

R.A. 1980-5

333

OFFICE NATIONAL D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES

29, Avenue de la Division Leclerc, 92320 CHATILLON (France)

**TRANSITION ET DÉCOLLEMENT :
VISUALISATIONS AU TUNNEL HYDRODYNAMIQUE DE L'ONERA**

par WERLÉ H.

Extrait de La Recherche Aérospatiale No 1980-5, p. 331-345.

TRANSITION ET DÉCOLLEMENT : VISUALISATIONS AU TUNNEL HYDRODYNAMIQUE DE L'ONERA

par

Henri WERLÉ (*)

RÉSUMÉ

Quelques expériences limitées à la visualisation de l'écoulement ont mis en lumière certains mécanismes de la transition en précisant notamment ses aspects instationnaires, tourbillonnaires et tridimensionnels, ainsi que les effets des différents paramètres agissant sur le phénomène.

Ces résultats permettent de distinguer quelques cas fondamentaux : transition naturelle, transition assurée par un décollement du type bulbe ou sans recollement, transition déclenchée par un obstacle, transition résultant d'un cisaillement latéral, que l'on peut observer sur les différents modèles soumis aux essais : plaque plane, profil, fuselage, sphère, cylindre, aile droite, aile en flèche.

Mots clés (lexique CEDOCAR) : Transition — Couche limite — Décollement écoulement — Écoulement incompressible — Tunnel hydrodynamique — Visualisation écoulement.

TRANSITION AND SEPARATION : VISUALISATIONS IN THE ONERA WATER TUNNEL

SUMMARY

A few experiments restricted to flow visualization brought to light some transition mechanisms, through the specification of its unsteady, vortical and three dimensional characteristics as well as the effect of the various parameters acting on the phenomenon.

These results make it possible to identify some basic cases : natural transition, transition caused by a bulb type separation, with or without reattachment, transition triggered by an obstacle, transition resulting from a lateral shear, which could be observed on the various models tested : flat plate, airfoil, fuselage, sphere, cylinder, straight wing, sweptback wing.

Keywords (NASA thesaurus) : Flow visualization — Boundary layer — Separated flow — Incompressible flow — Transition flow.

(*) Ingénieur Chef de Groupe de Recherche à l'O.N.E.R.A.

I. — INTRODUCTION

Comme on le sait, l'une des premières visualisations d'écoulement, celle effectuée par **Osborn Reynolds** en 1883 [1], a précisément servi à étudier l'apparition de la turbulence dans une conduite. Depuis cette date, le phénomène de la transition a fait l'objet de très nombreux travaux, dont la liste ne cesse de s'allonger et dont une revue même succincte sort bien entendu du cadre de cet article. La bibliographie donnée ci-dessous [2 à 25] concerne principalement les visualisations de ce phénomène et comporte probablement des omissions involontaires.

Dans la plupart des cas cités, ces visualisations ont été utilement complétées par des mesures quantitatives, par fil chaud ou tout autre moyen de sondage, alors que les expériences qui vont être décrites ci-dessous ne sont actuellement que qualitatives, le nombre de Reynolds indiqué pour chaque essai servant surtout de repère.

Le taux de turbulence dans les différentes veines d'essai du tunnel ONERA existant fera l'objet d'une série de mesures à l'occasion de la prochaine mise en service de nouvelles installations hydrauliques complétant le laboratoire actuel.

Fallait-il dans ces conditions entreprendre l'étude de ce phénomène fondamental de la mécanique des fluides? Il semble que l'on ne peut être qu'affirmatif, car les techniques de visualisation utilisées se sont révélées tout à fait aptes à mettre en lumière la structure complexe des différents types de transition que l'on peut observer en écoulement plan, axisymétrique et tridimensionnel. C'est là l'objet de cet article qui passe en revue une grande variété de modèles allant de la plaque plane à l'aile en flèche.

L'observation détaillée des phénomènes intéresse donc un grand nombre de configurations qui, pour la plupart, mettent en jeu les effets d'interaction entre transition et décollement. On est ainsi tout naturellement conduit à analyser les modifications qu'entraîne pour une zone décollée le passage au régime turbulent.

II. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

Les caractéristiques et performances normales du tunnel hydrodynamique de **Châtillon** [26] ont été précisées à plusieurs reprises dans des articles parus dans cette revue : sa veine (section 220×220 , vitesse maximale : 20 cm/s) convient surtout à la visualisation des écoulements en régime laminaire.

Grâce à la mise en service d'une veine auxiliaire à section réduite (140×140), dans laquelle la vitesse maximale atteint 50 cm/s, il a été possible d'étendre le domaine d'expérimentation du tunnel à l'étude des régimes transitionnels, et même turbulents.

De même, les méthodes de visualisation habituelles mettant en jeu des traceurs liquides ou gazeux sont bien connues des lecteurs de cette revue : il s'agit par exemple du procédé classique des filets de colorant de mêmes densité et viscosité que l'eau émis en des points isolés et judicieusement choisis de la surface des modèles, un passage à l'écoulement pariétal pouvant être obtenu par une réduction progressive du débit des colorants (fig. 10b). En régime turbulent, ce procédé conserve une certaine efficacité en dépit de la diffusion rapide du colorant (fig. 10b'). Dans un écoulement stationnaire, les filets représentent des lignes de courant (fig. 11a''). Quand l'écoulement devient instationnaire, ils ne constituent plus que des lignes d'émission qui révèlent cependant l'allure de l'écoulement instantané et notamment l'existence de décollements, tourbillons ou sillages (fig. 4c).

Pour mettre en évidence des phénomènes plus aléatoires, comme la formation des spots de turbulence (inter-

mittence) en régime transitionnel, une variante du procédé consiste à émettre par une fente une nappe colorée pariétale continue couvrant tout ou partie du modèle (fig. 1a'a''). Bien entendu, cette couche, plus ou moins épaisse suivant le débit d'émission, cesse d'être continue lorsqu'elle aboutit (fig. 1d'') ou émerge (fig. 1d''') dans une zone turbulente.

Le deuxième procédé adopté utilise de minuscules bulles d'air en suspension dans l'eau intéressant l'ensemble du champ aérodynamique. Grâce à un éclairage limité à une mince tranche de lumière, on peut observer leur déplacement dans une coupe longitudinale (fig. 1a et 7ab) ou au travers d'une coupe transversale (fig. 7b'' et 12f). En régime turbulent, les images obtenues à l'aide de ces bulles d'air fournissent surtout l'allure de l'écoulement moyen en raison de leur temps d'exposition ($\geq 1/10$ s).

PLAQUE PLANE

L'évolution en fonction d'une vitesse croissante (Re), de l'écoulement pariétal le long d'une paroi sans gradient de pression longitudinal est illustrée par les différentes vues de la figure 1. La nappe colorée pariétale représente une surface de courant plane en régime laminaire (fig. 1a, a'a''). En régime transitionnel, elle s'anime d'ondulations périodiques bidimensionnelles (ondes de **Tollmien Schlichting** : fig. 1bb'b'') avant de se désorganiser en raison de ruptures de plus en plus fréquentes (phénomène d'intermittence : fig. 1cc'c'') : on note la forme en V des déchirures. Enfin, à vitesse élevée, les spots turbulents à structure tridimensionnelle s'étendent à l'ensemble de l'écoulement (fig. 1dd'd''d'''). La figure 5a résume l'évolution que l'on peut observer le long d'une plaque suffisamment longue. Un gradient de pression longitudinal obtenu en inclinant légèrement la plaque (fig. 2) provoque d'abord un resserrement des différents domaines laminaire, transitionnel et turbulent décrits ci-dessus (fig. 2abb' et 2ef), puis l'apparition lorsque l'incidence croît d'un mince bulbe à décollement laminaire et recollement turbulent (fig. 2cc'd et 2ghh'i); la transition se manifeste alors par des échappements tourbillonnaires bidimensionnels, d'abord bien structurés, puis se désorganisant en aval. La figure 5a' schématise ce deuxième cas de transition.

PROFIL

Au-dessus d'un profil, soit par exemple le profil NACA 0012 (fig. 3), on retrouve tous les phénomènes observés dans les deux cas de base précédents.

À incidence nulle (fig. 3a) et pour un nombre de Reynolds d'essai suffisamment faible, la nappe de colorant pariétale émise au bord d'attaque s'étend jusqu'au bord de fuite sans décoller et en restant laminaire.

À 5° d'incidence (fig. 3bb'), la transition intervient en aval de la mi-corde et une couche limite turbulente se développe ensuite jusqu'au bord de fuite sans décoller (fig. 5b); sur les bords, cette transition intervient plus tôt en raison d'inévitables effets parasites le long des panneaux de garde.

Vers 12° d'incidence (fig. 3cc'), le gradient de pression longitudinal devient important et il se forme un mince bulbe au voisinage du bord d'attaque à décollement laminaire et recollement turbulent (fig. 5b''). La transition se manifeste par un échappement de rouleaux tourbillonnaires d'abord organisés au-dessus du bulbe, puis se scindant en spots isolés côté aval.

À 15° (fig. 3d), le bulbe s'étend et la désagrégation des rouleaux intervient plus rapidement. Quand le nombre de Reynolds diminue (Re , passant de 3.10^4 à 10^4 , fig. 3d'), le décollement s'étend à l'ensemble de l'extrados accompagné de la formation de grosses structures d'abord organisées puis se désagrégeant rapidement.

