

FLY THE WING



CHAPITRE 4

HIGH-ALTITUDE
MACHS



INTRODUCTION

Je vais te raconter ce qu'on fait quand on monte très haut et très vite avec un jet comme le DC-9 (ailes en flèche). Le but, c'est de comprendre les trucs bizarres qui arrivent près des limites de vitesse (les « Machs »), sans paniquer, juste pour savoir les reconnaître et les gérer.

D'abord, le **Dutch Roll** (pas une danse hollandaise !)

C'est un truc typique des avions avec ailes en flèche.
L'avion commence à osciller : il tourne un peu à gauche-droite (lacet) **ET** penche en même temps à gauche-droite (roulis). Ça donne un mouvement de balançoire croisé.
dans l'autre sens.

Pourquoi ça arrive ?

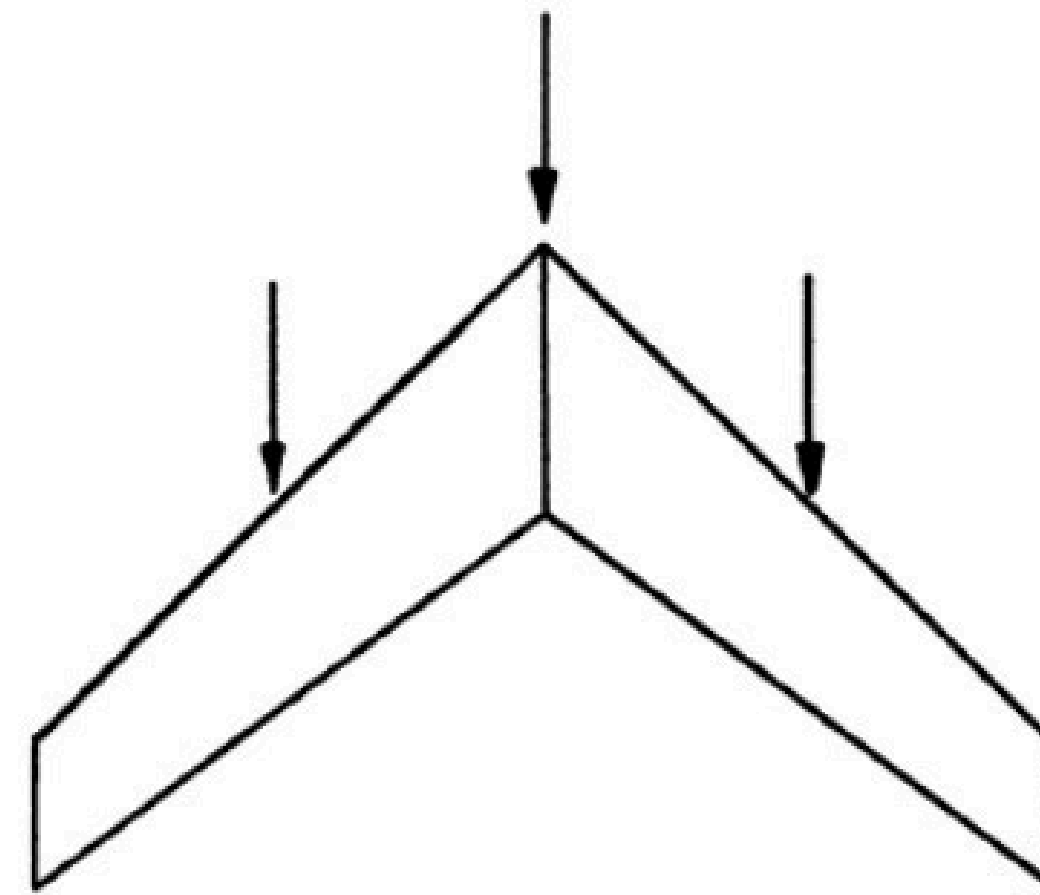
- Souvent à cause **du pilote** : trop de palonnier d'un coup, ou en turbulence, ou en surcontrôlant à basse vitesse.
- Une aile avance un peu
 - elle prend plus de portance
 - elle monte
 - l'avion roule de l'autre côté
 - et ça repart

Sur la plupart des jets de ligne, il y a un amortisseur de lacet (**yaw damper**) qui est presque toujours allumé. Il corrige tout seul super vite via le pilote automatique de direction. C'est magique : tu laisses faire, et pouf, ça s'arrête doucement.

