

4e JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

1, 2, 3 mars 1993 - Nantes

ETUDE EXPERIMENTALE DU DEFERLEMENT STATIONNAIRE DE
L'ONDE DE SURFACE ENGENDREE PAR LE DEPLACEMENT
D'UNE AILE BIDIMENSIONNELLE IMMERGEE

M. MORY - E. BARTHELEMY - L. DUBUS - O. GAY

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels / I.M.G. (CNRS - UJF - INPG)

et Laboratoire d'Hydraulique de France

BP 53X - 38041 GRENOBLE Cédex

Résumé

On considère expérimentalement le déferlement de l'onde générée par une aile bidimensionnelle immergée tractée à vitesse constante sous la surface libre. Les caractéristiques de l'onde sont régies par la forme de l'aile et sa corde, l'angle de l'aile α avec la direction du déplacement, la vitesse de déplacement C et la profondeur d'immersion h . Le principal paramètre considéré ici est la profondeur d'immersion. L'amplitude de l'onde augmente lorsque la profondeur d'immersion diminue et le déferlement se produit donc pour une profondeur d'immersion critique h_0 . Le déferlement est stationnaire, de type "spilling", c'est à dire que la surface libre s'écrête au sommet de l'onde, générant une masse air-eau mélangée en équilibre sur la face avant de l'onde. Ce travail reprend et prolonge les travaux expérimentaux de Duncan (1981,1983). En liaison avec les récents travaux théoriques de Cointe et Tulin (1992), les caractéristiques (amplitude et longueur d'onde) de l'onde résiduelle loin derrière l'aile sont étudiées. La comparaison avec les expériences de Duncan est effectuée au niveau des conditions critiques de déferlement. On détermine enfin la géométrie de la zone de déferlement.

Summary

Breaking of a wave produced by towing a submerged two-dimensional hydrofoil is considered from laboratory experiments. The properties of the wave are driven by the shape of the hydrofoil and its cord, its angle of attack α , the velocity C of the hydrofoil and the depth of submersion of the hydrofoil h . The effect of the depth of submersion is primarily considered. The steepness of the wave increases when the submersion depth decreases. Breaking occurs for a critical submersion depth h_0 . Breaking is stationary and of spilling type. The present work continues the experimental investigation by Duncan (1981,1983). In connection with the recent theoretical work by Cointe and Tulin (1992), the properties of the wave far from the hydrofoil (amplitude and wavelength) are considered. The comparison with Duncan's results is performed through the breaking criterion. The geometry of the breaking zone is finally determined.

1. Introduction

Le déplacement à vitesse constante d'une aile immergée produit une déformation de la surface libre. La déformation prend la forme d'une onde de célérité égale à la vitesse de l'aile loin derrière celle-ci. Pour le cas particulier où l'aile est un cylindre circulaire, Lamb (1932) a établi à partir d'une solution linéaire approchée que la longueur d'onde de l'onde loin du cylindre est

$$\lambda = 2\pi \frac{c^2}{g} \quad (1)$$

L'amplitude de la déformation de la surface libre dépend de plusieurs paramètres au nombre desquels sont la vitesse de déplacement c , la géométrie de l'aile et sa corde, ainsi que la profondeur d'immersion h .

La présente étude considère le déferlement de l'onde produite à l'arrière de l'aile. Ce déferlement, lorsqu'il se produit, est stationnaire et de type "spilling": l'onde s'écrête à son sommet en générant une masse mélangée d'air et d'eau en équilibre sur la face avant de l'onde. Ce type de déferlement se distingue du déferlement plongeant, qui s'opère par enroulement de la surface libre de l'onde.

Les objectifs de cette étude sont précis. Il s'agit tout d'abord d'un travail expérimental, faisant suite et complétant les expériences réalisées par Duncan (1981, 1983). Les travaux de Duncan se sont plus particulièrement attachés à préciser les conditions de déferlement et à quantifier la part du phénomène de déferlement dans la résistance exercée sur l'aile. Récemment, cette configuration expérimentale fut étudiée théoriquement par Cointe et Tulin (Cointe, 1987; Cointe et Tulin, 1992). Ce travail visait à formuler mathématiquement la perturbation associée au déferlement (champ de pression et cisaillement dûs à la masse déferlante). Le calcul numérique de l'onde derrière une aile immergée dépend crucialement des perturbations exercées par le déferlement. La qualité du modèle numérique dépend du degré d'exactitude de la modélisation du déferlement. Les principales caractéristiques de la modélisation de Cointe et Tulin sont les suivantes:

(i). l'analyse dimensionnelle montre que la masse déferlante de mélange air-eau est en équilibre hydrostatique sur la face avant de l'onde. La pression exercée par la masse déferlante sur l'écoulement à surface libre est localement égale au poids de la colonne d'eau. Ce poids est connu dès lors que la géométrie de la masse déferlante et la densité du mélange air-eau sont déterminées.

(ii). la masse déferlante étant stationnaire, le cisaillement exercé par l'onde sur la masse déferlante équilibre la composante de la force de gravité selon la direction du cisaillement.

(iii). la couche de cisaillement séparant la zone de déferlement de l'écoulement potentiel à l'intérieur du fluide modifie l'onde à l'arrière de l'aile. Elle se prolonge sous la surface libre derrière la zone de déferlement par une couche limite de type sillage. La longueur d'onde s'en trouve modifiée à l'arrière de l'onde. S'inspirant d'une analyse de Longuet-Higgins (1969), Cointe et Tulin prédisent que la longueur d'onde est:

$$\lambda = 2\pi \frac{c^2}{g} \frac{1}{1 + 2 \frac{g \Delta}{c^2}} \quad (2)$$

Δ est une échelle de longueur, de l'ordre de l'épaisseur de déplacement du sillage, longueur inconnue en l'état actuel des résultats expérimentaux.

