

5^e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

**ETUDE DE LA MORPHOLOGIE DES INTERFACES
DES CAVITES NATURELLES ET VENTILEES**

**F. LARRARTE - A. PAUCHET - P. BOUSQUET
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNIQUES AVANCÉES
GROUPE PHÉNOMÈNES D'INTERFACE
CHEMIN DE LA HUNIÈRE
91120 PALAISEAU
TÉL: (1) 60 10 03 18. - FAX: (1) 60 10 60 85.**

**K. BONHOFF
RWTH AACHEN (UNIVERSITÉ D'AIX-LA-CHAPELLE)
ALLEMAGNE**

Résumé

La morphologie de l'interface des cavités, naturelles ou ventilées, courtes et apparemment stables est étudiée par visualisation. Les images, enregistrées au moyen d'une caméra vidéo rapide à la cadence de 6000 images par seconde (images/s), sont analysées automatiquement pour déterminer les caractéristiques temporelles et spatiales des interfaces. Pour les cavités ventilées, on montre l'existence d'un train d'ondes se déplaçant continuellement et sans interruption dans le sens de l'écoulement. Dans le cas des cavités naturelles il a été possible de mettre en évidence l'existence d'un comportement quasi-périodique caractérisé par la présence de trois phases analogues à celles déjà observées dans le cas de cavités longues.

Summary

The morphology of the interface of short and apparently steady cavities, natural or ventilated, has been investigated by visualization. The images, recorded by means of a high speed video camera at 6000 images/s, were automatically analysed to obtain information concerning the time and spatial evolution of the interfaces. For the ventilated cavities, it is shown that a continuous and uninterrupted wave train moves in the flow direction. In the case of natural cavities, it has been possible to show the existence of a quasi periodic behaviour characterised by the succession of three phases, analogous to those already shown in the case of long cavities.

INTRODUCTION

Afin d'évaluer les effets thermiques dans la cavitation des liquides cryogéniques, Fruman *et al.* [1] ont proposé une méthodologie semi-empirique dans laquelle l'interface de la cavité de vapeur est assimilée, étant donnée sa faible courbure et la pression constante qui y règne, à une plaque plane sans gradient de pression au travers de laquelle s'établit un flux de chaleur capable de produire un débit de vapeur, pris égal à celui de l'air nécessaire pour entretenir une cavité ventilée de longueur égale à celle de la cavité naturelle. L'ajustement entre les résultats expérimentaux et le modèle est satisfaisant lorsque l'échange thermique est celui qui se produirait au sein d'une couche limite turbulente se développant sur une plaque rugueuse. Il a été montré, Fruman et Beuzelin [2], qu'un bon accord avec les travaux de Hord [3] est obtenu pour une rugosité équivalente inversement proportionnelle à la racine carré du nombre de Reynolds, basé sur la longueur de la cavité. De manière à permettre, d'une part, de justifier l'équivalence entre le débit d'air nécessaire à l'établissement d'une cavité ventilée et celui de vapeur nécessaire pour entretenir une cavité naturelle et, d'autre part, l'établissement d'une liaison entre le modèle simplifié de transfert et la physique des interfaces liquide-vapeur des cavités, une recherche de leurs caractéristiques morphologiques est conduite sous les auspices du Centre National d'Etudes Spatiales. L'objectif de cette communication est de présenter les moyens expérimentaux mis en oeuvre et les résultats préliminaires obtenus.

Ces recherches diffèrent des travaux antérieurs sur les cavités instables, [4], [5] et [6], par le fait que nous considérons des cavités courtes (moins de 40% de la corde du profil) et apparemment stables.

MOYENS EXPERIMENTAUX

Les essais ont été réalisés dans la veine d'essais de 150 mm de hauteur et 80 mm de largeur du tunnel de cavitation de l'ENSTA (Figure 1). Les visualisations sont effectuées soit suivant une direction normale à la surface plane du profil soit suivant une direction parallèle aux génératrices du profil (tranches).

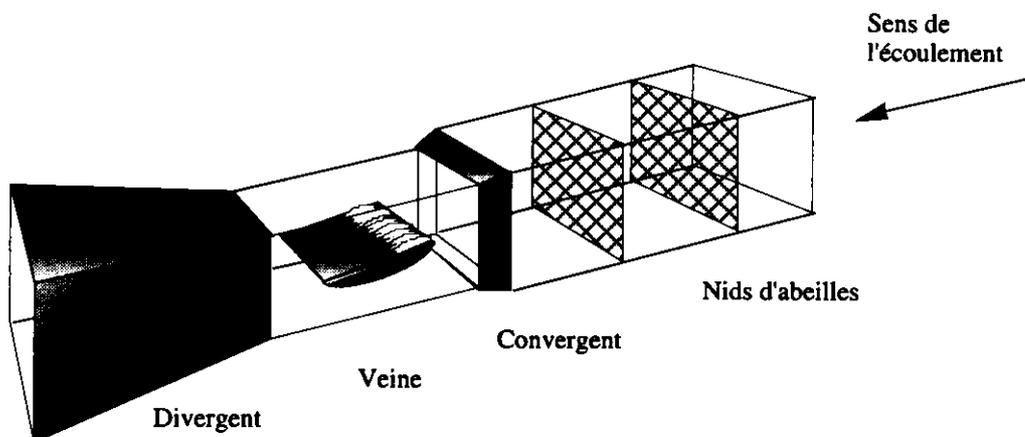


Figure 1 : Schématisation de la section d'essais du tunnel de cavitation.

Trois ailes ayant une section droite plan-convexe (extrados-intrados) de 150 mm de corde (Figure 2) ont été utilisées. L'une, P1, est destinée à l'étude des cavités ventilées et comporte un système d'injection d'air aboutissant à une fente de 1 mm de largeur située au bord d'attaque. Les deux autres, P2 et P3, sont utilisées pour l'étude de la cavitation naturelle. P3 diffère de P2 par la disposition d'un insert en Plexiglas de 6 cm de largeur et 11 cm de longueur à partir du bord d'attaque permettant de visualiser l'interface par l'intérieur de la cavité. Chaque aile est placée à mi-hauteur de la veine et maintenue sur la paroi latérale par un axe relié à un berceau goniométrique permettant de modifier son incidence.