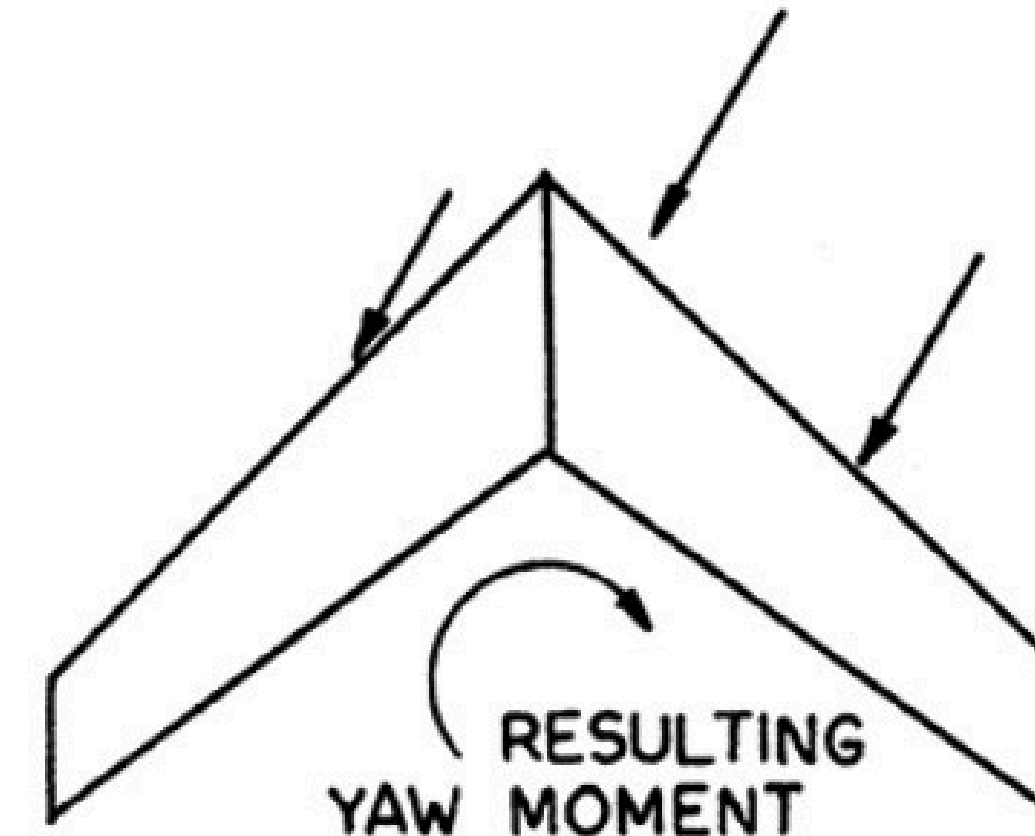
On va l'éteindre pour s'entraîner

(en altitude safe !) :

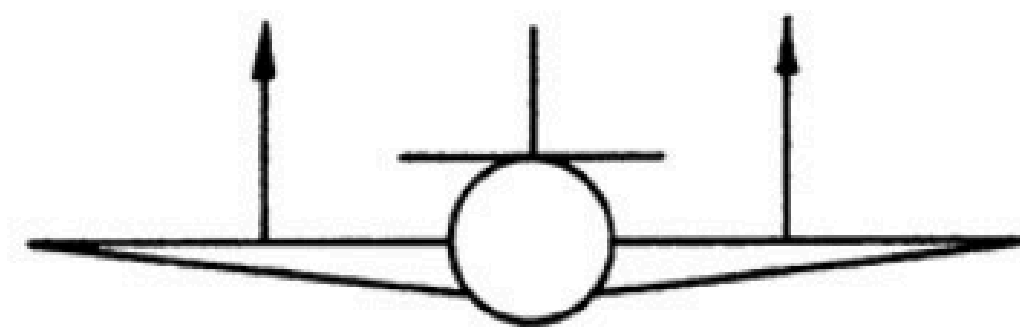
- Je provoque un Dutch roll avec le palonnier.
- L'avion oscille $\sim 20^\circ$ de chaque côté.
- Tu reprends les commandes. La première fois, tu l'as arrêté palonnier + ailerons (c'est normal, instinctif).
- Mais la meilleure façon : bloquer le palonnier neutre et corriger seulement avec les ailerons quand les ailes repassent à plat. Tu stoppes le roulis beaucoup plus vite !
- Si tu touches au palonnier, tu risques d'être en retard et d'empirer le truc.



