

Sillages de cheminées, faisceaux tubulaires, grilles et turbomachines

Quelques exemples de visualisations basés sur l'analogie hydraulique

par H. Werlé et M. Gallon

Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques

Introduction

La visualisation des écoulements représente une source d'information toujours appréciée et souvent un moyen efficace pour l'étude et la compréhension des phénomènes observés, que ce soit dans le domaine de la recherche fondamentale ou dans celui de l'aérodynamique ou l'hydrodynamique appliquée.

Les exemples illustrant cet article concernent des visualisations hydrodynamiques basées sur l'analogie hydraulique et mettent en jeu des obstacles isolés ou groupés, tels qu'ils se présentent dans le cas de structures externes soumises au vent ou internes et plongées dans un courant.

Malgré d'imparfaites conditions de similitude, ces expériences dans l'eau contribuent à guider l'expérimentation dans l'air ou le fluide réel, généralement plus difficile à mettre en œuvre et à interpréter.

Technique expérimentale

Les visualisations analysées ci-dessous ont été obtenues à l'aide de méthodes qui ont déjà fait l'objet d'un précédent article dans le cadre de cette revue [1] et leur description a été reprise récemment dans des synthèses groupant les principaux procédés utilisés dans l'eau [2] [3] : elles sont basées sur des émissions de liquides colorés de même densité et viscosité que l'eau (fig. 1 A), et sur l'utilisation de minuscules bulles d'air en suspension dans l'eau (fig. 1 C).

Les essais ont été effectués au laboratoire des analogies hydrauliques de l'ONERA [4] et ont eu pour cadre les

veines verticales d'un tunnel et d'une cuve hydrodynamiques fonctionnant simplement par vidange sous l'effet de la gravité. Ce type d'installation en circuit ouvert évite le recyclage des colorants opaques utilisés pour la visualisation. D'autre part, le remplissage de la veine qui précède chaque essai assure la formation des bulles d'air utilisées comme traceurs gazeux.

Cas d'un obstacle isolé fixe en courant plan

Tout obstacle placé dans un courant donne naissance à un sillage qui résulte de la confluence des écoulements passant de part et d'autre du modèle [5]. On distingue différents types de sillage en courant plan suivant qu'il s'agit d'une confluence de deux couches limites non décollées à l'extrémité d'une plaque mince sans incidence (fig. 1 E à G), d'une confluence autour d'une zone d'eau morte au culot droit d'une plaque plus épaisse (fig. 1 H à K) ou d'une confluence de deux couches limites décollées en aval d'un cylindre (fig. 1 A à D) ou d'un profil avec incidence (fig. 1 L). Ces vues résument l'évolution bien connue du sillage en fonction du nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement : à faible vitesse, le sillage est rectiligne et stationnaire englobant d'abord une zone fermée siège de deux tourbillons symétriques (fig. 1 B et 1 H); quand la vitesse du courant est suffisamment élevée, la région de la confluence présente un caractère instationnaire accentué. Dans le cas simple d'un profil symétrique et sans incidence, le sillage est caractérisé par le phénomène bien connu des tourbillons alternés de Bénard Karman [6] [7].

Ceux-ci apparaissent nettement grâce au colorant émis

de part et d'autre du modèle et qui reste concentré dans le noyau de ces tourbillons (fig. 1 G), tant que la turbulence du courant ne dépasse pas un certain niveau (fig. 1 D). Notons ici que le même phénomène se distingue plus difficilement sur les vues obtenues par la méthode des bulles d'air et nécessitant un temps d'exposition plus long; en effet, la prise de vue ayant été effectuée suivant des axes liés aux modèles, les tourbillons apparaissent sur les clichés avec un certain bougé dès qu'ils commencent à s'éloigner du modèle (fig. 1 L).

Dans le cas d'un modèle « courant plan » monté entre deux parois, l'écoulement dans le plan de symétrie du montage représente effectivement l'écoulement bidimensionnel que l'on cherche à étudier si la veine est suffisamment large. Par contre, des différences notables apparaissent au voisinage des parois le long desquelles l'écoulement devient tridimensionnel (fig. 2). En effet, la couche limite qui se forme le long de ces parois décolle devant l'obstacle et ce décollement, siège de tourbillons en fer à cheval coiffant le bord d'attaque des modèles [8], est plus ou moins étendu et symétrique suivant la forme du bord d'attaque, l'épaisseur et l'inclinaison du modèle, comme le révèlent les émissions colorées pariétales figurant sur les vues de la figure 2. Elles précisent, en outre, l'organisation du sillage pariétal en aval du modèle, et notamment l'existence d'un effet de puits plus ou moins important suivant la largeur et la forme du bord de fuite.

La figure 3 permet d'étendre l'étude précédente au cas d'un profil symétrique classique (NACA 00 12) et montre, en outre, l'influence d'un jeu entre la paroi et la section d'extrémité du profil.

En l'absence de jeu (fig. 3 A, C et E), le décollement devant l'obstacle, symétrique d'incidence nulle, se décale vers l'intrados à incidence croissante, tandis que l'effet de puits concentré au bord de fuite à incidence nulle remonte vers l'extrados.

Un jeu introduit entre l'aile et la paroi a pour conséquence de réduire plus ou moins complètement l'effet d'obstacle, c'est-à-dire le décollement de l'écoulement pariétal à l'amont du modèle, jusqu'à laisser un passage à l'écoulement (fig. 3 B, D, F, G et H). Dans ces conditions, les lignes de courant pariétales s'incurvent de l'intrados vers l'extrados sous l'effet du tourbillon marginal qui se forme à l'extrémité du modèle devenue libre, au fur et à mesure que croît l'incidence (fig. 3 B, D et H).

A la lumière de ces résultats, on comprend qu'un jeu judicieux entre le modèle et les parois permet d'obtenir un écoulement plan sur une partie plus grande de l'envergure et de minimiser ainsi les effets tridimensionnels dus à la couche limite parasite des parois.

Enfin, cette étude de l'effet d'un jeu entre une aile fixe et une paroi [9] constitue une approche du cas plus complexe d'une aube de roue mobile se déplaçant au voisinage de la paroi d'une carène, tel qu'il se produit dans une turbomachine axiale.

Cas d'un obstacle isolé fixe en écoulement tridimensionnel

La figure 4 est consacrée au cas d'un modèle de forme cylindrique, monté sur une paroi plane avec plus ou moins d'inclinaison et comportant ou non une extrémité libre

de forme hémisphérique. Comme devant un cylindre « courant plan » disposé entre deux parois (fig. 2 A et D), l'écoulement pariétal décolle en amont de l'obstacle le long d'une ligne de décollement incurvée vers l'aval de part et d'autre d'un point de partage avancé. De même, cette zone décollée est le siège d'un ou de plusieurs tourbillons-puits en « fer à cheval » coiffant l'avant du cylindre. Son étendue diminue lorsqu'augmente l'inclinaison du cylindre (fig. 4 A à G). Quand la flèche est élevée (fig. 4 E et G), la zone décollée sur le cylindre s'organise et devient le siège de deux tourbillons symétriques. Ces tourbillons constituent le sillage fini du modèle, dont la fermeture se produit sous l'effet des courants transversaux qui s'établissent derrière le modèle [10] (fig. 4 H et I). En courant plan, le même phénomène peut aussi être observé sans courant transversal, mais seulement durant le mouvement de démarrage qui précède l'établissement du régime permanent (fig. 4 J).

Dans le cas décrit ci-dessous d'un cylindre très incliné et monté sur une paroi, les deux tourbillons du sillage induisent deux tourbillons secondaires au voisinage de cette paroi en aval du modèle (fig. 4 F et G). Dans ces conditions, on note une certaine analogie avec l'écoulement observé le long d'une paroi plane comportant un jet normal de section circulaire et de faible intensité. En effet, un tel jet s'incurve sous l'effet du courant principal, en formant deux tourbillons contrarotatifs qui induisent près de la paroi le même type de décollement tourbillonnaire que sous un cylindre très incliné (fig. 4 H et I [11]).

Des phénomènes semblables peuvent être décelés autour de maquettes d'immeuble-tour (fig. 5 A, B et C) [12] [13] et de cheminée sans ou avec simulation du débit (fig. 5 A et E ou fig. 5 F et G) [14]. On retrouve, d'une part, le décollement au pied du modèle, dont l'importance dépend aussi de la forme plus ou moins profilée de la maquette et de son orientation par rapport au vent (fig. 5 A et B). Notons que la présence d'arêtes sur le modèle assure une certaine stabilité des zones décollées donnant naissance au sillage (fig. 5 C). D'autre part, au sommet de la tour ou de la cheminée apparaît un tourbillon stationnaire sous l'effet de succion dû à l'extrémité libre. Une accentuation notable de cet effet se produit lorsque l'on simule le débit de la cheminée et il se forme alors un courant ascendant qui a pour origine deux tourbillons trombes contrarotatifs sur le sol en aval du modèle, tandis que le panache de fumée simulé est incurvé par le courant principal, sa structure devenant tourbillonnaire comme celle d'un jet émis directement de la paroi (fig. 5 F à I). Ce type de visualisation est susceptible d'apporter une contribution à l'étude des problèmes très actuels concernant la pollution par la fumée émise par des cheminées fixes [15] ou mobiles [16].