N° d'origine des fig. prises par la RA 1980-5

< TRANSITION >

Fig. 1.

a 53188	a" 53074
a' 52425	
b 53186	b" C 5797
b' 52416	
c 53184	c" C 5796
c' 51534	
d 53191	d" C 5792 d" 57261
d' 51519	

Fig. 2

a 53083	e 53093
b 53117d	f 53091
b' C 5794	g 53117g
c 53115d	h 53115g
c' 53078	h' 53089
d 53076	i 53088

Fig. 3

a 53126g
b 53130g
b' 53138d
c 53130d
c' 53138g
d 53134d
d' 53132d

Fig. 4

a 58542	a' 58735
b 58541	b' 58488
c 58540	d 58538
c' 58491	d' 58492
e 58536	e' 58739
f 58571	e" 58574

Fig. 5

schémas a a'
b b' b" b"
c c' c"
d d' d"
e e' e'

Fig. 6

a 59163	a' 59165d
	a" 59165m
b 59112	b' 59089
	b" 59090
c 59118	c' 59131
	c" 59132

Fig. 7

a 51500	a' 51592h
b 51505	e 51584
b' 51564	c' 51567
b" 51595b	c" 51595h

Fig. 8

a 57846	a' 57861
b 57837	b' 57828

Fig. 9

a 50331	b 50385
a' 50351	b' 50371
c 52291 d 52301	b" 50376
c' 52339 d' 52348	e 52364 f 52358
	e' 52376 f' 52385

Fig. 10

a 46736	a' 46761
b 53427	b' 53444

Fig. 11

a 55195	b 55200
a' 54852	b' 55202
a" 54830	b" 55211

Fig. 12

a 55491	a' 55488
b 55487	b' 55486
	c 53547
d 54117	e 54093d f 53956
d' 55493	e' 54094d f' 53957

«Транзит»

«Транзит»

Fig 1
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Fig 2
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Fig 3
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Fig 4
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Fig 5
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Fig 6
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

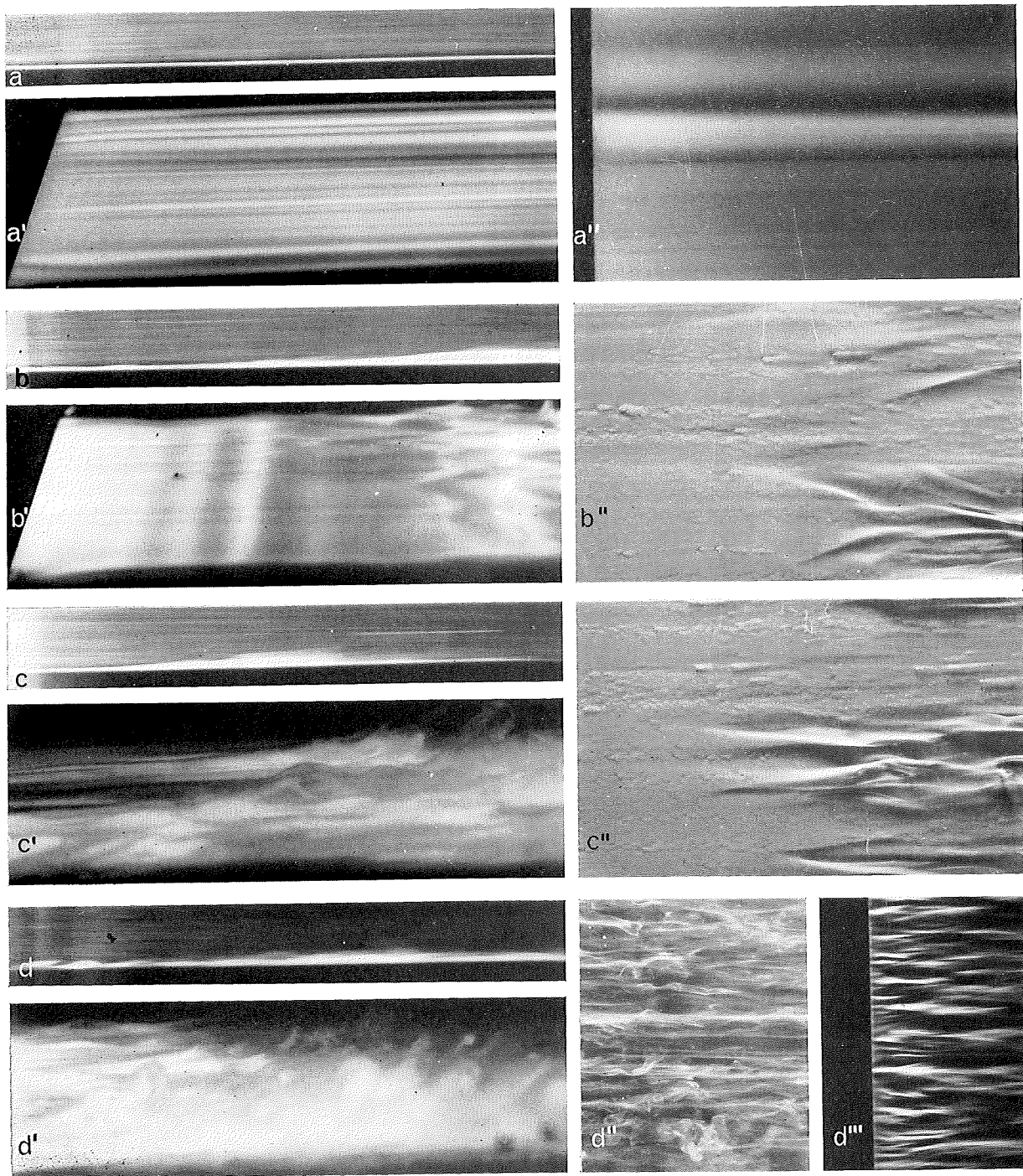


Fig. 1. — Écoulement le long d'une paroi plane sans gradient de pression longitudinal ($\alpha = 0^\circ$).

- $aa'd''$ régime laminaire : $Re_x \approx 0,2 \cdot 10^5$.
- $bb'b''$ début du régime transitionnel (ondes de Tollmien Schlichting) : $Re_x \approx 0,75 \cdot 10^5$.
- $cc'c''$ régime transitionnel (intermittence) : $Re_x \approx 0,9 \cdot 10^5$.
- $dd'd''d'''$ régime turbulent établi : $Re_x \approx 1,5 \cdot 10^5$. (x de 150 à 300 mm suivant les cas)

- coupes longitudinales ($abcd$) visualisées par bulles d'air et colorant pariétal;
- vues perspectives et en plan (tous les autres clichés) visualisées à l'aide de colorant émis à l'amont sous la forme d'une nappe pariétale (sauf d'' , colorant émis dans la couche limite turbulente).

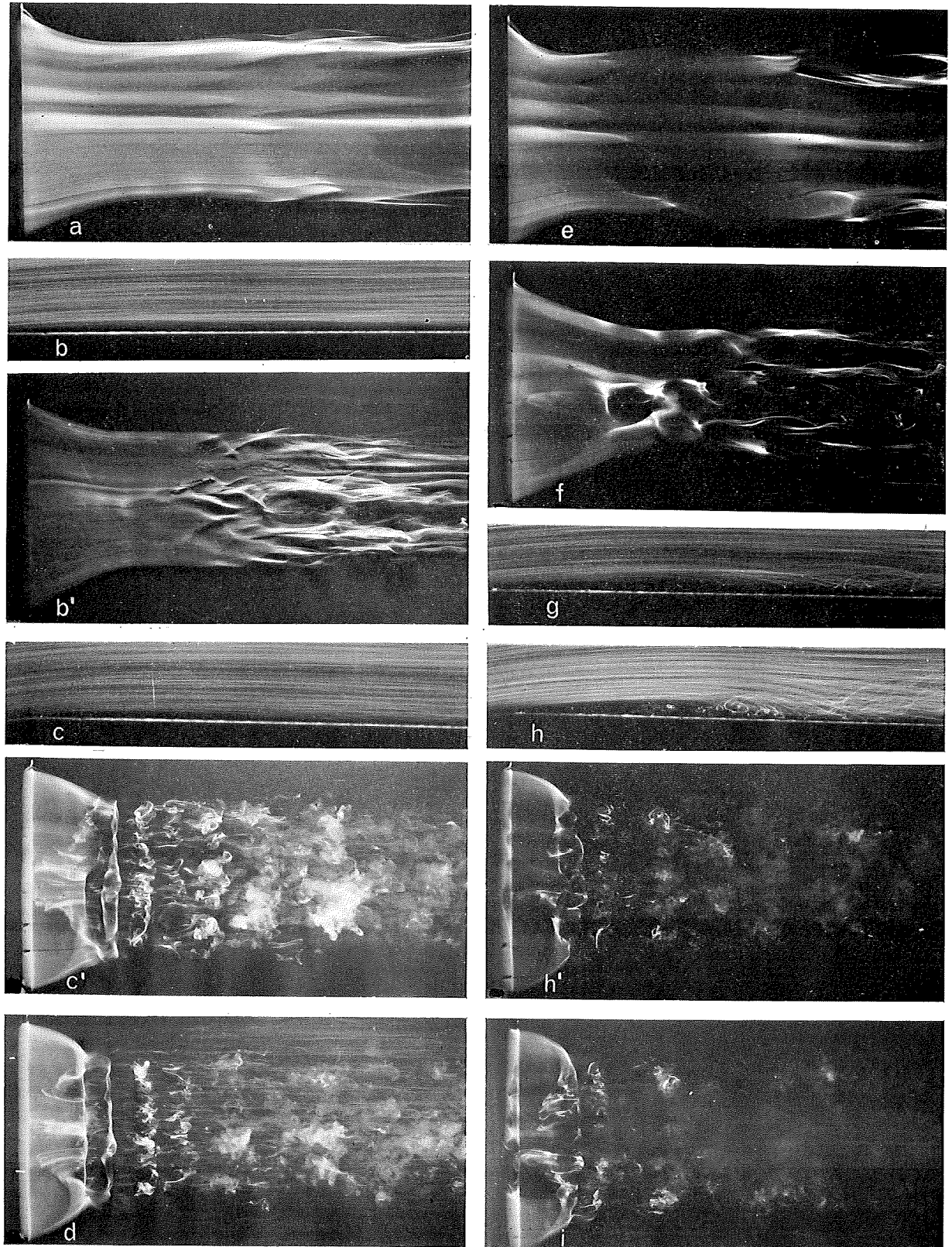


Fig. 2. — Écoulement le long d'une paroi plane avec gradient de pression longitudinal
(à gauche : $\alpha = 1^\circ$, à droite : $\alpha = 2^\circ$)

Régime laminaire : a ($Re_x \approx 0,3 \cdot 10^5$) et e ($Re_x \approx 0,2 \cdot 10^5$).
 Régime transitionnel : bb' ($Re_x \approx 0,45 \cdot 10^5$) et f ($Re_x \approx 0,3 \cdot 10^5$).
 (sans décollement)
 Régime turbulent : g ($Re_x \approx 0,45 \cdot 10^5$)
 (transition assurée) cc' et hh' ($Re_x \approx 0,6 \cdot 10^5$)
 par un bulbe décollé d et i ($Re_x \approx 0,75 \cdot 10^5$)
 au bord d'attaque ($x \approx 150$ mm).

Coupes longitudinales (b, c, h) et vues en plan (tous les autres clichés).

