

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. pères pour 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	e' 51567
b" 51595b	e" 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»

№ п/п	№ документа	Содержание	Дата
1	2008	2008	2008
2	2009	2009	2009
3	2010	2010	2010
4	2011	2011	2011
5	2012	2012	2012
6	2013	2013	2013
7	2014	2014	2014
8	2015	2015	2015
9	2016	2016	2016
10	2017	2017	2017
11	2018	2018	2018
12	2019	2019	2019
13	2020	2020	2020
14	2021	2021	2021
15	2022	2022	2022
16	2023	2023	2023
17	2024	2024	2024
18	2025	2025	2025
19	2026	2026	2026
20	2027	2027	2027
21	2028	2028	2028
22	2029	2029	2029
23	2030	2030	2030
24	2031	2031	2031
25	2032	2032	2032
26	2033	2033	2033
27	2034	2034	2034
28	2035	2035	2035
29	2036	2036	2036
30	2037	2037	2037
31	2038	2038	2038
32	2039	2039	2039
33	2040	2040	2040
34	2041	2041	2041
35	2042	2042	2042
36	2043	2043	2043
37	2044	2044	2044
38	2045	2045	2045
39	2046	2046	2046
40	2047	2047	2047
41	2048	2048	2048
42	2049	2049	2049
43	2050	2050	2050
44	2051	2051	2051
45	2052	2052	2052
46	2053	2053	2053
47	2054	2054	2054
48	2055	2055	2055
49	2056	2056	2056
50	2057	2057	2057
51	2058	2058	2058
52	2059	2059	2059
53	2060	2060	2060
54	2061	2061	2061
55	2062	2062	2062
56	2063	2063	2063
57	2064	2064	2064
58	2065	2065	2065
59	2066	2066	2066
60	2067	2067	2067
61	2068	2068	2068
62	2069	2069	2069
63	2070	2070	2070
64	2071	2071	2071
65	2072	2072	2072
66	2073	2073	2073
67	2074	2074	2074
68	2075	2075	2075
69	2076	2076	2076
70	2077	2077	2077
71	2078	2078	2078
72	2079	2079	2079
73	2080	2080	2080
74	2081	2081	2081
75	2082	2082	2082
76	2083	2083	2083
77	2084	2084	2084
78	2085	2085	2085
79	2086	2086	2086
80	2087	2087	2087
81	2088	2088	2088
82	2089	2089	2089
83	2090	2090	2090
84	2091	2091	2091
85	2092	2092	2092
86	2093	2093	2093
87	2094	2094	2094
88	2095	2095	2095
89	2096	2096	2096
90	2097	2097	2097
91	2098	2098	2098
92	2099	2099	2099
93	2100	2100	2100
94	2101	2101	2101
95	2102	2102	2102
96	2103	2103	2103
97	2104	2104	2104
98	2105	2105	2105
99	2106	2106	2106
100	2107	2107	2107
101	2108	2108	2108
102	2109	2109	2109
103	2110	2110	2110
104	2111	2111	2111
105	2112	2112	2112
106	2113	2113	2113
107	2114	2114	2114
108	2115	2115	2115
109	2116	2116	2116
110	2117	2117	2117
111	2118	2118	2118
112	2119	2119	2119
113	2120	2120	2120
114	2121	2121	2121
115	2122	2122	2122
116	2123	2123	2123
117	2124	2124	2124
118	2125	2125	2125
119	2126	2126	2126
120	2127	2127	2127
121	2128	2128	2128
122	2129	2129	2129
123	2130	2130	2130
124	2131	2131	2131
125	2132	2132	2132
126	2133	2133	2133
127	2134	2134	2134
128	2135	2135	2135
129	2136	2136	2136
130	2137	2137	2137
131	2138	2138	2138
132	2139	2139	2139
133	2140	2140	2140
134	2141	2141	2141
135	2142	2142	2142
136	2143	2143	2143
137	2144	2144	2144
138	2145	2145	2145
139	2146	2146	2146
140	2147	2147	2147
141	2148	2148	2148
142	2149	2149	2149
143	2150	2150	2150
144	2151	2151	2151
145	2152	2152	2152
146	2153	2153	2153
147	2154	2154	2154
148	2155	2155	2155
149	2156	2156	2156
150	2157	2157	2157
151	2158	2158	2158
152	2159	2159	2159
153	2160	2160	2160
154	2161	2161	2161
155	2162	2162	2162
156	2163	2163	2163
157	2164	2164	2164
158	2165	2165	2165
159	2166	2166	2166
160	2167	2167	2167
161	2168	2168	2168
162	2169	2169	2169
163	2170	2170	2170
164	2171	2171	2171
165	2172	2172	2172
166	2173	2173	2173
167	2174	2174	2174
168	2175	2175	2175
169	2176	2176	2176
170	2177	2177	2177
171	2178	2178	2178
172	2179	2179	2179
173	2180	2180	2180
174	2181	2181	2181
175	2182	2182	2182
176	2183	2183	2183
177	2184	2184	2184
178	2185	2185	2185
179	2186	2186	2186
180	2187	2187	2187
181	2188	2188	2188
182	2189	2189	2189
183	2190	2190	2190
184	2191	2191	2191
185	2192	2192	2192
186	2193	2193	2193
187	2194	2194	2194
188	2195	2195	2195
189	2196	2196	2196
190	2197	2197	2197
191	2198	2198	2198
192	2199	2199	2199
193	2200	2200	2200
194	2201	2201	2201
195	2202	2202	2202
196	2203	2203	2203
197	2204	2204	2204
198	2205	2205	2205
199	2206	2206	2206
200	2207	2207	2207
201	2208	2208	2208
202	2209	2209	2209
203	2210	2210	2210
204	2211	2211	2211
205	2212	2212	2212
206	2213	2213	2213
207	2214	2214	2214
208	2215	2215	2215
209	2216	2216	2216
210	2217	2217	2217
211	2218	2218	2218
212	2219	2219	2219
213	2220	2220	2220
214	2221	2221	2221
215	2222	2222	2222
216	2223	2223	2223
217	2224	2224	2224
218	2225	2225	2225
219	2226	2226	2226
220	2227	2227	2227
221	2228	2228	2228
222	2229	2229	2229
223	2230	2230	2230
224	2231	2231	2231
225	2232	2232	2232
226	2233	2233	2233
227	2234	2234	2234
228	2235	2235	2235
229	2236	2236	2236
230	2237	2237	2237
231	2238	2238	2238
232	2239	2239	2239
233	2240	2240	2240
234	2241	2241	2241
235	2242	2242	2242
236	2243	2243	2243
237	2244	2244	2244
238	2245	2245	2245
239	2246	2246	2246
240	2247	2247	2247
241	2248	2248	2248
242	2249	2249	2249
243	2250	2250	2250
244	2251	2251	2251
245	2252	2252	2252
246	2253	2253	2253
247	2254	2254	2254
248	2255	2255	2255
249	2256	2256	2256
250	2257	2257	2257
251	2258	2258	2258
252	2259	2259	2259
253	2260	2260	2260
254	2261	2261	2261
255	2262	2262	2262
256	2263	2263	2263
257	2264	2264	2264
258	2265	2265	2265
259	2266	2266	2266
260	2267	2267	2267
261	2268	2268	2268
262	2269	2269	2269
263	2270	2270	2270
264	2271	2271	2271
265	2272	2272	2272
266	2273	2273	2273
267	2274	2274	2274
268	2275	2275	2275
269	2276	2276	2276
270	2277	2277	2277
271	2278	2278	2278
272	2279	2279	2279
273	2280	2280	2280
274	2281	2281	2281
275	2282	2282	2282
276	2283	2283	2283
277	2284	2284	2284
278	2285	2285	2285
279	2286	2286	2286
280	2287	2287	2287
281	2288	2288	2288
282	2289	2289	2289
283	2290	2290	2290
284	2291	2291	2291
285	2292	2292	2292
286	2293	2293	2293
287	2294	2294	2294
288	2295	2295	2295
289	2296	2296	2296
290	2297	2297	2297
291	2298	2298	2298
292	2299	2299	2299
293	2300	2300	2300
294	2301	2301	2301
295	2302	2302	2302
296	2303	2303	2303
297	2304	2304	2304
298	2305	2305	2305
299	2306	2306	2306
300	2307	2307	2307
301	2308	2308	2308
302	2309	2309	2309
303	2310	2310	2310
304	2311	2311	2311
305	2312	2312	2312
306	2313	2313	2313
307	2314	2314	2314
308	2315	2315	2315
309	2316	2316	2316
310	2317	2317	2317
311	2318	2318	2318
312	2319	2319	2319
313	2320	2320	2320
314	2321	2321	2321
315	2322	2322	2322
316	2323	2323	2323