Cas d'obstacles groupés fixes

Un premier exemple de visualisation concerne des maquettes « courant plan » de faisceaux turbulents [17] (fig. 6) et prolonge l'étude du sillage autour d'un cylindre isolé commencée ci-dessus (fig. 1 A à D).

Dans la configuration d'une file isolée de cylindres disposés les uns derrière les autres (fig. 6 A), on note que le sillage du premier cylindre ne se referme pas devant l'obstacle constitué par le deuxième; il présente un carac-

tère d'eau morte stationnaire côté amont et ne devient le siège de tourbillons alternés qu'à proximité du deuxième cylindre. A partir de ce cylindre, la turbulence augmente et les sillages sont entièrement tourbillonnaires.

Dans la configuration d'un faisceau à files parallèles (fig. 6 B), l'écoulement entre deux files voisines reste relativement laminaire et sain mis à part les fluctuations dues aux tourbillons alternés qui sont en opposition de phase d'une file à l'autre.

Dans la configuration d'un faisceau à files quinconçées (fig. 6 C), on observe que les couches d'écoulement sain qui se forment entre les cylindres de chaque rangée se subdivisent en deux devant l'obstacle constitué par les cylindres de la rangée suivante, pour venir s'associer deux à deux, et ainsi de suite. Cette confluence provoque la fermeture du sillage des cylindres. D'amont en aval, ces couches et sillages finis, d'abord laminaires, deviennent progressivement plus turbulents et finissent par être le siège de tourbillons alternés. Seulement au cours d'un mouvement de démarrage (fig. 6 D) apparaît un écoulement idéalement organisé avec des sillages fermés et parfaitement symétriques, comme cela a déjà pu être observé autour d'un cylindre isolé (fig. 4 J).

Le deuxième exemple de montage comportant plusieurs éléments groupés et fixes concerne une maquette de grille plane d'aubes à forte déviation montées entre parois (fig. 7) et qui constitue une réplique de celle qui équipe la soufflerie S5 du centre ONERA de Chalais-Meudon [18]. Les visualisations obtenues mettent en évidence l'allure et la périodicité de l'écoulement dans les grilles aussi bien dans le plan de symétrie (présence d'un décollement sur l'extrados : fig. 7 A) que le long des parois latérales (phénomènes tourbillonnaires semblables à ceux décelés aux vitesses élevées en soufflerie : figure 7 C que l'on peut rapprocher de la figure 2 H relative à un élément isolé possédant aussi un bord d'attaque pointu). La résorption plus ou moins complète des décollements est observée lorsque croît la vitesse V_0 , ou que diminue le pas relatif de la grille. L'expérience confirme, d'autre part, l'efficacité d'un soufflage (fig. 7 B) comme moyen de suppression des décollements sur les aubes elles-mêmes ainsi qu'au voisinage des parois latérales. On sait que ce procédé a été maintes fois appliqué au contrôle de l'écoulement sur les voilures et leurs volets [19] [20].

Cas d'obstacles groupés mobiles

Un dernier exemple a pour thème l'écoulement instationnaire dans une maquette de turbomachine axiale dont la roue mobile comporte vingt aubes [21]. Les essais ont

été effectués dans une cuve fonctionnant comme un tunnel hydro-dynamique vertical avec contrôle de la vitesse du courant dans la veine annulaire du modèle. Dans ces conditions, on peut bloquer la roue mobile (fig. 8 A et C) ou la faire fonctionner dans son domaine d'adaptation (fig. 8 B et D et D à I, fig. 9 C et D) aussi bien qu'en dehors de ce régime (fig. 9 A et B).

Les visualisations obtenues au cours des premiers essais [21] fournissent aussi bien des images de l'écoulement moyen (fig. 8 A et B) que l'allure des phénomènes instationnaires qui affectent l'écoulement pariétal, par exemple côté carène (fig. 8 C, D et E). D'autre part, des émissions colorées continues ou intermittentes (fig. 8 F à I) ou des trajectoires de bulles d'air (fig. 9 C) précisent dans le plan de la mi-envergure des aubes mobiles, la position, le déplacement et le caractère du sillage issu de ces aubes.

Enfin, la structure des décollements tournants, tels qu'ils se forment lors d'un fonctionnement hors adaptation apparaît nettement grâce aux bulles d'air éclairées dans un plan passant par la mi-envergure des aubes (fig. 9 A) ou par l'axe de la machine (fig. 9 B).

Ces essais de turbomachine se poursuivent actuellement en mettant en jeu un montage optique avec rotoscope [22] qui permet des prises de vues en mouvement relatif, et de ce fait sans bougé des aubes mobiles, suivant un axe parallèle à celui de la machine [26]. Par ailleurs, d'autres essais sont en cours avec une nouvelle roue mobile comportant des aubes dont le pas relatif a été notablement réduit, et en présence ou non d'un redresseur (fig. 9 D et C) semblable à celui qui fait l'objet d'essais dans l'air au centre ONERA de Cannes [23].

Conclusion

Les visualisations d'écoulements analysés dans cet article démontrent que les méthodes adoptées au laboratoire des analogies hydrauliques de l'ONERA sont en mesure de couvrir un domaine d'application étendu, la plupart des écoulements réels étant caractérisés par des phénomènes de décollements et de sillages, qu'il s'agisse de structures externes soumises au vent ou internes et plongées dans un courant.

Utilisées conjointement avec d'autres procédés d'étude, théoriques ou expérimentaux, afin de tenir compte d'éventuelles différences occasionnées principalement par la variation du nombre de Reynolds, ces méthodes sont susceptibles de contribuer à la résolution de nombreux problèmes d'aérodynamique, d'hydrodynamique et du domaine industriel.

Voir à la page 360 "Références - Cinémathèque"

FIGURE 1

**SILLAGE ISSU DE DIFFÉRENTS OBSTACLES ISOLÉS
EN COURANT PLAN**

(Visualisation à l'aide d'émissions colorées et de bulles d'air)

— Cylindre :

- A. $Re_d \approx 10^2$ ($d = 40$);
- B. $Re_d \approx 10^3$ ($d = 40$);
- C. $Re_d \approx 0,15 \cdot 10^4$ ($d = 30$);
- D. $Re_d \approx 0,8 \cdot 10^4$ ($d = 40$).

— Plaque mince ($e/l \approx 3\%$; $\alpha = 0^\circ$; $l = 124$):

- E. $Re_e \approx 2 \cdot 10^2$;
- F. $Re_e \approx 4 \cdot 10^2$;
- G. $Re_e \approx 8 \cdot 10^2$.

— Plaque à culot droit ($e = 15$; $\alpha = 0^\circ$; $l \approx 50$):

- H. $Re_e \approx 10^2$;
- I. $Re_e \approx 1,5 \cdot 10^3$;
- J. et K. $Re_e \approx 0,9 \cdot 10^3$ (vues extraites d'un film d'essai);

— Profil NACA 00 12 ($l = 60$; $\alpha = 12^\circ 5$):

- L. $Re_e \approx 0,3 \cdot 10^4$.