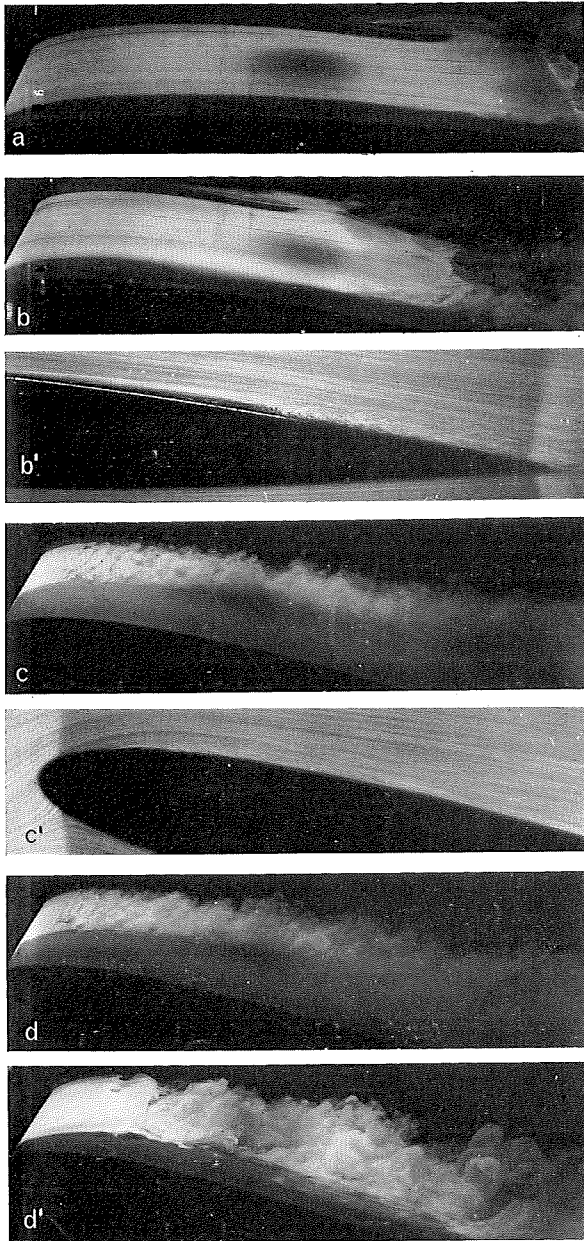


Fig. 3. — Écoulement autour d'un profil avec incidence. Vues perspectives de l'extrados (abcd) et coupes suivant le profil médian (b'c').

a $\alpha = 0^\circ$
 bb' $\alpha = 5^\circ$
 cc' $\alpha = 12^\circ 5'$
 dd' $\alpha = 15^\circ$

profil NACA 0012
 corde $l = 200$
 $Re_l \approx 0,3 \cdot 10^6$
 (sauf d' : $Re_l \approx 10^6$).

Le deuxième exemple concerne le profil ONERA D auquel est consacré la figure 4, qui précise l'évolution du décollement sur l'extrados et son interaction avec le phénomène de transition en fonction de l'incidence et du nombre de Reynolds :

- à 5° d'incidence, on décèle à faible Reynolds — $Re_l \approx 10^4 - 2,5 \cdot 10^4$ (fig. 4bb') — un décollement arrière qui déclenche la transition (fig. 5b'). La zone décollée se referme en « moyenne » en aval du bord de fuite pour donner naissance à un sillage avec tourbillons alternés du type Bénard-Karman. Sa structure moyenne est celle qui a été déterminée en soufflerie à l'aide de sondages et visualisations par fumée [27]; quand le

nombre de Reynolds croît, soit $Re_l \approx 5 \cdot 10^4$ (fig. 4aa'), un décollement avant peut être localisé au bord d'attaque sous la forme d'un minuscule bulbe, fermé en moyenne, et à recollement turbulent. En assurant la transition et ainsi la réactivation de la couche limite aval, ce bulbe permet d'éviter le décollement arrière;

- à 10° d'incidence (fig. 4cc'), ce bulbe [28] est plus important, et s'étend encore, lorsque le nombre de Reynolds est moins élevé (fig. 4dd');
- à 15° d'incidence (fig. 4ee'e''), le décollement se généralise à l'ensemble de l'extrados. Les frontières fluctuantes, côté extrados et intrados, de la zone décollée sont le siège de tourbillons emportés par le courant (fig. 5b'''). Cette zone décollée se referme en moyenne en aval du bord de fuite, comme le prouve une émission de colorant effectuée à l'aide d'une sonde isolée (fig. 4e''')
- à 20° d'incidence (fig. 4f), cette zone décollée s'étend en épaisseur et en aval, son caractère tourbillonnaire s'accroît.

FUSEAU CYLINDRIQUE

Un premier exemple d'écoulement axisymétrique concerne celui d'un fuseau de révolution; il s'agit d'un cylindre ($D = 80$) à tête ogivale placée à incidence nulle.

La figure 6 permet de comparer dans les mêmes conditions d'essai :

- d'une part, le cas laminaire du fuseau lisse (vues 6aa'a'');
- d'autre part, les cas avec transition déclenchée artificiellement par un obstacle d'épaisseur $e = 1$ mm (fig. 6bb'b'') et 2 mm (fig. 6cc'c'').

Le décollement localisé qui se fixe le long de cet obstacle assure la transition de la couche limite laminaire par l'intermédiaire des rouleaux qui se forment à sa frontière et qui sont ensuite emportés par le courant (fig. 5c). Ces structures, d'abord toriques, se scindent ensuite en éléments isolés, comme cela avait été observé en courant plan.

Quand l'épaisseur e croît, la désagrégation des rouleaux intervient plus rapidement tandis que le décollement derrière l'obstacle s'étend. Quand le nombre de Reynolds diminue, le décollement s'étend aussi, mais la transition et les rouleaux qui l'assurent, n'apparaissent que plus en aval.

Un autre type de transition de la couche limite laminaire qui se développe sur un fuseau lisse sans incidence (fig. 7aa') peut être obtenu sous l'effet de la rotation d'une partie du moyeu cylindrique.

Pour une valeur modérée du rapport de la vitesse de rotation à la vitesse du courant (fig. 7bb'b''), le cisaillement de la couche limite sur la partie tournante provoque déjà des différences de caractère et d'orientation des lignes d'émission pariétales : laminares côté amont, transitionnelles au milieu, turbulentes côté aval (fig. 7b').

Pour un rapport de vitesse élevé (fig. 7cc'c''), ce phénomène s'accroît : la couche limite cisailée s'épaissit et devient le siège de tourbillons à structure hélicoïdale emportés par le courant. La diffusion du colorant souligne le passage du régime laminaire au régime turbulent (fig. 7c'). La visualisation par bulles d'air dans une coupe transversale (fig. 7c'') permet de distinguer la trace des différents tourbillons qui se forment dans cette couche cisailée et qui caractérisent ce type de transition (fig. 5d''').

SPHÈRE

Le cas classique de la sphère, qui a servi longtemps de critère pour la transition [29], peut être évoqué brièvement à l'aide de la figure 8.

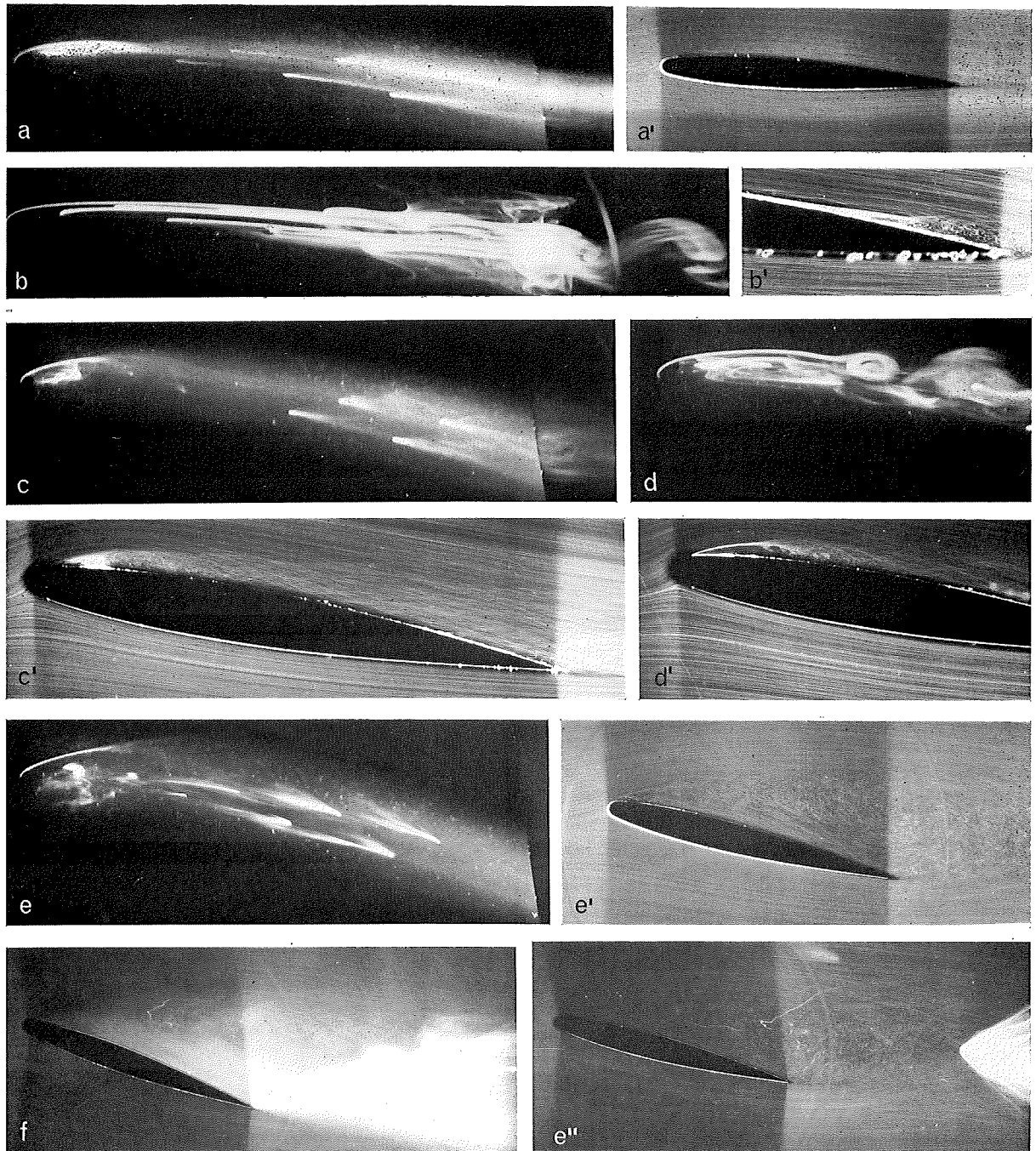


Fig. 4. — Écoulement autour d'un profil avec incidence.
Vues perspectives de l'extrados (abcde) et coupes suivant le profil médian (a'b'c'd'e'e''f).

