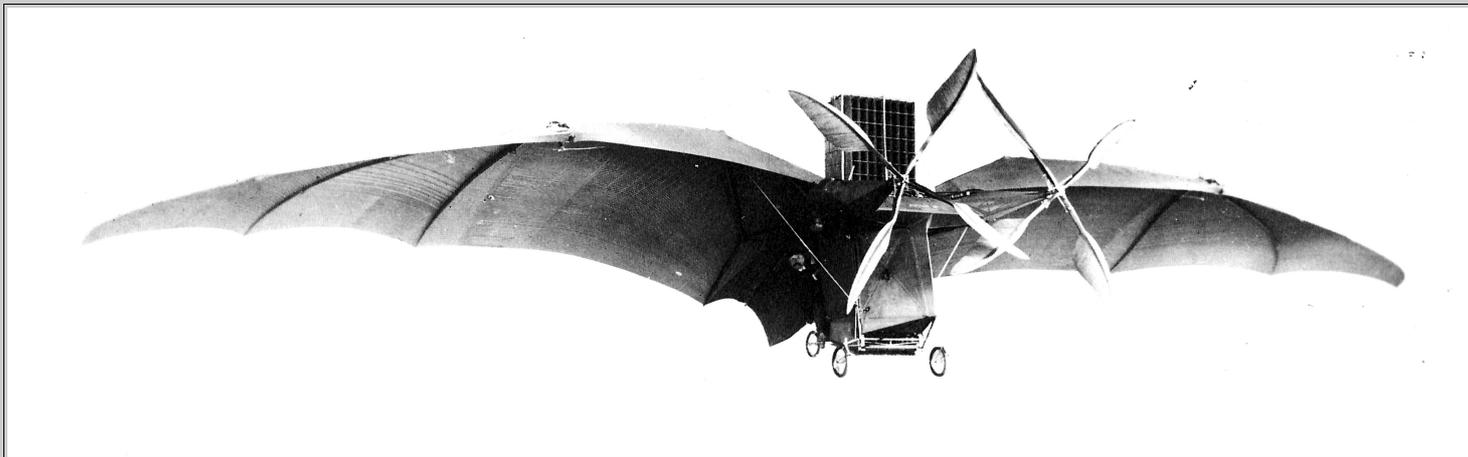


CONNAISSANCE

AVION



du B.I.A au C.A.E.A

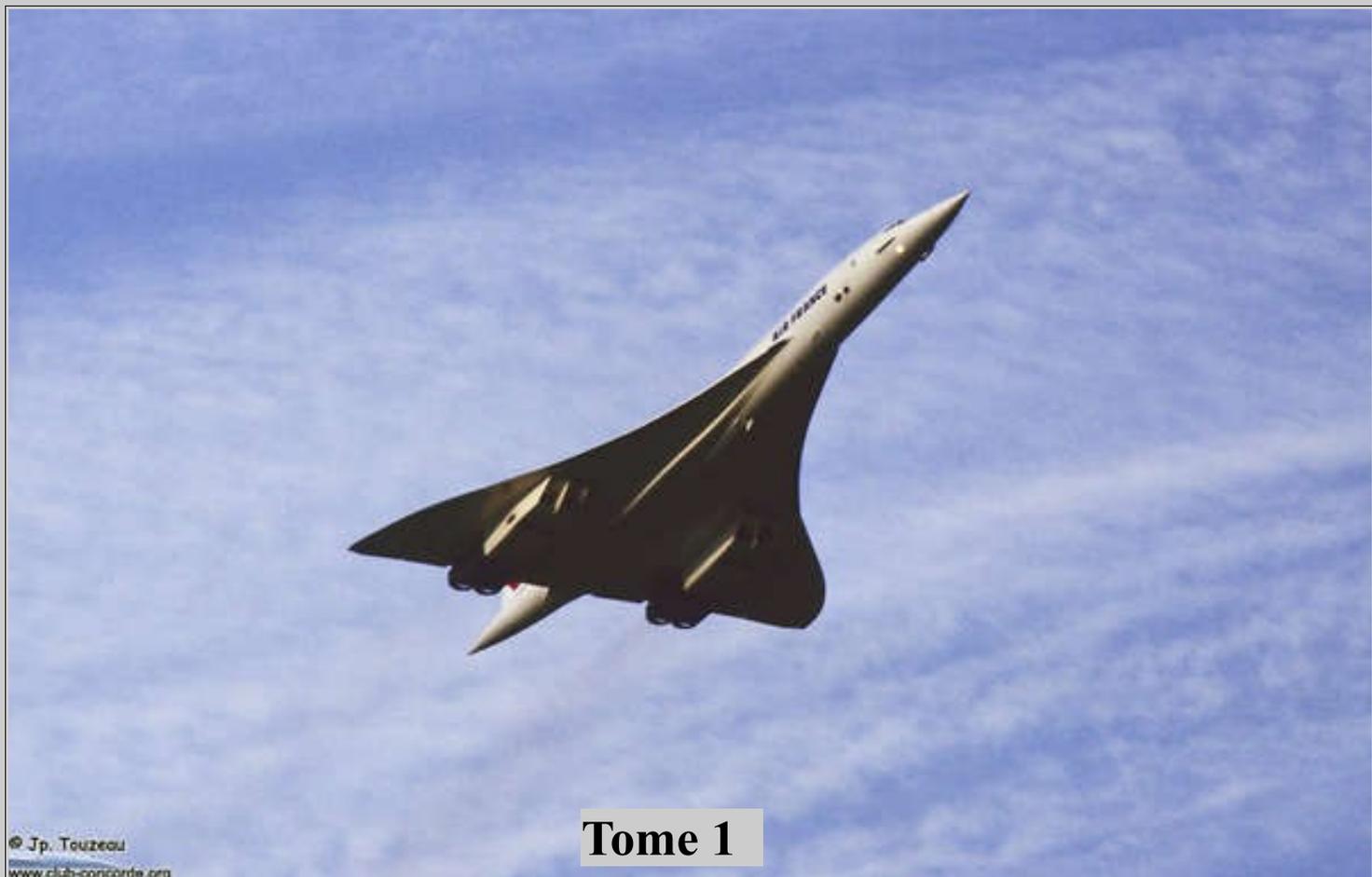


TABLE DES MATIÈRES

STRUCTURE ET CONSTRUCTION

ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION

- Contraintes mécaniques

Chapitre 1 : FUSELAGE

- 1.1– Construction en treillis
- 1.2– Construction en bois coffré ou bois entoilé
- 1.3 – Construction en tubes d'acier
- 1.4 – Structure monocoque
- 1.5 – Structure semi-mono coque
- 1.6 – Matériaux entrant dans la fabrication des avions
- 1.7 – Avion militaire (planche)
- 1.8 – Avion civil (planche)

Chapitre 2 : LES AILES

- 2.1 – Historique
- 2.2 – Types et formes
 - 2.2.1 – Types d'ailes
 - 2.2.2 – Formes d'ailes
 - 2.2.3 – Historique
- 2.3 – Les profils
- 2.4 – La structure interne des ailes

Chapitre 3 : LES GOUVERNES

- 3.1 - Les ailerons
 - 3.1.1 – Le lacet inverse
 - 3.1.2 – Comment lutter contre le lacet inverse
- 3.2 – Les Winglets
 - 3.2.1 – Principe