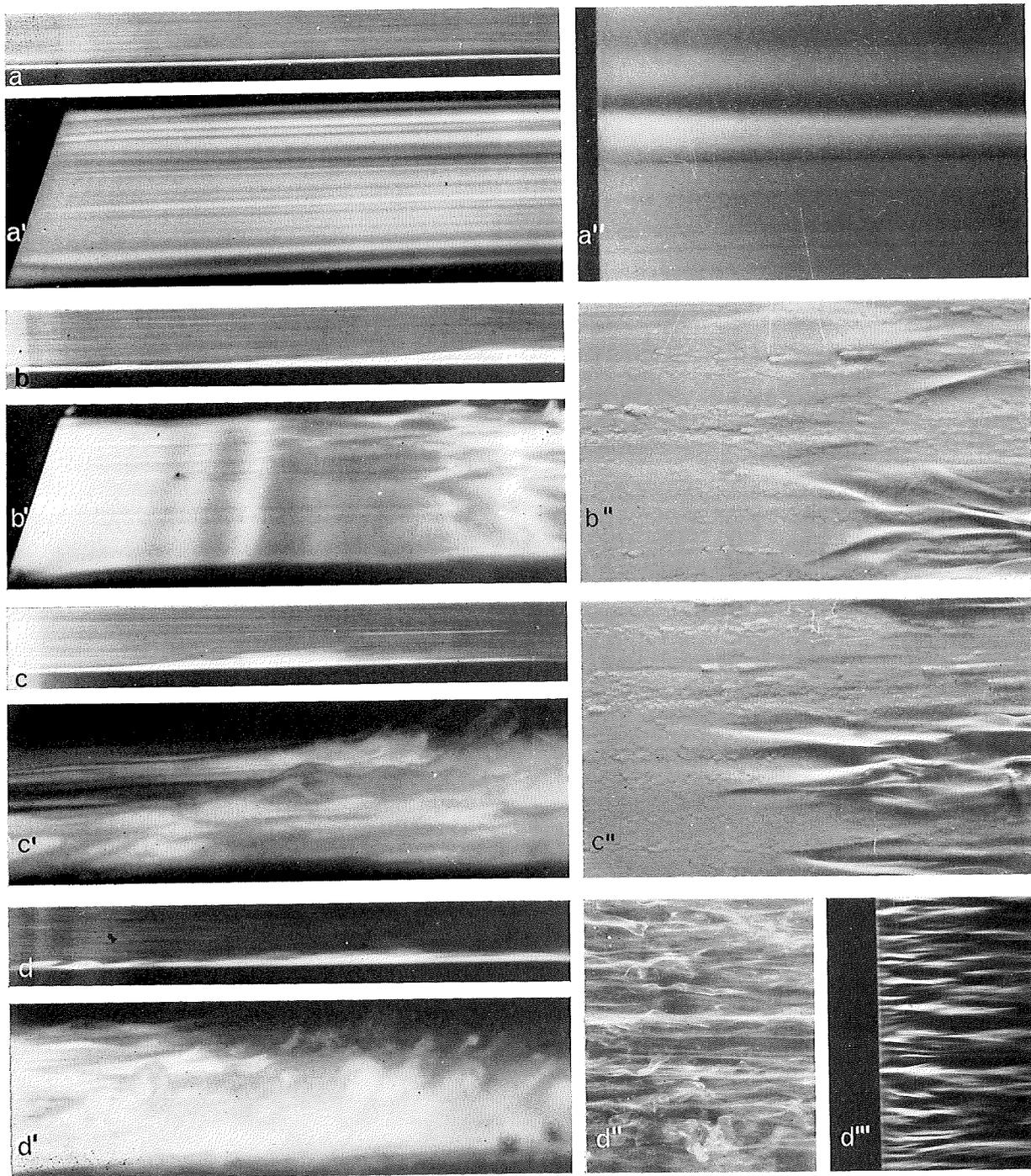


Fig. 1. — Écoulement le long d'une paroi plane sans gradient de pression longitudinal ($\alpha = 0^\circ$).

- $aa'd'$ 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).

