Méthodes de visualisation des écoulements hydrauliques

Hydraulic flow visualisation methods

PAR H. WERLÉ,

INGÉNIEUR DE RECHERCHES A L'O.N.E.R.A.

Le laboratoire des Analogies hydrauliques de l'O.N.E.R.A. exploite différents dispositifs et méthodes destinés à la visualisation de l'écoulement autour des maquettes.

Ces moyens expérimentaux ont permis, comme le prouvent les exemples de résultats présentés (), d'apporter une contribution qualitative, et même quantitative, à des recherches fondamentales de mécanique des fluides, principalement en aérodynamique (décollements, tourbillons, jets, etc.). Leur domaine d'application peut être étendu à des études telles que : diffuseurs, prises d'air, hélices, etc.*

(*) Cet article résume l'exposé et les films présentés au cours de la session de mars 1963 du Comité Technique de la S.H.F.

Various methods and arrangements for the visual observation of flows around models are in use at the O.N.E.R.A. hydraulic Analogy laboratory.

As confirmed by the examples given of results obtained (), they have enabled qualitative—and even quantitative—contributions to be made to basic fluid mechanics research, especially in aerodynamics (separation, vortices, jets, etc.). Their application can also be extended to cover research on diffusers, air intakes, propellers, etc.*

(*) This article gives a summary of a conference given and of the films shown at the March 1963 meeting of the Technical Committee of Société Hydrotechnique de France.

L'observation des phénomènes aérodynamiques grâce à la visualisation facilite l'analyse et la compréhension du mécanisme de l'écoulement autour des maquettes. L'expérimentation dans l'eau permet de procéder à de telles études plus simplement et plus rapidement que dans l'air. C'est pour ces raisons et dans ce but que se poursuit l'exploitation, à l'O.N.E.R.A., d'un certain nombre de dispositifs hydrauliques utilisés pour la visualisation des écoulements.

La cuve étroite pour l'étude des écoulements visqueux [1]

Cette cuve fonctionne par gravité. Elle comporte une veine très étroite (distance entre parois : 1 mm). La visualisation est assurée par des émissions colorées. L'écoulement observé aux nombres de Reynolds très faibles ($Re \approx 10$) contourne sans décoller les obstacles qu'il ren-

contre, quelles que soient leur forme et leur configuration (fig. 1).

La cuve hydraulique pour l'étude des phénomènes supersoniques [2]

Le fonctionnement de cette cuve est basé sur l'analogie bien connue entre l'écoulement supersonique bidimensionnel d'un gaz et celui d'une nappe d'eau à surface libre s'écoulant dans un canal dont le fond est horizontal. On sait que cette analogie correspond au cas d'un gaz fictif dont le rapport des chaleurs spécifiques serait $\gamma = 2$.

L'écoulement se fait par gravité (dimensions du canal : $1,30 \times 0,30$ m, hauteur utile : 0,06 m). Plusieurs montages optiques sont utilisés : un premier rappelle la méthode des ombres, un deuxième s'apparente aux méthodes interférentielles, un troisième constitue un procédé intermédiaire (fig. 2).

Le tunnel hydrodynamique pour l'étude des écoulements à basse vitesse [3]

Il s'agit d'une soufflerie à eau disposée verticalement et sans circuit de retour. Elle fonctionne par « rafales » sous l'action de la gravité. Son réservoir lui assure une durée d'essai de 2 mn à la vitesse normale de fonctionnement de 10 cm/s ($Re \approx 10^4$) dans la veine à section carrée (22×22 cm), (fig. 3).

Deux méthodes de visualisation ont été employées :

- les émissions colorées (mélange laiteux de densité égale à celle de l'eau) pour rendre visible l'écoulement au voisinage des maquettes (fig. 5, en bas);
- l'utilisation de bulles d'air obtenues grâce à un agent émulsionnant introduit dans l'eau au moment du remplissage du réservoir. Les bulles donnent l'aspect de l'écoulement dans de minces tranches transversales ou longitudinales de la veine (fig. 7; à gauche). Cette méthode précise même l'allure des vecteurs vitesse en projection sur le plan visualisé (cliché à temps de pose court, exemple au milieu de la figure 5). Elle révèle en outre le caractère de laminarité ou de turbulence de l'écoulement, en particulier celui de la couche limite (présence d'une couche vide de bulles en contact avec la paroi en cas de laminarité : fig. 4).