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article visent à répondre à deux types de questions suscitées par les résultats théoriques de Cointe et Tulin:

1. déterminer la géométrie de la zone de déferlement. Cette donnée est inséparable de la détermination de la densité du mélange air-eau dans la zone déferlante. Compte-tenu de grandes difficultés expérimentales, la densité du mélange air-eau n'a pas été mesurée. Le Contrat S.T.C.A.N./B.A. dans le cadre duquel ce travail a été effectué se limite à une étude prospective des méthodes de mesure envisageables. Nous ne reprenons pas ici ce travail bibliographique contenu dans le rapport de contrat (Mory, Barthelemy, Dubus et Gay, 1992)

2. préciser l'influence du déferlement sur les caractéristiques résiduelles de l'onde loin derrière l'aile immergée (longueur d'onde, amplitude).

Les travaux de Duncan (1981,1983) fournissent de nombreux résultats expérimentaux sur le déferlement de type spilling. Les mêmes caractéristiques expérimentales ont été retenues de façon d'une part à disposer d'éléments de comparaison et d'autre part à fournir des données complémentaires à celles de Duncan. L'article contient trois parties. La première décrit l'installation expérimentale ainsi que les méthodes de mesure. La seconde partie présente quelques résultats expérimentaux sur les conditions critiques de déferlement, qui sont comparés aux résultats de Duncan. Cette partie contient également les résultats sur les caractéristiques de l'onde résiduelle loin derrière l'aile. La troisième partie est consacrée à la géométrie de la zone de déferlement.

2. Installation et méthodes expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans un canal du LEGI/IMG long de 36 m et large de 55 cm. La figure 1 montre un schéma du chariot de déplacement supportant l'aile et assurant son déplacement le long du canal.

L'installation expérimentale permet des conditions de fonctionnement identiques à celles de Duncan. L'aile immergée est dans les deux cas un profil bidimensionnel NACA 0012 de corde 20 cm. L'envergure de 52 cm est fixée par la largeur du canal. Cette valeur est très proche de celle de Duncan. L'angle de l'aile avec le plan horizontal parallèle à la direction de déplacement de l'aile peut être fixé à toute valeur comprise entre -15° et $+15^\circ$. La gamme de vitesse de déplacement de l'aile (0 à 1,2 m/s) correspond à la gamme explorée par Duncan.

Duncan avait opté pour un système mécanique de traction immergé en totalité. L'aile reposait sur un chariot, lui même fixé sur un rail reposant au fond du canal. La traction était assurée par un câble mobile le long du rail. Nous avons choisi un système de traction différent. Le canal étant équipé d'un chemin de roulement fixé sur ses montants latéraux, le chariot fut conçu pour se déplacer au dessus du canal. Il supporte l'aile par l'intermédiaire de deux plaques transparentes en altuglas de 1 cm d'épaisseur chacune, laissant deux entrefers de 0,5 cm de largeur entre elles et les parois du canal. La vue de côté de l'installation expérimentale (figure 1b) montre que ces plaques traversent la surface libre. La profondeur d'immersion de l'aile est fixée en montant ou descendant les plaques. Notre choix de placer le chariot de traction à l'extérieur de l'eau était suggéré par l'équipement du canal et par le souci de simplifier la mécanique de l'installation expérimentale. La réalisation et la traction d'un support immergé est délicate sur le plan de la mise en oeuvre et du réglage. La puissance requise est de plus importante. En revanche, l'utilisation d'un chariot hors de l'eau ramène la puissance nécessaire pour tracter l'aile à environ 100W. Nous avons donc pu utiliser un moteur pas à pas (moteur de type CX 106-178 de la marque Parker) piloté par un indexeur programmable pour assurer le déplacement du chariot. Le chariot est rendu entièrement autonome par l'alimentation embarquée assurée par un ensemble de quatre batteries (4 x 12 V) alimentant le moteur et l'indexeur. Les séquences de déplacement du chariot sont programmées sur un micro-ordinateur puis transférées sur l'indexeur par une liaison RS232, déconnectée après stockage du programme par l'indexeur. Le démarrage du chariot s'effectue par actionnement d'un interrupteur sur le chariot. Ces choix techniques procurent les avantages du moteur pas à pas (précision des déplacements, simplicité de la programmation) et éliminent toutes les difficultés mécaniques liées à la traction de câbles d'alimentation électrique ou à l'emploi de câbles de traction. En revanche, les plaques supportant l'aile produisent en traversant la surface libre des ondes de Kelvin tridimensionnelles qui se superposent à l'onde bidimensionnelle générée par l'aile. L'influence de ces ondes est discutée dans la partie 3.