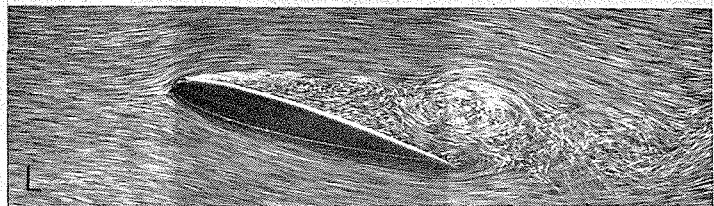
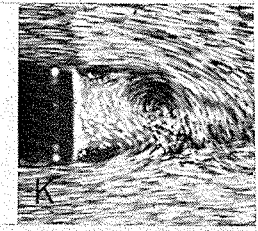
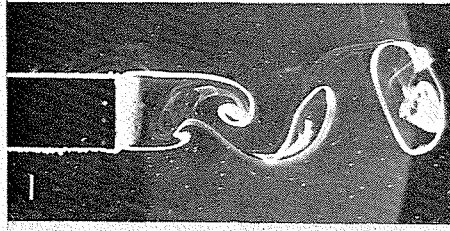
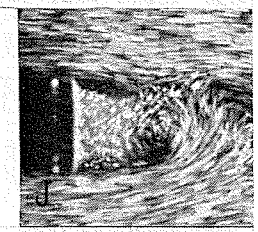
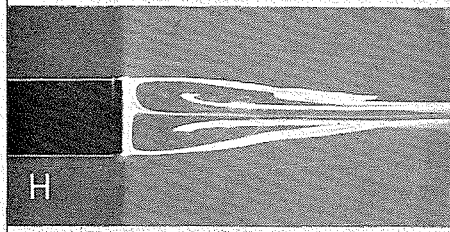
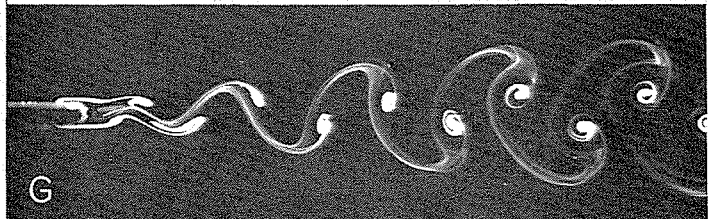
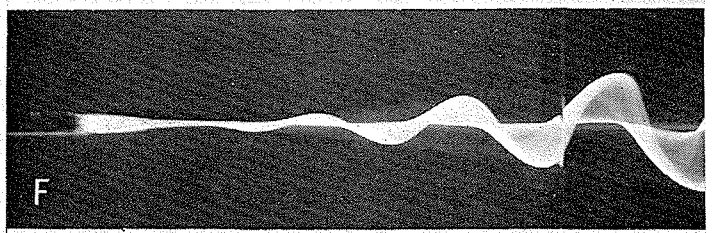
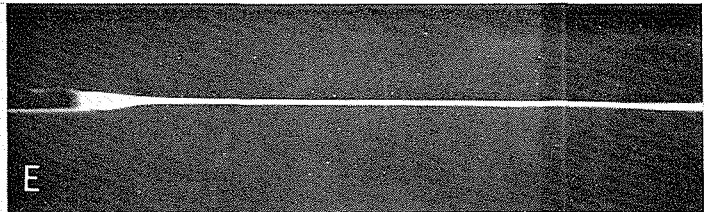
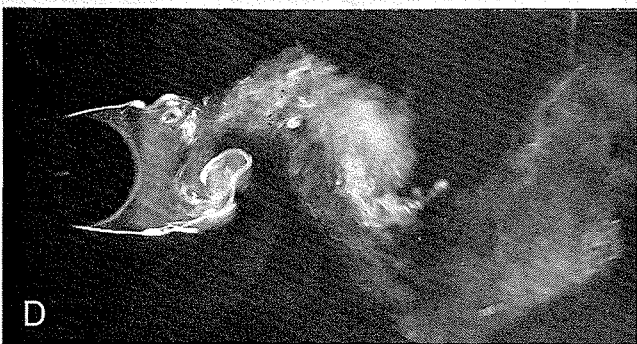
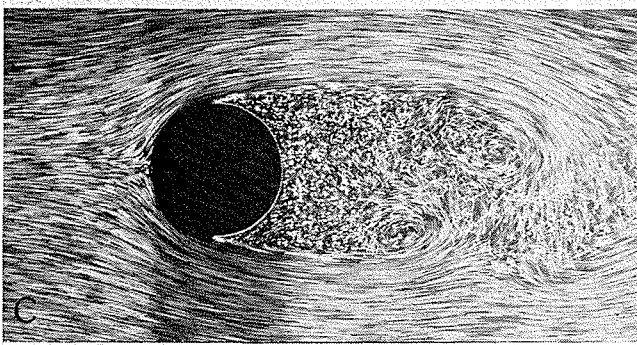
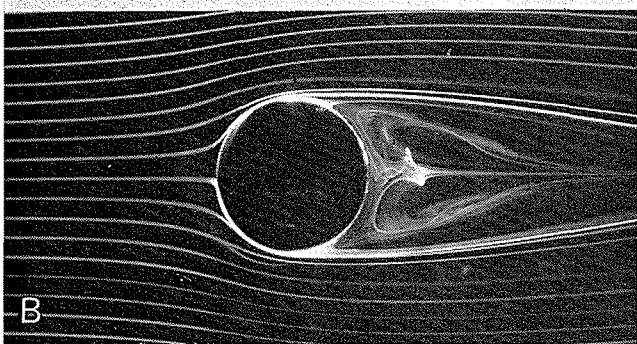
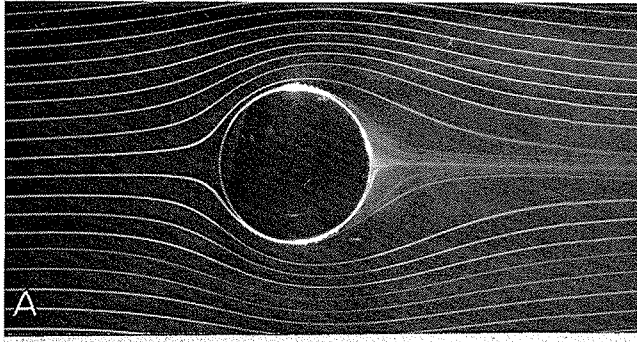


FIGURE 2

ÉCOULEMENT LE LONG D'UNE
PAROI PLANE EN PRÉSENCE DE DIFFÉRENTS OBSTACLES
DU TYPE « COURANT PLAN »

(Visualisation à l'aide d'émissions colorées pariétales;
montage sans jeu)

- Cylindre ($d = 30$):
 - A. $Re_d \approx 1,5 \cdot 10^3$;
 - B. $Re_d \approx 3 \cdot 10^3$;
- Cylindre ($d = 20$):
 - C. $Re_d \approx 10^3$;
 - D. $Re_d \approx 2 \cdot 10^3$.
- Obstacle profilé ($\alpha = 0^\circ$; $l = 100$; $e/l = 15\%$):
 - E. $Re_l \approx \frac{1}{2} 10^4$ (bord d'attaque arrondi);
 - F. $Re_l \approx 10^4$ (bord d'attaque pointu).
- Dièdre à culot droit ($\delta_{\text{pointe}} = 10^\circ$; $l = 100$; $e/l = 15\%$):
 - G. $Re_l \approx 10^4$ ($\alpha = 0^\circ$);
 - H. $Re_l \approx \frac{1}{2} 10^4$ ($\alpha = 10^\circ$).

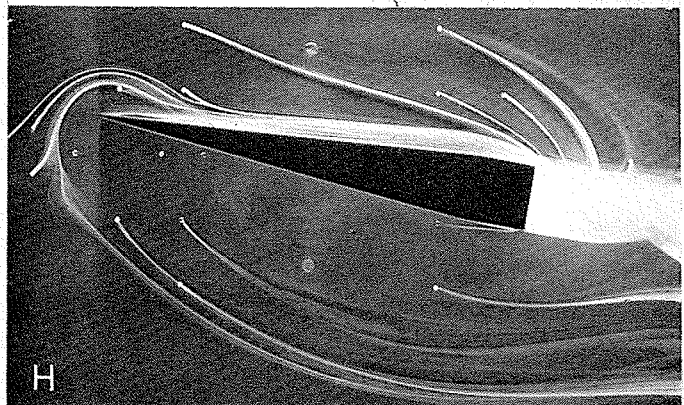
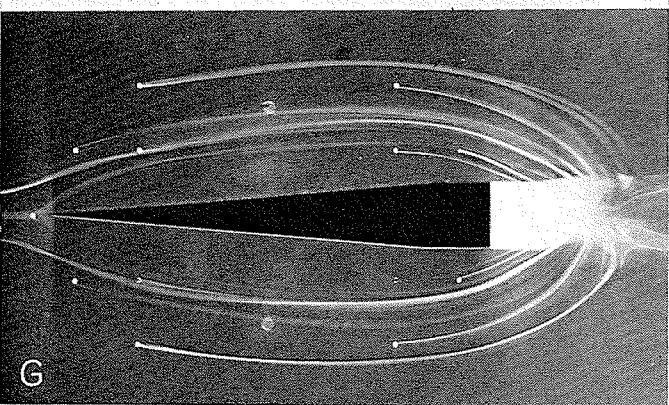
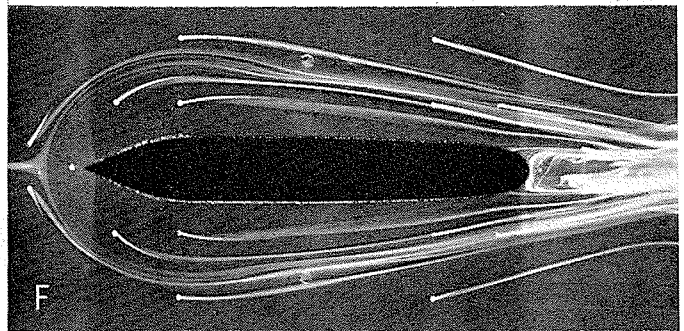
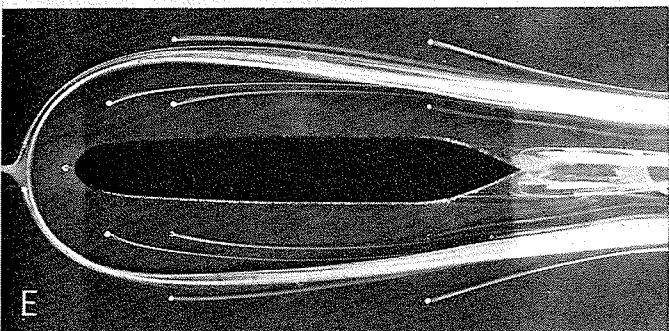
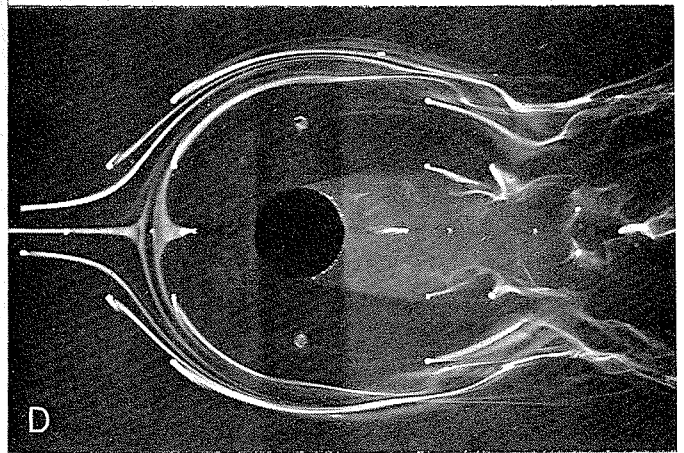
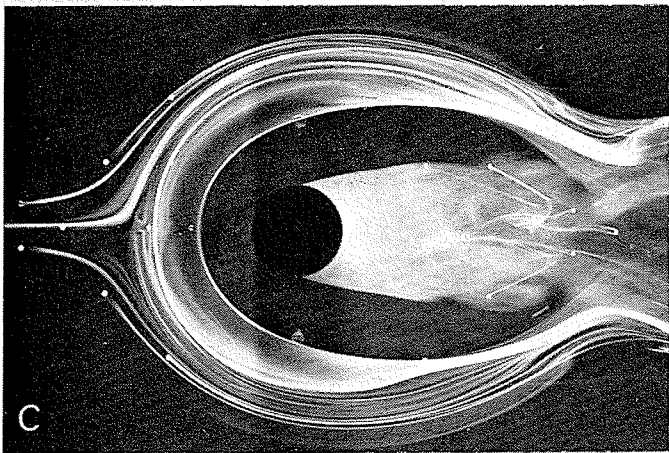
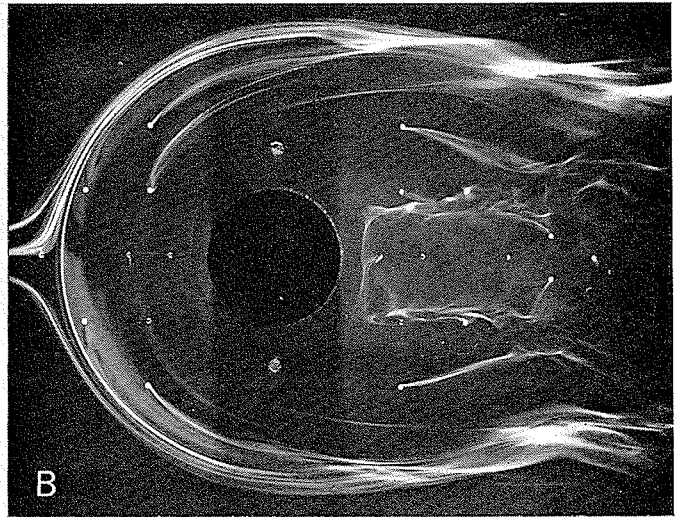
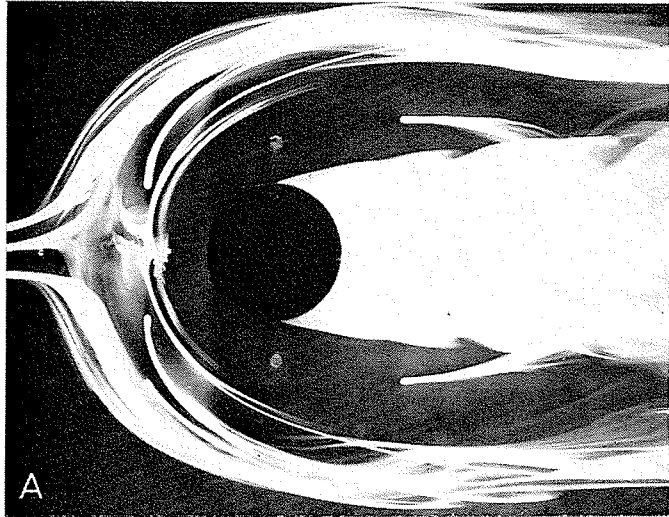