3.3 – Les dispositifs hypersustentateurs

3.3.1 – Les différentes formes de volets hypersustentateurs

3.3.1.1 – Les volets de bord de fuite

3.3.1.2 – Les becs de bord d'attaque

3.3.1.3 – Becs à fentes commandés ou SLAT

3.3.1.4 – Volets Krüger

3.3.1.5 – Tableau récapitulatif

3.4 – Les déporteurs ou destructeurs de portance

3.4.1 - Spoiler

3.4.2 – Aérofrein

3.5 – Les empennages

3.5.1 – Types d'empennages

3.5.1.1 – Empennage horizontal

3.5.1.2 – La gouverne de profondeur

3.5.2 – La compensation aérodynamique

3.5.3 – L'empennage vertical

3.5.3.1 - Monodérive

3.5.3.2 – Multidérives

3.5.3.3 – Autres systèmes de compensation d'effort

Chapitre 4 : LES ATERRISSEURS

4.1– Historique

4.2 – Types de train

4.2.1 – Train d'atterrissage tricycle

4.2.2 – Train d'atterrissage classique

4.3 – Cinématique de train

4.4 – Composition d'un train

Chapitre 5 : LES COMMANDES DE VOL

5.1 – Commandes de vol

5.2 – Liaison avec les actionneurs

5.2.1 – La transmission par câble

5.2.2 – La tringlerie mécanique rigide

5.3 – Conséquences et remèdes

5.3.1 – L'assistance hydraulique et les commandes servomotrices

5.3.2 – Les commandes de vol électriques

Chapitre 6 : CIRCUIT ÉLECTRIQUE

Chapitre 7 : PROTECTION INCENDIE

Chapitre 8 : PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE

8.1 – Généralités

8.2 – Conditions favorables au givrage

8.2.1 – Conséquences du givrage

8.2.2 – Moyens de lutte

8.2.3 – Avertisseurs de givrage

8.2.4 – Dégivrage voilure et empennages

8.2.4.1 – Système pneumatique mécanique

8.2.4.2 – Système électrique

Chapitre 9 : LES INSTRUMENTS DE BORD

- Rôle des instruments de bord

9.1 - Instruments anémobarométriques

9.2 – L'anémomètre

9.2.1 – Histoire

9.2.2 – Généralités

9.2.3 – L'appareil

9.2.4 – Rôle

9.2.5 – Lecture du cadran

9.2.6 – le machmètre

9.2.6.1 – Cône de Mach

9.3 - L'altimètre

9.3.1 – Fonctionnement

9.3.2 – Présentation

9.4 – Les calages altimétriques

9.4.1 – Le calage altimétrique QFE

9.4.2 – Le calage altimétrique QNH

9.4.3 – Le calage altimétrique QNE ou 1013 hPa

9.4.3.1 – Calcul approché de l'altitude pression

9.4.4 – Variation des pressions

9.4.5 – Le radioaltimètre

- 9.5 – Le variomètre
 - 9.5.1 – Principe
- 9.6 – Le gyroscope
 - 9.6.1 – Principe
- 9.7 – L'horizon artificiel
 - 9.7.1- Principe
 - 9.7.2 – Interprétation
 - 9.7.3 – Vérification et limitation
- 9.8 – L'indicateur de virage
 - 9.8.1 – L'aiguille
 - 9.8.2 – Interprétation

Chapitre 10 : LES PROPULSEURS

- 10.1– Généralités
- 10.2 – L'hélice
 - 10.2.1 – Hélice à pas fixe
 - 10.2.2 – Hélice à pas variable
 - 10.2.2.1 – Utilisation de l'hélice à calage variable
 - 10.2 .2.2 – Conclusion
- 10.3 – Les moteurs
 - 10.3.1 – Généralités
- 10.4 – L'allumage
- 10.5 – Le moteur à pistons
 - 10.5.1 – Le moteur est composé
 - 10.5.2 – La carburation
 - 10.5.3 – Paramètres influant sur la puissance
 - 10.5.4 – Influence de l'altitude
 - 10.5.4.1 – Conditions propices à l'apparition de glace dans le carburateur
 - 10.5.4.2 – Moyens pour éviter le givrage carburateur
 - 10.5.4.3 – Utilisation du réchauffage carburateur
 - 10.5.4.4 – Conservation de la puissance en altitude
- 10.6 – Le carburant
- 10.7 – Le circuit carburant
- 10.8 – Les huiles
- 10.9 – Les turbopropulseurs

Chapitre 11 : LE TURBORÉACTEUR

11.1- Histoire

11.2 – Principe

11.2.1 – Calcul de la poussée

11.2.2 – Entrée d'air et soufflante

11.3 – Le turboréacteur simple flux

11.4 – Le turboréacteur double flux

11.5 – Le turboréacteur double flux à faible taux de dilution

11.6 – Le turbofan

11.7 – La postcombustion

11.8 – Les inverseurs de poussée

11.9 – Le turboréacteur pour le décollage vertical

11.10 – Le statoréacteur

11.10.1 – Avantages et inconvénients

11.11 – Le pulsoréacteur

11.12 – Le scramjet

INTRODUCTION

Il existe de nombreux ouvrages traitant de l'aéronautique. Nullement la prétention de refaire un manuel de plus, j'ai trouvé intéressant, par expérience, de regrouper par tomes les différents chapitres constituant les éléments principaux ,soit :

Tome 1 : Connaissance avion,

Tome 2 : Aérodynamique / Mécanique du vol,

Tome 3 : Navigation ,

Tome 4 : Réglementation,

Tome 5 : Météo,

pour le B.I.A (Brevet d'Initiation Aéronautique) et le CAEA (Certificat d'Aptitude à l'Enseignement Aéronautique).