$aa'bb'$ $\alpha = 5^\circ$.
 $cc'dd'$ $\alpha = 10^\circ$.
 $ee'e''$ $\alpha = 15^\circ$.
 f $\alpha = 20^\circ$

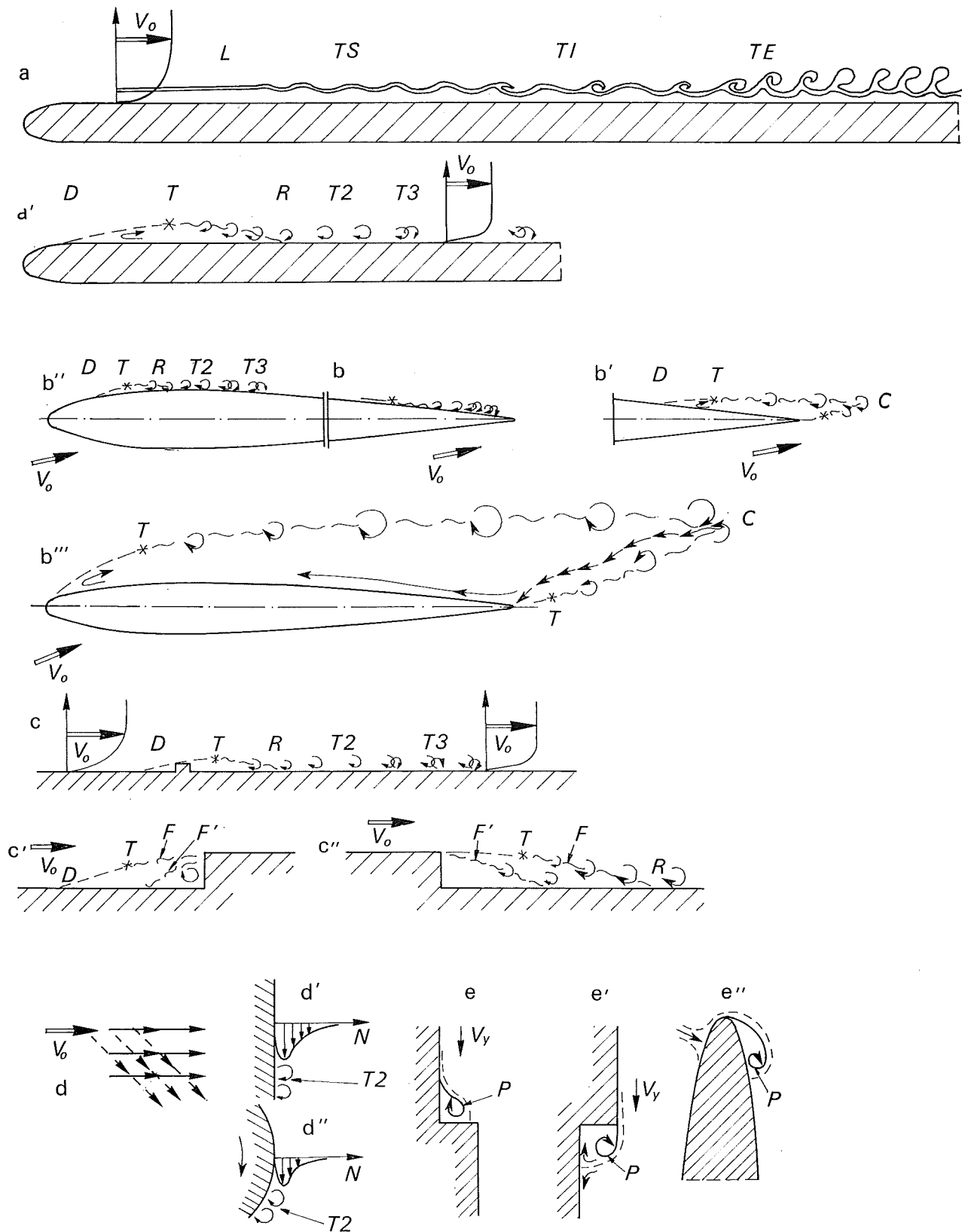
profil ONERA D
 corde $l = 100$ ($e/l = 10,5\%$)
 $Re_l \approx 0,5 \cdot 10^5$
 sauf $b'd'$ ($Re_l \approx 0,25 \cdot 10^5$)
 et bd ($Re_l \approx 10^4$)

Fig. 5. — Schémas relatifs à la transition laminaire-turbulent de l'écoulement le long de différents modèles. →

aa' : paroi plane sans et avec gradient de pression longitudinal.
 $bb'b''b'''$: profil avec incidence.
 $cc'c''$: obstacle, ressaut ou décrochement le long d'une paroi plane ou d'un fuseau cylindrique sans incidence.
 $dd'd''$: paroi avec couche limite cisailée latéralement (effet de flèche ou rotation).
 $ee'e''$: paroi avec ressaut ou décrochement en flèche, bord d'attaque en flèche.

Légende :

L : régime laminaire.
 TS : ondes de Tollmien Schlichting.
 TI : phénomène d'intermittence.
 TE : turbulence établie.
 D : ligne de décollement laminaire
 T : transition.
 R : zone de recollement turbulent.



- T2 : structures tourbillonnaires bidimensionnelles (rouleaux) ou hélicoïdales (schéma d').
- T3 : structures tourbillonnaires tridimensionnelles.
- C : zone de confluence au sein du fluide assurant la fermeture en moyenne de la zone décollée et prolongée par un sillage à tourbillons alternés.
- F : frontière moyenne de la zone décollée se formant devant un ressaut ou derrière un décrochement de paroi (F' en régime turbulent).
- ab : transition sans décollement.
- b' : transition assurée par un décollement arrière.
- a'b' : transition assurée par un bulbe décollé au bord d'attaque.
- b'' : transition autour d'un décollement généralisé à l'ensemble du profil.
- cc' : transition déclenchée par un obstacle.
- dd'd'' : transition dans une couche limite cisailée latéralement (dérapage).
- ee'e'' : transition assurée par un décollement tridimensionnel caractérisé par une nappe en cornet enroulée autour d'un tourbillon-puits P alimenté par la couche turbulente, qui décolle devant le ressaut(e), au bord du décrochement (e'), ou le long du bord d'attaque en flèche (e'').

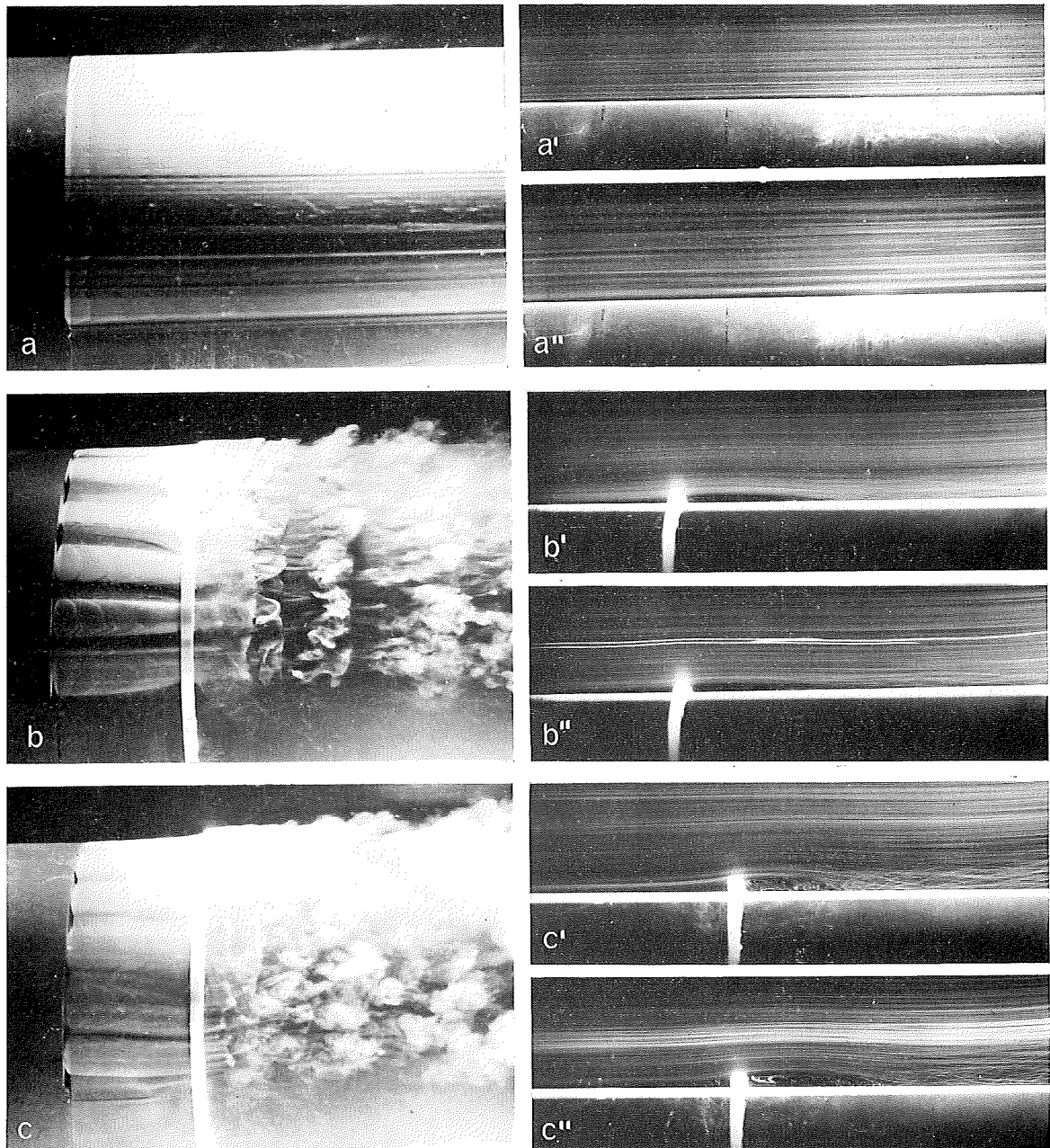


Fig. 6. — Écoulement le long d'un fuseau cylindrique fixe.
Vues en perspective (abc) et coupes diamétrales (a'a''b'b''c'c'').