FIGURE 3

ÉCOULEMENT LE LONG
D'UNE PAROI PLANE EN PRÉSENCE D'UNE AILE
DU TYPE « COURANT PLAN »

(Visualisation à l'aide d'émissions colorées pariétales; montage
avec jeu d'extrémité j ; profil NACA 00 12; corde $l = 90$;
 $Re_l \approx 0,9 \cdot 10^4$).

A.	$\alpha = 0^\circ$	$j = 0$;
B.	$\alpha = 0^\circ$	$j = 8$;
C.	$\alpha = 5^\circ$	$j = 0$;
D.	$\alpha = 5^\circ$	$j = 8$;
E.	$\alpha = 10^\circ$	$j = 0$;
F.	$\alpha = 10^\circ$	$j = 2$;
G.	$\alpha = 10^\circ$	$j = 8$;
H.	$\alpha = 10^\circ$	$j = 32$.

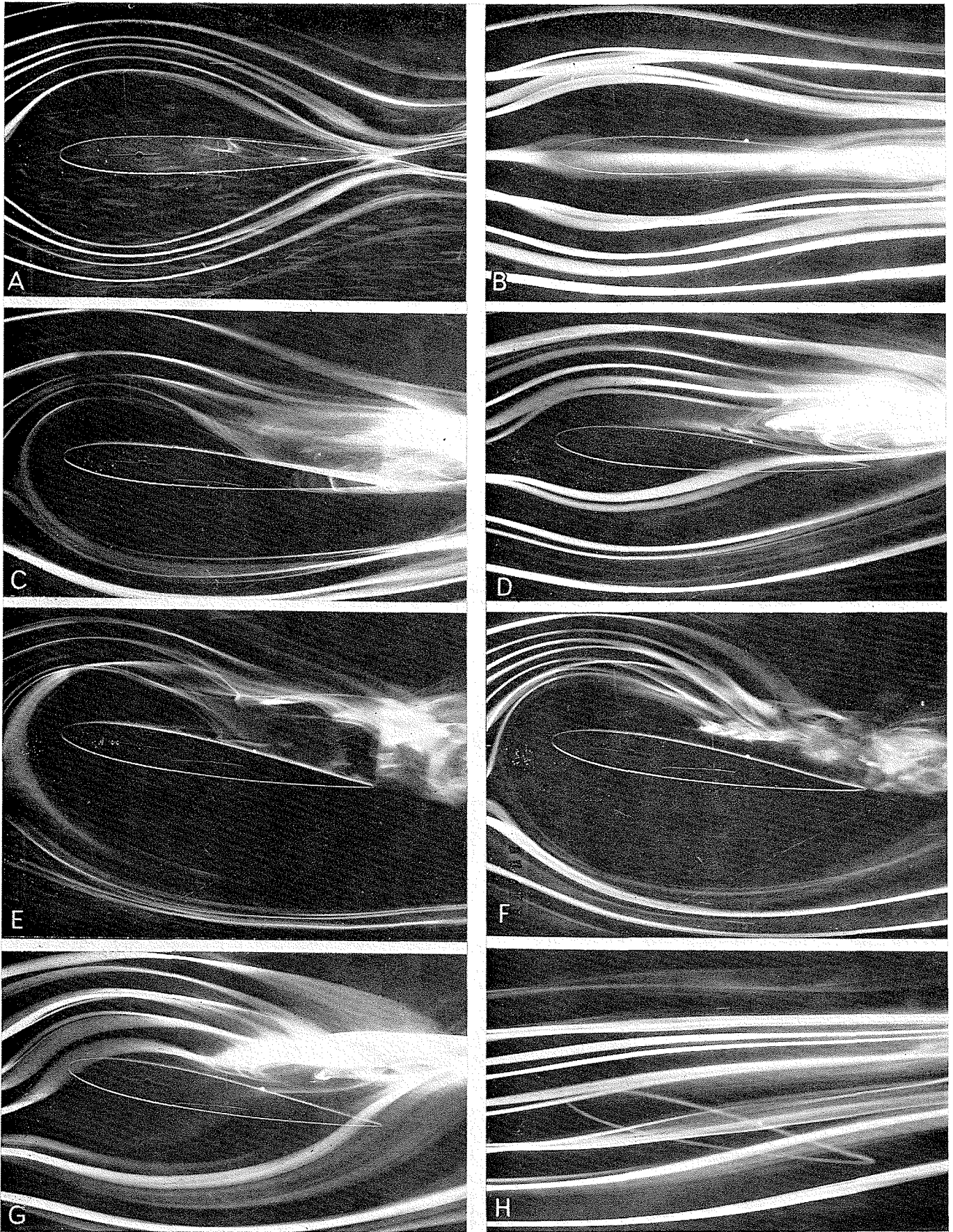


FIGURE 4

ÉCOULEMENT AUTOUR D'UN CYLINDRE MONTÉ SUR
UNE PAROI PLANE

- Modèles à extrémité hémisphérique libre ($d = 30$; $h = 80$;
 $Re_d \approx 0,8 \cdot 10^4$):
 - A et B. Flèche $\varphi = 0^\circ$;
 - C et D. Flèche $\varphi = 30^\circ$;
 - E, F et G. Flèche $\varphi = 60^\circ$.
 - Modèles de comparaison montés entre parois :
 - H et I. Flèche $\varphi = 60^\circ$ ($d = 40$; $Re_d \approx 0,4 \cdot 10^4$);
 - J. Flèche $\varphi = 0^\circ$ ($d = 50$; vitesse V_o crois-
sante au cours d'un démarrage).
- (Visualisation à l'aide d'émissions colorées [vues B, D et H]).
(Visualisation par bulles d'air :
— tranches suivant plan de symétrie [vues A, C, E et J]; et
— tranches transversales au milieu ou à l'extrémité du
modèle [vues I, F et G]).