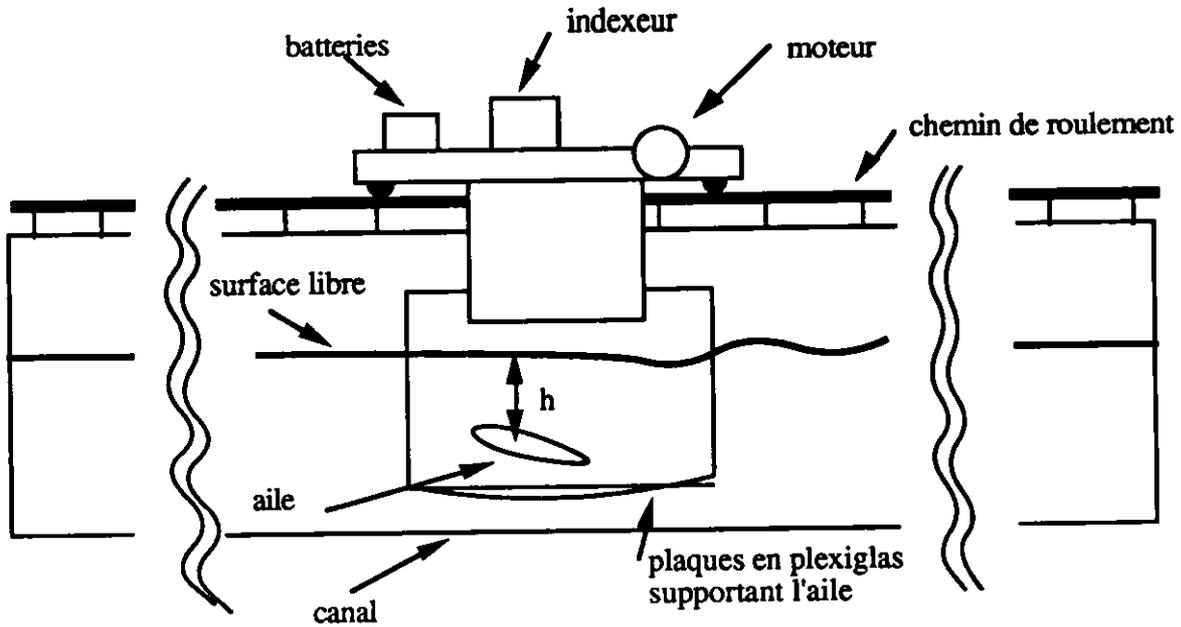


Figure 1a: Schéma de l'installation expérimentale.

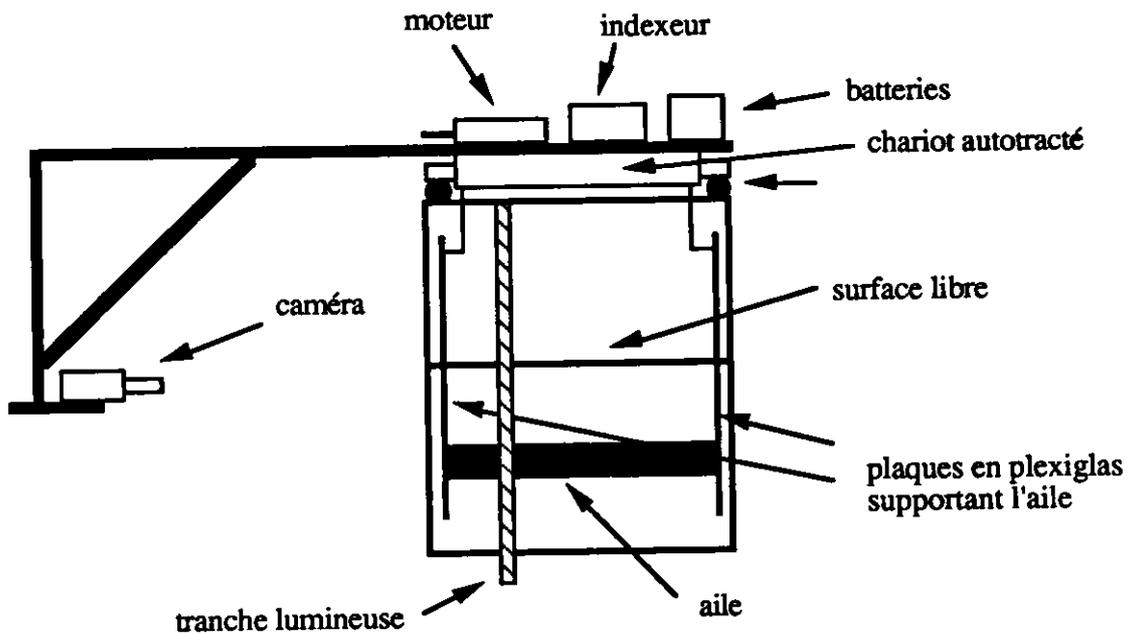


Figure 1b: Vue en coupe de l'installation expérimentale et principe des visualisations.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus à partir de visualisations filmées par une caméra SONY Vidéo Hi8 PRO. Cette caméra dispose d'un obturateur permettant de régler la durée d'exposition de chaque image entre 1/50s et 1/4000s. Des images vidéo précises sont ainsi obtenues. Pour déterminer la géométrie de la zone de déferlement (partie 4), la caméra est déplacée avec le chariot mobile. La zone de déferlement est visualisée dans une tranche lumineuse de 5 cm d'épaisseur, la diffusion de la lumière étant fortement accentuée par la présence de bulles dans la zone de déferlement. Pour déterminer les caractéristiques des ondes résiduelle (partie 3), la caméra est fixe et filme les déformations de la surface libre au passage et

derrière le chariot. Les caractéristiques de l'onde (amplitude et longueur d'onde) sont mesurées par la trace de la surface libre sur la paroi du canal.

3. Comparaison avec les expériences de Duncan au voisinage du seuil de déferlement et caractéristiques de l'onde résiduelle

Les conditions expérimentales choisies pour comparer nos résultats à ceux de Duncan correspondent à celles de la figure 3 de son article publié dans le *J. Fluid Mech.* (1983). L'angle d'incidence du profil est de 5° et la vitesse de translation de 0,8 m/s. Les conditions critiques de déferlement sont déterminées en effectuant l'expérience pour diverses hauteurs d'eau. Dans tous les cas l'aile reste à une distance de 17,3 cm du fond du canal. Seule varie la profondeur d'immersion du profil. Pour le même profil, la même vitesse et le même angle d'incidence, Duncan a observé l'apparition du déferlement lorsque la profondeur d'immersion de l'aile vaut 19,3 cm. Cette profondeur critique varie expérimentalement légèrement (environ 0,5 cm) selon les perturbations parasites que la surface libre peut subir.