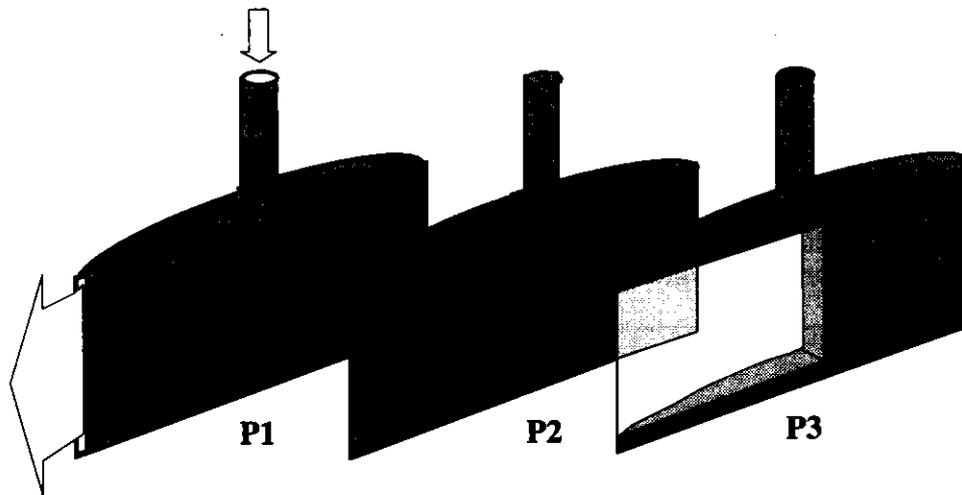


Figure 2 : Schéma des ailes utilisés : P1, avec la fente d'injection d'air, P2 opaque et P3 muni d'un insert en Plexiglas.

L'incidence géométrique nulle du profil est déterminée au préalable, hors de la veine, par la vérification du parallélisme entre la face plane du profil et le redan du hublot. Ceci est effectué au moyen d'un niveau assurant une précision d'une minute d'angle. Afin de prévenir la déformation des cavités au niveau de la paroi au travers de laquelle on effectue la visualisation latérale, un joint en silicone est disposé entre la section terminale de l'aile et la paroi latérale de la veine pour éviter l'écoulement d'entrefer.

Les expériences ont été menées à 4° d'incidence pour des vitesses de 6 et 8 m/s et des longueurs de poches de 3 et 6 cm respectivement. Ces longueurs ont été obtenues en réglant la pression statique de l'écoulement non perturbé à l'infini amont dans le cas des profils P2 et P3. Pour le profil P1, les longueurs des cavités ont été obtenues en modifiant le débit d'injection d'air sans modifier la pression statique de l'écoulement non perturbé à l'infini amont. Le réglage de ces conditions opératoires a été réalisé grâce à la mise en place d'une technique rapide de détection et d'analyse du contour des cavités. Pour cela, une tranche lumineuse était disposée longitudinalement sur la poche dont une prise de vue était réalisée au moyen d'une caméra vidéo classique (25 images par seconde) avec une durée d'ouverture de l'obturateur de $1/10000$ s. L'image de ce contour était superposée à une grille, issue de la prise de vue d'une mire millimétrique, dans des conditions de grossissement optique inchangées, tracée sur l'écran d'un moniteur. Cette méthode permet d'obtenir immédiatement le facteur d'échelle pour la détermination précise de la longueur des poches observées en vue du réglage rapide des paramètres de fonctionnement du tunnel de cavitation.

Les visualisations préliminaires, Bonhoff [7], ont été réalisées au moyen d'une caméra rapide Hycam à la cadence de 10000 images/s avec un éclairage constitué de six lampes au radium de 150 W. Quoique ce procédé ait permis d'obtenir des images ayant une très grande résolution en terme de niveaux de gris, il présente l'inconvénient de différer l'analyse des images acquises, Miquel [8]. Il a donc été préféré par la suite, d'opérer avec une caméra vidéo rapide Kodak Spin Physics (SP2000) qui permet d'acquérir jusqu'à 12000 images/s en possédant toutes les facilités d'un enregistrement sur support magnétique. Cependant la sensibilité du capteur CCD étant bien inférieure à celle des films cinématographiques, il est nécessaire de disposer d'un flux de lumière d'intensité supérieure.

Pour cela, cinq lampes d'une puissance unitaire de 360 W et une lampe à arc d'une puissance de 500 W associée à un système optique de focalisation ont été utilisées. Pour améliorer la qualité des images obtenues pour certaines prises de vues, l'extrados des profils P1 et P2 a été recouvert d'un film plastique rouge du fait de la meilleure sensibilité du capteur CCD dans cette gamme de longueur d'ondes. Pour les visualisations par tranche, dans le but d'éviter les réflexions parasites, la face latérale en regard de la caméra ainsi que la face plane ont été peintes en noir.

Différentes configurations d'éclairage et de prises de vues ont été adoptées. Pour visualiser l'évolution de la géométrie de la section de la poche (avec les ailes P1 et P2) on a utilisé l'arrangement schématisé sur la Figure 3a, tandis que pour établir la morphologie de l'interface en lumière réfléchie ou transmise on a utilisé respectivement le montage schématisé sur les Figure 3b et 3c. La caméra était équipée d'un objectif Angénieux de 150mm muni d'une bague prolongatrice de 10mm dans le cas des prises de vues des poches les plus courtes. Afin de conserver un grossissement optique constant, la bague d'adaptation du plan focale de l'objectif était immobilisée et la mise au point assurée grâce au déplacement précis de la caméra sur une table de positionnement millimétrique.

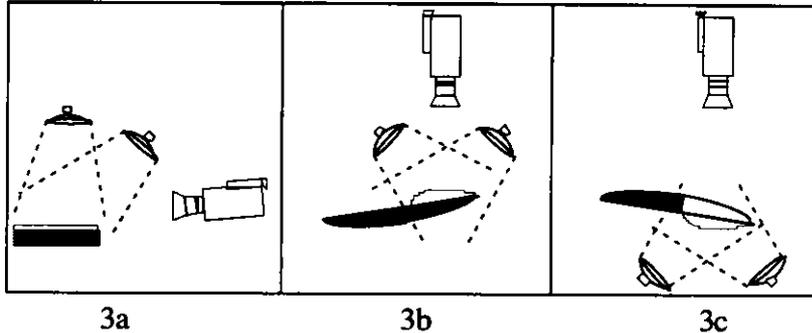


Figure 3 : Schéma des différentes configurations de prises de vues.