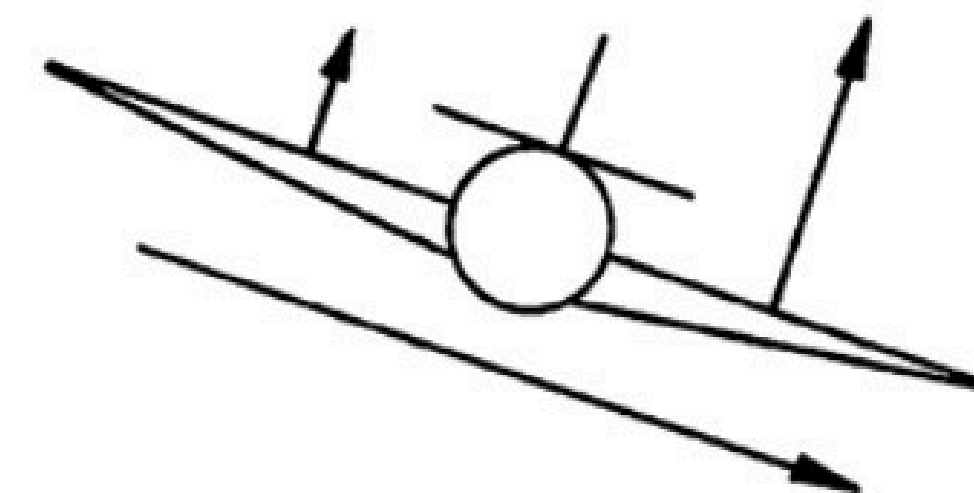
SWEPT WING AT
ZERO SIDESLIP



SWEPT WING IN A
SIDESLIP TO THE RIGHT



SWEPT WING
IN LEVEL FLIGHT

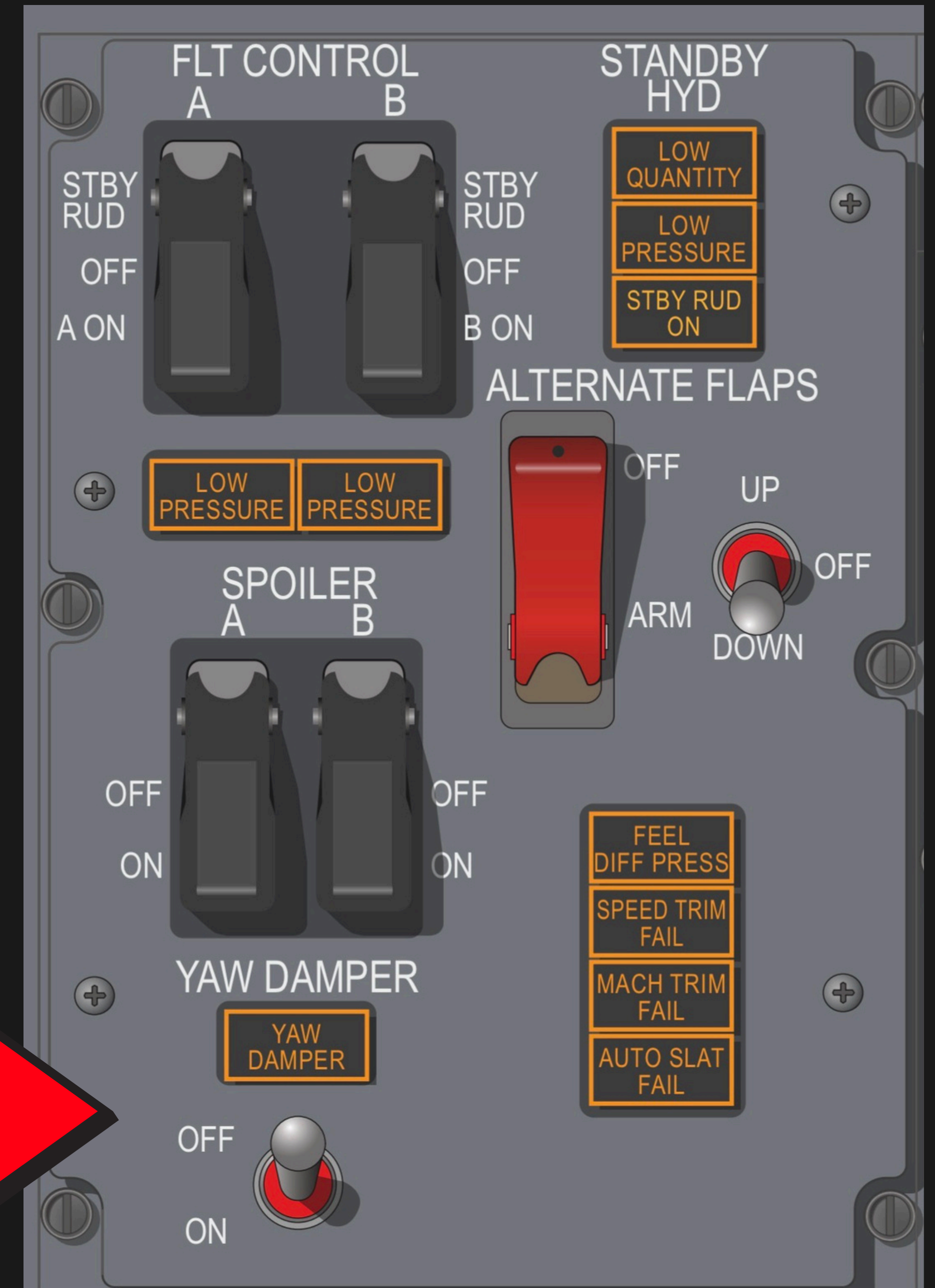


SWEPT WING IN A
SIDESLIP TOWARD
THE DOWN WING

Figure 4-1. Effect of sweepback on yaw and roll moments.

Leçon :

Yaw Damper **TOUJOURS** allumé en vol normal. Ne surcontrôle pas, ne lutte pas contre le palonnier qui bouge tout seul.



**Maintenant, on monte haut
(31 000–35 000 ft) pour tester les « Machs »**

On va volontairement approcher les limites pour sentir les phénomènes, mais sans danger (on reste dans les limites ou on dépasse juste un tout petit peu).

Rappels sur le DC-9 :

- **Vitesse de croisière normale : Mach 0,78 (parfois 0,80).**
- **Mach critique (première onde de choc) :**
~ Mach 0,75 → presque rien à ce stade.
- **Tuck léger commence vers Mach 0,80–0,82.**
- **Limite max : Mach 0,84 → alarme survitesse (clacker)**

1. Le **Mach Tuck** (le nez qui veut plonger)

Pourquoi ? À haute vitesse, une onde de choc se forme sur l'aile (surtout à la racine).

Le centre de pression recule → ça crée un moment qui **pousse le nez vers le bas (piqué)**. C'est la « divergence de traînée » ou « force divergence ».

