombre de Reynolds local déterminé à partir des vitesses dans la couche limite et de la dimension caractéristique des rugosités. C'est bien ce qui apparaît dans le cas des visualisations réalisées ici. L'indentation joue le rôle d'un promoteur qui permet à la cavitation de se stabiliser dans des conditions d'écoulement pour lesquelles elle n'aurait pas pu le faire naturellement.



Figure 6 : Visualisation de cavitation attachée pour deux vitesses de l'écoulement ($\alpha = 4^\circ$, $\sigma = 1$).

Par contre après les premières apparitions, attachées sur les indentations, le développement de cavitation consécutif à une augmentation de la vitesse de l'écoulement, se fait de façon généralisée sur toute l'envergure du profil. On met alors en évidence l'importance du nombre de Reynolds local qui va « activer » des imperfections de la surface de plus en plus petites.

Effets de la vitesse

Afin de compléter cette étude en prenant en compte les effets de la vitesse sur le développement et l'établissement de la poche de cavitation nous avons mené une série de visualisations sur un profil de même nature mais exempt d'indentations en modifiant la vitesse de l'écoulement sans modifier le nombre de cavitation. Les photographies présentées à la figure 7 ont été réalisées sur un profil NACA 65012 à une incidence de 4° pour un nombre de cavitation égal à 1,2. La vitesse évolue sur ces 7 vues de 13 à 25 m/s par pas de 2 m/s.

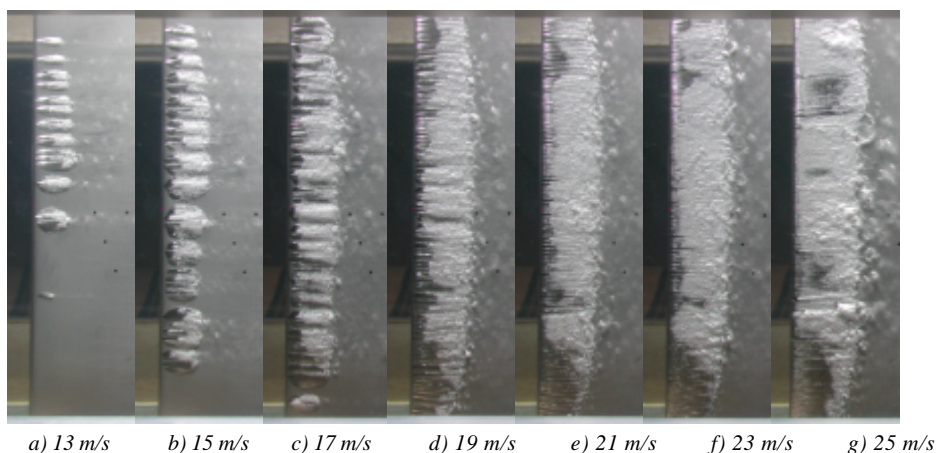


Figure 7 : Evolution d'une poche de cavitation pour un sigma constant de 1,2 et des vitesses croissantes de 13 à 25 m/s par pas de 2 m/s (Profil NACA 65012 – 4° d'incidence).

Pour la vitesse la plus faible (a) les premiers spots apparaissent de façon éparse en aval du bord d'attaque du profil. Une légère augmentation de vitesse (b) se traduit par une multiplication du nombre des spots qui conservent, individuellement, une allure semblable les uns aux autres. Sur la troisième image (c) les spots ont saturé l'ensemble de l'envergure de l'aile, l'augmentation de la vitesse se traduit alors par une diminution de la taille individuelle des spots (d) et par un rapprochement du point d'attachement du spot du bord d'attaque. Sur les deux images suivantes (e et f) les spots se réunissent pour former une poche unique dont la longueur augmente légèrement (10 à 15 %). Enfin (g) le bord de fuite de la poche montre des signes classiques de déstabilisation avec émission de nuages de bulles. On remarquera alors que la poche de cavitation partielle a le comportement général d'une poche unique dont la surface a une allure assez perturbée, très différente des poches lisses qui peuvent être initiées par un bulbe de décollement laminaire par exemple. A titre d'illustration la figure 8 montre sur le même profil, mais avec indentations, la cohabitation, pour une vitesse de l'écoulement légèrement inférieure, d'une poche lisse et d'une poche attachée sur l'indentation R1. On remarquera la différence d'aspect et la différence de position des deux poches au voisinage de leur bord d'attaque respectif.

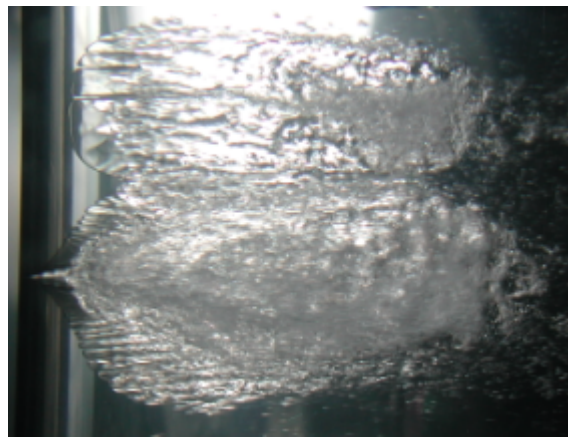


Figure 8 :Cohabitation, sur le profil Naca 65012 d'une poche de cavitation lisse et d'un spot initié sur l'indentation R1 (11 m/s, incidence 4° , $\sigma = 1,1$).

Conclusions

Les visualisations ont montré que la cavitation peut s'attacher sous forme d'un spot sur des imperfections de paroi pour donner, pour des écoulements à nombre de Reynolds élevé, l'impression de voir une poche bi dimensionnelle alors que celle-ci semble être le résultat de la coalescence de nombreux spots se déclenchant sur des imperfections de plus en plus petite.

L'étude de la cavitation sur des indentations calibrées a permis de mieux comprendre la dynamique de ces spots et le travail s'oriente maintenant vers la quantification de ces effets en particulier et terme de Reynolds locaux. Le but étant de déterminer le seuil à partir duquel une imperfection de la paroi pourra devenir le promoteur d'un spot de cavitation et de déterminer des critères permettant de lier rugosité d'un profil et risque de cavitation.

Références

- [1970] Knapp RT, Daily JW et Hammit FG
Cavitation
McGraw-Hill Inc, Engineering Societies Monograph.
- [1975] Arakeri VH
Viscous effects on the position of cavitation separation from smooth bodies
Journal of Fluid Mechanics, vol 68, pp 779-799.
- [1985] Franc J-P et Michel J-M
Attached cavitation and the boundary layer : Experimental investigation and numerical treatment
Journal of Fluid Mechanics, vol 154, pp 63-90.
- [1991] Ceccio SL et Brennen CE
Observations of the dynamics and acoustics of travelling bubble cavitation
Journal of Fluid Mechanics, vol 233, pp 633-660.
- [1995] Kuhn de Chizelle Y, Ceccio SL et Brennen CE
Observations and scaling of travelling bubble cavitation
Journal of Fluid Mechanics, vol 293, pp 99-126.
- [2002] Farhat M, Guennoun F et Avellan F
The leading edge cavitation dynamics
Proceedings of ASME FEDSM'02, July 14-18, Montreal, Québec, Canada.