Ces livres mettant à la disposition des débutants et des initiés, l'indispensable pour comprendre, assimiler et retenir définitivement ce qui, malgré l'évolution des techniques, reste vrai.

Ne voulant pas donner une impression de fausse simplicité pour le spécialiste, mais espérant que le débutant trouve des explications brèves restant à sa portée.

Lorsqu'il sera nécessaire pour lui de consulter des ouvrages plus complexes, le futur technicien ou pilote verra sa tâche simplifiée.

J'espère que ni l'un ni l'autre ne seront déçus.

Patrick SELVA

Certains rêvent de leur vie, d'autres vivent de leurs rêves.

CLASSIFICATION GÉNÉRALE DES AÉRONEFS

AÉRONEFS
On désigne par aéronefs, tous les appareils capables de s'élever et de circuler dans l'espace aérien (article L110-1 du code de l'aviation civile), Suivant la classification OACI, on désigne :

AÉROSTATS
ou « plus légers que l'air », la sustentation est principalement due à la « flottabilité »



Ballon libre à air chaud (Montgolfière)
ou à gaz



Dirigeable (propulsé)

AÉROSPATIAUX
Ils appliquent à la fois, les lois d'aérodynamique et de balistique



AERODYNES
ou « plus lourd que l'air », La sustentation est principalement obtenue par l'application de forces aérodynamiques



PLANEURS
Appareils à voilure fixe, utilisant les courants atmosphériques pour circuler dans l'espace aérien



AVIONS
Appareils à voilure fixe et dotés d'un ou plusieurs dispositifs de propulsion