Nous présentons nos résultats expérimentaux pour les profondeurs d'immersion de l'aile valant respectivement $h = 15,9$ cm, 19,3 cm, 21 cm, 23,7 cm et 26 cm et 30,3 cm. La comparaison avec les résultats de Duncan est effectuée de deux façons:

(i). par relevé des conditions critiques de déferlement. Hormis les cas pour lesquels le déferlement est intense, la visualisation de l'onde dans un plan vertical apporte peu de renseignements sur le déferlement. Nous avons donc visualisé la surface libre dans un plan horizontal à l'aide d'un appareil photo fixée sur le chariot et regardant la surface libre par le dessus. Le fond du canal est marqué par des bandes blanches parallèles à la direction du déplacement. Dans le référentiel lié à l'aile, les déformations de la surface libre s'accompagnent d'une déformation de l'image des bandes blanches vues par l'appareil photo. L'observation de ces déformations permet de repérer les zones dans le plan horizontal où l'onde déferle. On obtient ainsi une excellente estimation, bien que qualitative, du degré de bidimensionnalité de l'onde.

(ii). par relevé du profil de dénivellation de la surface libre à l'arrière de l'aile. Ce relevé est également effectué par analyse d'images. La caméra vidéo, placée en un point fixe, filme la dénivellation de la surface libre sur la paroi du canal pendant et après le passage de l'aile. Le profil de la surface est digitalisé numériquement, tracé, puis comparé aux résultats de Duncan (1983). Les résultats obtenus sur les caractéristiques résiduelles de l'onde (amplitude et longueur d'onde) sont également comparés aux prédictions de Cointe et Tulin (1992).

Nous présentons sur la figure 2 les visualisations de l'onde dans le plan horizontal pour différentes conditions expérimentales typiques. Les photographies, prises dans le référentiel lié à l'aile, mettent clairement en évidence les deux systèmes d'onde générés par le déplacement de l'aile et de son support, à savoir, d'une part l'onde bidimensionnelle générée par l'aile sous-marine, et d'autre part les ondes tridimensionnelles de Kelvin produites par les plaques qui traversent la surface libre le long des parois du canal pour supporter l'aile. L'amplitude des ondes tridimensionnelles varie peu avec la profondeur d'immersion de l'aile; elle dépend principalement de l'épaisseur des plaques et de la vitesse de déplacement. En revanche, l'amplitude de l'onde bidimensionnelle produite par l'aile augmente sensiblement lorsque diminue la profondeur d'immersion.

L'effet des ondes de Kelvin est faible lorsque l'aile est suffisamment proche de la surface libre (Figure 2c, $h = 19,3$ cm). L'onde déferle à l'arrière de l'aile. Les limites de la zone de déferlement dans la direction parallèle au déplacement varient peu perpendiculairement aux parois du canal. Le déferlement est pratiquement bidimensionnel. Lorsque l'aile est plus distante de la surface libre (Figures 2a et 2b), l'amplitude de l'onde bidimensionnelle diminue et, relativement, les ondes de Kelvin deviennent plus visibles. Pour la profondeur d'immersion la plus grande ($h = 30,3$ cm, Fig. 2a), l'onde de Kelvin domine, mais ne donne pas lieu au déferlement. Pour $h = 23,7$ cm (Figure 2b), un déferlement de type "spilling" se produit sur la crête des ondes de Kelvin. Lorsque la profondeur d'immersion passe de 23,7 cm à 19,3 cm, les

deux zones de déferlement sur les crêtes des ondes de Kelvin s'alignent rapidement et le déferlement devient bidimensionnel.



2a: $h = 30,3$ cm.



2b: $h = 23,7$ cm.



2c: $h = 19,3$ cm.

Figure 2: Visualisations dans le plan horizontal du déferlement de l'onde produite par le déplacement d'une aile sous-marine.
Vitesse de déplacement 0,8 m/s, angle d'incidence 5° , h est la profondeur d'immersion.

Les ondes de Kelvin tridimensionnelles produites par les plaques traversant la surface libre pour supporter l'aile modifient fortement les conditions critiques d'apparition du déferlement. Les conditions critiques de déferlement observées par Duncan ne sont pas retrouvées par nos expériences. Cette différence est clairement mise en évidence par la Figure 2c ($h = 19,3$ cm) qui correspond à la condition critique de déferlement obtenue par Duncan. Les plaques supports qui traversent la surface libre sont responsables des écarts importants relevés avec l'expérience de Duncan. Il paraît délicat de réduire l'épaisseur des plaques sans nuire à la rigidité du support ni induire d'éventuels problèmes de vibration. Un raisonnement d'analyse dimensionnelle suggère que l'amplitude des ondes tridimensionnelles varie avec la racine carrée de l'épaisseur des plaques. L'épaisseur des plaques support devrait donc être ramenée à 2,5 mm pour réduire d'un facteur 2 l'amplitude des ondes de Kelvin. D'autres solutions sont à l'étude, qui feraient traverser la surface libre par les plaques supports à l'arrière de la zone de déferlement.