L'armoire de commande de la caméra est munie d'un moniteur noir et blanc qui permet d'effectuer, au moyen d'une lumière stroboscopée et pour une ouverture maximale du diaphragme de l'objectif, la mise au point de l'image et de procéder au réglage de l'éclairage en modifiant le nombre et la position des lampes. L'intensité lumineuse nécessaire dépend de la cadence d'acquisition (6000 images/s) et de l'ouverture de diaphragme choisies. Afin de garantir une profondeur de champ compatible avec le degré de mobilité de l'interface par rapport au plan focal, on a choisi une ouverture de diaphragme comprise entre 5,6 et 8. La cadence de 6000 images/s a été retenue car elle offre le meilleur compromis entre la qualité des images réalisées avec l'éclairage disponible et la capacité à capter les phénomènes rapides que l'on souhaite analyser. Le moniteur permet également de contrôler immédiatement après acquisition la qualité des images enregistrées.

PROCEDURE DE DEPOUILLEMENT

Pour permettre la validation statistique des résultats et éviter la subjectivité d'un opérateur, il est nécessaire de procéder à l'automatisation de l'analyse d'image de manière à dépouiller un très grand nombre d'images en utilisant des critères permanents d'analyse. La chaîne d'acquisition et de traitement est présentée sur la Figure 4 sous la forme d'un organigramme.

Les cassettes de la caméra SP2000 ont été visionnées afin de ne retenir que les séquences de bonne qualité. Ces dernières ont été copiées sur support vidéo standard U-matic pour pouvoir être lues avec le logiciel de traitement d'images Optimas[®]. Ce transfert a été effectué du magnétoscope de la caméra SP2000, opérant à 1 image/s, vers le magnétoscope U-matic enregistrant à 24 images/s. Quoique cette copie image par image soit coûteuse en temps et en volume de stockage, on a transféré, pour chacune des séquences les plus révélatrices, 200 images écran par configuration. Ceci correspond à 600 images du champ physique puisque chaque image écran contient trois images, Figure 5. Le logiciel Optimas[®], qui fonctionne sur micro-ordinateur PC, permet une numérisation des images ainsi enregistrées et leur traitement ultérieur.

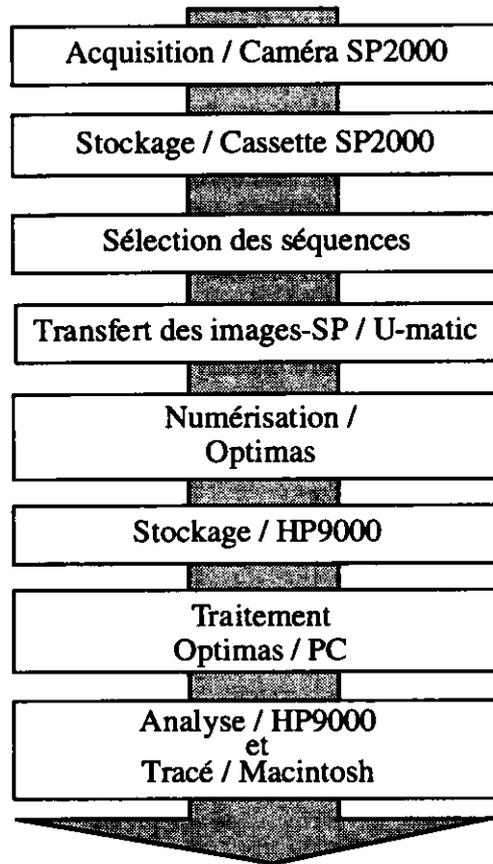


Figure 4 : Organigramme de la procédure d'acquisition et de traitement d'images.

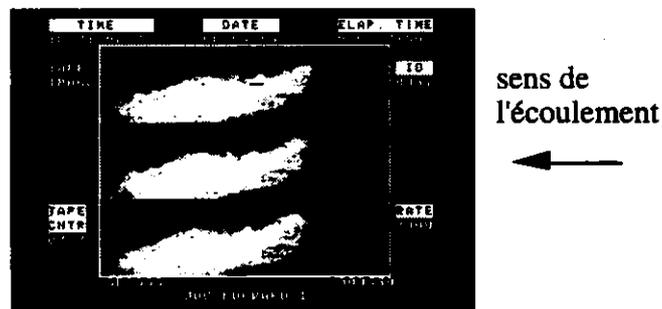
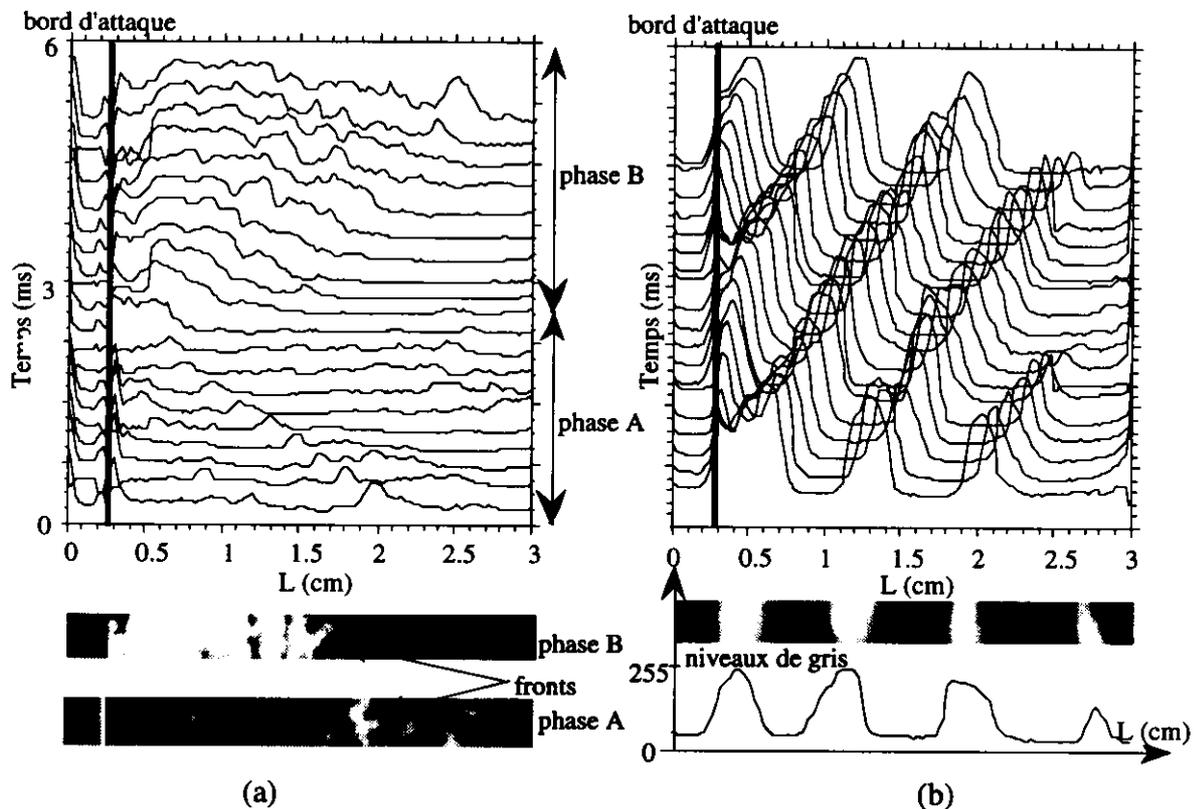


Figure 5 : Image écran de la caméra-SP2000.