Avions lourds : capacité maxi supérieure à 10 passagers

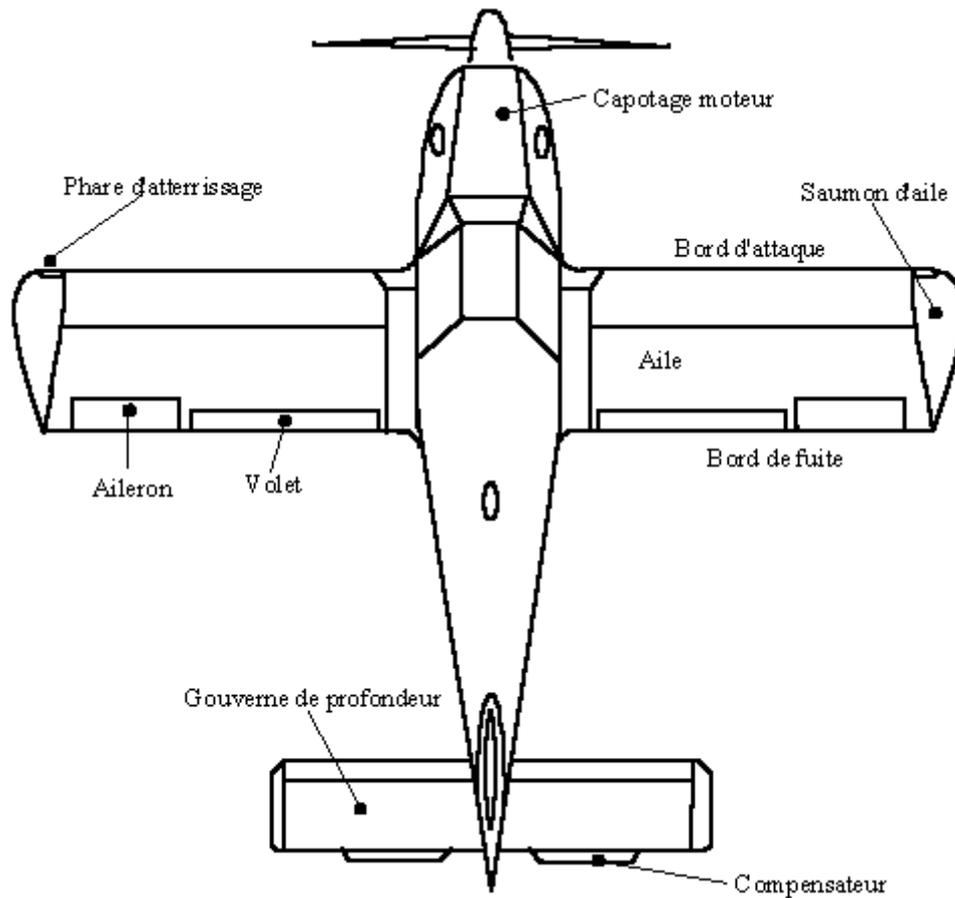


Avions légers : 5,7 tonnes maxi au décollage
ULM : Ultra Légers Motorisés

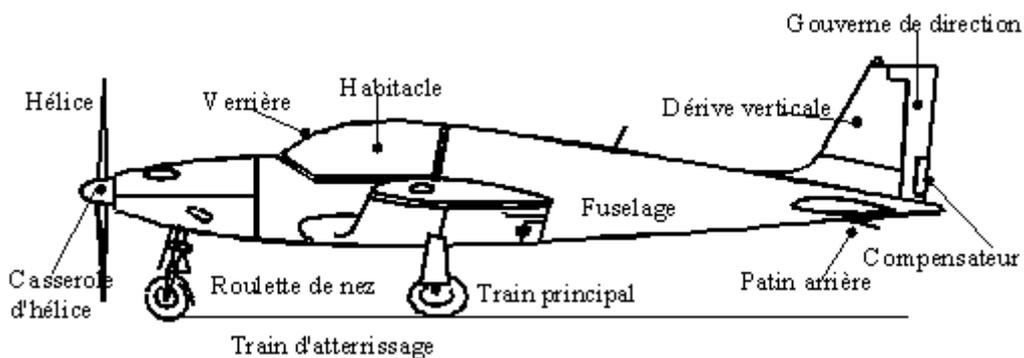
GIRAVIONS
Appareils à voilure tournante (rotor) assurant simultanément la sustentation et la propulsion



STRUCTURE ET CONSTRUCTION



ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION:



La structure d'un avion doit pouvoir concilier deux choses apparemment contradictoires: la légèreté, et la rigidité.

L'ensemble composé du fuselage, des ailes et des empennages est appelé **cellule**.

Contraintes mécaniques :

Les principales forces agissant sur l'aéronef sont :

- le poids de l'appareil
- la résultante aérodynamique sur chaque aile
- les efforts aérodynamiques sur les gouvernes
- la traction ou la poussée des moteurs
- les efforts inertiels (centrifuges ou d'autre nature) naissant lors des manœuvres de l'appareil

On appelle **contrainte** (généralement notée σ), la pression qu'exerce une force (F) sur une surface

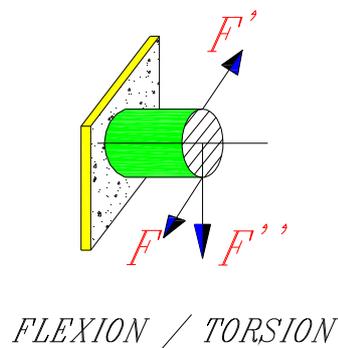
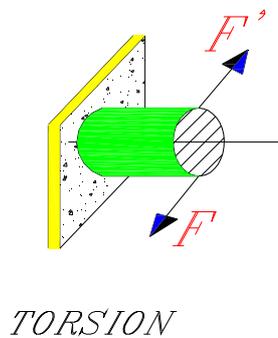
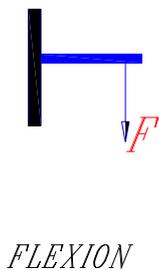
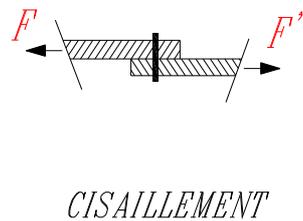
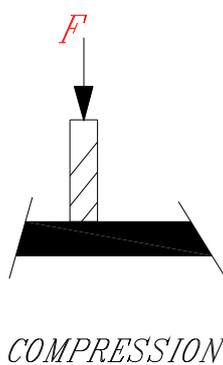
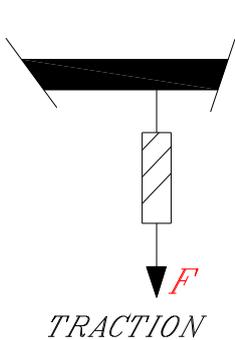
(S) donnée: $\sigma = F / S$