Nous montrons sur la figure 3 le profil de la dénivellation de la surface libre à l'arrière de l'aile. La dénivellation est relevée visuellement sur la paroi latérale du canal que regarde une caméra fixe. On digitalise sur les images vidéo la position de la surface libre à l'aide d'un digitaliseur d'images d'image vidéo FOR-A (type IV-560). L'appareil permet une discrétisation de l'image en 720 pixels pour la direction horizontale et en 540 pixels pour la direction verticale. La dénivellation de la surface libre étant faible comparée à la longueur d'onde (1 cm environ à comparer à 40 cm), il est nécessaire de réduire le champ en rapprochant la caméra des parois du canal pour numériser avec précision la position de la surface libre. Chaque image ne contient donc que environ une demie longueur d'onde. Les courbes complètes de dénivellation de la surface libre sont reconstituées sur la Figure 3 en "collant" les courbes numérisées à partir d'images successives séparées par des décalages temporels égaux à la largeur de l'image divisée par la vitesse de déplacement. Ces procédures de "collages" expliquent les petites irrégularités relevées à intervalles réguliers sur les courbes de la Figure 3.

La figure 3 précise et quantifie les conclusions tirées de la figure 2. On constate en premier lieu l'aspect irrégulier de l'onde derrière l'aile. Cette irrégularité est très forte lorsque la profondeur d'immersion de l'aile est la plus grande ($h = 30,3$ cm, Figure 3a). Lorsque la profondeur d'immersion diminue, la variation de l'amplitude de l'onde apparaît comme une modulation régulière de l'amplitude. Pour sa part, Duncan observait derrière l'aile, pour les conditions expérimentales sans déferlement, une onde bidimensionnelle régulière d'amplitude quasi-constante, mais ses tracés ne montrent généralement que les trois ou quatre premières longueurs d'onde. Nous attribuons l'irrégularité que nous observons aux ondes de Kelvin tridimensionnelles produites par les plaques supports. L'importance relative des ondes de Kelvin par rapport à l'onde bidimensionnelle produite par l'aile croissant lorsque la profondeur d'immersion diminue, il est donc bien logique d'observer des irrégularités plus forte pour $h = 30,3$ cm. Comme pour les résultats de Duncan (1983), le train d'onde est très déformé pour la plus faible profondeur d'immersion (Figure 3f, $h = 15,9$ cm). Pour ces conditions expérimentales le déferlement est très important (la géométrie de la zone de déferlement est étudiée pour des conditions expérimentales voisines dans le §4). L'amplitude des ondes à l'arrière de la zone de déferlement est très faible.

La deuxième constatation tirée de la figure 3 est la faible amplitude des ondes produites par l'aile. Pour une profondeur d'immersion de 21 cm, Duncan obtenait une amplitude de l'onde (crête à creux) proche de 4 cm (pour ces conditions expérimentales l'onde ne déferle pas dans les expériences de Duncan). Cette valeur est deux fois supérieure aux valeurs que nous obtenons dans le même cas. Ceci corrobore nos observations de déferlement plus intenses et plus fréquents résultant de la présence des ondes de Kelvin.

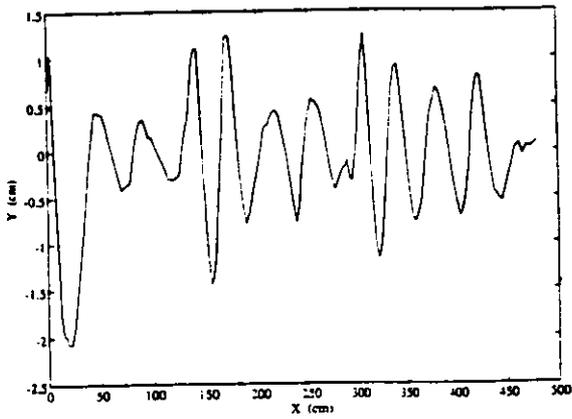
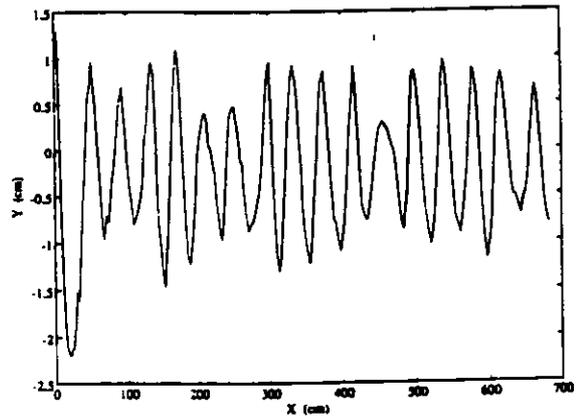
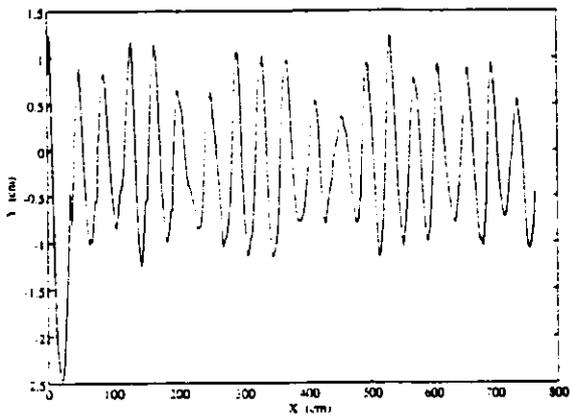
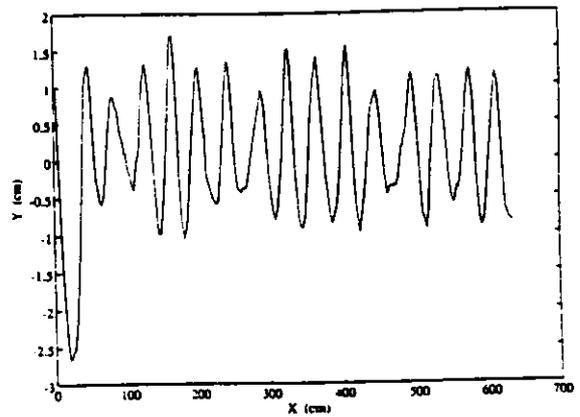
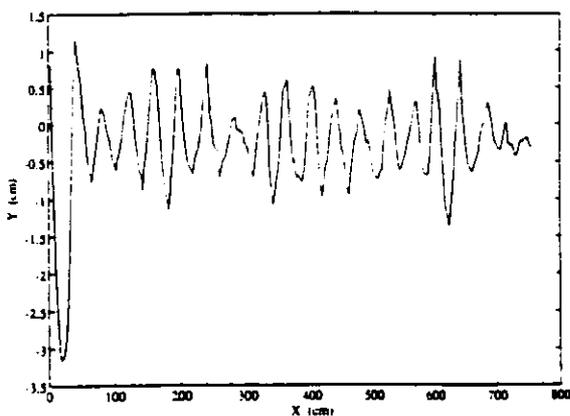
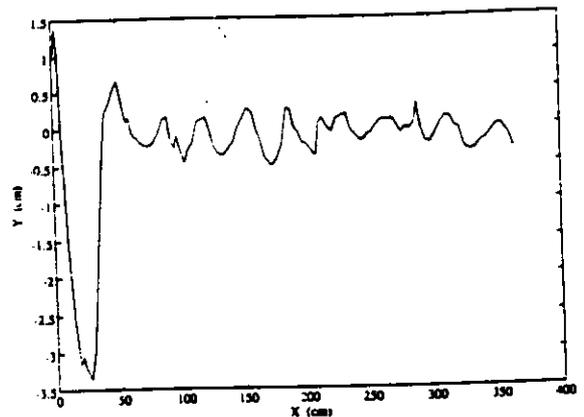
3a: $h = 30,3$ cm.3b: $h = 26$ cm.3c: $h = 23,7$ cm.3d: $h = 21$ cm.3e: $h = 19,3$ cm.3f: $h = 15,9$ cm.