$aa'a''$ écoulement laminaire (fuseau lisse)
 $bb'b''$ } transition déclenchée par un obstacle } épaisseur : 1 mm
 $cc'c''$ } épaisseur : 2 mm

$Re_x \approx 0,7 \cdot 10^5$ ($x = 140$)
 sauf $a'b''c''$: $Re_x = 0,35 \cdot 10^5$
 $\alpha = 0^\circ$ diamètre $D = 80$

Fig. 8. — Écoulement autour d'une sphère.

Vues en plan (ab) et coupes diamétrales (a'b').

$D = 60$
 $Re_D \approx 3 \cdot 10^4$

aa' : sphère lisse (1^{er} régime de décollement).
 bb' : sphère avec obstacle déclenchant la transition (2^e régime).

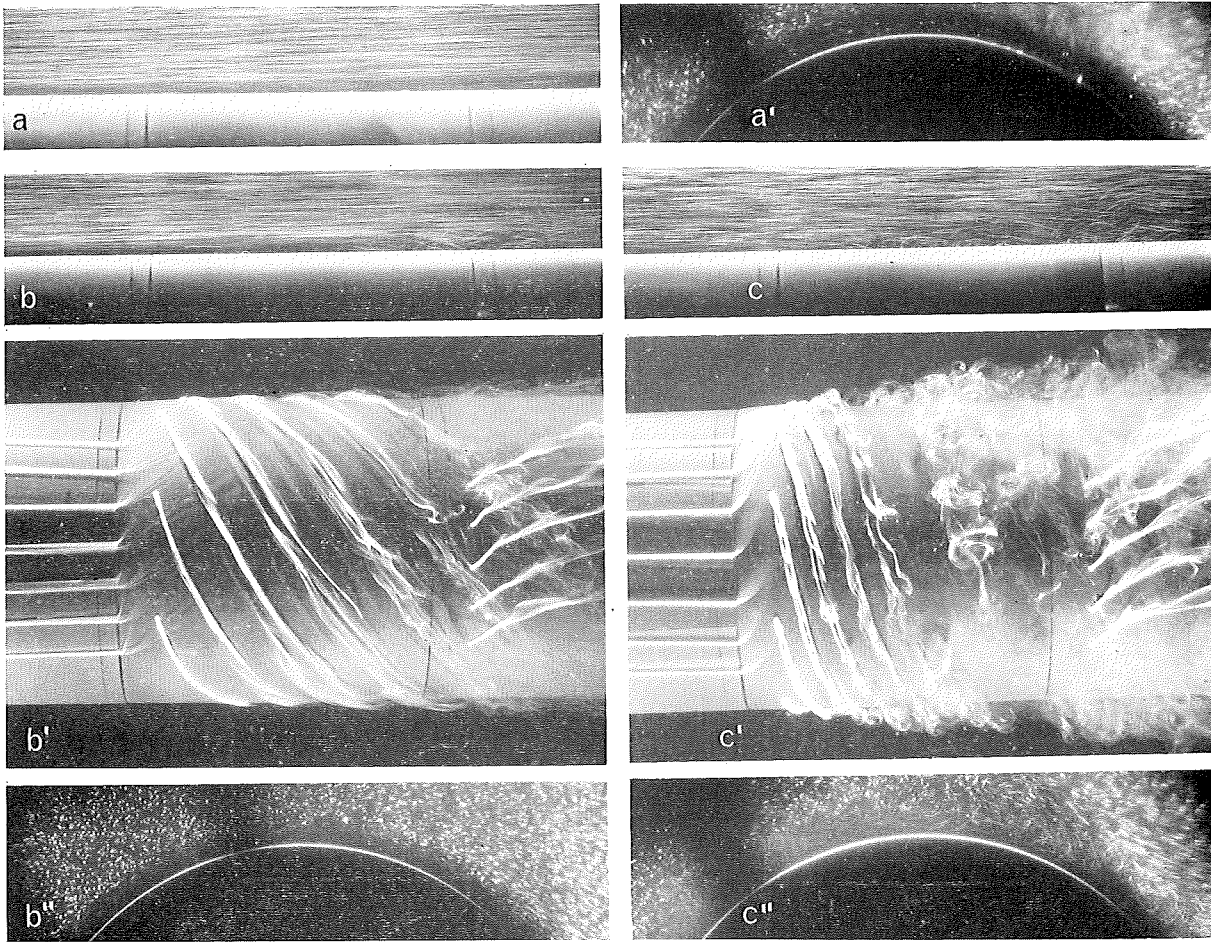
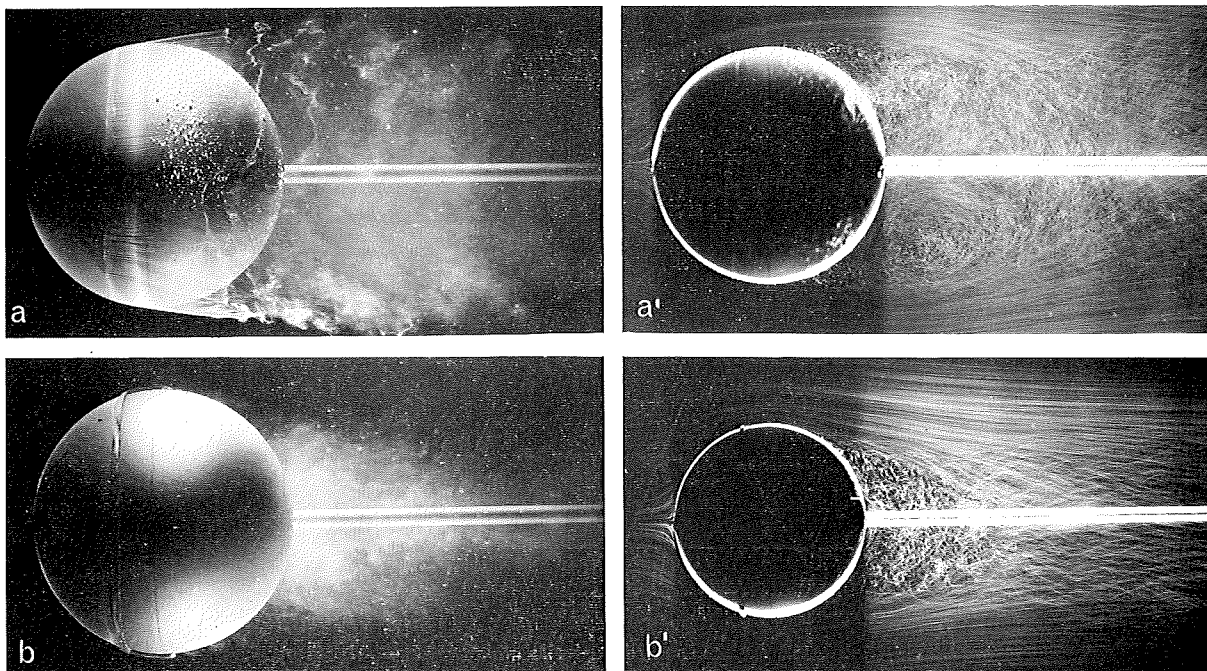


Fig. 7. — Écoulement le long d'un fuseau cylindrique avec partie tournante.
Vues en plan ($b'c'$), coupes diamétrales (abc) et transversales ($a'b''c''$).

aa' $V_t = 0$,
 $bb'b$ $V_t = 1,1 V_0$,
 $cc'c''$ $V_t = 2,2 V_0$.

$\alpha = 0^\circ$ diamètre : $D = 80$
 $x = 200$ $Re_x = 10^4$ à $2 \cdot 10^4$
 vitesse périphérique : $V_t = 2\pi DN$