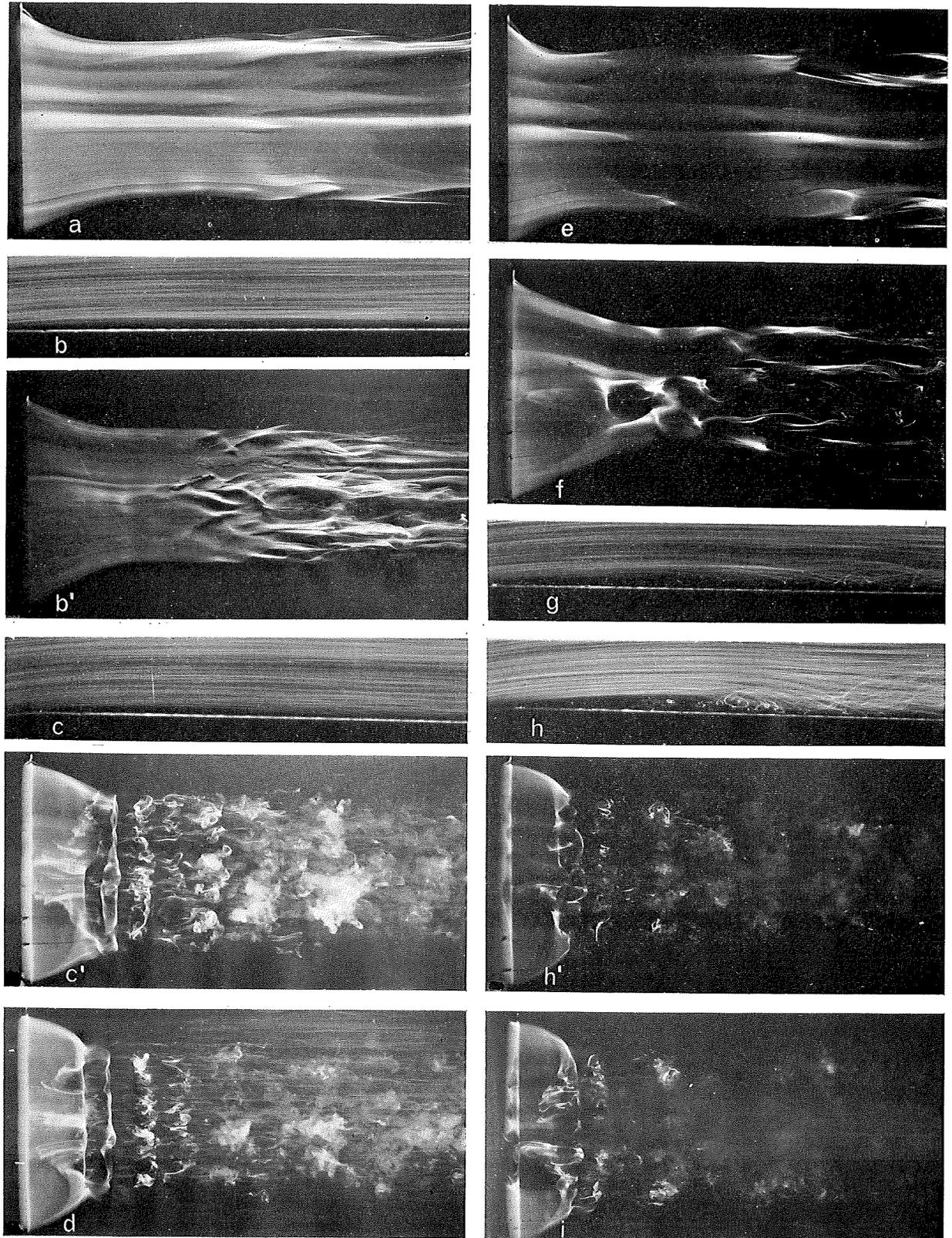


Fig. 2. — Écoulement le long d'une paroi plane avec gradient de pression longitudinal
(à gauche : $\alpha = 1^\circ$, à droite : $\alpha = 2^\circ$)

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).

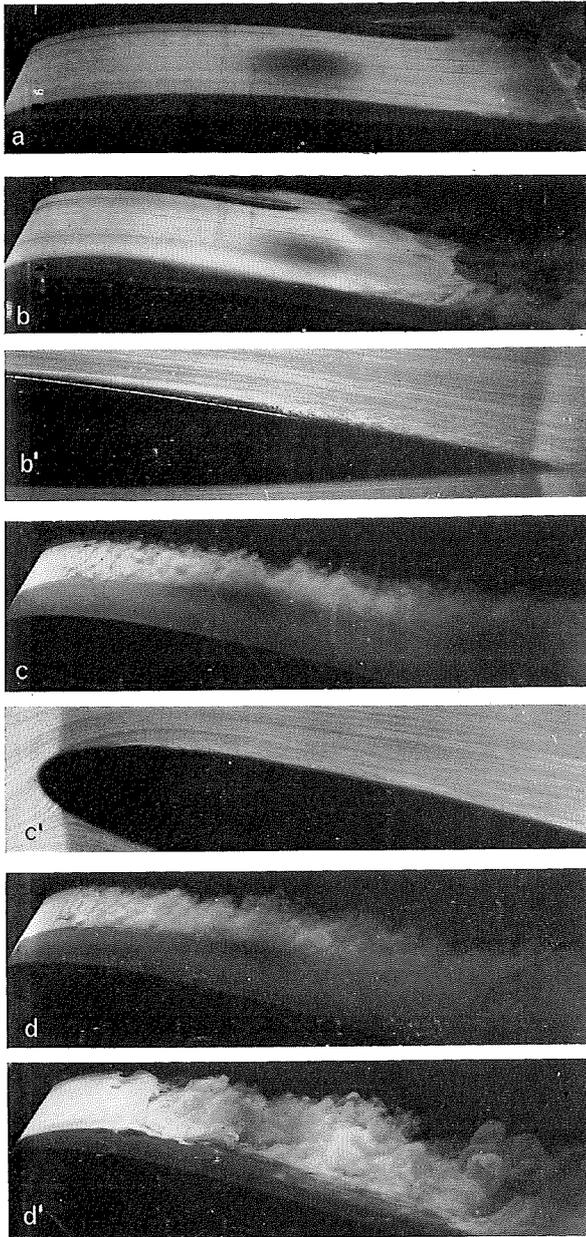


Fig. 3. — Écoulement autour d'un profil avec incidence. Vues perspectives de l'extrados (abcd) et coupes suivant le profil médian (b'c').

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 consacrée 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.