Figure 3: Dénivellation de la surface libre produite par le déplacement d'une aile sous-marine. Vitesse de déplacement 0,8 m/s, angle d'incidence 5° , h est la profondeur d'immersion.

Les trains d'ondes tracés sur la figure 3 possèdent une longueur d'onde relativement régulière (excepté le cas de la Figure 3f). Nous avons estimé la longueur en mesurant la distance entre deux crêtes successives pour chacune des conditions expérimentales de la figure 3. Pour chaque expérience, excepté celle correspondant à la Figure 3f, qui correspond à un cas de déferlement intense et pour laquelle il est bien difficile d'estimer une longueur d'onde, sont ainsi calculés la valeur moyenne de la longueur d'onde et l'écart type des mesures par rapport à la valeur moyenne. Les résultats de ce calcul statistique sont résumés sur le Tableau 1. Il est intéressant de remarquer que la valeur de moyenne de la longueur d'onde est très proche de la longueur d'onde en profondeur infinie des ondes linéaires de vitesse de phase égale à la célérité de l'aile. Cette dernière longueur d'onde, qui correspond au résultat de Lamb (Eq. 1), vaut 41 cm pour les conditions expérimentales considérées dans ce paragraphe. Compte-tenu des importantes perturbations causées par les ondes de Kelvin, aucun effet significatif du sillage de la zone de déferlement sur la longueur d'onde ne peut être estimé. Les prédictions théoriques de Cointe et Tulin (1992) (eq. 2) ne peuvent pas être testées en l'état actuel de nos résultats expérimentaux.

h	longueur d'onde moyenne	écart type
30,3 cm	41,5 cm	6,2 cm
26,0 cm	41,1 cm	3,4 cm
23,7 cm	40,6 cm	4,1 cm
21,0 cm	40,1 cm	4,1 cm
19,3 cm	40,8 cm	3,8 cm

Tableau 1: Statistique sur la longueur d'onde du train d'onde à l'arrière de l'aile.
Les conditions expérimentales sont celles de la Figure 3: $C = 0,8$ m/s, $\alpha = 5^\circ$.

4. Géométrie de la zone de déferlement

Les visualisations dans un plan vertical permettent de déterminer les contours de la zone de déferlement avec une précision satisfaisante. Il est nécessaire, pour obtenir des informations significatives, de choisir des conditions expérimentales pour lesquelles le déferlement est important, puisque les théories dans le cadre desquelles nous nous plaçons sont bidimensionnelles. Par ailleurs, les dimensions de la poche mélangée air-eau ne peuvent être déterminées avec précision que si son épaisseur est suffisamment grande par rapport à sa longueur. Nous présentons dans ce paragraphe un exemple à partir duquel nous exposons le principe de l'analyse et nous en démontrons la faisabilité.

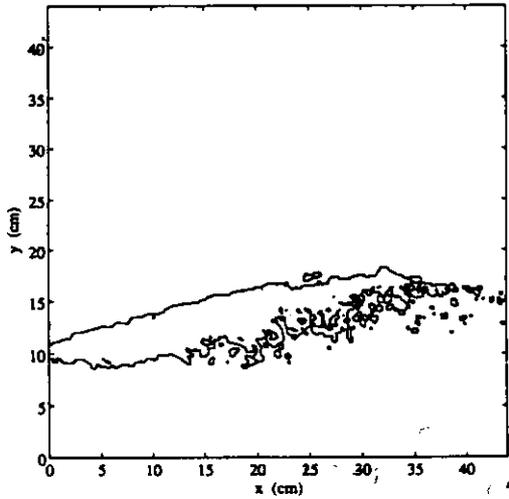
Comme nous l'avons succinctement expliqué dans le paragraphe 2, les visualisations dans le plan vertical sont effectuées par une caméra vidéo SONY Hi8 PRO, fixe dans le référentiel lié à l'aile. La durée d'exposition de chaque image est fixée à $1/1000$ s et le film contient 25 images/s. La séquence analysée correspond à une courte période d'une expérience. Les images sélectionnées pour être analysées sont prises lorsque l'aile se situe dans une section du canal où la zone de déferlement est traversée par une tranche lumineuse de 5 cm d'épaisseur parallèle au plan d'observation (voir Figure 1b). La présence des bulles fait apparaître la zone de déferlement de façon très lumineuse sur les images.