Exemples de visualisations obtenues au tunnel hydrodynamique

Un premier exemple concerne les décollements qui se manifestent le long d'une paroi [4]. L'écoulement laminaire le long d'une paroi incurvée constituant un divergent à pente élevée se distingue de l'écoulement observé le long d'une paroi plane par l'existence d'un décollement tangentiel de la couche limite au début de l'incurvation, suivi de l'apparition de la turbulence (fig. 4).

Un décollement généralisé de même type se développe en aval d'un important décrochement de paroi. Cependant, lorsque le décrochement est plus réduit, la zone décollée peut se refermer sur elle-même et de plus rester entièrement laminaire (fig. 5, en haut).

Un décollement localisé s'observe aussi en amont d'un ressaut de paroi. Il est le siège d'un tourbillon principal sans effet de source ou de puits lorsque l'écoulement est plan. Ce tourbillon devient tourbillon-puits à échappement transversal lorsque apparaissent des effets tridimensionnels, par exemple à la suite d'une réduction en envergure du ressaut (fig. 5, en bas).

La figure 6 illustre une étude des phénomènes d'interaction entre écoulements externe et interne à l'arrière d'un corps de révolution sans incidence [5]. Au culot droit d'un cylindre sans jet, on observe une zone de fluide mort à caractère laminaire. Plus en aval apparaît la turbulence qui assure l'homogénéisation progressive du sillage. Un jet axial d'intensité suffisante oblige les couches de fluide les plus proches à s'incurver vers l'axe et réduit de ce fait le sillage à une zone finie annulaire, siège d'un tourbillon torique stable.

Sur un corps fuselé, le fluide décolle peu après le maître-couple lorsque le soufflage est faible ou nul tandis qu'un jet intense élimine complètement le décollement.

La figure 7 concerne les décollements qui apparaissent sur les ogives [6]. Sur l'extrados d'une ogive profilée et fortement inclinée, on observe un décollement dont le caractère tourbillonnaire est nettement mis en évidence par l'enroulement des filets colorés émis à la surface du modèle et par l'aspect du pseudo-écoulement transversal visualisé par les bulles d'air.

Alors que ce type d'ogive n'est le siège d'aucun décollement à incidence nulle, une ogive à nez plus plat est marquée, à $i = 0^\circ$, par la présence d'un décollement localisé en « bourrelet » [6].

L'exemple suivant est tiré d'une étude systématique des phénomènes tourbillonnaires [7] et a pour sujet les tourbillons d'apex sur une aile delta mince à bord d'attaque aigu et avec incidence (fig. 8). Les essais au tunnel ont mis en

évidence le schéma de l'écoulement, de structure sensiblement conique, ainsi que les caractéristiques des tourbillons : leur position, l'évolution de la vitesse sur l'axe, la forme hélicoïdale des filets constituant leur noyau, leur éclatement sous l'effet de la turbulence, etc. L'expérience précise en outre l'influence, sur ces éléments, des paramètres d'écoulement, de configuration et de forme.

Un autre exemple concerne les essais d'une buse de captation schématisant une prise d'air bidimensionnelle en « écope » le long d'une paroi plane (fig. 9). Les visualisations font ressortir l'existence d'un régime d'adaptation de la prise sans décollement sur la lèvre d'entrée. En dehors d'un domaine autour de ce régime, on observe soit un décollement en bourrelet, soit un décollement généralisé, à l'intérieur ou à l'extérieur du modèle. Un modèle à lèvre arrondie possède évidemment un domaine d'adaptation plus large qu'un modèle à lèvre pointue. Un braquage de la lèvre permet d'adapter la forme de l'entrée à l'écoulement et d'étendre le domaine d'utilisation vers des régimes à débit d'entrée faible ou élevé. Dans ce dernier cas, une entrée secondaire sur le côté permet de réduire encore les décollements internes.

Enfin, les méthodes de visualisation adoptées se sont révélées utilisables même pour des hélices (fig. 10). Pour les essais d'une hélice carénée dans un diffuseur, le modèle a été monté dans la veine de manière à laisser subsister un écoulement périphérique (fig. 3). L'essai en présence d'un écoulement extérieur lent précise l'importance du tube de courant capté par le diffuseur, importance qui est en rapport direct avec l'efficacité de l'hélice. L'expérience révèle en outre l'existence d'un décollement turbulent à symé-

trie de révolution lorsque la pente du diffuseur est élevée. Suivant le régime de rotation de l'hélice, ce décollement se produit sur le diffuseur ou sur le moyeu central en raison de l'éclatement du flux de l'hélice.