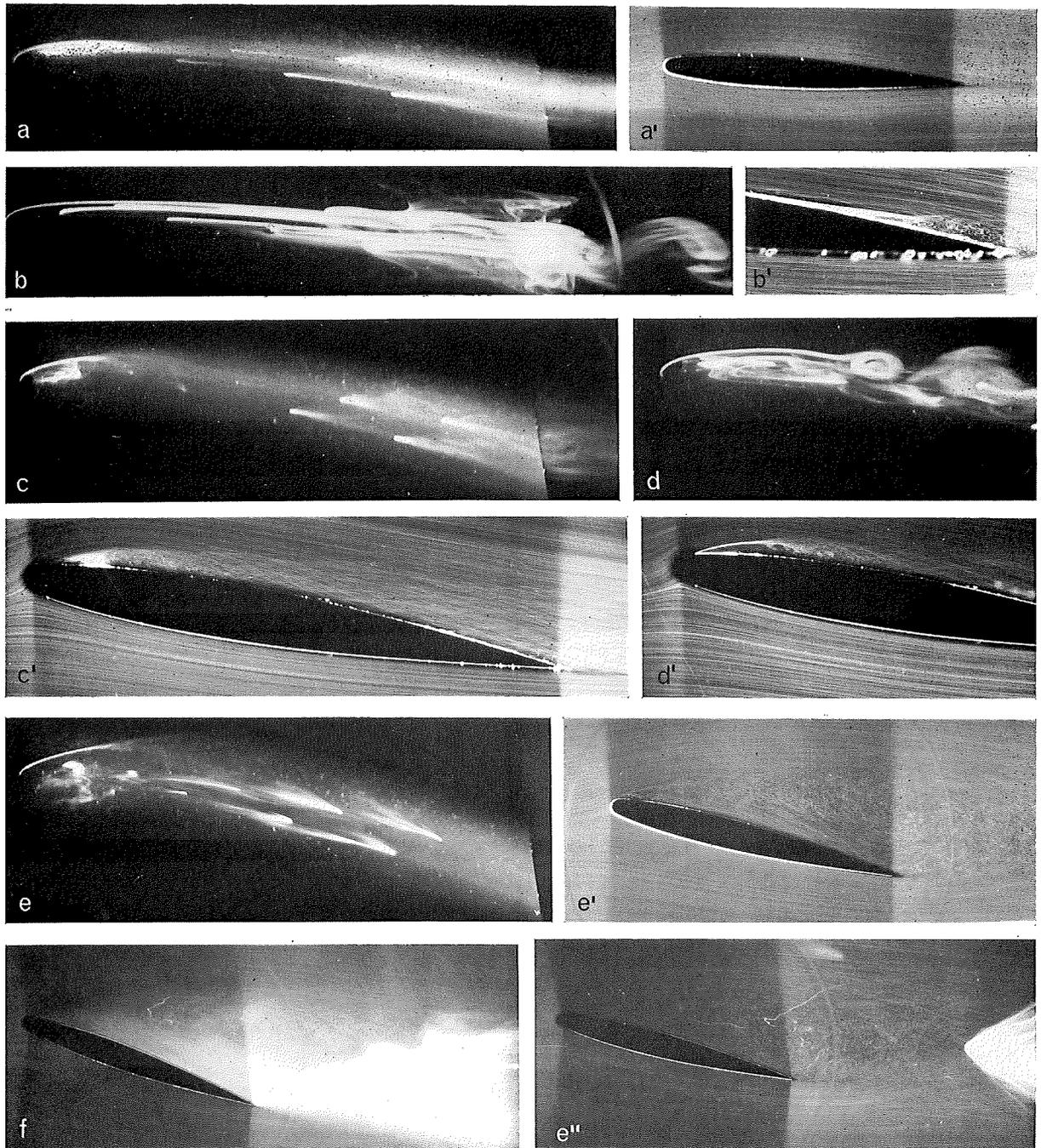


Fig. 4. — Écoulement autour d'un profil avec incidence.
Vues perspectives de l'extrados (abcde) et coupes suivant le profil médian (a'b'c'd'e'e''f).

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

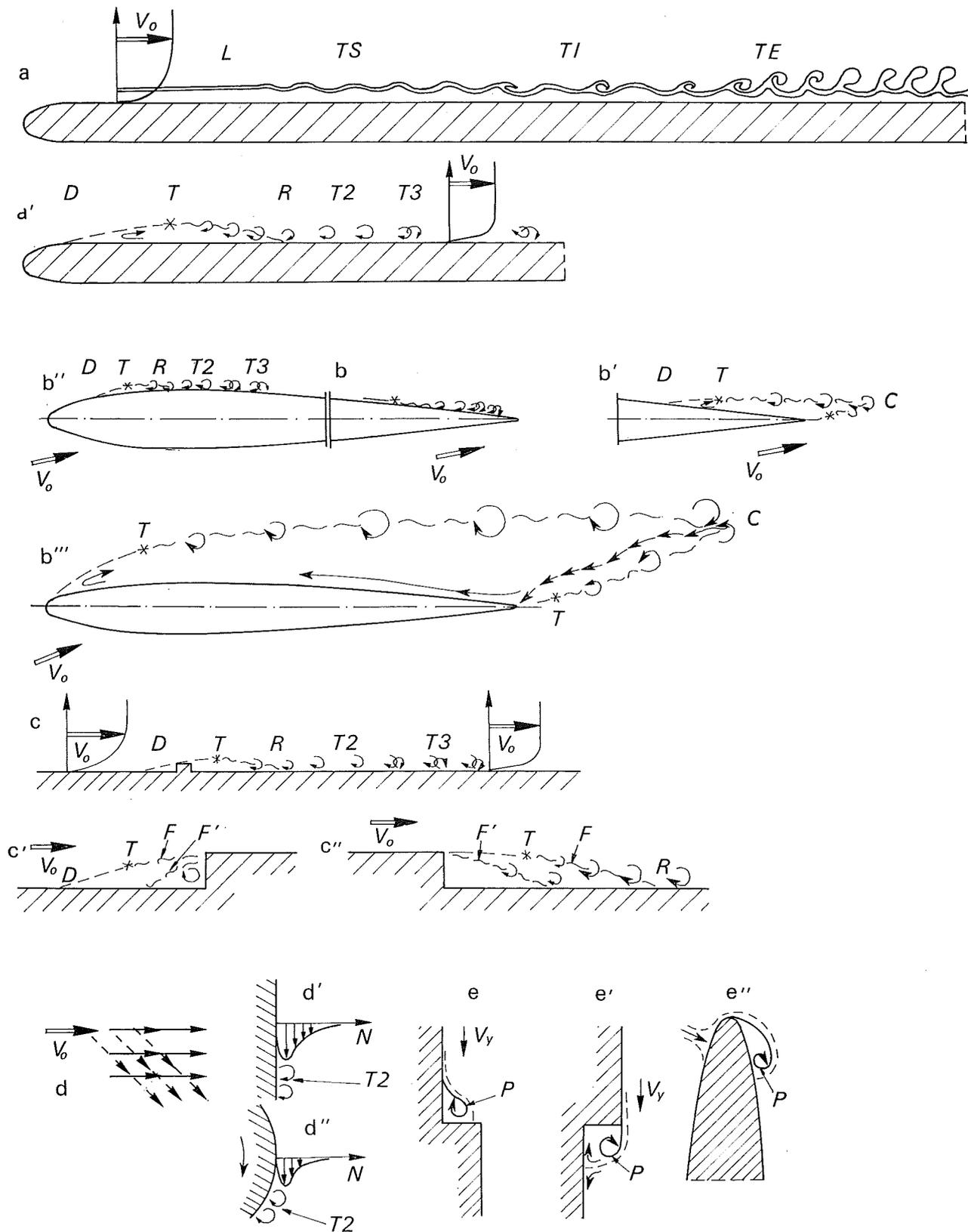
profil ONERA D
 corde $l = 100$ ($e/l = 10,5\%$)
 $Re_l \approx 0,5 \cdot 10^5$
 sauf $b'd'$ ($Re_l \approx 0,25 \cdot 10^5$)
 et bd ($Re_l \approx 10^4$)

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'').