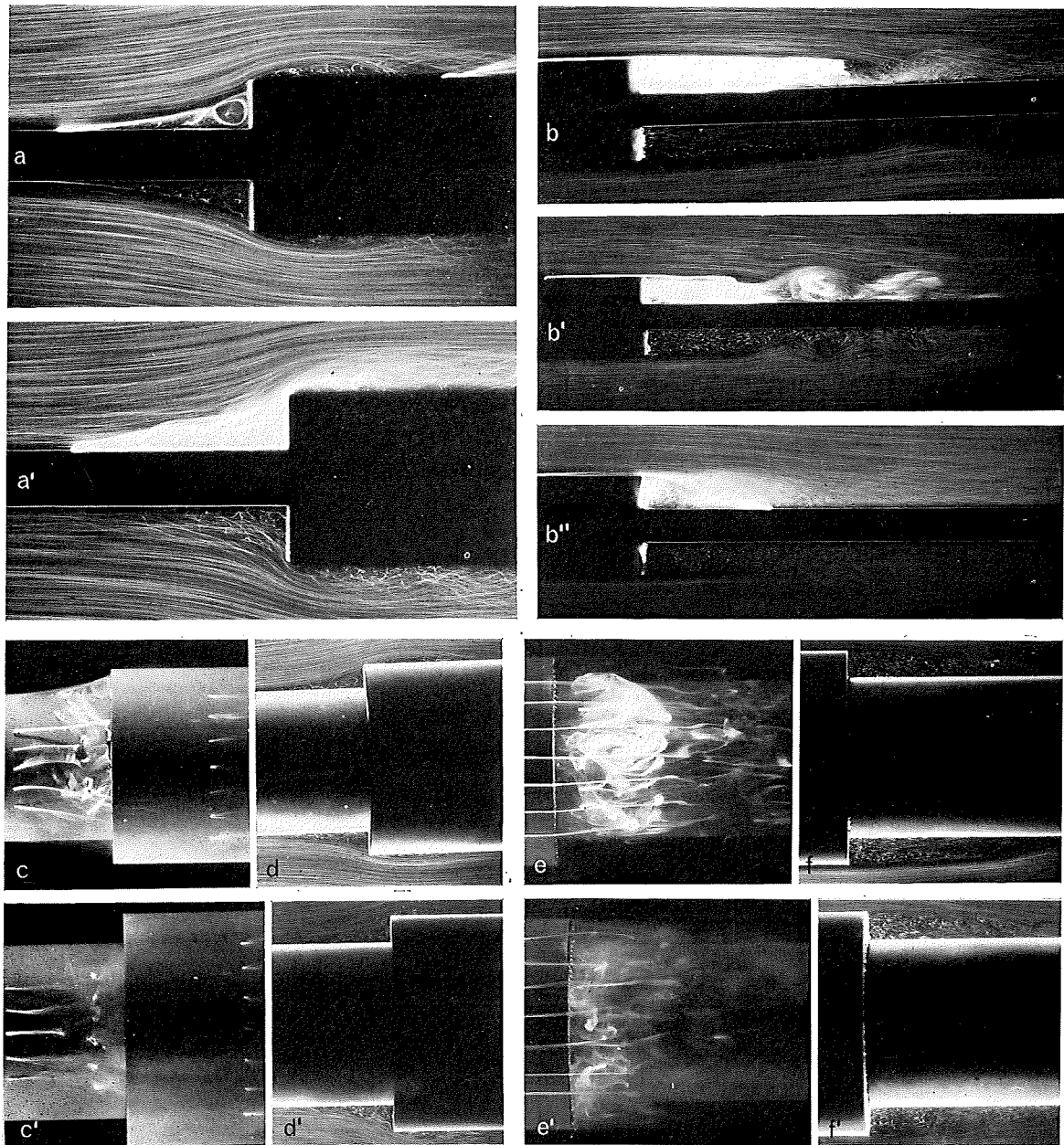


Fig. 9. — Écoulement le long d'une paroi sans incidence comportant un ressaut ou un décrochement.

Coupes suivant le plan médian d'une paroi plane ($aa'bb'b''$),
 Vues en plan ($cc'ee'$) et coupes diamétrales ($dd'ff'$) d'un fuseau cylindrique.

a	: régime laminaire	$Re_x \approx 0,5 \cdot 10^5$	
a'	: régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 10^5$	($x_{\text{ressaut}} = 200$).
b	: régime laminaire	$Re_x \approx 1,55 \cdot 10^4$	
b'	: régime laminaire	$Re_x \approx 3,1 \cdot 10^4$	($x_{\text{décrochement}} = 250$).
b''	: régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 1,2 \cdot 10^5$	
cd	: régime laminaire	Re_x de $2,5$ à $5 \cdot 10^4$	
$c'd'$: régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 10^5$	($x_{\text{ressaut}} = 260$).
ef	: régime laminaire	$Re_x \approx 0,65 \cdot 10^4$	
$e'f'$: régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 1,3 \cdot 10^4$	($x_{\text{décrochement}} = 260$).

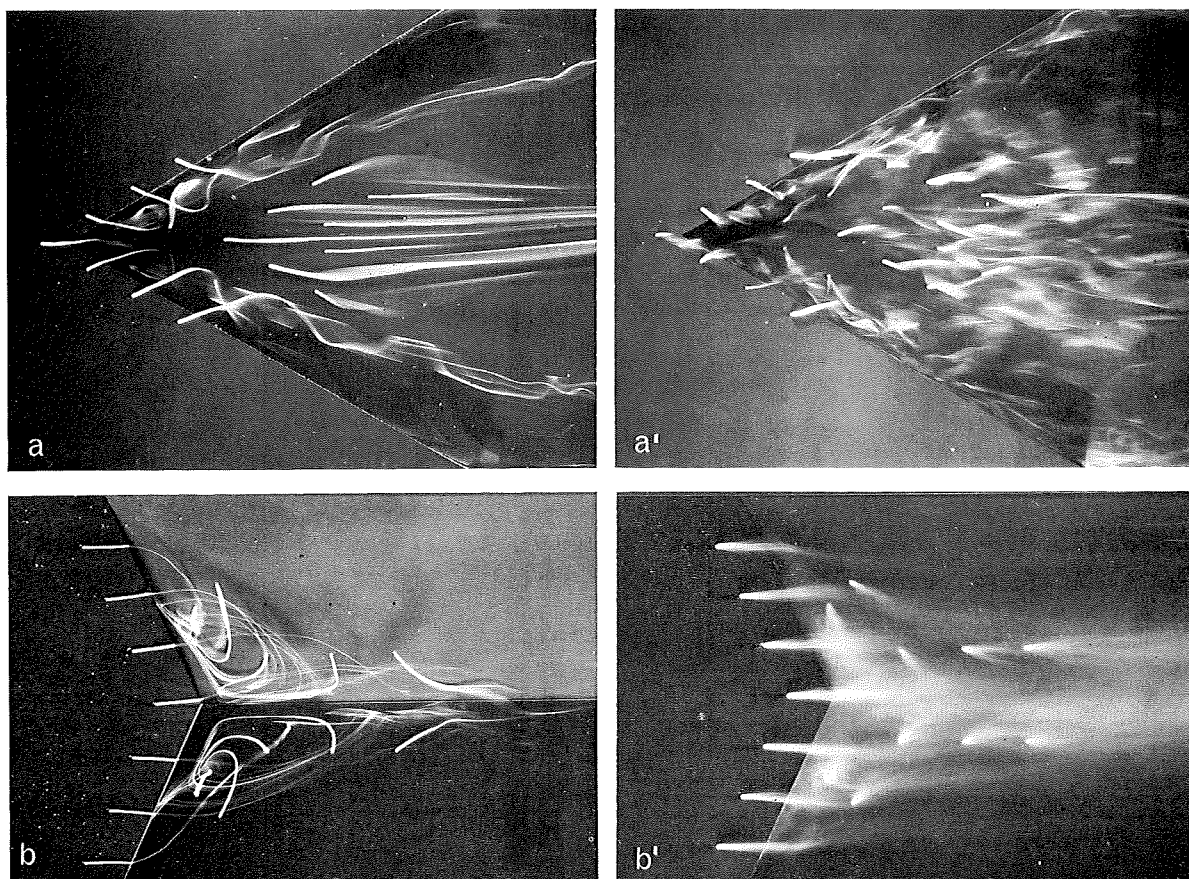


Fig. 10. — Écoulement le long d'une paroi plane comportant un décrochement en flèche (vues en plan).

Décrochement en chevron :	a	régime laminaire	$Re_x \approx 0,5 \cdot 10^4$.
($\varphi = 60^\circ$, $x_{\text{apex}} = 100$)	a'	régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 2 \cdot 10^4$.
Décrochement en auge :	b	régime laminaire	$Re_x \approx 0,8 \cdot 10^4$.
($\varphi = 25^\circ$, $x_{\text{apex}} = 170$)	b'	régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 10^5$.

Dans les conditions réalisées au tunnel ($Re_D = 3 \cdot 10^4$ a u maximum), seul le premier régime d'écoulement peut être réalisé (fig. 8a'). Le deuxième régime avec décollement réduit ne peut être obtenu qu'en déclenchant la transition par un obstacle amont (fig. 8b'). Dans les deux cas, le décollement sur la sphère et le sillage qui le prolonge soumis à des instabilités périodiques ont une structure tridimensionnelle, la symétrie de révolution ne se trouvant vérifiée que pour l'écoulement moyen (fig. 8a'b').

PAROI AVEC RESSAUT OU DÉCROCHEMENT

La présence d'une discontinuité de forme le long d'une paroi constitue un autre facteur créant un décollement (fig. 9 et 10).

Ainsi en courant plan, la couche limite laminaire décolle devant un ressaut de paroi (fig. 9a) pour se rattacher sur la face avant de l'obstacle, enfermant une zone de recirculation finie, siège d'un ou de plusieurs tourbillons stationnaires. Notons aussi la présence d'un décollement localisé sur le ressaut et fixé au bord de la paroi aval.

En régime turbulent (fig. 9a'), l'écoulement moyen visualisé par les traceurs conserve la même structure. On note simplement que le décollement plus tardif de la couche limite turbulente entraîne une réduction sensible de la zone tourbillonnaire (fig. 9c').

Un autre exemple met en jeu un décrochement de paroi au bord duquel se fixe le décollement de la couche limite

laminaire (fig. 9b). L'écoulement extérieur s'incurve et vient recoller sur la paroi aval. Dans cet essai, une émission de tourbillons (rouleaux) à la frontière de la zone décollée assure la transition et la couche limite aval est alors turbulente. Quand le nombre de Reynolds croît (fig. 9b'), les rouleaux se forment plus près du décrochement et le recollage intervient plus rapidement.

Enfin, dans le cas d'une couche limite amont turbulente (fig. 9b''), la structure de la zone décollée ne change pas fondamentalement, en dépit des remous observés. Mais son étendue moyenne est encore plus réduite (fig. 9c'') et les tourbillons émis à sa frontière fluctuante sont plus nombreux.

L'étude du comportement de la couche limite en présence d'une discontinuité de paroi a été reprise dans le cas d'un fuseau de révolution sans incidence. En régime laminaire (fig. 9cd), la couche périphérique décolle devant un ressaut, cependant la symétrie de révolution de ce décollement ne se maintient pas en permanence. La coupe diamétrale visualisée par bulles d'air (fig. 9d) confirme que la structure tourbillonnaire de la zone décollée est la même qu'en courant plan. En régime turbulent (fig. 9c'd'), la structure de l'écoulement se maintient comme c'était déjà le cas en courant plan. La coupe diamétrale (fig. 9d') révèle en outre que le décollement turbulent libre devant le ressaut intervient plus tard, de ce fait la zone décollée est plus réduite qu'en laminaire.