Les images sélectionnées sont numérisées par une carte d'acquisition sous la forme d'images 512×512 . La procédure numérique du traitement d'image ne fait appel qu'à des procédures simples et standards:

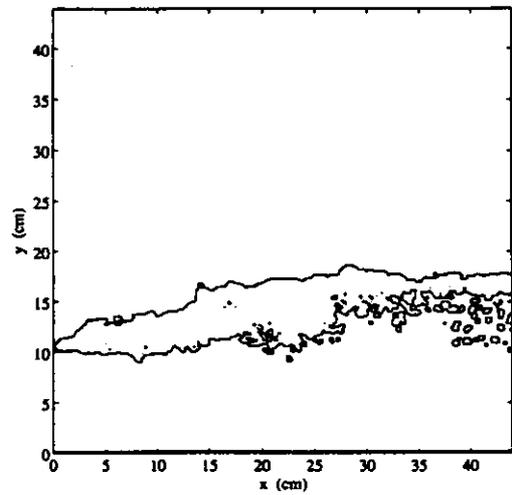
1. les images digitalisées sont binarisées. Cette étape dépend d'une appréciation qualitative de l'opérateur de ce qui fait partie de la zone de déferlement et de ce qui n'en fait pas partie. L'opérateur doit indiquer un niveau de gris au delà duquel tout pixel est considéré comme étant dans la zone de déferlement et en deça duquel tout pixel est considéré comme étant hors de la zone de déferlement. Le logiciel de traitement d'image est suffisamment interactif



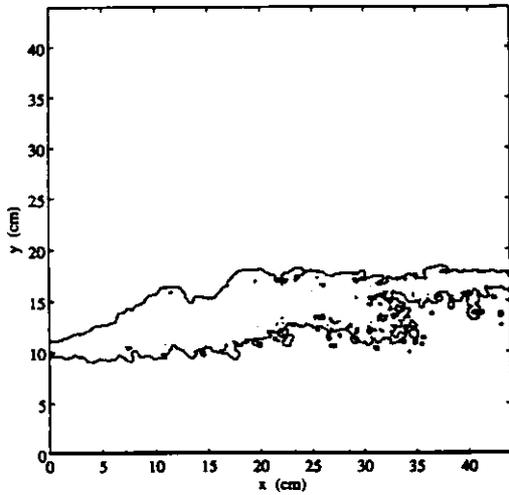
(4a).



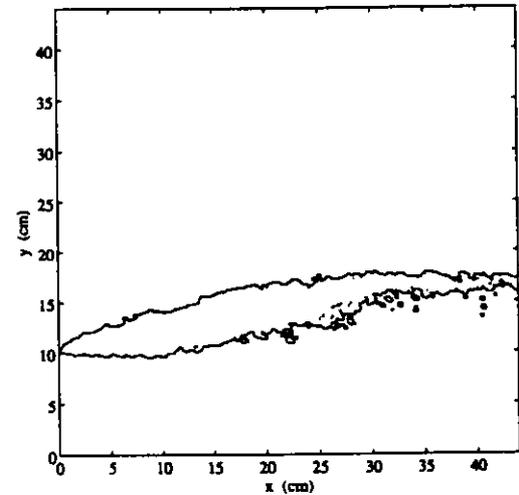
(4b).



(4c).



(4d).



(4e).

Figure 4: Géométrie de la zone de déferlement.

Conditions expérimentales: $C = 1$ m/s, $\alpha = 10^\circ$, hauteur de l'aile par rapport au fond 19 cm, profondeur d'immersion $h = 14$ cm.

(4a): Visualisation de la zone de déferlement dans un plan vertical.

(4b), (4c), (4d): Contours instantanés de la zone de déferlement. (4b) est le résultat pour (4a). (4c) et (4d) sont séparés de (4b) par des intervalles de temps respectifs de 6/25 s et 9/25 s.

(4e): Contour de la zone de déferlement moyenné sur un ensemble de 8 images.

pour permettre une détermination fine du seuil de binarisation. La qualité de la procédure de binarisation dépend directement du contraste affecté à la zone de déferlement.

2. les contours de la zone binarisée sont calculés numériquement et tracés. Les tracés font généralement apparaître plusieurs contours: la poche de déferlement d'une part, et des chapelets de grosses bulles éjectées à l'arrière de la zone de déferlement.

La procédure de traitement d'image est appliquée à des images uniques ainsi qu'à des images correspondant à la moyenne de plusieurs images. Le traitement d'images moyennées donne une estimation du contour moyen de la zone de déferlement. Il permet également, par comparaison avec les images instantanées, d'estimer le degré de stationnarité du déferlement.