La mise au point des programmes de traitement automatique des images a été réalisée en utilisant celles de l'interface des cavités naturelles et ventilées suivant une vue normale à la surface plane des profils, acquises précédemment par Bonhoff [7]. Un certain nombre de séquences furent développées sur papier, numérisées au moyen d'un scanner Canon et enregistrées sur PC. Un premier traitement permet d'établir un fichier de coordonnées et de niveaux de gris associés. Puisque les phénomènes observés se propagent suivant la direction de l'écoulement, on effectue la moyenne des niveaux de gris établis sur seize lignes équidistantes et parallèles à cette direction. La comparaison des profils de niveaux de gris moyens permet de connaître les caractéristiques de propagation des ondes ou des perturbations superficielles. La Figure 6 est un exemple des résultats obtenus. Elle sera commentée plus loin. Ce qui est important de noter ici, c'est que les renseignements issus du dépouillement automatique viennent confirmer ceux obtenus manuellement par Bonhoff [7] et valident ainsi la méthode d'analyse.

Des programmes permettant de traiter les images vidéo de chaque cavité vue de côté et d'en extraire le contour le plus proche de l'appréciation visuelle de la poche ont été développés. Puisque les cavités en coupe se présentent comme des images claires contrastées sur un fond noir, du fait du pouvoir réfléchissant des gouttelettes de liquide ou des bulles de vapeur/air (luminance de voile), il est possible de déterminer le contour apparent de la cavité par une méthode de seuillage. L'aire de la poche est calculée à l'intérieur du contour apparent. Cette méthode ne permet pas de sélectionner certaines zones très peu réfléchissantes comprises au voisinage de la paroi du profil, en particulier dans le quart avant de la cavité naturelle (voir Figure 6a). Ceci introduit une erreur d'appréciation estimée à 5%. En outre, et ceci est plus important, l'analyse automatique ne permet pas de distinguer, comme on le verra par la suite, la cavité du nuage de bulles détaché. Dès lors, l'estimation de l'aire de la cavité de tête se trouve faussée. La Figure 7 schématise la procédure d'analyse implémentée sur station de travail HP-9000/735.



Figures 6 : Evolution des fronts d'ondes au cours du temps, (a) pour une poche naturelle, (b) pour une poche ventilée.

RESULTATS

Les prises de vues en plan des interfaces obtenues par cinématographie rapide ont permis de mettre en évidence, dans le cas des cavités naturelles, l'existence de cycles relativement périodiques caractérisés par trois phases successives : la phase A, pendant laquelle un front d'onde remonte vers l'amont jusqu'à atteindre le bord d'attaque ; suivie par la phase B caractérisée par un train d'ondes se propageant du bord d'attaque vers l'aval ; elle même suivie par la phase C qui apparaît comme une interface lisse. L'analyse de dix séquences a conduit aux estimations des périodes et des célérités moyennes des ondes observées. La durée de la phase A, Figure 8a, qui caractérise la propagation du jet rentrant, est d'environ 3 ms soit une vitesse moyenne de la "tête" du jet de 6,3 m/s pour une vitesse de l'écoulement non perturbé de 6,6 m/s. La phase B, durant laquelle la cavité est convectée vers l'aval, se déroule pendant un temps variable de 2,5 à 4,5 ms, Figure 8b. Les intumescences observées au cours de cette période ont

une longueur d'onde d'environ 3 mm. La phase C est une étape de transition dont la durée est variable.

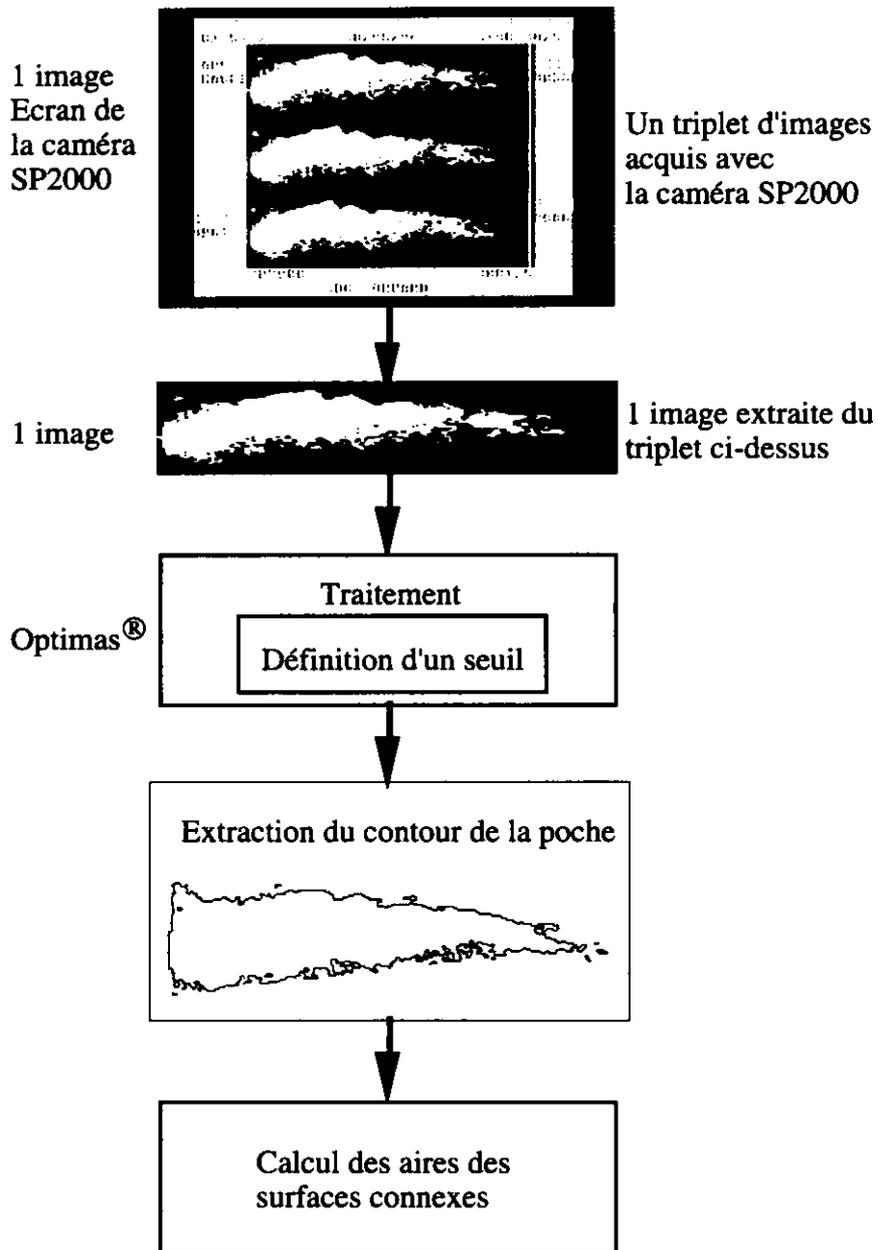
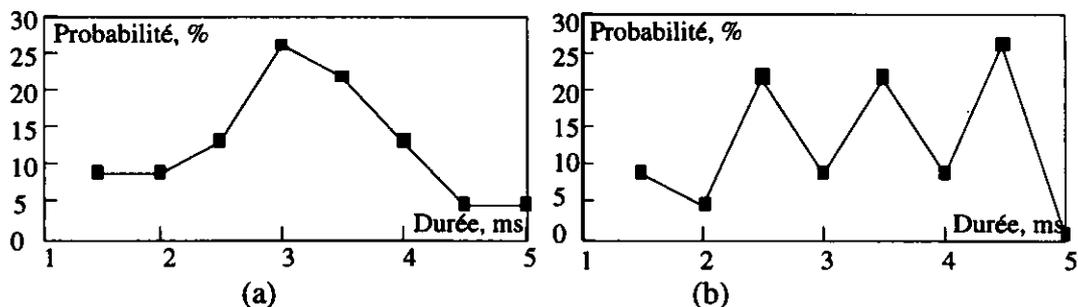