Dans le deuxième cas examiné, le décollement de la couche périphérique se fixe au bord droit d'un décroche-

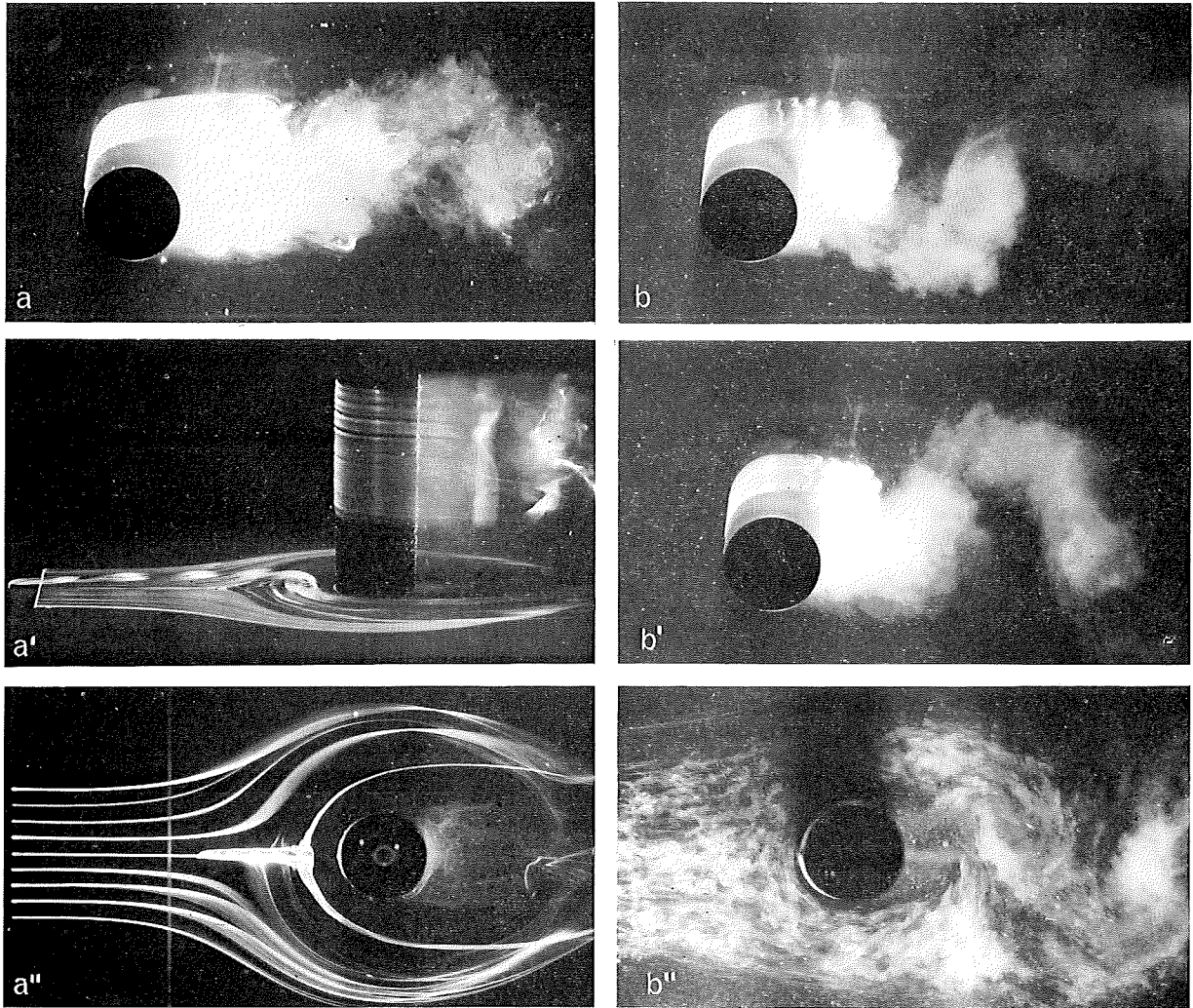


Fig. 11. — Écoulement autour d'un cylindre fixé le long d'une paroi plane (montage « courant plan »)

Vues perspectives ($aa'bb'$) et de profil ($a''b''$)

$aa'a''$ régime laminaire le long de la paroi : $Re_D \approx 0,3 \cdot 10^4$

$bb'b''$ régime turbulent le long de la paroi : $Re_D \approx 1,5 \cdot 10^4$ ($D = 30$).

ment de paroi. En régime laminaire (fig. 9ef), on observe à la frontière de cette zone décollée finie, la formation de rouleaux d'abord toriques, puis se désorganisant en aval où ils sont emportés par le courant. La coupe diamétrale (fig. 9f) permet de distinguer comme en courant plan le caractère mixte de la zone décollée laminaire côté amont, turbulente côté aval.

En régime turbulent (fig. 9e'f'), la rapide diffusion des colorants n'empêche pas de constater que l'écoulement moyen s'organise comme dans le cas laminaire, mais les fluctuations et échanges accrus assurent un brassage et une fermeture plus rapide de la zone décollée.

Les figures 5c' et c'' sont donc valables en écoulement axisymétrique aussi bien qu'en courant plan.

Par contre, ceci n'est plus vrai dans le cas d'un écoulement tridimensionnel. En effet, comme cela avait déjà été établi en régime laminaire [30], les décollements tourbillonnaires, soit par exemple devant un obstacle d'envergure limité (fig. 11) ou derrière un décrochement de paroi en flèche (fig. 10) comportent des structures ouvertes vers l'amont et l'aval : en effet, une couche de courant alimente le noyau du tourbillon qui s'incurve vers l'aval où il évacue le débit capté. Cette structure reste valable en régime transitionnel ou turbulent (fig. 5ee').

Dans le cas d'un décrochement de paroi en flèche

accentuée ($\varphi = 60^\circ$) du type « chevron » (fig. 10aa'), la structure tourbillonnaire qui s'établit de part et d'autre du plan de symétrie à partir d'un point de décrochement avancé s'apparente à celle que l'on observe sur une aile delta mince avec incidence, et c'est cette pointe avancée qui joue le rôle d'apex. La turbulence ne modifie pas fondamentalement l'organisation de ce décollement tridimensionnel.

Il en est de même dans le cas d'un décrochement de paroi en flèche modérée ($\varphi = 25^\circ$) du type « auge » (fig. 10bb'), où l'on observe la confluence des deux tourbillons se formant le long des bords du décrochement, tourbillons qui se rejoignent le long du plan de symétrie en emprisonnant une zone de recirculation médiane qui prolonge le bord de fuite du décrochement insuffisamment pointu, et dont la structure organisée — on y distingue notamment deux foyers — se conserve en régime turbulent.

CYLINDRE

Comme on le sait [31], l'écoulement autour d'un cylindre n'est véritablement plan qu'en dehors du voisinage des panneaux entre lesquels il est monté (fig. 11abb').

Comme devant un ressaut de paroi, on observe devant

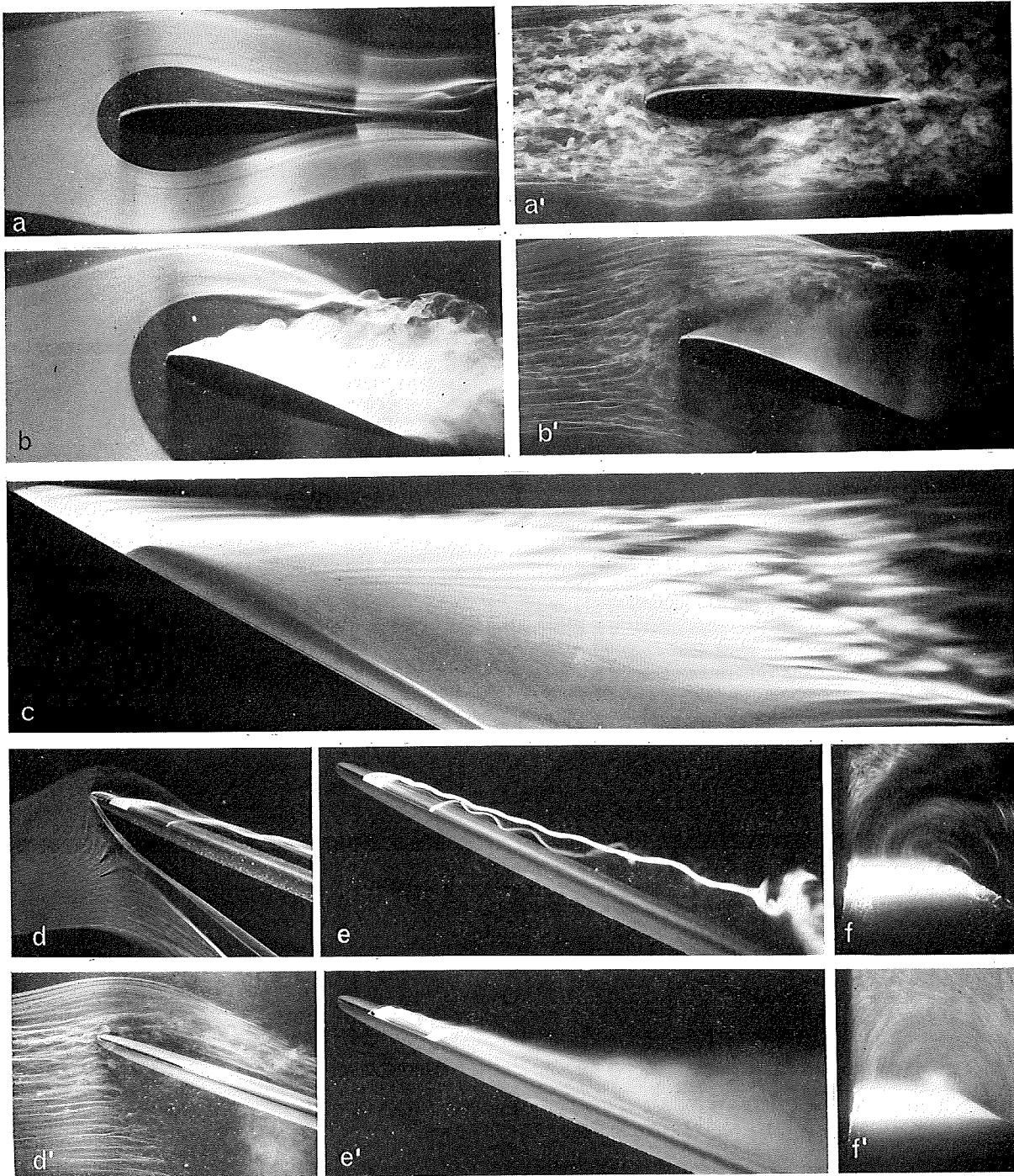


Fig. 12. — Écoulement autour d'une aile fixée le long d'une paroi plane.
(montage « courant plan » et montage demi-maquette)

Vues de profil (aa' bb' dd' ee'), vue en plan (c) et coupes transversales (ff') situées à la hauteur de la mi-corde d'emplanture.

Aile droite (profil NACA0012, $l = 90$) à incidence $\alpha = 0^\circ$ (aa') et 20° (bb') :
 ab régime laminaire $Re_l \approx 0,9 \cdot 10^4$
 $a'b'$ régime turbulent $Re_l \approx 4,5 \cdot 10^4$.