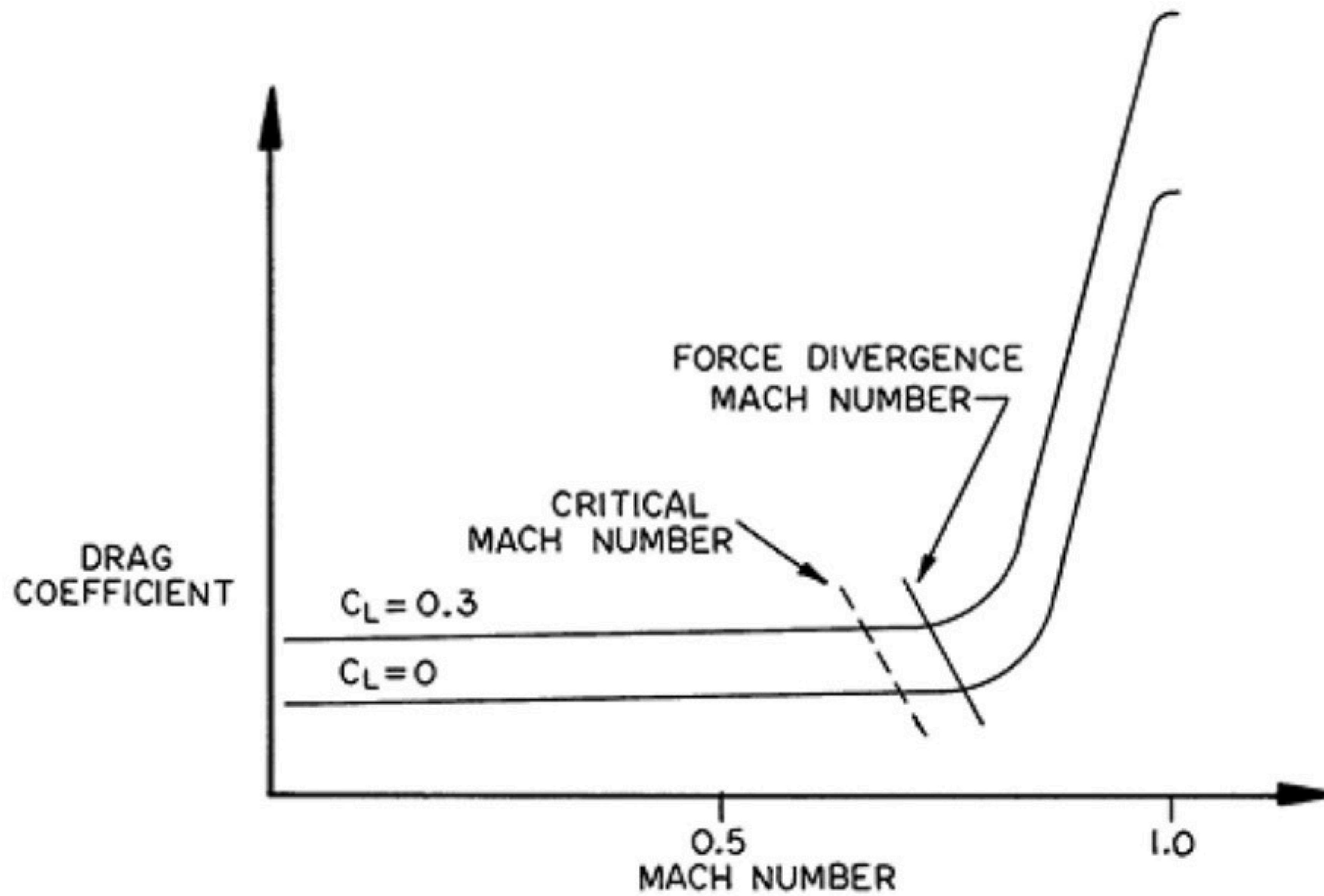


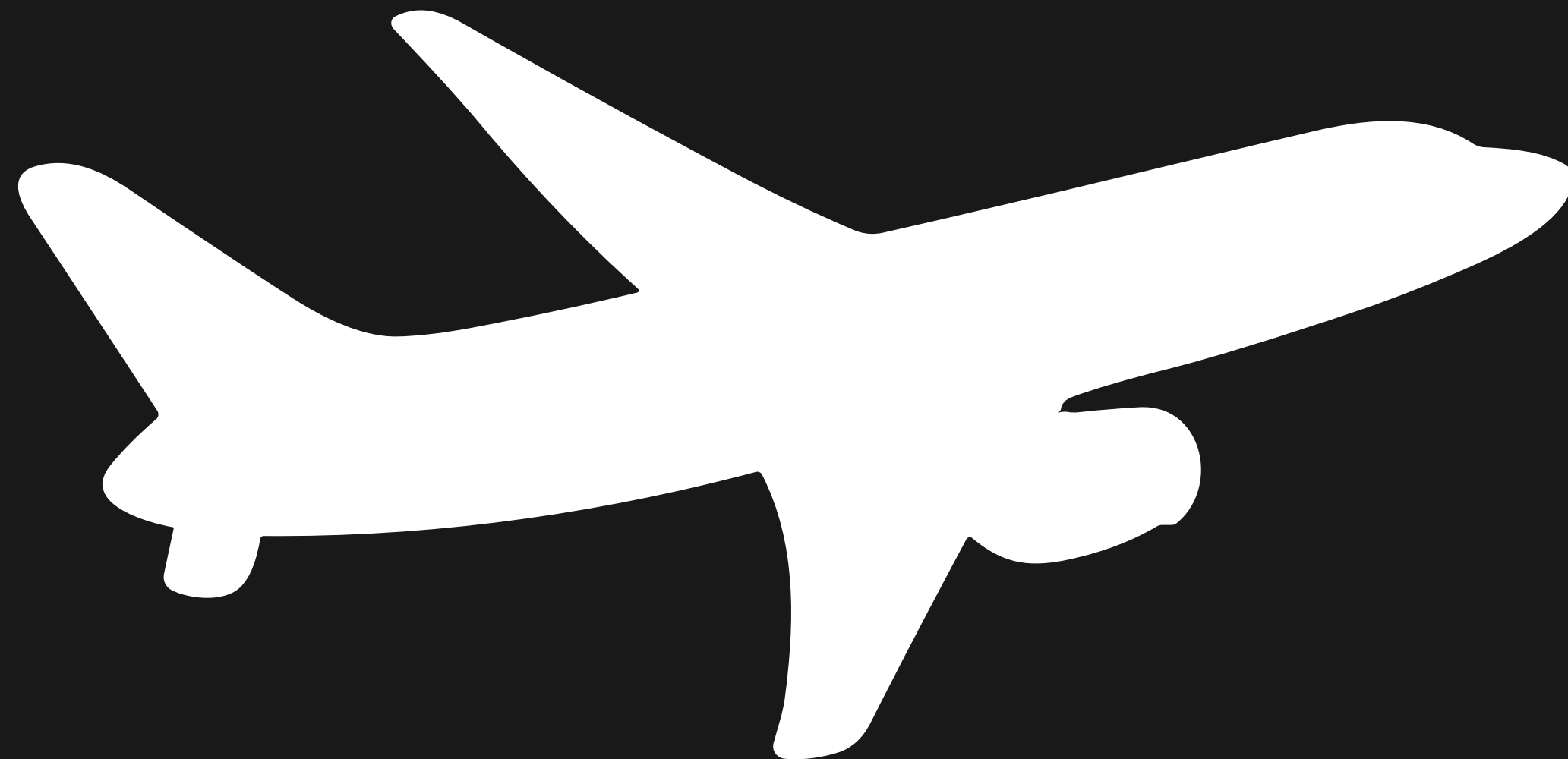
Figure 4-2. Compressibility force divergence.

Sur le DC-9 :

- On éteint le compensateur de trim Mach (un système auto qui pousse sur l'élévateur pour contrer le tuck).
- On accélère à Mach 0,80, on trim pour tenir l'altitude.
- Puis on pousse à Mach 0,82 → d'abord légère montée (plus de portance), puis le nez commence à baisser doucement (**tuck léger**).
- C'est contrôlable avec profondeur + trim manuel.
- On rallume le compensateur → après 5 secondes, il corrige tout seul, tu sens la pression arrière sur le manche. Le tuck dangereux arrive seulement si on dépasse beaucoup les limites.

2. Le **Buffet Mach** (secousses comme un décrochage)

Ça arrive quand l'onde de choc devient **plus forte** →
séparation de l'écoulement sur l'aile → turbulence qui
secoue l'avion.



On le provoque comme ça :

- À Mach 0,82 (juste sous la limite), altitude ~33 000 ft.
 - On fait un virage incliné **30°** sans perdre d'altitude
→ il faut tirer un peu sur le manche → angle d'attaque monte → buffet !
 - L'avion tremble et secoue comme en décrochage accéléré (mais c'en est un, en fait, à haute vitesse).
- Pour récupérer : baisse un peu le nez, relâche la pression, remets les ailes à plat, réduis la vitesse. Le buffet s'arrête vite.