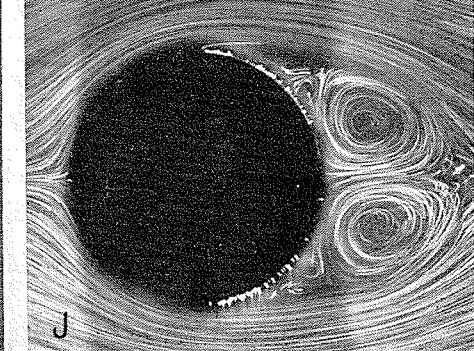
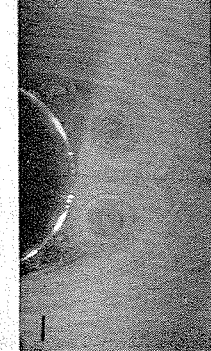
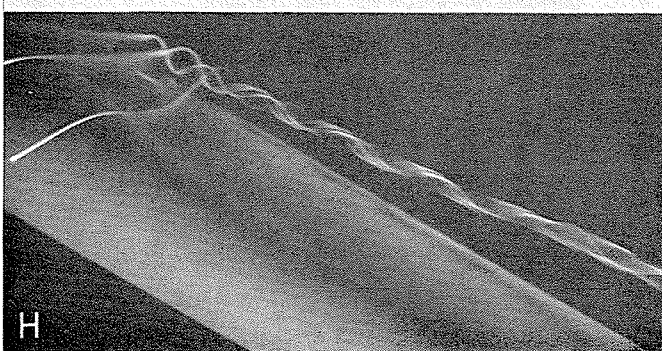
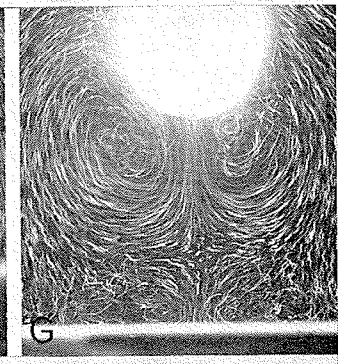
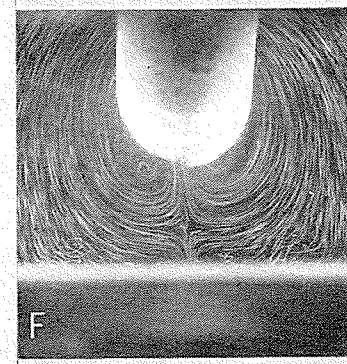
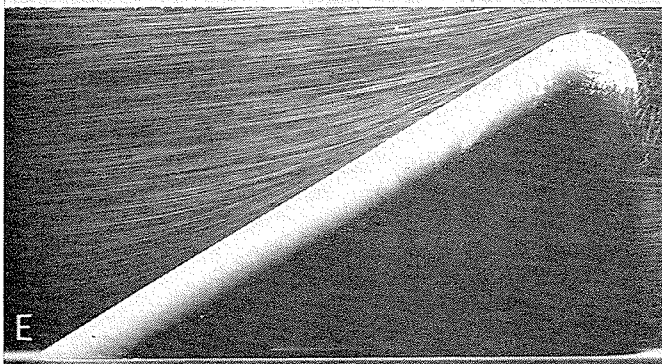
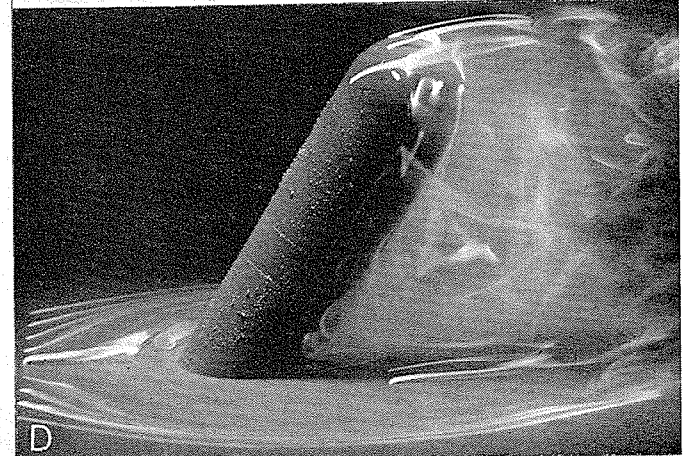
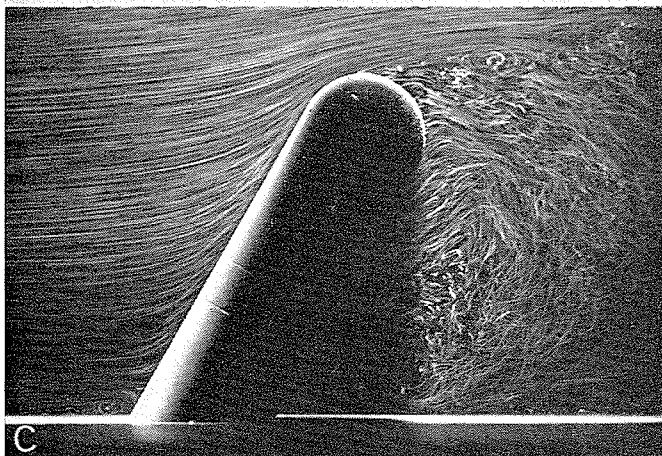
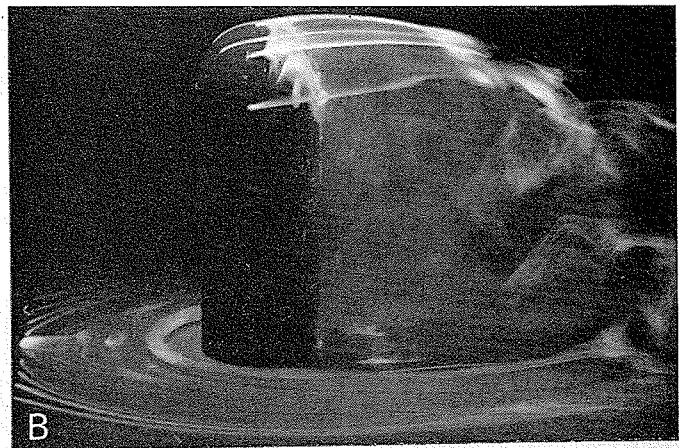
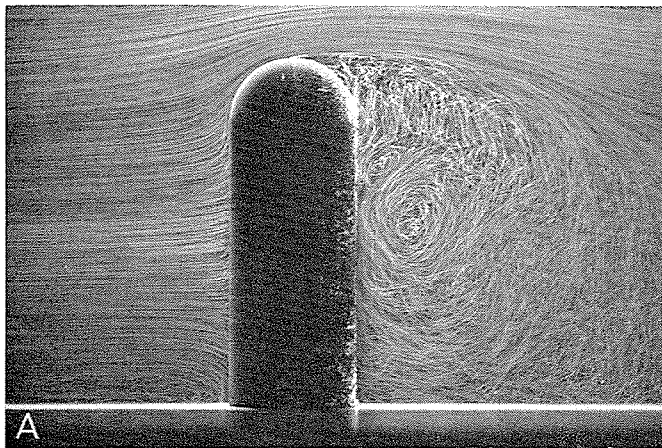


FIGURE 5

ÉCOULEMENT AUTOUR DE DIFFÉRENTS OBSTACLES
MONTÉS SUR UNE PAROI PLANE

- Maquette d'immeuble-tour ($Re_d \approx 0,8 \cdot 10^3$):
 - A. Écoulement dans le plan de symétrie (vent arrière);
 - B. Écoulement dans le plan de symétrie (vent de face);
 - C. Écoulement dans une tranche transversale (vent de face).

- Maquette de cheminée ($d = 10$; $h = 4d$; $Re_d \approx 10^3$):
 - D et E. Sans simulation du débit;
 - F et G. Avec simulation du débit.Écoulement pariétal (émissions colorées) et écoulement dans le plan de symétrie (bulles d'air):

- Cas d'une paroi émettant un jet normal de section circulaire ($d = 8$; $\bar{V}_j/V_o \approx 5$):
 - H. Écoulement pariétal (émissions colorées);
 - I. Tranche d'écoulement transversale située en aval de l'orifice d'éjection (visualisation par bulles d'air, jet teinté à l'aide de colorant).