Figure 7 : Les étapes de conditionnement et de traitement des images.

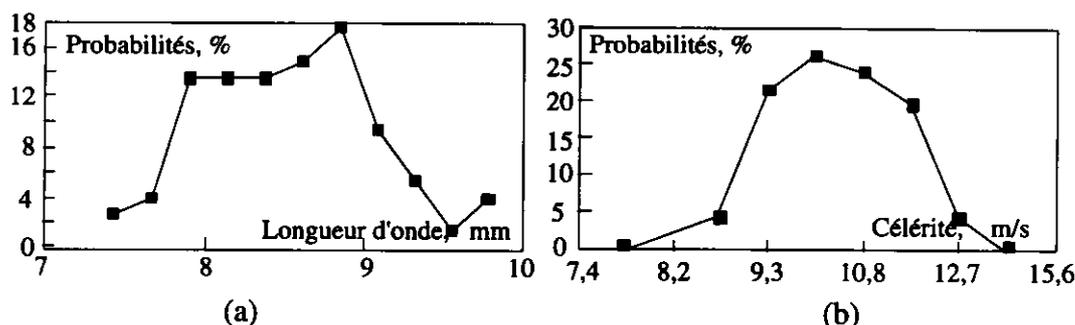


Figures 8 : Estimation des durées des phases A et B observées pour une cavité naturelle.

(a) durée d'observation du jet rentrant (phase A)

(b) durée d'observation du premier motif du train d'ondes (phase B).

Pour la poche ventilée, Bonhoff [7] observa l'émission périodique, à partir du bord d'attaque, d'ondes ayant une longueur d'onde caractéristique de l'ordre de 8 mm et une célérité moyenne de 10,4 m/s, Figures 9a et b.



Figures 9 : Caractéristiques de l'interface d'une cavité ventilée.
 (a) estimation de la longueur d'ondes
 (b) estimation de la célérité des ondes.

La Figure 6a, obtenue en analysant les films pris par Bonhoff [7] par la méthode automatique des niveaux de gris, permet de bien visualiser la phases A, de propagation du jet rentrant, et B, de croissance de la cavité naturelle, ainsi que le déplacement des intumescences de la cavité ventilée. La Figure 10 donne la position du front de "tête" du jet rentrant en fonction du temps pour deux des cas analysés. La pente est la vitesse de remontée de la "tête" du jet, de 7 et 10 m/s pour les deux cas considérés. Ces vitesses sont supérieures à la vitesse moyenne trouvée par Bonhoff [7]. Dans le cas de la cavité ventilée, la Figure 6b montre clairement l'allure des ondes qui se propagent sur l'interface. L'écart entre les maximum des intumescences donne bien une longueur d'onde de 8,5 mm qui se situe tout à fait dans la gamme des longueurs d'ondes estimée par Bonhoff.

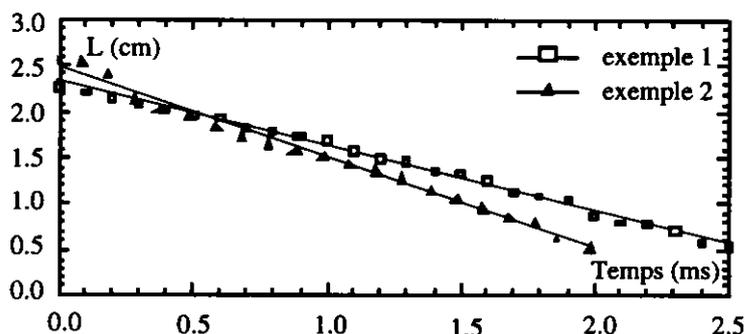


Figure 10 : Deux exemples de propagation du jet rentrant.

Les images des tranches obtenues pour une vitesse de l'écoulement non perturbé de 8 m/s et des cavités naturelles et ventilées de 6 cm de longueur ont été analysées dans la situation où elles se trouvent au dessus du profil, Figure 11. Dans le cas des cavités naturelles, Figure 11a, l'interface initialement lisse devient de plus en plus perturbée au fur et à mesure de l'accentuation de la cambrure (image 4); simultanément une lame de liquide (jet rentrant) remonte jusqu'au bord d'attaque (Phase A), images 1 à 4. L'impact du front du jet se manifeste par le détachement de la tête de la cavité (image 5) qui se soulève (image 6). Le nuage de vapeur ainsi formé est alors convecté en aval (Phase B), images 6 à 13, dans un mouvement de rotation induit par l'écoulement liquide extérieur. Sur ces mêmes images, on distingue aussi la reformation d'une cavité depuis le bord d'attaque. Sur l'image 13 la nouvelle cavité continue à se développer alors que le nuage a été convecté dans le sillage de la poche. Les images 13 à 20 montrent l'installation de la phase C. Pour la poche ventilée, on observe des déformations locales de l'interface autour d'une forme moyenne stationnaire (Figure 11b). Ces déformations traduisent la propagation vers l'aval d'ondes dont la célérité moyenne est de 6,2 m/s, donc inférieure à la vitesse de l'écoulement non perturbé.