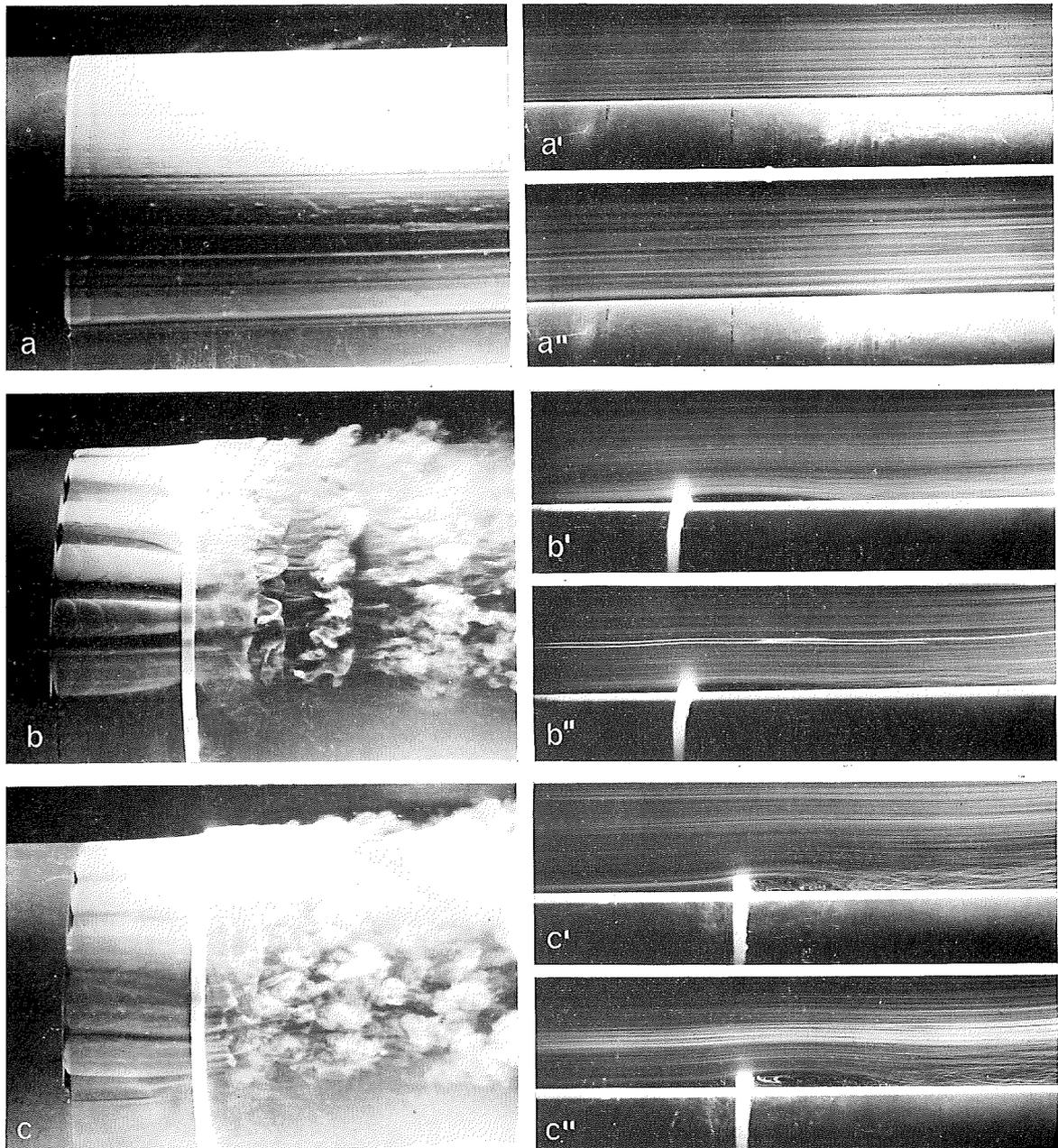


Fig. 6. — Écoulement le long d'un fuseau cylindrique fixe.
Vues en perspective (abc) et coupes diamétrales (a'a''b'b''c'c'').

$aa'a''$ 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).