Rho (N/m²)

N

m²

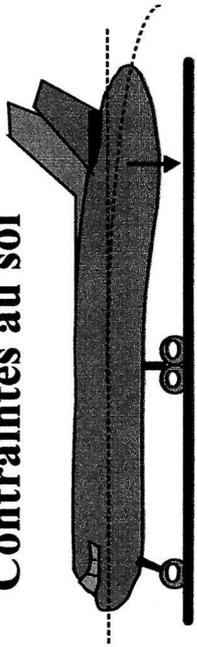
N = 1 Kg,m,s⁻²



La résistance des matériaux, à partir de l'analyse des efforts et des moments, permet de dimensionner les éléments (nature et forme), afin que ceux-ci puissent supporter les charges auxquelles ils sont soumis.

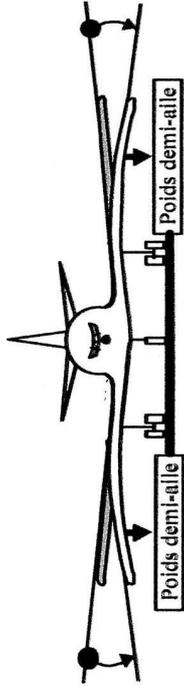
CONTRAINTES DUES AUX CHARGES STATIQUES

Contraintes au sol



L'extrados du fuselage subit une traction

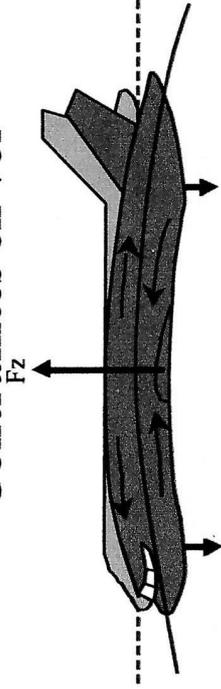
L'intrados du fuselage subit une compression



L'extrados de l'aile subit une traction

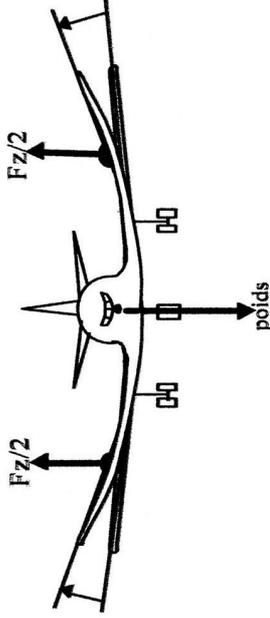
L'intrados de l'aile subit une compression