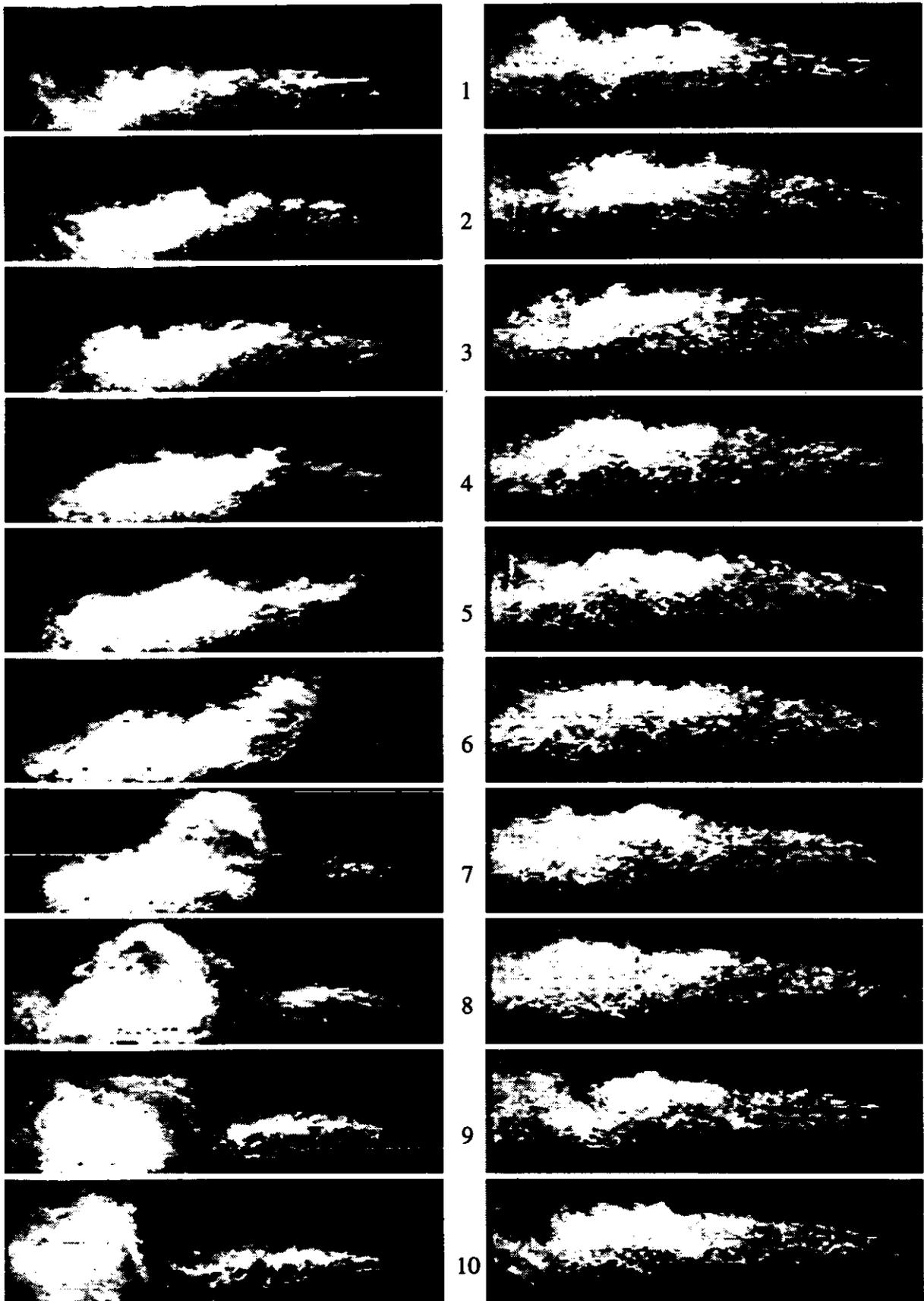


Figure 11 : Evolution des poches au cours du temps,
temps entre deux images 0.83 ms,
(a) poches naturelles, (b) poches ventilées