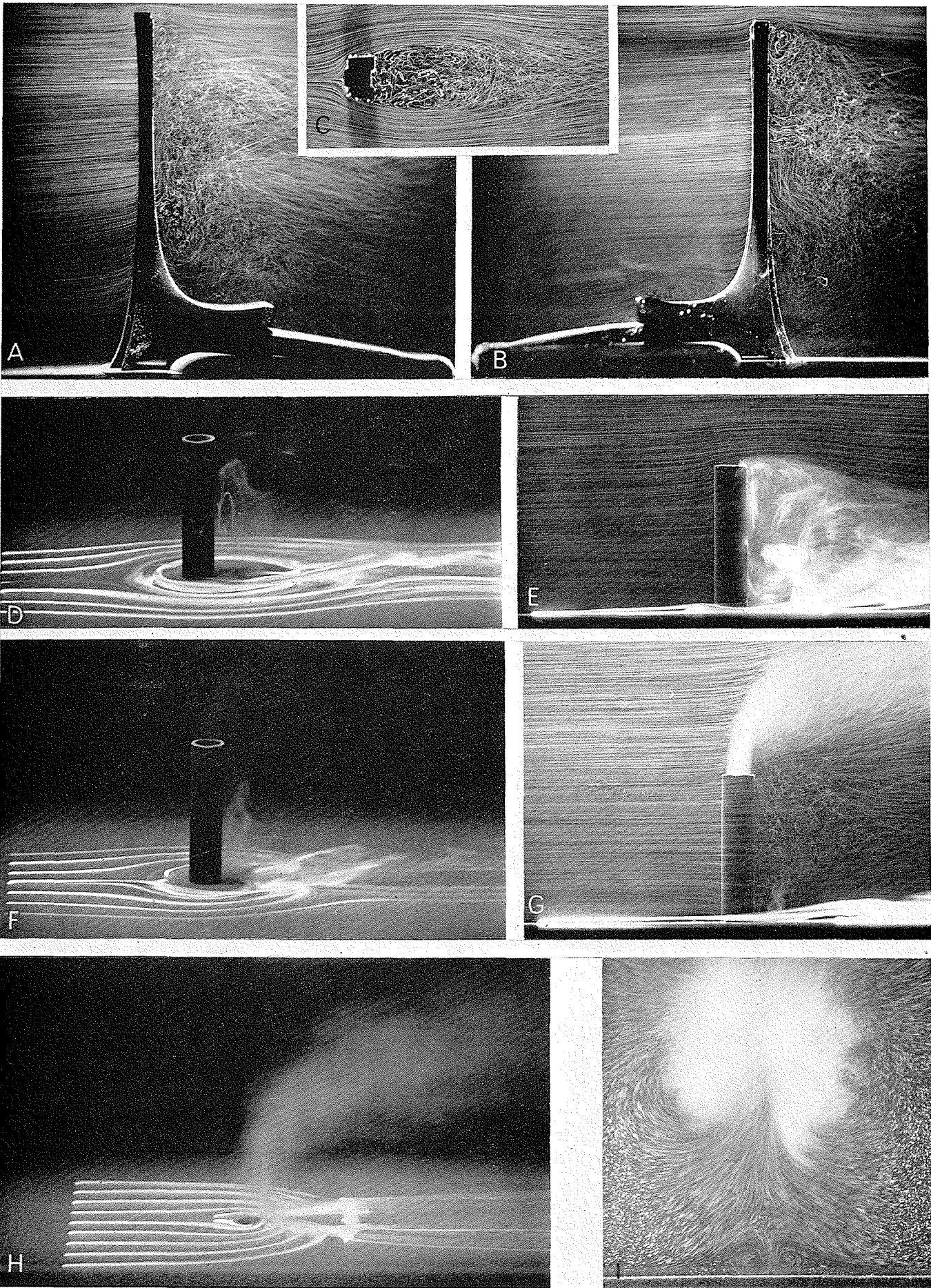


FIGURE 6

ÉCOULEMENT AUTOUR D'UN FAISCEAU TUBULAIRE

— Maquette « courant plan » montée entre parois :

A. File isolée ($d = 15$; $Re_d \approx 2 \cdot 10^3$);

B. Files parallèles ($d = 15$; $E/d = 2$
 $Re_d \approx 1,5 \cdot 10^3$);

C. Files quinconcées ($d = 15$; $E/d = 2$;
 $Re_d \approx 5 \cdot 10^3$);

(Visualisation par bulles d'air).

D. Files quinconcées ($d = 15$; $E/d = 2$;
 $Re_d \approx 3 \cdot 10^3$;

mouvement de démarrage).

(Visualisation à l'aide d'émissions colorées).

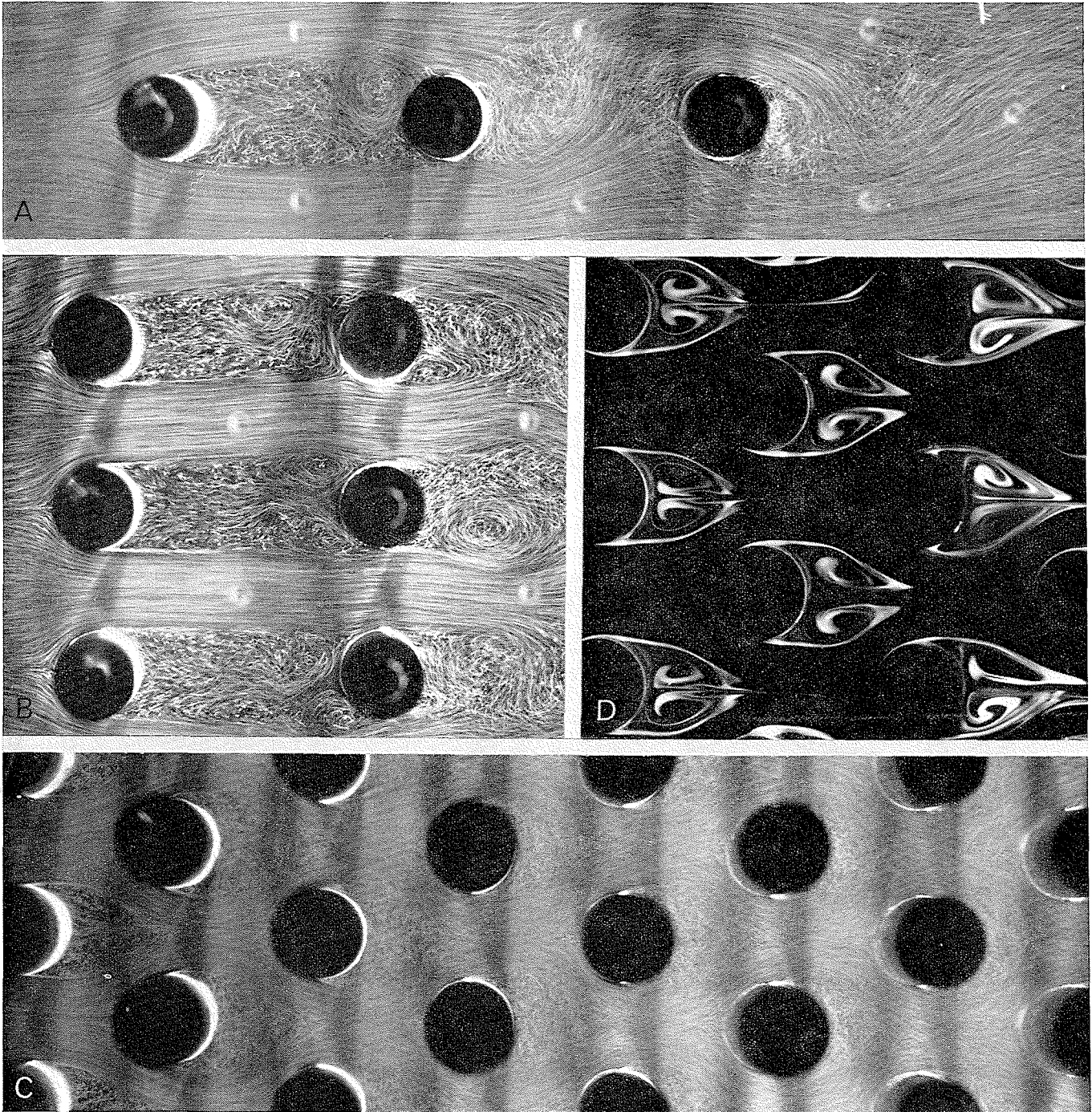


FIGURE 7

ÉCOULEMENT DANS UNE GRILLE D'AUBES FIXES
A FORTE DÉVIATION

— Maquette « courant plan » montée entre parois (corde $l = 70$;
 $Re_l \approx 1,4 \cdot 10^4$):

A. Ecoulement dans le plan de symétrie (essai
sans soufflage);

B. Ecoulement dans le plan de symétrie (essai
avec soufflage sur une aube);

(Visualisation par bulles d'air);

C. Ecoulement le long de la paroi latérale (essai
sans soufflage);

(Visualisation à l'aide d'émissions colorées).