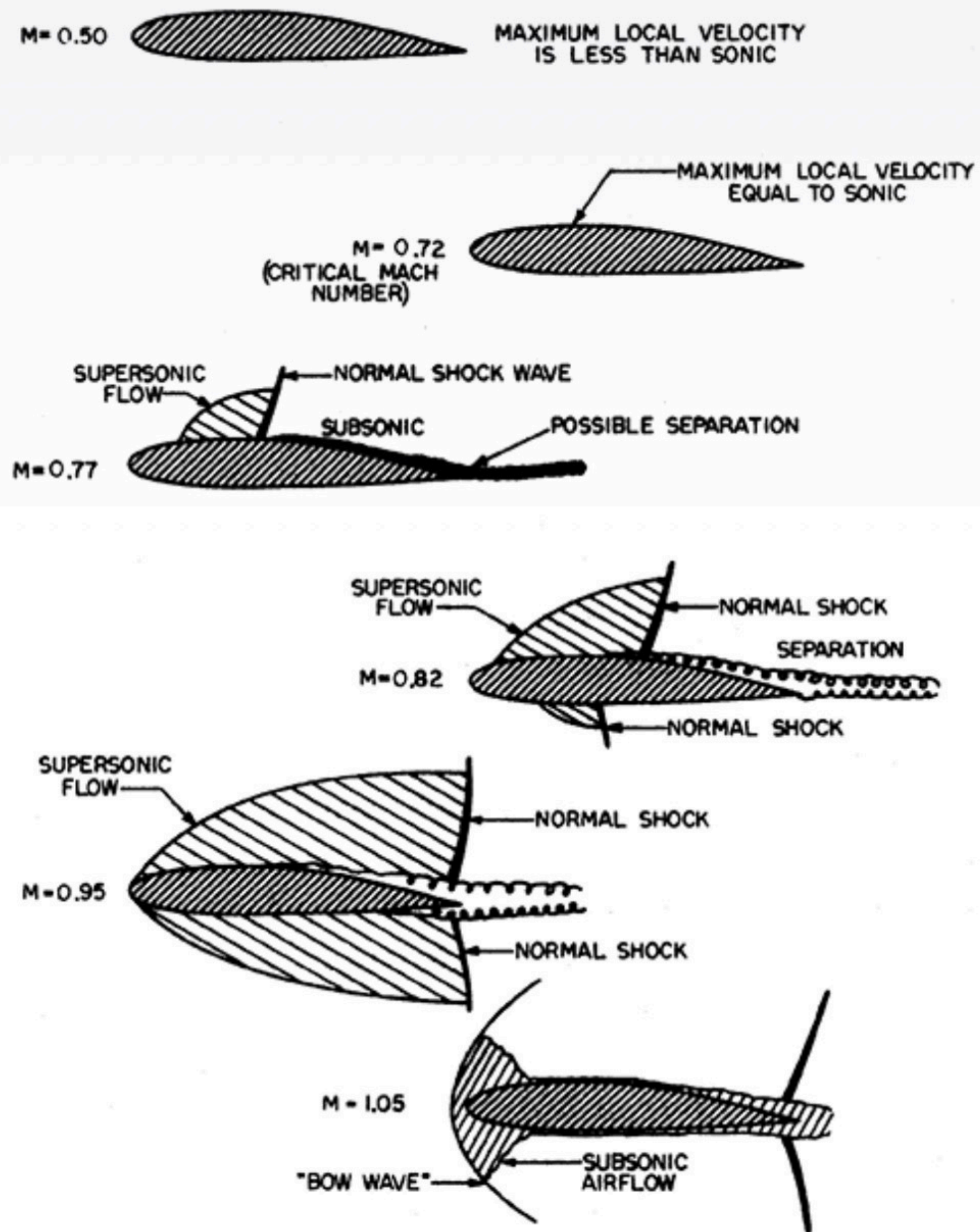


Figure 4-3. Transonic flow patterns.

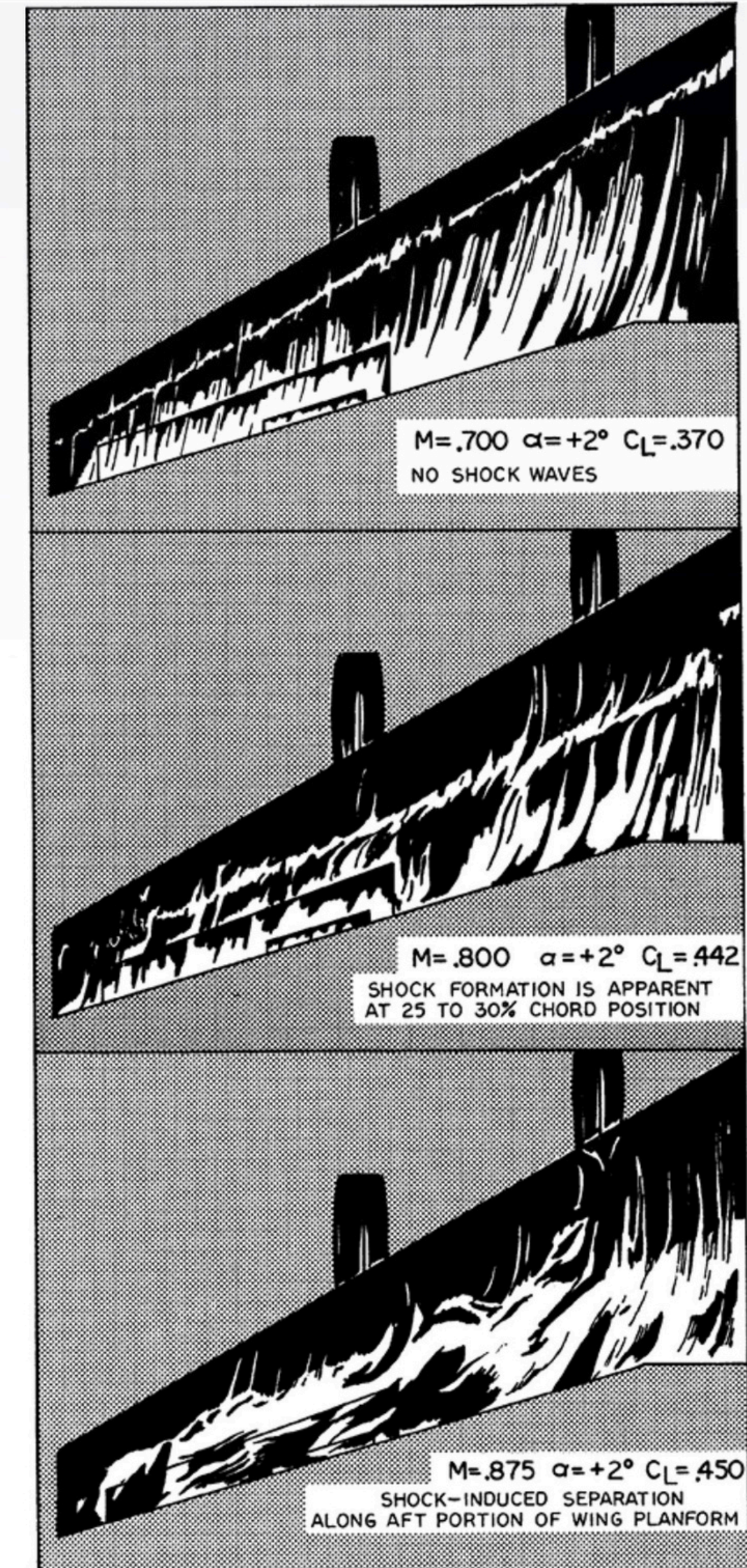


Figure 4-4. Fluorescent oil flow patterns in

Leçon :