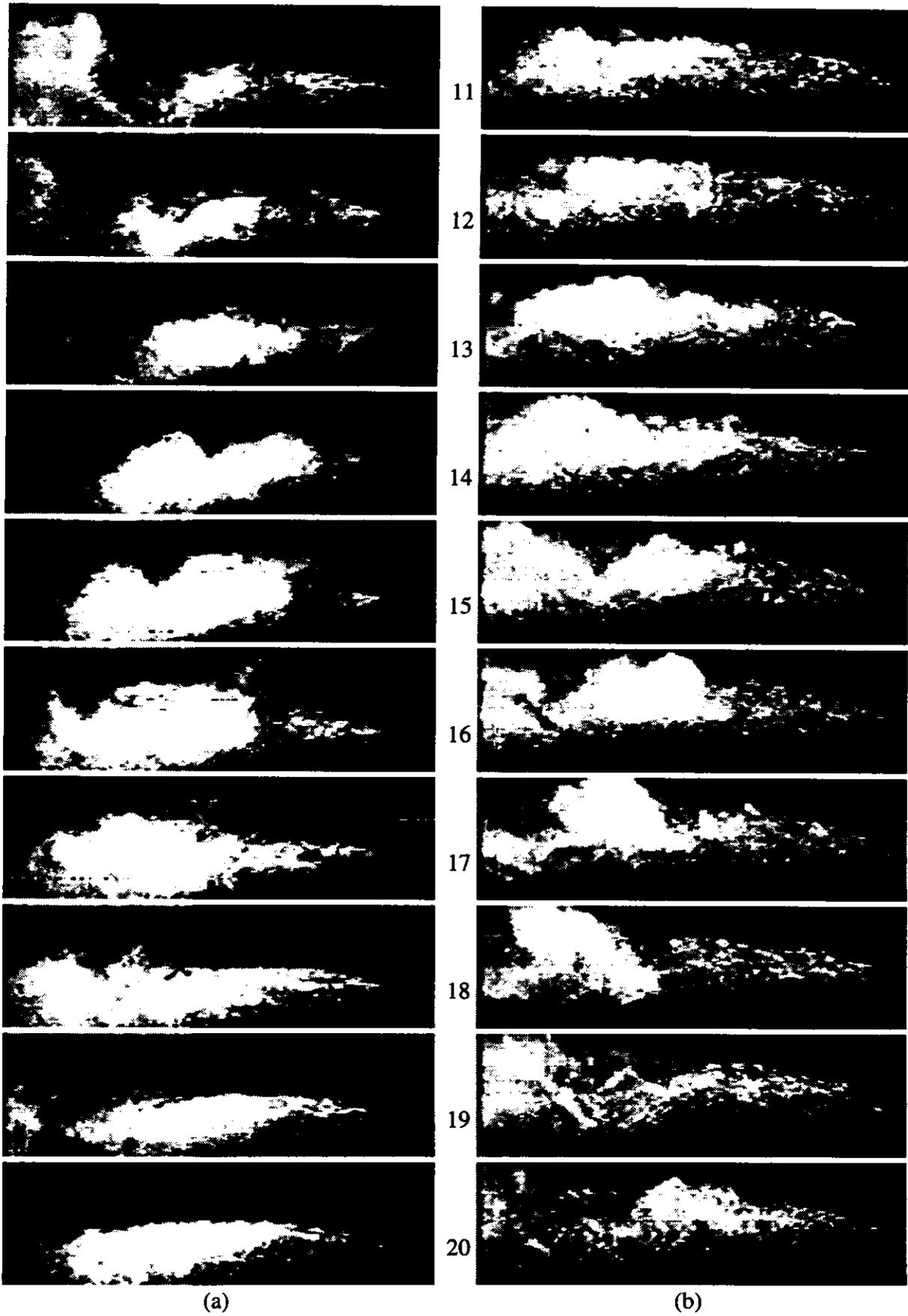
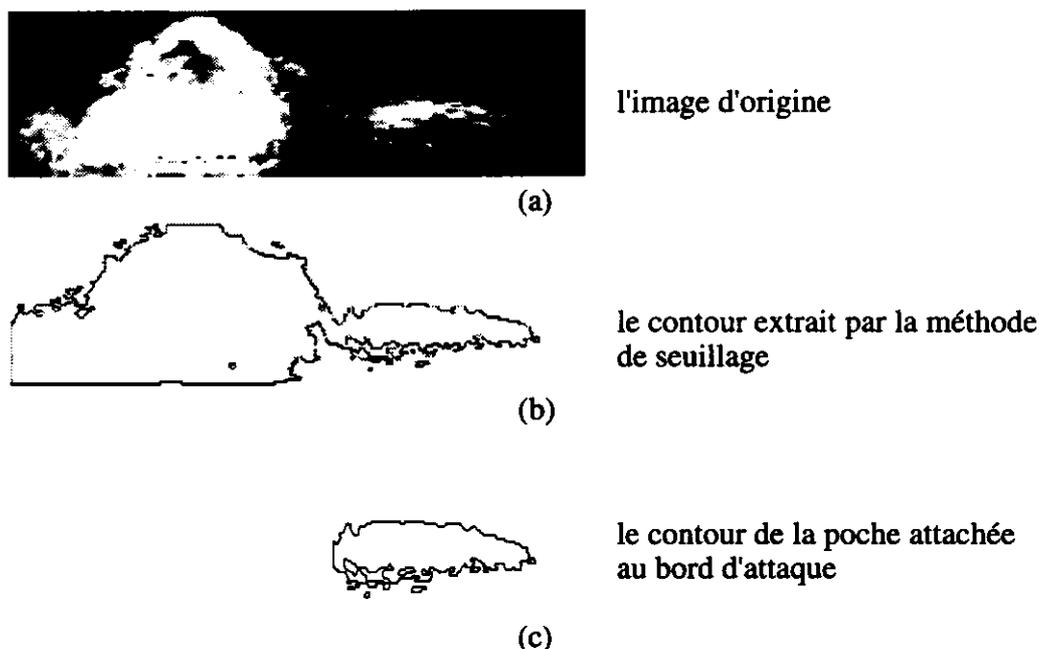


Figure 11 : suite

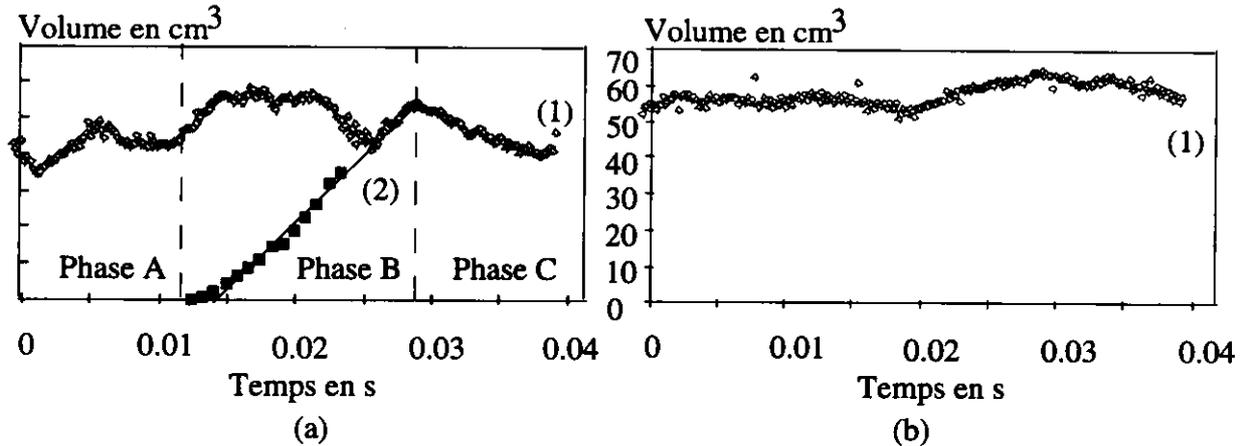
L'analyse automatique ne permet pas de dissocier l'évolution des aires de la cavité en cours de reformation de celle détachée et transportée vers l'aval. Ceci nous a conduit à procéder manuellement à cette dissociation en introduisant une coupure nette entre poche attachée et nuage détaché comme il est montré sur la Figure 12. L'intérêt de cette opération est de permettre le calcul du débit de vapeur produit pendant la phase de formation de la nouvelle poche ainsi que la vitesse de condensation de celle en cours de détachement. La Figure 13 montre l'évolution du volume de vapeur, pris égal à l'aire de la poche multipliée par la largeur du profil, en fonction du temps pour les poches naturelles et ventilées situées au dessus du profil.