Contraintes en vol



L'extrados du fuselage subit une traction

L'intrados du fuselage subit une compression

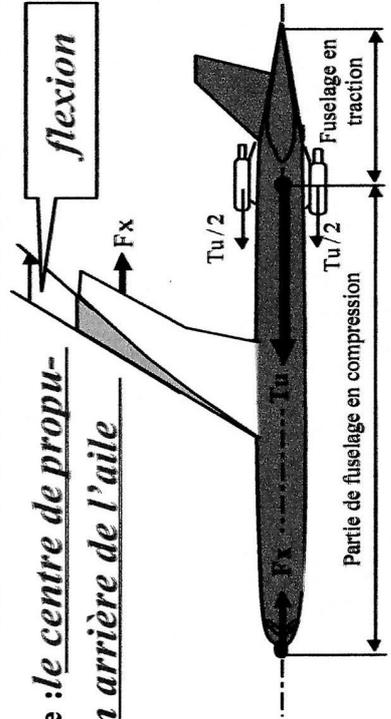


L'extrados de l'aile subit une compression

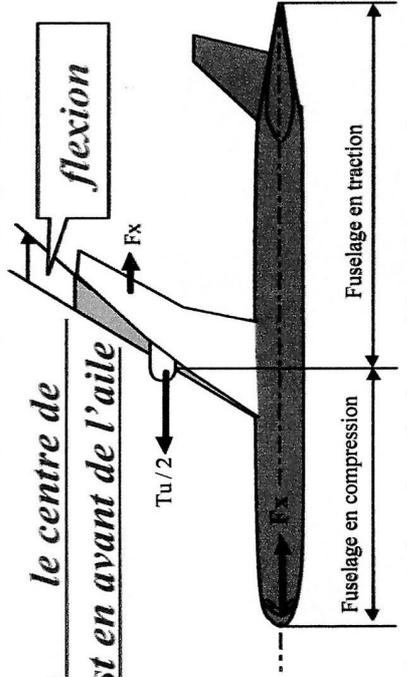
L'intrados de l'aile subit une traction

INFLUENCE DU MODE DE PROPULSION SUR LA NATURE DES CONTRAINTES

1/ Aile poussée : le centre de propulsion est en arrière de l'aile



2/ Ailes tractées : le centre de propulsion est en avant de l'aile



Dans les deux cas, l'aile subit une flexion, mais les parties du fuselage en compression et en traction sont fonction de la position des propulseurs.

CONTRAINTES DUES AUX CHARGES AERODYNAMIQUES

Torsion de l'aile lors d'une variation de portance

1/ Aileron au neutre

Aile au repos

Plan de l'aile

Aileron au neutre

2/ Aileron baissé

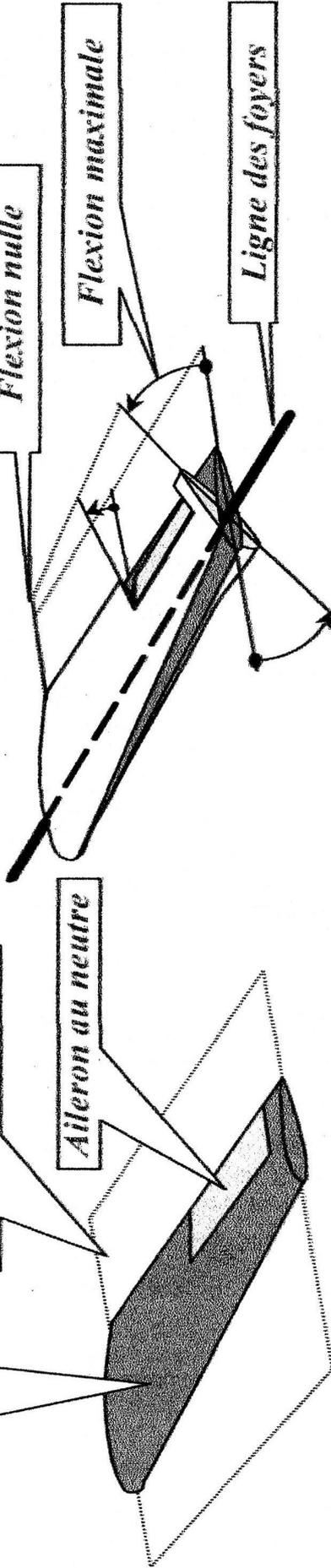
La portance augmente en arrière de la ligne des foyers. Au

niveau de l'emplanture, l'aile reste rigide par liaison mécanique avec le fuselage tandis qu'elle subit une flexion maximale à son extrémité libre..

Flexion nulle

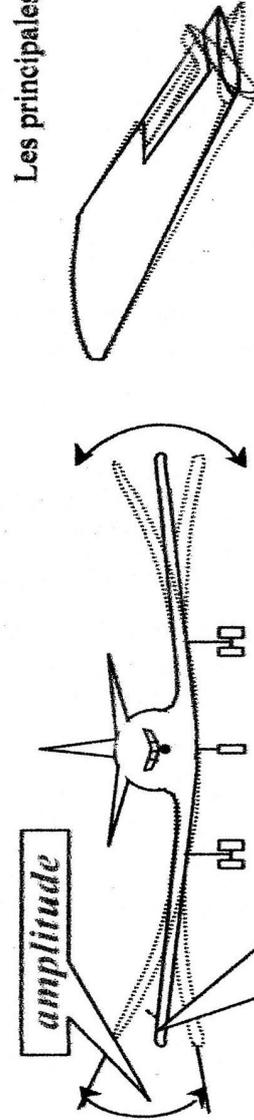
Flexion maximale

Ligne des foyers



VIBRATIONS MÉCANIQUES ET FLUTTER EXPLOSIF

Les vibrations sont des mouvements oscillatoires autour d'une position moyenne. Elles se caractérisent principalement par l' amplitude et la fréquence qui est le nombre d'oscillations par seconde.