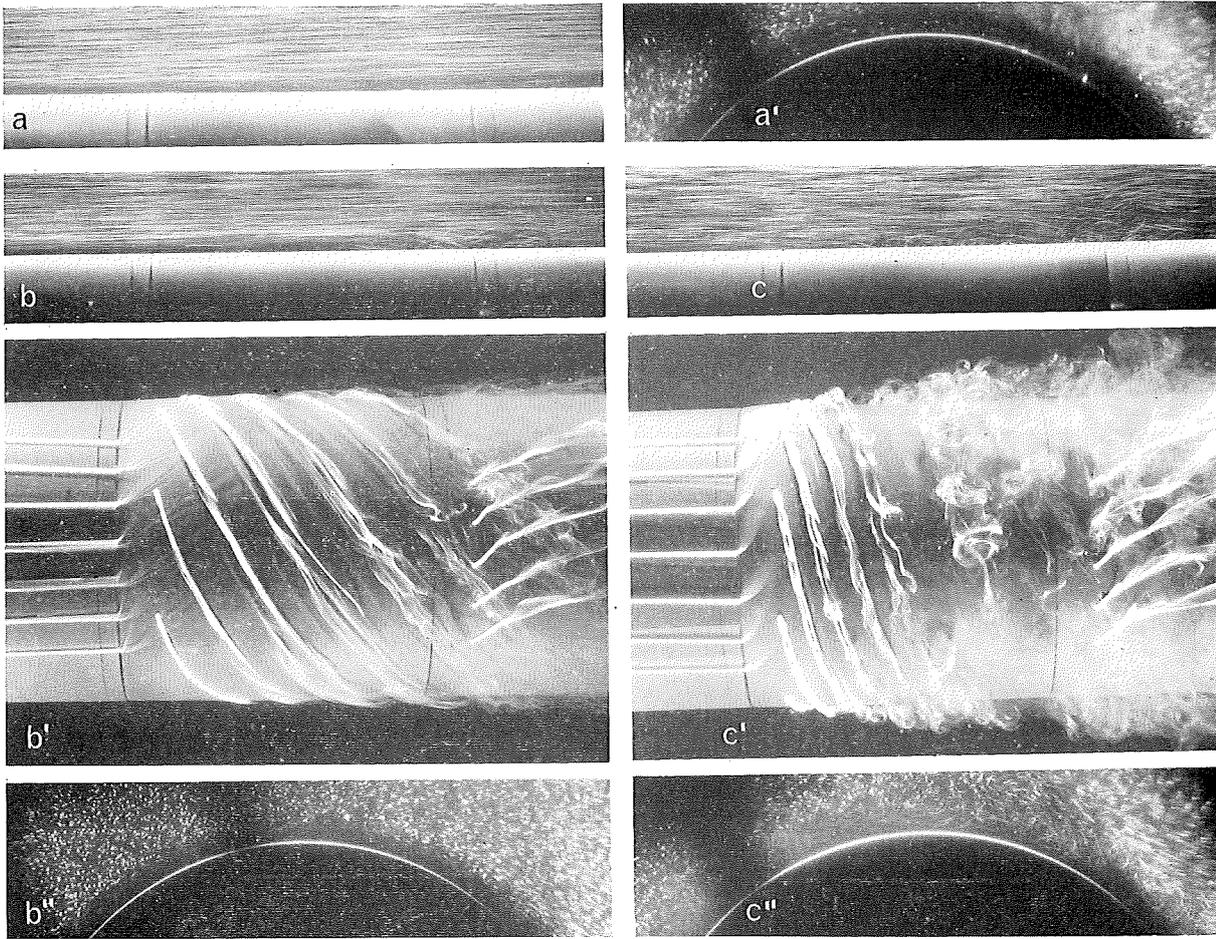
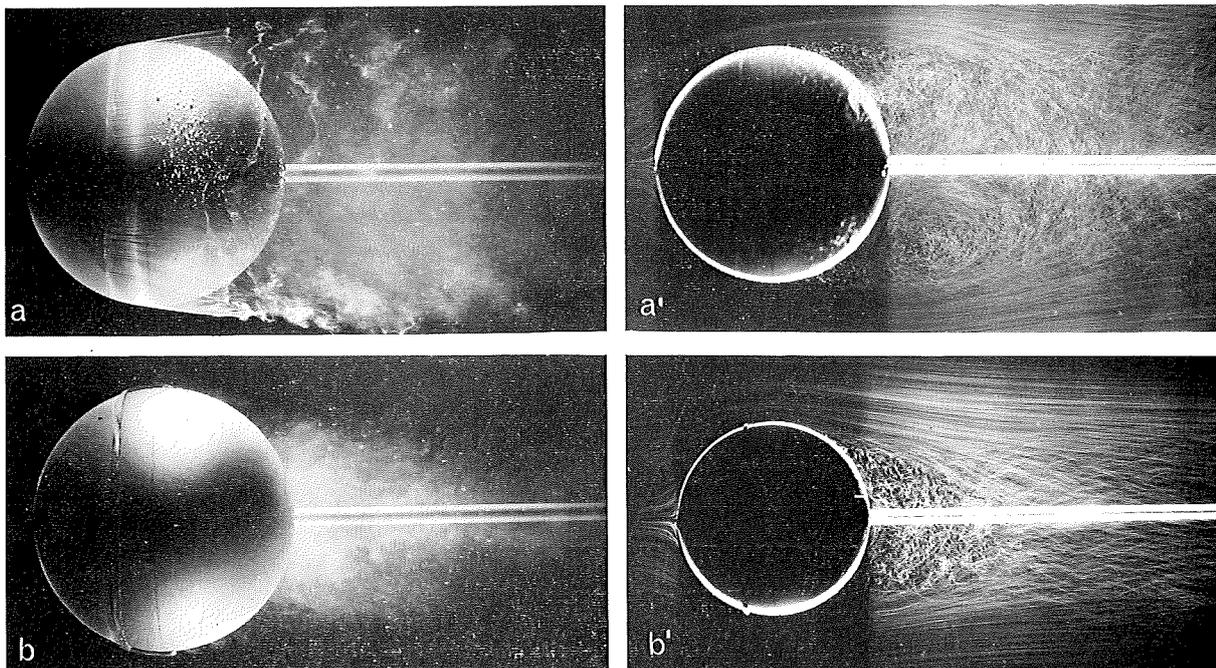


Fig. 7. — Écoulement le long d'un fuseau cylindrique avec partie tournante.
Vues en plan ($b'c'$), coupes diamétrales (abc) et transversales ($a'b''c''$).