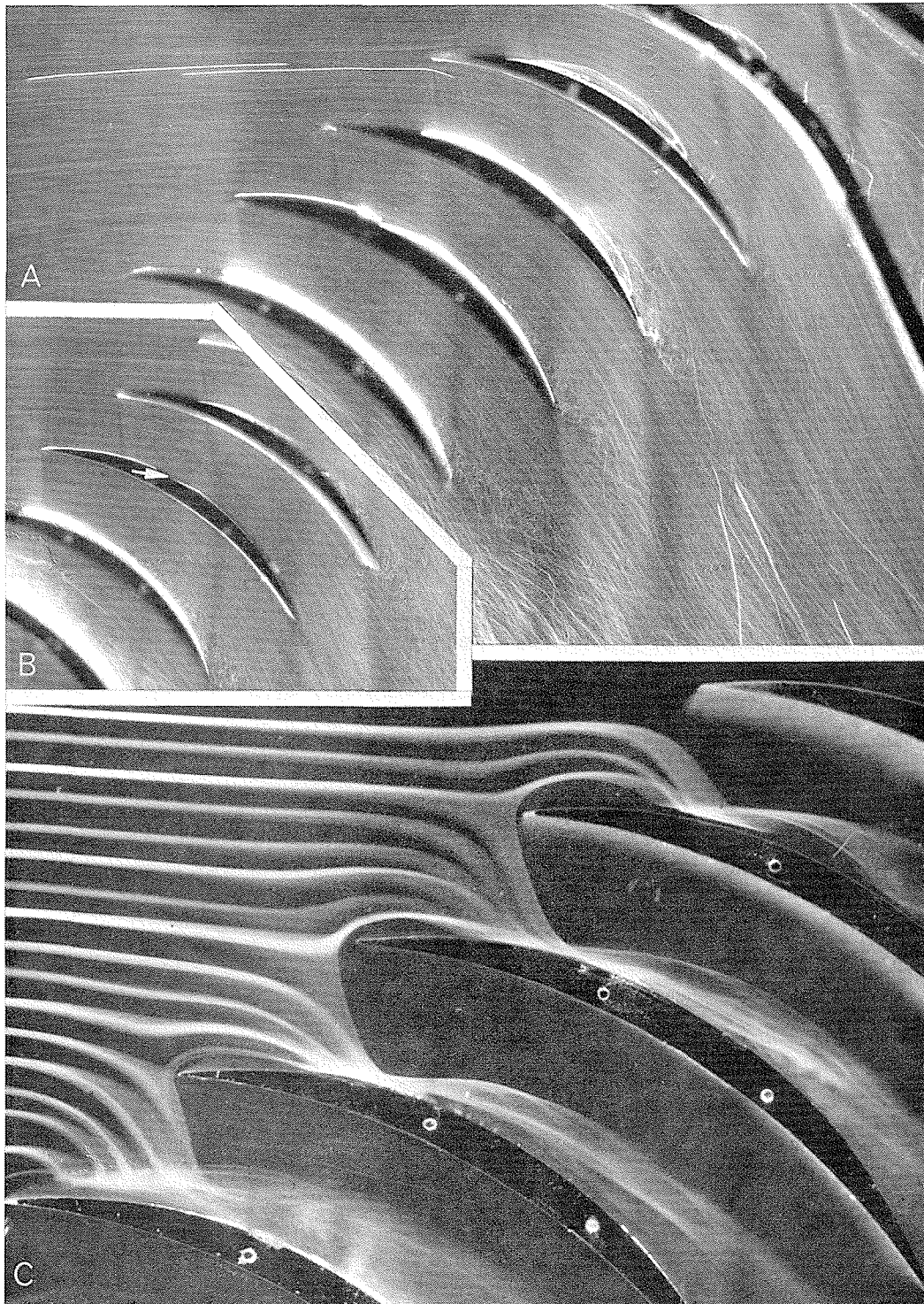


FIGURE 8

**ÉCOULEMENT DANS UNE MAQUETTE DE TURBOMACHINE
AXIALE**

(Pas relatif des aubes $\approx 1,54$ sauf contre-indication)

- Essai avec roue à aubes fixe ($l = 25$; $Re_t \approx 10^4$; $N = 0$):
 - A. Écoulement dans le plan de la mi-envergure (bulles d'air);
 - C. Écoulement pariétal le long de la carène (émissions colorées).
- Essai au régime de fonctionnement correct ($l = 25$; $Re_t \approx 10^4$; $N = 0,4$ tr/s):
 - B. Écoulement dans le plan de la mi-envergure (bulles d'air);
 - D et E. Écoulement pariétal le long de la carène (émissions colorées continues);
 - F, G, H et I. Écoulement visualisé par des émissions colorées intermittentes à partir d'une rampe fixe située en amont de la mi-envergure des aubes (images extraites d'un film d'essai).

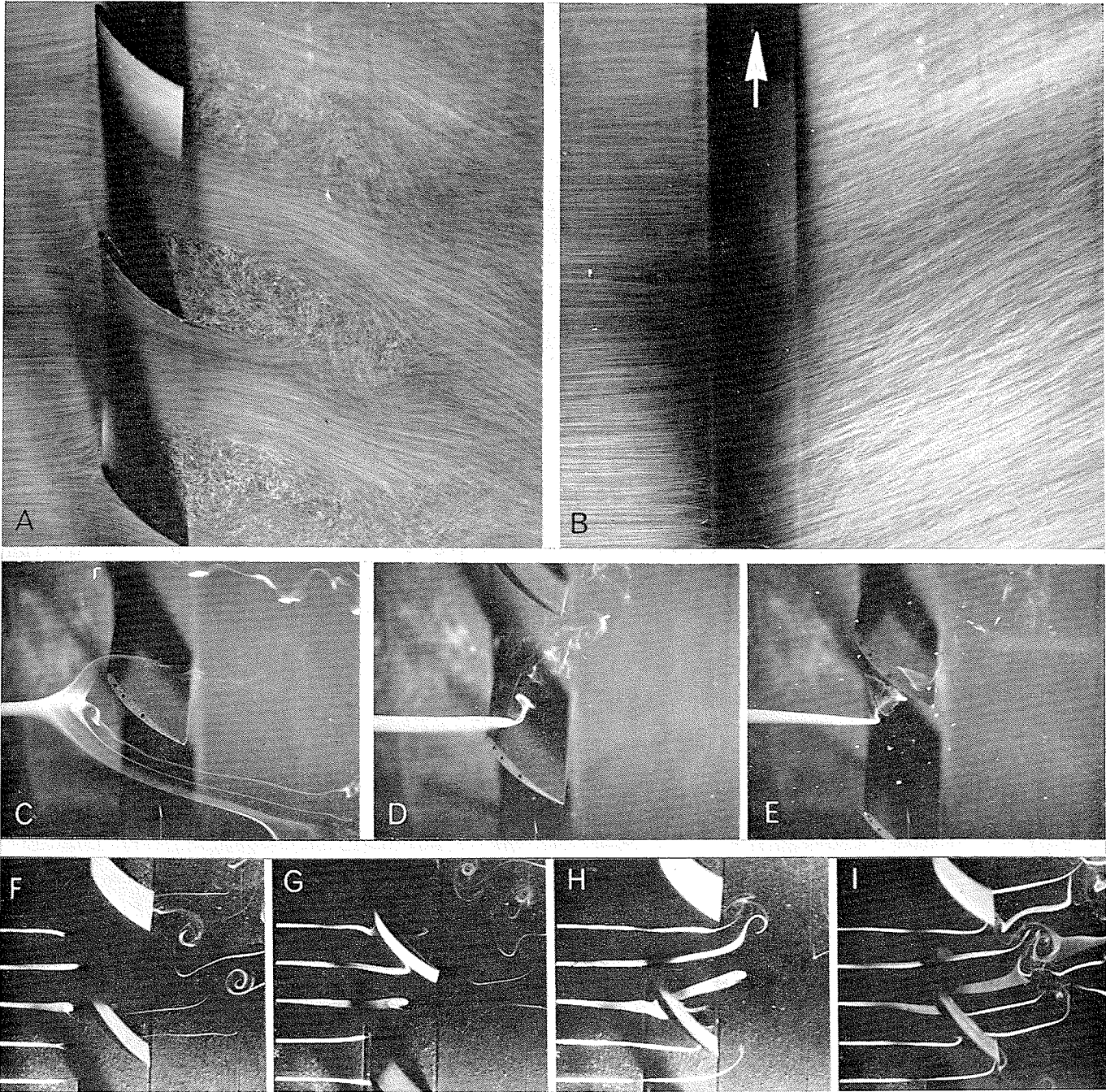
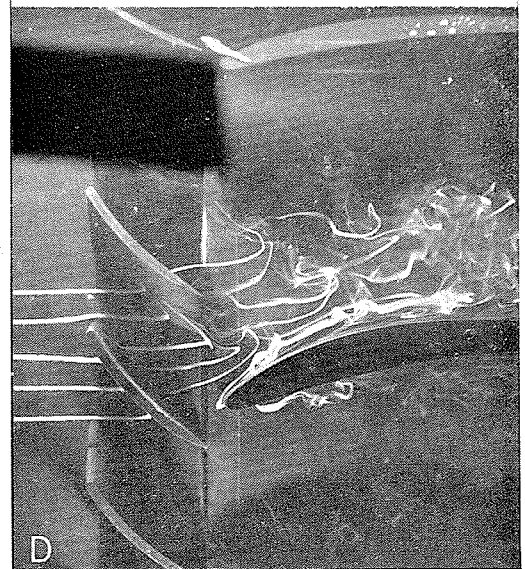
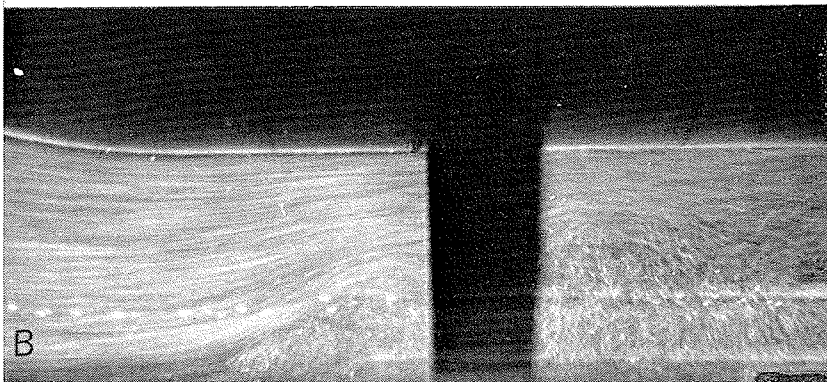
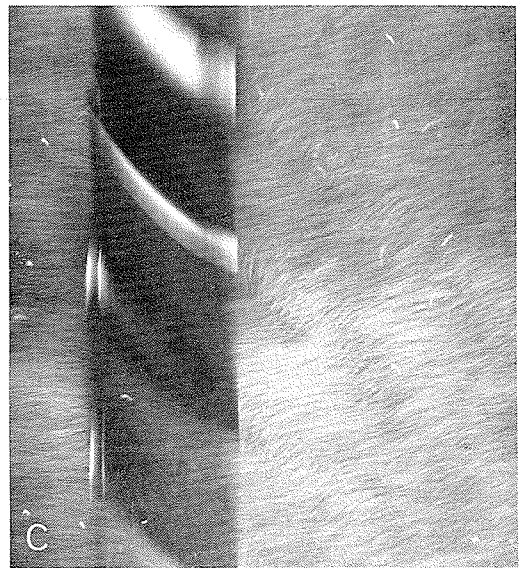
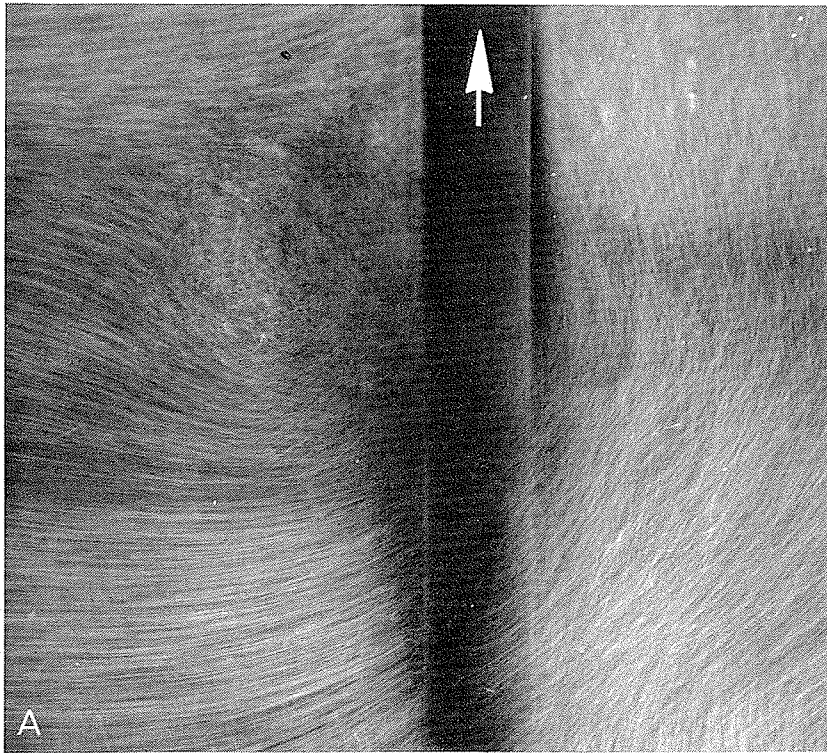