Nous présentons sur la Figure 4 un exemple de visualisation de la zone de déferlement dans un plan vertical ainsi que les tracés de quatre contours de la masse mélangée air-eau en équilibre sur la face avant de l'onde. Trois de ces contours sont des contours instantanés (Figures 4b, 4c et 4d). Le contour (4b), qui correspond à la photographie (4a), montre la fiabilité de la procédure numérique d'extraction des contours. Le traitement numérique des images n'utilise que des procédures standards d'analyse d'image et, en particulier, ne met en oeuvre aucun filtrage. Ceci n'est possible que grâce à la bonne qualité des images, notamment sur le plan de contraste. Les contours (4c) et (4d) correspondent à des images postérieures à (4b). Les écarts de temps sont relativement faibles, respectivement 6/25 s entre (4b) et (4c) et 3/25 s entre (4c) et (4d). La comparaison des trois contours instantanés donne la mesure de l'instantanéité de l'écoulement. La photographie (4a) et le contour (4b) montrent déjà que la zone de mélange air-eau injecte des bulles dans l'écoulement potentiel à l'arrière de la zone de déferlement. La densité de ces bulles reste faible, de sorte que le taux de vide est probablement proche de zéro. Les contours (4c) et (4d) montrent un phénomène de lâcher de tourbillon vers l'aval à la base de la zone de déferlement. Ce phénomène, périodique, injecte à intervalles de temps réguliers des grappes de bulles importantes dans l'écoulement potentiel. Phénoménologiquement, l'éjection de ces tourbillons est une conséquence logique de la dynamique de couche de mélange que Cointe et Tulin (1992) prédisent à l'interface entre la zone de déferlement et l'écoulement potentiel. En revanche, l'éjection de tourbillons met en question le caractère stationnaire du déferlement. Il est toutefois possible de définir sans ambiguïté le contour moyen de la zone de déferlement, comme celui tracé sur la figure (4e). La procédure de moyennage d'images permet de filtrer les bulles isolées et les tourbillons injectés dans l'écoulement potentiel. Une moyenne de 8 images donne déjà des résultats probants. On remarque que la zone de déferlement est relativement allongée et ne possède pas, comme le supposent Cointe et Tulin (1992), une pente très raide à l'avant de la poche. Le concept de perte de charge singulière utilisé dans leur modèle phénoménologique est apparemment une modélisation très brutale du phénomène.

4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de prolonger les travaux expérimentaux de Duncan (1981, 1983) en précisant notamment l'effet du déferlement de type spilling sur les caractéristiques des ondes produites par une aile immergée en translation et en déterminant la géométrie de la zone de déferlement.

Notre installation expérimentale est de conception plus simple que celle de Duncan, mais elle donne lieu à des phénomènes plus complexes. Les plaques qui supportent l'aile engendrent des ondes de Kelvin en traversant la surface libre, qui se superposent à l'onde bidimensionnelle produite par l'aile sous-marine. Les ondes de Kelvin, tridimensionnelles, dominent lorsque la profondeur d'immersion augmente. A cause de la présence des ondes de Kelvin, les conditions critiques de déferlement obtenues par Duncan ne sont pas retrouvées dans notre expérience, les ondes de Kelvin déferlant avant que ne déferle l'onde bidimensionnelle. La longueur d'onde des déformations de la surface libre à l'arrière de la zone de déferlement est centrée autour de la longueur d'onde des ondes linéaires en profondeur infinie de vitesse de phase égale à la célérité de l'aile. L'onde est d'autant plus modulée en amplitude que la profondeur d'immersion augmente et que l'importance relative des ondes de Kelvin s'accroît. En modifiant les conditions critiques de déferlement, les ondes de Kelvin

réduisent d'un facteur deux l'amplitude de l'onde à l'arrière de l'aile par rapport aux résultats de Duncan.

L'influence des ondes de Kelvin diminue lorsque la profondeur d'immersion diminue; notre installation expérimentale produit des déferlements bidimensionnels de type spilling lorsque la profondeur d'immersion est suffisamment faible. La géométrie moyenne de la zone de déferlement est déterminée avec précision. Elle diffère sensiblement de la géométrie introduite dans le modèle théorique de Cointe et Tulin (1992), notamment à l'avant de la poche de déferlement. L'analyse des contours instantanés de la poche de déferlement montre également une instationnarité de la poche de déferlement liée à la structure de couche de mélange de l'interface séparant la poche de déferlement de l'intérieur du fluide.

Ce sujet de recherche a débuté récemment; les résultats présentés ici servent principalement à tester l'installation expérimentale et les méthodes de mesures. L'installation fonctionne parfaitement sur le plan technique mais nécessite d'être améliorée pour réduire l'influence des ondes de Kelvin non négligeable ne se poursuit dans deux directions. Nous travaillons dans ce sens. Nous poursuivons également l'analyse des résultats sur la géométrie de la poche de déferlement en le comparant plus finement aux résultats de Duncan (1983) et au modèle de Cointe et Tulin (1992).

Remerciements: Ce travail a été réalisé dans le cadre du contrat S.T.C.A.N./B.A. N°S917704213. Nous sommes redevables à R. Cointe de ses conseils scientifiques et à J.M. Usseglio-Polaterra de la prise en charge administrative de ce contrat par le LHF. Nous remercions également MM. Bigillon et Picaud pour leur assistance technique.

Références

- COINTE R. (1987) "A theory of breakers and breaking waves", PhD Thesis, University of California, Santa Barbara.
- COINTE R. & TULIN M.P. (1992) "A theory of steady breakers", soumis au J. Fluid Mech.
- DUNCAN J. (1981) "An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil", Proc. R. Soc. London, vol A 377, pp. 331-348.
- DUNCAN J. (1983) "The breaking and non breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil", J. Fluid Mech., vol 126, pp. 507-520.
- LAMB H. (1932) "Hydrodynamics", Dover Publications.
- MORY M., BARTHELEMY E. & DUBUS L. (1992) "Etude du déferlement", Rapport de contrat S.T.C.A.N./BA passé auprès du LHF
- LONGUET-HIGGINS M.S. (1969) "Action of a variable stress at the surface of water waves", The Physics of Fluids, Vol. 12, pp. 737-740.