Dans le cas d'une hélice non carénée placée face au vent, des émissions colorées en bout de pales mettent en évidence les tourbillons marginaux qui s'y développent. Une visualisation par bulles d'air donne un aspect plus global de l'écoulement dans le plan diamétral. Il en est de même pour un essai au point fixe près de la surface libre, marqué par un tourbillon trombe issu de la surface et induit par l'hélice.

Ces quelques exemples démontrent que les procédés adoptés pour l'étude des écoulements sont en mesure de couvrir un domaine d'application étendu et de contribuer ainsi à la résolution de nombreux problèmes de mécanique des fluides.

BIBLIOGRAPHIE - CINÉMATHEQUE

- [1] H. WERLÉ. — ONERA, article dans *La Recherche Aéronautique*, n° 79 (1960) et film T 355 a.
- [2] H. WERLÉ. — ONERA, publication n° 103 (1961) et film T 355 c.
- [3] H. WERLÉ. — ONERA, note technique n° 48 (1958) et film T 355 b.
- [4] H. WERLÉ. — ONERA, films T 329 OA et T 432 OA.
- [5] H. WERLÉ. — ONERA, note technique n° 61 (1960) et film T 401 OA.
- [6] H. WERLÉ. — ONERA, articles dans *La Recherche Aéronautique*, n° 70 (1959) et 90 (1962).
- [7] H. WERLÉ. — ATMA, communication à la session 1961 et film A 378 OA.

DISCUSSION

Président : M. CHAPOUTHIER

Sur la demande de M. le Président, M. WERLÉ précise que le premier film est un montage composite dont la première partie est consacrée à la cuve étroite en charge, la seconde partie au canal à surface libre et la troisième partie au tunnel hydrodynamique, lequel est disposé verticalement et comporte une veine fermée.

Le deuxième film a été entièrement tourné dans ce tunnel.

M. LEGENDRE confirme que l'infirmité de notre vue, soulignée par le Président, est le motif qui incite les aérodynamiciens à débrouiller l'étude des problèmes de mécanique des fluides par des observations d'écoulements d'eau.

M. Maurice Roy, qui a encouragé M. WERLÉ et largement exploité les procédés qu'il a développés, désire

mettre à la disposition des théoriciens un moyen de choisir ou critiquer les hypothèses de base de leurs calculs de mécanique des fluides, applicable aussi bien aux écoulements d'air qu'aux écoulements dans l'eau. L'observation de ces derniers écoulements, aux très basses vitesses évitant la turbulence, est très facile.

Ultérieurement, des caméras à grande vitesse permettent d'enregistrer des écoulements d'air en régime supersonique, mais les procédés utilisés pour rendre sensible les écoulements sont beaucoup moins directs que l'observation d'un courant d'eau et l'expérimentateur qui dépouille les films au ralenti interprète plus facilement s'il a appris à observer dans l'eau le phénomène qu'il doit étudier.

M. le Président remercie M. WERLÉ et M. LEGENDRE de leurs très intéressants exposés et de leurs magnifiques films, dont le dernier est inédit.

FIG. 1.

La cuve étroite pour la visualisation des écoulements visqueux.

A gauche, vue de la cuve disposée horizontalement, avec son miroir de prise de vues;

A droite, exemples d'écoulements ($Re \approx 10$) obtenus :

- le long d'une paroi plane avec obstacle anguleux (en haut);
- autour d'une ellipse avec une incidence de 25° (en bas).

FIG. 2.

La cuve à analogie hydraulique des phénomènes supersoniques.

A gauche, vue du canal horizontal à surface libre avec miroir de prise de vues;

A droite, écoulement autour d'un dièdre sans incidence ($M_0 \approx 4,5$),

De haut en bas :

- montage optique avec fond à teinte plate;
- montage optique avec fond à franges;
- montage optique avec fond à trois teintes.

FIG. 3. Le tunnel hydrodynamique à visualisation.

A gauche, vue du tunnel disposé verticalement;

A droite, maquettes d'essai :

- aile delta avec fuselage conique montée sur mât (en haut);
- hélice carénée dans un diffuseur (au milieu et en bas).

FIG. 4. Ecoulement le long d'une paroi continue ($R \approx 10^4$).

A gauche, visualisation par bulles d'air :

- de l'écoulement le long d'une paroi plane (en haut);
- de l'écoulement le long d'une paroi incurvée (en bas).