Le buffet Mach peut arriver si tu voles trop haut pour ta masse (l'avion a besoin de trop d'angle d'attaque), ou en turbulence, ou en tirant trop fort. C'est un avertissement : **ralentis !**



3. Dépasser un peu la limite pour entendre **l'alarme**

On descend, on accélère en descente jusqu'à Mach **0,84**
→ le « clacker » sonne + léger buffet.

C'est l'alarme survitesse. Elle est précise, mais pas
infaillible ($\pm 0,02$ Mach possible).

Donc : ne compte pas QUE sur elle.

Surveille le tuck, le buffet, ta vitesse.

Quand ça sonne → réduit puissance, ralentis.

Ensuite, on redescend à Mach 0,80 (vitesse descente recommandée).

Plus tard, en virage incliné à Mach 0,80 en sortant d'une descente rapide → re-buffet !

Ça montre que même à Mach 0,80, si tu tires fort ou que tu mets de l'inclinaison, tu peux provoquer du buffet (rafale + charge).

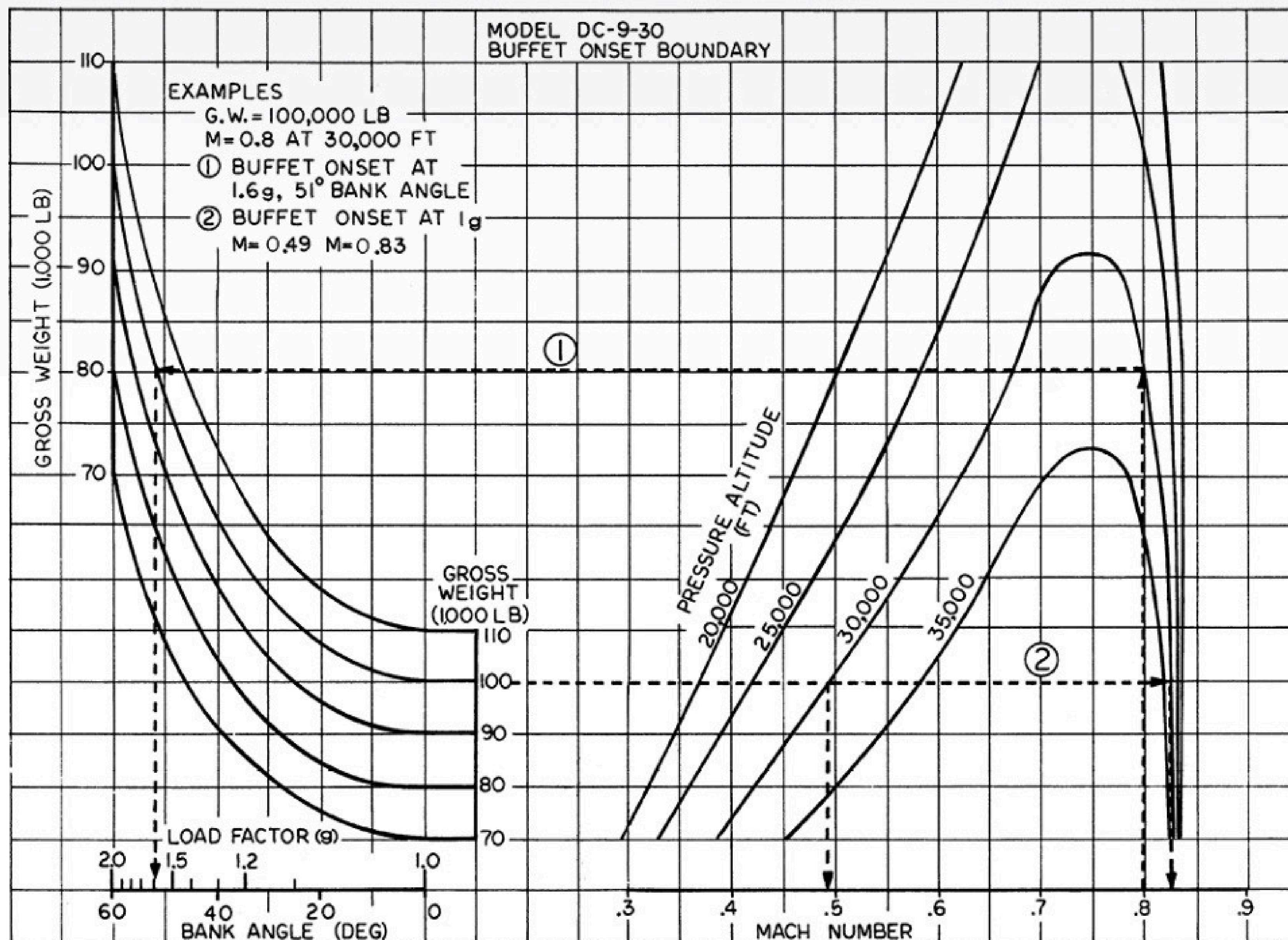


Figure 4-5. DC-9-30 buffet onset boundaries.