Figures 12 : Illustration de la différence entre le contour de la poche et le contour de la cavité en cours de reformation.

La Figure 13a montre, en motifs blancs, l'évolution de la totalité du volume de la cavité naturelle et, en motif noirs, celle de la cavité attachée déterminée comme indiqué sur la Figure 12. On note que la fluctuation du volume total est de $\pm 12\%$ autour d'une moyenne de 52 cm^3 . La croissance du volume de la poche attachée est linéaire avec une pente de $3,6 \text{ l/s}$. Cette pente vient rejoindre parfaitement celle observée sur la courbe d'évolution de la totalité de la poche. La diminution du volume qui suit cette croissance correspond à l'amincissement de la cavité (amorçe de la Phase C). La Phase A, correspondant à la pénétration du jet rentrant, coïncide partiellement à la croissance observée à gauche de la figure, suivie d'une relaxation précédant le détachement du nuage. La Figure 13b, pour une cavité ventilée, montre une très grande stabilité puisque la fluctuation n'est que de $\pm 5\%$ autour d'une moyenne de 55 cm^3 .

La Figure 13a permet en outre d'estimer une vitesse de condensation pendant la Phase B. En effet, si l'on considère l'écart entre les courbes en motifs blancs et noirs, on obtient pour la zone comprise entre ces courbes une pente sensiblement égale mais de signe opposé ($-3,3 \text{ l/s}$) à celle de la courbe de formation de la cavité attachée.



Figures 13 : Evolution du volume des cavités pour des poches naturelles (a) et ventilées (b) situées au dessus de l'aile

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une procédure d'analyse automatique d'images a été mise au point. Elle a permis d'exploiter des visualisations des interfaces limitant les cavités naturelles (vapeur) et ventilées, apparemment stables, obtenues au moyen de la vidéo rapide (6000 images par seconde). Les conclusions de cette analyse sont les suivantes.

a) Les cavités naturelles sont caractérisées par l'existence d'une quasi périodicité comportant essentiellement trois phases : la pénétration du jet rentrant qui aboutie au bord d'attaque est le phénomène précurseur du détachement de la cavité, celle-ci est transportée comme un nuage de bulles pendant que se produit la formation d'une nouvelle cavité à partir du bord d'attaque. Le débit de production de la vapeur au cours de la formation de la cavité est sensiblement égal au débit de vapeur qui se condense lorsque celle-ci est convectée en aval.

b) Les cavités ventilées n'ont pas de comportement périodique mais montrent l'existence d'ondes superficielles se propageant de l'amont vers l'aval à une vitesse proche de celle de l'écoulement non perturbé,

Il apparaît donc que les mécanismes déterminants de la cinématique des interfaces sont différents suivant qu'il s'agisse des cavités naturelles ou ventilées. Pour les premières, l'existence d'un jet rentrant entraîne la pulsation de la cavité. Pour les deuxièmes, l'évacuation continue de l'air injecté ne donne pas lieu à la formation d'un jet rentrant et rend les cavités plus "stables". La différence de débit d'air et de vapeur entre les deux types de cavité atteint un facteur 10. Cependant, du fait des vitesses sensiblement égales de vaporisation et de condensation, on peut émettre l'hypothèse qu'il existe un certain équilibre entre ces deux processus. Lorsque cet équilibre est rompu, c'est en faveur de la production de vapeur qui conduit à déstabiliser la poche par une augmentation de la pression dans la zone de fermeture laissant alors entrer une lame liquide qui vient décoller la cavité depuis le bord d'attaque. Si la compensation de la vaporisation et de la condensation est ainsi réalisée, on peut accepter un mécanisme similaire sur le plan thermique. Ceci ne remet donc pas en cause l'ordre de grandeur du débit de production de vapeur qui entre réellement en jeu dans l'effet thermique.

En tout état de cause, l'assimilation de l'interface moyenne des cavités naturelles à une plaque plane rugueuse sans gradient de pression n'a que peu de justification physique. Les résultats obtenus devraient permettre de proposer des modélisations plus satisfaisantes du point de vue physique.

Le travail doit se poursuivre par l'obtention, par cinématographie rapides (10000 images/s), d'images simultanées des poches vues de dessus et de côté. La meilleure définition des images cinématographiques et la plus grande vitesse de prise de vue doivent permettre de

mieux analyser les causes des instabilités et, en particulier, le comportement du jet rentrant. En profitant de l'existence du plan porteur avec un insert transparent, on envisage de mesurer les vitesses au voisinage de la paroi du profil sans traverser l'interface.

REFERENCES

- [1] FRUMAN D.H., BENMANSOUR I., SERY R., 1991 - "Estimation of the thermal effects on cavitation of cryogenic liquids." ASME FED-Vol. 109, Cavitation and Multiphase Flow Forum, Portland, pp. 93-96.
- [2] FRUMAN D.H., BEUZELIN F., 1992 - "Effets thermiques dans la cavitation des fluides cryogéniques.", La Houille Blanche, N° 7/8, pp. 557-561.
- [3] HORD J., 1972 - "Cavitation in liquid cryogenics : 2-Hydrofoil." NASA CR-2156.
- [4] LE Q., FRANC J.P., MICHEL J.M. 1993 - "Partial cavities : global behavior and mean pressure distribution." Journal of Fluids Engineering, Vol 115, pp. 243-248.
- [5] KAMONO H., KATO H., YAMAGUCHI H., MIYANAGA M., 1993 - "Simulation of cavity flow by ventilated cavitation on a foil section.", ASME FED-Vol. 153, Cavitation and Multiphase Flow, Washington DC, pp. 183-189.
- [6] MAIGA I.A., 1983 - "Etude théorique et expérimentale de la cavitation partielle sur un profil bidimensionnel.", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- [7] BONHOFF K., 1993 - "Recherche sur la morphologie et les caractéristiques hydrodynamiques d'une cavité de vapeur." Rapport de fin d'études, ENSTA - GPI.
- [8] MIQUEL J.C., 1985 - "La vidéo rapide." Colloque National en Visualisation et Traitement d'Images, Nancy, pp. 187-197.
- [9] STUTZ B.- REBOUD J.L., 1994 - " Experimental study of the two phase structure of attached cavitation.", ASME FED, Cavitation and Multiphase Flow Forum, Lake Tahoe, pp. 1-6.