FIGURE 9

ÉCOULEMENT DANS UNE MAQUETTE DE TURBOMACHINE
AXIALE

- Fonctionnement hors adaptation avec décollement tournant ($l = 25$; $Re_l = 1/2 \cdot 10^4$; $N = 0,4$ tr/s):
 - A. Ecoulement dans le plan de la mi-envergure;
 - B. Ecoulement dans le plan diamétral;(bulles d'air).
- Essai au régime de fonctionnement correct ($l = 50$; $Re_l = 1/2 \cdot 10^4$; $N = 0,1$ tr/s):
 - C. Essai sans redresseur (bulles d'air);
 - D. Essai avec redresseur (émissions colorées).(pas relatif $\approx 0,77$).



Références. Cinémathèque

- [1] WERLÉ (H.). — Méthodes de visualisation des écoulements hydrauliques. *La Houille Blanche*, n° 5 (1963), p. 587-595.
- [2] WERLÉ (H.). — Hydrodynamic flow visualisation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 5 (1973), p. 361-382.
- [3] WERLÉ (H.). — Méthodes de visualisation hydrodynamique des écoulements : exposé au colloque sur les « Techniques de mesure dans les écoulements » organisé par l'E.D.F. et le C.E.A. du 24 au 28 septembre 1973 au château d'Ermenonville (à paraître), voir aussi [24].
- [4] WERLÉ (H.). — Le laboratoire des analogies hydrauliques de la Direction Aérodynamique. Publication *ONERA*, n° 103 (1961).
- [5] PRANDTL (L.). — Motion of fluids with very low viscosity. *NACA T.M.*, n° 452 publié dans *La Houille Blanche*, n° 1 (1973), p. 75-82.
- [6] CHANG (P.). — Separation of flow. International series of monographs in interdisciplinary and advanced topics in science and engineering, vol. 3, *Pergamon Press*, (1970), p. 439, etc.
- [7] CARRIÈRE (P.). — Notions générales sur les problèmes de confluence. *Revue française de Mécanique*, n° 24 (1957), p. 7-27.
- [8] SACKMANN (L.). — L'écoulement des fluides au voisinage des points singuliers des obstacles. *Publ. Scient. Techn. Ministère de l'Air*, n° 92 (1936).
- [9] HÜRLIMANN (R.). — Untersuchungen über Strömungsvorgänge an Schaufelenden in der Nähe von Wänden. *Mitteilungen aus dem Inst. für Aerodyn.*, n° 31 (Pr. J. Ackeret), Verlag Leeman, Zürich.
- [10] WERLÉ (H.) et GALLON (M.). — Contrôle d'écoulements par jet transversal. *L'Aéronautique et l'Astronautique*, n° 34 (1972), 2^e.
- [11] CARRIÈRE (P.). — Effets de l'écoulement interne sur le comportement aérodynamique d'un avion à réaction. 6^e congrès ICAS Munich (1968), T.P. *ONERA*, n° 601.
- [12] WIANECKI (J.) et DRIVIÈRE (J.). — Action du vent sur les bâtiments et ouvrages d'art. *Arts et Métiers*, n°s 4-5, (avril-mai 1972), p. 27-40.
- [13] WERLÉ (H.). — Le tunnel hydrodynamique au service de l'industrie. *Sciences et Techniques*, n° 17 (décembre 1969), p. 35-42.
- [14] WERLÉ (H.). — Visualisation hydrodynamique d'écoulements instationnaires. N.T. *ONERA*, n° 180 (1971), voir aussi [25].
- [15] TULIN (M.) and SCHWARTZ (J.). — Hydrodynamic aspect of waste discharge. *J. Hydronautics*, vol. 6, n° 1 (janvier 1972), p. 7-15.
- [16] ETZOLD (F.) und WILLE (R.). — Strömungsprobleme an Schiffs-schornsteinen. *Schiff und Hafen*, Heft 6 (1972), p. 378-380.
- [17] WERLÉ (H.). — Sur l'écoulement autour d'un faisceau tubulaire. *Revue française de Mécanique*, n° 41 (1972), p. 7-19.
- [18] MAUZÉ (G.) et THIBERT (J.-J.). — Méthode d'étude expérimentale de grilles d'aubes transsoniques à forte déviation. Communication à l'ATMA (session 1972).
- [19] WERLÉ (H.). — Essais de soufflage au tunnel hydrodynamique à visualisation. N.T. *ONERA*, n° 61 (1960).
- [20] WERLÉ (H.). — Sur l'écoulement au bord d'attaque d'un profil portant. *La Recherche aérospatiale*, n° 4 (1973), p. 197-218.
- [21] WERLÉ (H.) et GALLON (M.). — Adaptation de la cuve hydraulique à la visualisation de l'écoulement dans les turbomachines. *La Recherche aérospatiale*, n° 1 (1972), p. 15-21.
- [22] CHINCHOLLE (L.). — Visualisation des écoulements relatifs dans les machines tournantes. Rotoscope. *La Houille Blanche*, n° 1 (1968).
- [23] DE SIEVERS (A.) et LARGUIER (R.). — Dispositif d'étude de l'écoulement aérodynamique interne d'une turbomachine axiale. Communication à l'ATMA (session 1973), voir aussi [26].
- [24] Film *ONERA* n° 757. — Méthodes de visualisation hydrodynamique des écoulements (1973) (16 mm, sonore, 35 mn, en couleur).
- [25] Film *ONERA* n° 666. — Ecoulements instationnaires (1971) (16 mm, sonore, 20 mn, en couleur).
- [26] Film *ONERA* n° 707. — Ecoulement dans une maquette de turbomachine axiale (version muette présentée à la session 1973 de l'ATMA ; version sonore en préparation).