G-LOAD 1.25
WEIGHT & ALTITUDE LOW (LO) & HIGH (HI) SPEED BUFFET MARGINS

GROSS WT.		70,000	75,000	80,000	85,000	90,000	95,000	100,000	105,000
FLT ALT		LO--HI	LO--HI	LO--HI	LO--HI	LO--HI	LO--HI	LO--HI	LO--HI
350	M IAS	.525-.826 172--280	.550-.824 181--280	.575-.821 190--280	.596-.818 197--278	.617-.815 204--277	.639-.815 212--274	.660-.803 220--272	.680-.794 227--268
330	M IAS	.496-.829 170--294	.519-.826 178--294	.542-.824 187--294	.564-.821 195--292	.585-.819 202--290	.605-.814 210--289	.625-.810 217--287	.645-.805 224--286
310	M IAS	.460-.831 165--309	.484-.829 174--308	.506-.827 181--307	.525-.825 188--307	.545-.823 196--306	.566-.820 204--304	.586-.817 212--303	.606-.813 219--302
290	M IAS	.435-.832 162--323	.456-.831 170--323	.477-.830 178--322	.496-.828 186--321	.515-.826 194--320	.535-.825 201--320	.555-.822 209--319	.575-.820 217--318
280	M IAS	.425-.833 162--330	.445-.832 170--330	.465-.831 178--330	.483-.829 185--329	.500-.827 192--327	.520-.825 200--327	.540-.824 208--326	.560-.823 216--326
260	M IAS	.398-.834 158--345	.418-.833 166--344	.438-.832 174--344	.454-.831 181--343	.470-.830 188--342	.490-.829 195--342	.509-.828 203--341	.527-.826 210--340
240	M IAS	.372-.835 154--359	.390-.834 162--359	.408-.833 169--358	.424-.832 176--358	.440-.832 183--358	.458-.831 191--358	.476-.831 198--358	.495-.830 206--356
220	M IAS	.354-.835 153--374	.370-.834 160--374	.386-.834 167--374	.401-.834 174--374	.416-.834 180--375	.432-.833 187--374	.449-.833 194--374	.465-.832 202--373
200	M IAS	.335-.836 151--390	.350-.835 158--390	.365-.835 165--390	.378-.835 171--390	.392-.835 177--390	.407-.834 184--389	.423-.834 192--389	.439-.833 198--388

G-LOAD 1.50

350	M IAS	.597-.818 197--277	.623-.812 206--275	.649-.806 215--273	.670-.796 223--269	.691-.787 231--266	.706-.775 236--261	----- -----	----- -----
330	M IAS	.563-.822 194--293	.589-.818 203--291	.614-.814 213--289	.634-.808 220--287	.655-.802 228--285	.673-.793 235--281	.692-.784 242--277	.709-.771 248--273
310	M IAS	.526-.825 189--307	.550-.822 198--305	.575-.819 208--304	.595-.815 215--302	.616-.811 223--301	.636-.806 231--299	.656-.802 239--297	.675-.796 246--294
290	M IAS	.497-.829 186--321	.521-.827 196--320	.544-.825 205--320	.564-.822 213--319	.585-.819 221--317	.605-.815 229--316	.625-.811 237--315	.640-.806 243--312
280	M IAS	.484-.830 185--329	.507-.828 194--328	.530-.826 204--327	.550-.824 212--326	.570-.821 220--325	.589-.818 227--324	.609-.815 235--323	.624-.811 242--321
260	M IAS	.455-.831 181--343	.477-.830 190--342	.500-.829 200--341	.519-.827 208--340	.538-.825 216--340	.556-.822 223--339	.575-.820 231--338	.591-.817 238--336
240	M IAS	.425-.832 177--358	.445-.832 185--358	.466-.832 194--358	.484-.831 202--357	.504-.829 211--356	.523-.827 219--355	.542-.825 227--355	.555-.823 233--354
220	M IAS	.401-.833 174--374	.421-.833 183--374	.440-.833 191--374	.457-.832 199--373	.475-.831 207--373	.492-.830 215--372	.510-.828 223--370	.525-.826 229--370
200	M IAS	.379-.835 171--389	.397-.835 179--389	.415-.835 188--389	.431-.834 195--389	.447-.832 202--388	.463-.831 210--387	.480-.830 218--386	.495-.828 225--385

Figure 4-6. DC-9-31 low-speed and high-speed buffet margins.

En résumé, ce que je retiens :

- **Dutch roll** → yaw damper ON, **ne surcontrôle pas**, corrige avec ailerons seulement si besoin.
- À haute altitude / haute vitesse : surveille le **tuck** (nez qui descend) et le **buffet** (secousses).
- Ce sont des signaux d'alerte précoces → ralentis avant que ça empire.
- Le compensateur trim Mach aide beaucoup pour le tuck léger.
- Tout ça reste safe si on respecte les limites et qu'on teste calmement en entraînement.

L'idée, c'est de ne pas avoir peur de voler haut et vite, mais de savoir exactement ce qui se passe et comment réagir. Comme ça, en cas de turbulence ou de mauvais calcul de masse/altitude, tu reconnais les symptômes et tu agis direct.



BORED AVIATOR