Aile en flèche ($\varphi = 60^\circ$, profil ONERA D sauf indication contraire) $l = 200$ à l'emplanture :
 c $\alpha = 5^\circ$ vue de l'extrados (profil NACA 0012) $Re_l \approx 10^5$.
 def $\alpha = 25^\circ$ 20° pour d régime laminaire $Re_l \approx 0,2 \cdot 10^5$.
 $d'e'f'$ $\alpha = 25^\circ$ (20° pour d') régime turbulent $Re_l \approx 10^5$.

le cylindre un décollement de la couche limite du panneau avec formation de tourbillons principaux et secondaires, mais avec une structure tridimensionnelle. En effet, les tourbillons, alimentés par une mince couche de courant, s'incurvent en fer à cheval de part et d'autre du cylindre et évacuent vers l'aval le débit capté. En régime laminaire (fig. 11aa'a"), aucune interaction ne se produit entre cette structure pariétale et les tourbillons de Bénard-Karman qui se forment plus loin dans le sillage. A vitesse élevée (fig. 11bb'b"), ces tourbillons alternés apparaissent dans le proche sillage, l'écoulement le long du panneau devient turbulent, et même instationnaire car soumis aux fluctuations périodiques du sillage, mais il conserve finalement sa même structure moyenne.

AILES

Pour compléter cette étude phénoménologique des effets de la turbulence sur les écoulements tridimensionnels, il nous reste à examiner le cas des ailes illustré par la figure 12.

Comme autour d'un cylindre, l'écoulement autour d'une aile droite (fig. 12aa'bb') n'est véritablement plan qu'en dehors des panneaux de garde.

La couche limite laminaire (fig. 12ab) de ces panneaux décolle en effet devant l'obstacle que constitue le modèle. Cette plage décollée et le tourbillon en fer à cheval qui s'y forme sont symétriques à incidence nulle; ils se développent côté intrados quand l'incidence croît [32].

En régime turbulent (fig. 12a'b'), les décollements sont plus réduits mais subsistent : ils sont plus difficiles à observer sur les clichés que sur les films [35].

Le dernier cas évoqué dans cet article est celui de l'aile cylindrique en flèche accentuée, qui a déjà fait l'objet de publications antérieures [33 et 34].

A faible incidence, soit pour $\alpha = 5^\circ$ (fig. 12c), la nappe de colorant émise sur l'extrados révèle que l'écoulement ne décolle pas, mais qu'il se produit, comme on l'a vu dans [34], un fort dérapage vers le bord d'attaque des lignes de courant pariétales (formation d'une nappe tourbillonnaire non décollée et de ce fait non enroulée). Dans les conditions des essais ($Re = 10^5$), ce dérapage provoque près du bord de fuite la formation d'un réseau de petits tourbillons longitudinaux parallèles qui assurent la transition et évitent le décollement arrière (fig. 5dd').

A incidence élevée, on retrouve l'image classique du décollement le long d'un bord d'attaque en flèche, avec la nappe enroulée en « cornet » autour d'un tourbillon principal issu de l'apex et éclatant côté aval (fig. 12ef). La turbulence ne modifie pas cette structure organisée (fig. 5e"), mis à part la position plus proche du bord d'attaque, du tourbillon et son éclatement plus précoce (fig. 12e'f'). Il en est de même le long du panneau de garde (fig. 12dd'), où la flèche de l'aile réduit l'effet d'obstacle et par conséquent l'étendue de la plage décollée devant l'apex de l'aile.

CONCLUSION

Limitée à la seule visualisation des phénomènes, la présente étude n'a donc pour ambition que de permettre une meilleure compréhension de certains mécanismes associés à la transition. Ainsi, grâce à la variété des résultats obtenus, on a pu préciser, d'une part les principaux types de transition qui apparaissent dans les écoulements plans, axisymétriques et tridimensionnels, d'autre part les effets du passage au régime turbulent sur les couches limites et plus spécialement les décollements.

Cette étude purement qualitative doit être étendue à l'observation des phénomènes intéressant les sillages et les jets et complétée par la mesure d'un certain nombre de grandeurs du champ permettant une analyse plus complète de différents facteurs agissant sur les processus de formation de structures turbulentes.

RÉFÉRENCES

- [1] REYNOLDS O. — Phil. Trans. Roy. London II, 51 (1883).
- [2] THEODORSEN Th. — *The structure of turbulence*. — 50 Jahre Grenzschicht forschung par Görtler H. et Tollmien W. Friedr. Vieweg et Sohn, Braunschweig (1955).
- [3] TOLLMIE W. — *La physique des écoulements en 1962*. — Zeitschrift für Flugw. n° 11 (1962).
- [4] SCHRAUB F. A., KLINE S. J., HENRY J., RUNSTADLER P. W. and LITTEL A. — *Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time dependent velocity field in low speed water flows*. — Stanford University Rep. MD-10 California (1964).
- [5] IPATENKO AL. and ANTONOV AM. — *Visualization of transition phenomena in the boundary layer on turbine guide vanes*. Aviatsonnaia. Tek Vol. 7, n° 3 (1965), p. 76-82.
- [6] LEGENDRE R. — *Interprétation des mesures de turbulence*. — Note Technique ONERA n° 138 (1968).
- [7] SĂVULESCU St. N. — *Tranzitia de la scurgerea laminara' la cea turbulenta'*. — Edit. Ac. Repub. Soc. Romania Bucuresti (1968).
- [8] WORTMANN F. X. — *Visualization of transition*. — J. Fluid Mech., vol. 38, part. 3 (1968), p. 473-480.
- [9] KUCHEMANN D. — *Turbulence et mouvements tourbillonnaires*. — Z. für Flugw., n° 8-9 (1971), p. 305-308.
- [10] KIM H. T., KLINE S. J. and REYNOLDS W. C. — *Production de turbulence au voisinage d'une paroi lisse dans une couche limite turbulente*. — Journ. of Fluid Mech., vol. 50, part 1 (1971), p. 133-160.
- [11] KOVASZNY L. — *The structure of turbulence in shear flow*. — AGARD CP 93 D1-D14 (1971).
- [12] SMIGIELSKI P., FAGOT H., ALBE F. et OUDIN R. L. — *Diagnostic des turbulences. 1^e, partie : visualisations*. — IRSL. Rap. 38/71.
- [13] BIPPES H. — *Experimentelle Untersuchungen des laminar-turbulenten Umschlags an einer parallel angeströmten konkaven Wand*. — Sitzungsbericht Heidelberger Acad. Wiss. 3. Abhandlung (1972).
- [14] DAVIES P. — *Structure of turbulence*. — J. of Sound and Vibration, vol. 28, n° 2 (1973), p. 513-526.
- [15] OFFEN G. R. and KLINE S. J. — *Experiments on the velocity characteristics of « bursts » and on the interactions between the inner and outer regions of a turbulent boundary layer*. — Rep. MD-31 Stanford Univ. California (1973).
- [16] NYCHAS S. G., HERSHEY H. C. and BRODKEY R. S. — *A visual study of turbulent shear flow*. — J. of Fluid Mech., vol. 61, part 3 (1973), p. 513.
- [17] FALCO R. E. — *Combined simultaneous flow visualization hot-wire anemometry for the study of turbulent flows*. — AIAA Pap. n° 74-99 (1974).
- [18] RESHOTKO E. — *Boundary layer stability and transition*. — Annual Review of Fluid Mech, vol. 8 (1976), p. 311.
- [19] WORTMANN F. X. — *The incompressible fluid motion downstream of twodimensional Tollmien Schlichting waves*. — AGARD CP-224, Mémoire n° 12 (1977).
- [20] ARNAL D., JUILLEN J. C. and MICHEL R. — *Calculation method and experimental analysis of the onset and development of boundary layer transition*. — AGARD CP-224, Mémoire n° 13 (1977).
- [21] MOULDEN T. R. FROST W. and GARNER A. — *The complexity of turbulent fluid motion from*. — Handbook of turbulence, vol. 1, Edit. Plenum Publi. Corporation (1977).
- [22] MORKOVIN M. V. — *Instability, transition to turbulence and predictability*. — AGARD AG-236 (1978).
- [23] MULLER T. J. — *Smoke visualization of subsonic and supersonic flows*. — Univ. of Notre Dame (Indiana) Fin. Rep UNDA5 TN-3412 (1978).
- [24] HOFBAUER M. — *Investigation of coherent structures in the velocity field of a fully developed turbulent channel flow using flow visualization and anemometry*. — Max Plank Inst. (Göttingen) HC A06/MFA01 (1978).

- [25] COUSTEIX J. et PAILHAS G. — *Étude exploratoire d'un processus de transition laminaire-turbulent au voisinage du décollement d'une couche limite laminaire.* — Rech. Aerosp., 1979-3. Traduction anglais. ESA.TT609.
- [26] WERLÉ H. — *Le tunnel hydrodynamique au service de la recherche aérospatiale.* — Pub. ONERA n° 156 (1974).
- [27] SOLIGNAC J. L. — *Étude du décollement de bord de fuite d'un arrière-corps de révolution profilé.* — Rech. Aérosp. n° 1980-3.
- [28] GLEYZES Ch., COUSTEIX J. et BONNET J. L. — *Bulbe de décollement laminaire avec transition.* — Aéron. et Astron. n° 80 (1980).
- [29] REBUFFET P. — *Aérodynamique expérimentale. 1^{re}, partie.* — Librairie Béranger (1950), p. 293-295.
- [30] WERLÉ H. — *Écoulements décollés.* — AGARD CP n° 168. Mémoire n° 39. T.P. ONERA, 1975-14.
- [31] WERLÉ H. et GALLON M. — *Sillages de cheminées, faisceaux tubulaires, grilles et turbomachines.* — La Houille Blanche n° 4. — T.P. ONERA 1303 (1973).
- [32] YOUNG A. — *Some special boundary layer problems.* — Z. für Flugw. und Weltraumforsch 1. Heft. 6 (1977), p. 401-414.
- [33] MIRANDE J., SCHMITT V. et WERLÉ H. — *Système tourbillonnaire présenté à l'extrados d'une aile en flèche à grande incidence.* — AGARD CP n° 247, Mémoire n° 12 (1978).
- [34] WERLÉ H. — *Structures des décollements sur les ailes en flèche.* — Rech. Aérosp. 1980-2. Traduction anglais. ESA. TT 652.
- [35] FILM ONERA n° 930. — « *Couches limites (1978).* — (16 mm, couleur, 32 mn, en français ou anglais).