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 : $V_t = 2\pi DN$



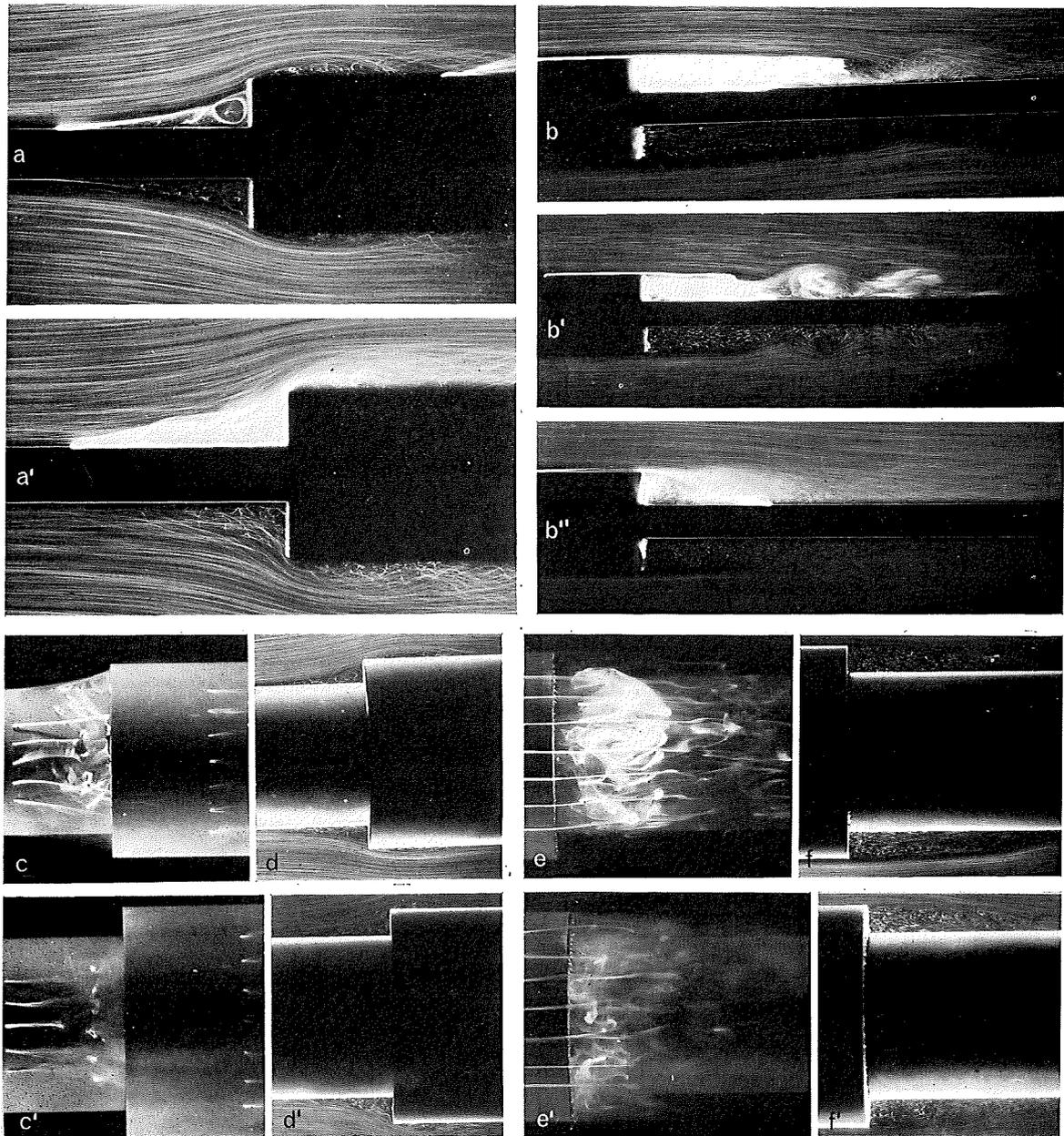


Fig. 9. — Écoulement le long d'une paroi sans incidence comportant un ressaut ou un décrochement.

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)	$Re_x \approx 1,3 \cdot 10^4$	($x_{\text{décrochement}} = 260$).

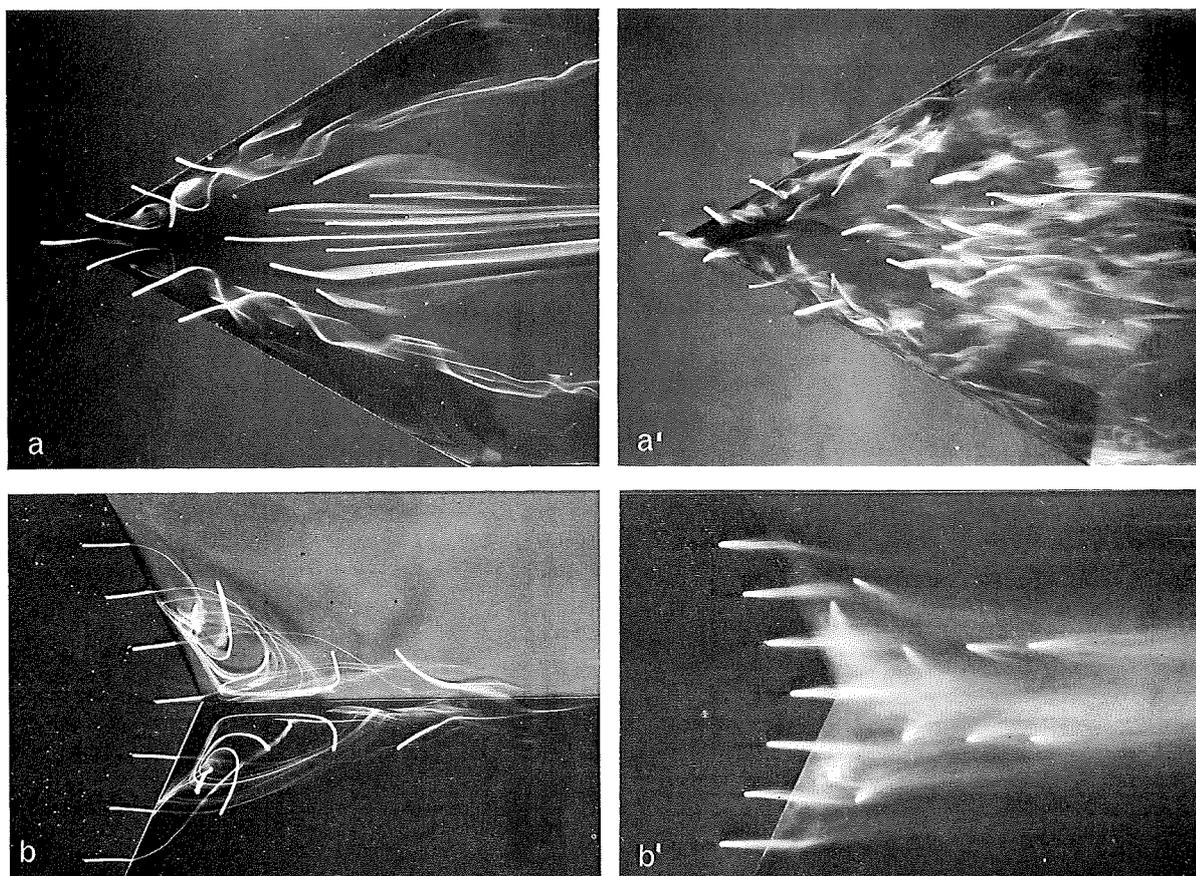


Fig. 10. — Écoulement le long d'une paroi plane comportant un décrochement en flèche (vues en plan).

Décrochement en chevron :	a	régime laminaire	$Re_x \approx 0,5 \cdot 10^4$.
	a'	régime turbulent (transition artificielle)	$Re_x \approx 2 \cdot 10^4$.
Décrochement en auge :	b	régime laminaire	$Re_x \approx 0,8 \cdot 10^4$.
	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-