A droite, schéma relatif à la paroi incurvée :

1 : Lignes de courant. - 2 : Couche sans bulles d'air caractérisant une couche limite laminaire. - 3 : Décollement tangentiel. - 4 : Profil de vitesse. - 5 : Ligne de séparation. - 6 : Ligne de vitesse quasi nulle. - 7 : Transition. - 8 : Zone décollée turbulente.

FIG. 5.

Écoulement le long d'une paroi discontinue ($\theta \approx 10^\circ$).
De haut en bas :

- décollement limité en aval d'un petit décrochement;
 - décollement généralisé en aval d'un grand décrochement;
 - décollement limité en amont d'un ressaut;
 - décollement autour d'un ressaut d'envergure limitée.
- (Vue perspective de l'écoulement pariétal et vue en plan de l'écoulement au voisinage de la paroi. Visualisation par émissions colorées.)

FIG. 6.

Écoulement autour d'un culot avec jet ($V_j \approx 10 V_0$).
En haut, écoulement au culot droit d'un cylindre à incidence nulle sans jet (en haut) et avec jet (en bas);
Au milieu, schéma de l'écoulement avec jet :
1 : Culot droit. - 2 : Lignes de courant. - 3 : Frontière de la zone de mélange avec le jet. - 4 : Zone décollée annulaire à l'arrière du culot. - 5 : Tourbillon en forme de tore situé dans la zone 4;
En bas, écoulement à l'arrière d'un corps de révolution fuselé à incidence nulle, sans jet (en haut) et avec jet (en bas).

FIG. 7.

Écoulement autour d'une ogive ($R_0 \approx 0,6 \cdot 10^4$).

A gauche, en haut, décollement en bourrelet sur une ogive à nez plat sans incidence (plan diamétral);

A droite, écoulement autour d'une ogive profilée à 20° d'incidence (écoulement extérieur en haut, écoulement pariétal en bas);

A gauche, en bas, tranche d'écoulement transversale à l'extrémité de l'ogive précédente.

FIG. 8.

Écoulement autour d'une aile delta très mince avec incidence ($R_1 \approx 2 \cdot 10^4$).

A gauche, écoulement extrados (en haut) et tranche d'écoulement transversale au bord de fuite (en bas), à 20° d'incidence;

Au milieu, en haut, détail de l'écoulement pariétal extrados visualisé par bulles d'air, à 20° d'incidence;

A droite, tranche d'écoulement au bord de fuite à 10° d'incidence (en bas) et éclatement des tourbillons d'extrados sur une aile à flèche plus réduite et à 20° d'incidence (en haut).

FIG. 9.

Ecoulement autour d'une prise d'air bidimensionnelle en « écope » le long d'une paroi. (V_E = vitesse moyenne d'entrée; β = angle de braquage de la lèvre.)

A gauche, modèle à lèvre pointue : de haut en bas,

$\beta = 0^\circ$, $V_F \approx 0,5 V_0$

$\beta = -10^\circ$, $V_F \approx 0,5 V_0$

$\beta = 0^\circ$, $V_E \approx 2 V_0$

$\beta = +10^\circ$, $V_E \approx 2 V_0$

A droite, modèle à lèvre arrondie : de haut en bas,

$\beta = 0^\circ$, $V_E \approx 0,5 V_0$

$\beta = 0^\circ$, $V_E \approx V_0$

$\beta = 0^\circ$, $V_E \approx 2 V_0$

$\beta = 0^\circ$, $V_F \approx 4 V_0$

(modèle avec entrée secondaire)

FIG. 10.

Ecoulement autour d'une hélice

(Hélice tournant à N (tr/s), $V_0 \approx 10$ cm/s sauf contre-indication, 2α = angle d'ouverture du diffuseur)

A gauche, hélice carénée : de haut en bas,

$2\alpha = 8^\circ$, $N = 8$ tr/s

$2\alpha = 20^\circ$, $N = 4$ tr/s

$2\alpha = 20^\circ$, $N = 10$ tr/s

A droite, hélice non carénée :

$N = 4$ tr/s (émissions colorées en bout de pales), hélice face au vent;

$N = 6$ tr/s (écoulement dans le plan diamétral), hélice face au vent;

$N = 8$ tr/s ($V_0 = 0$) hélice au point fixe près de la surface libre située à gauche (cliché retourné de 90°).