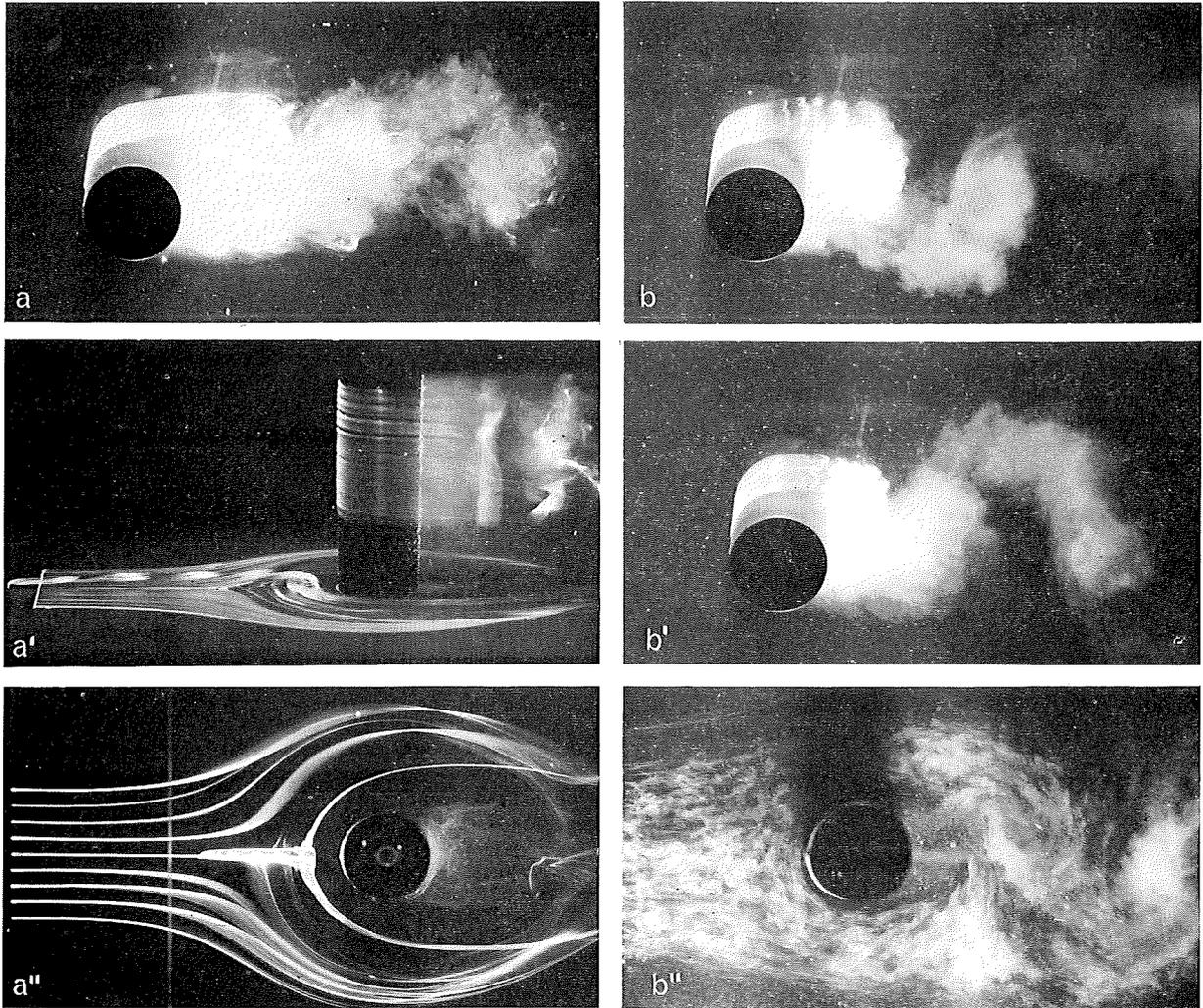


Fig. 11. — Écoulement autour d'un cylindre fixé le long d'une paroi plane (montage « courant plan »)
 Vues perspectives ($aa'bb'$) et de profil ($a''b''$)
 $aa'a''$ régime laminaire le long de la paroi : $Re_D \approx 0,3 \cdot 10^4$ ($D = 30$).
 $bb'b''$ régime turbulent le long de la paroi : $Re_D \approx 1,5 \cdot 10^4$

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

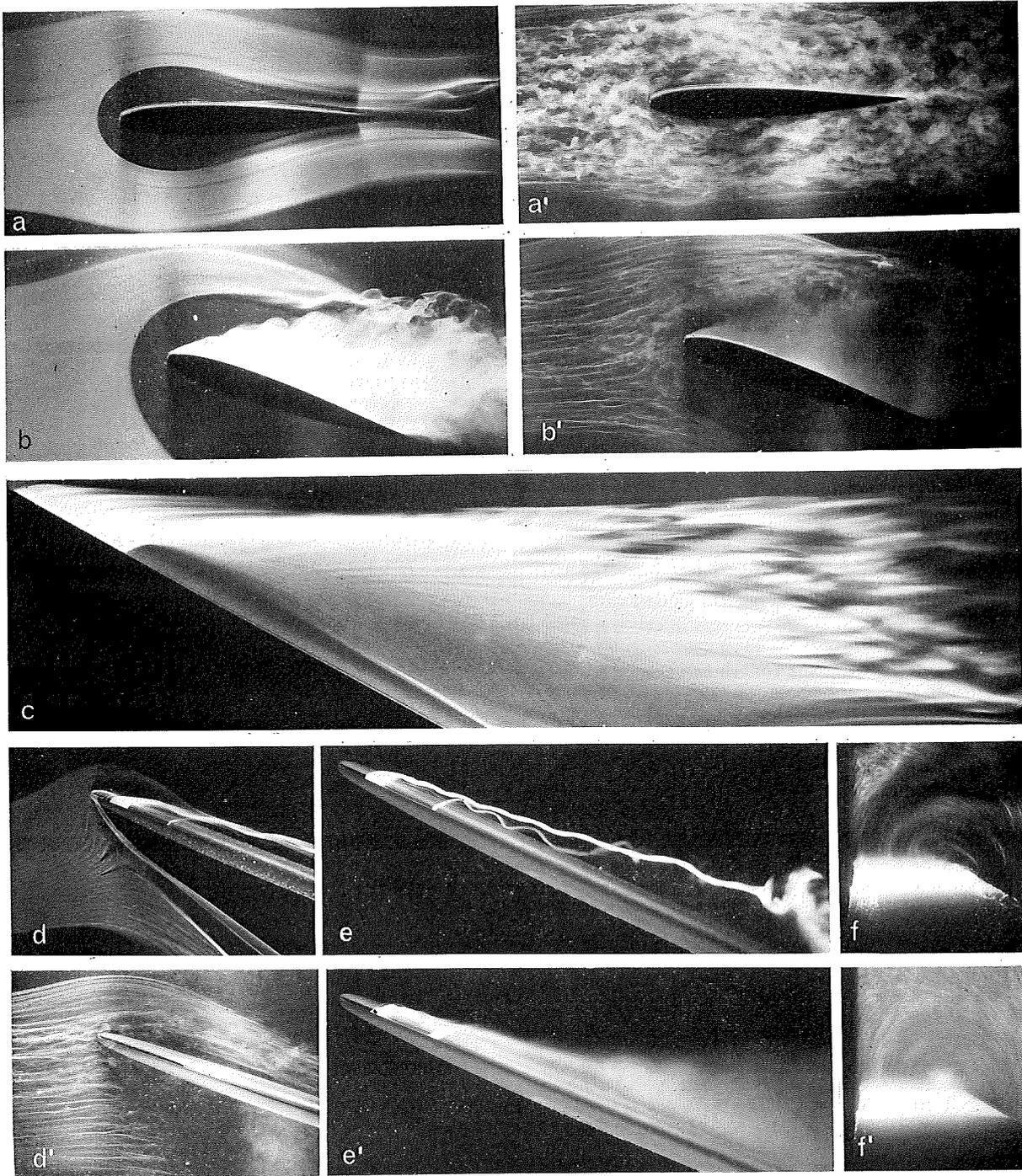


Fig. 12. — Écoulement autour d'une aile fixée le long d'une paroi plane.
(montage « courant plan » et montage demi-maquette)

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 two-dimensional 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 UNDA 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).