Les principales origines de ces vibrations sont :

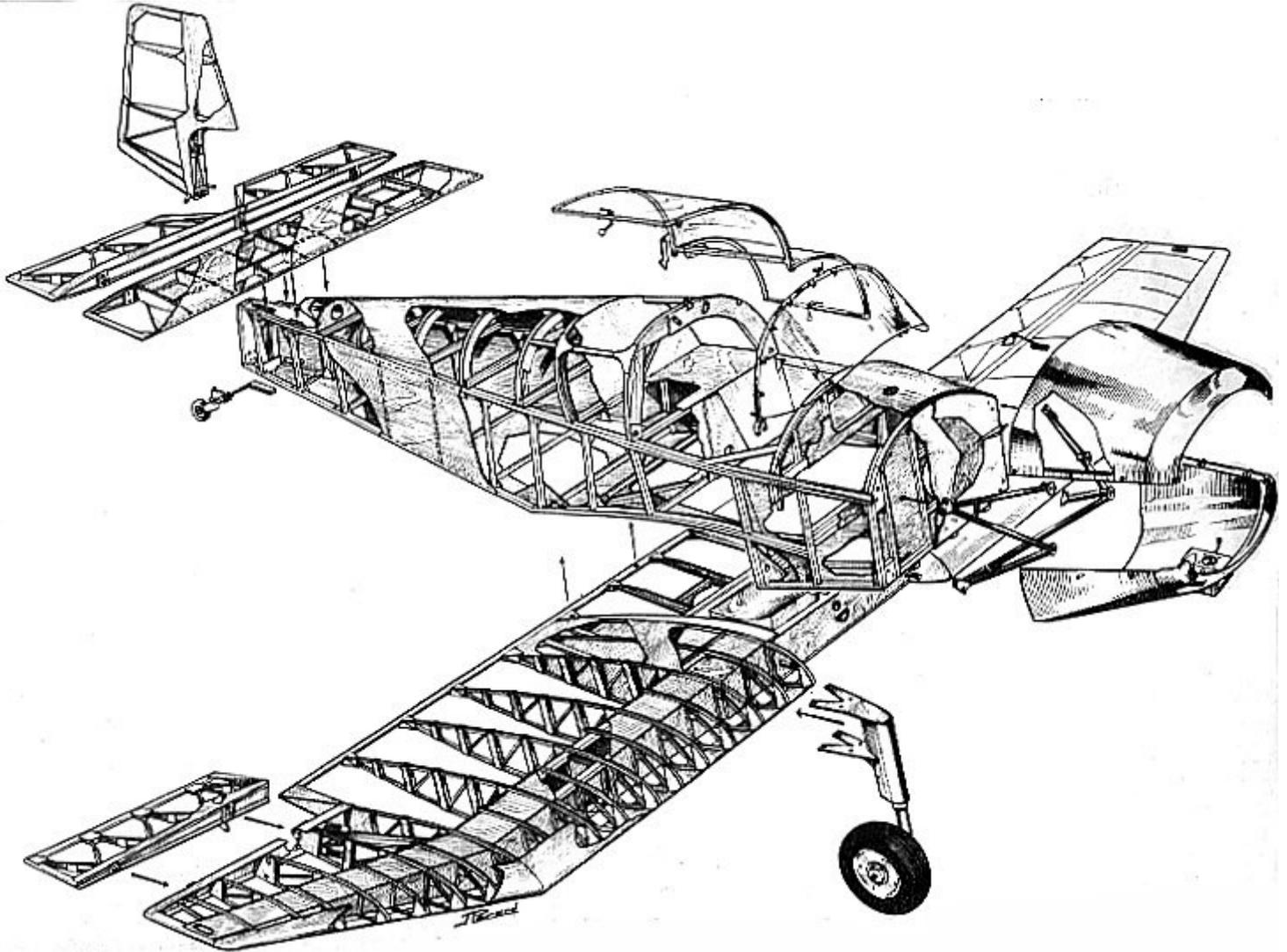
- Fonctionnement des propulseurs
- Forces aérodynamiques instationnaires
- Nombre de Mach

Le flutter explosif survient pour un nombre de Mach spécifique à chaque avion, lorsque les diverses vibrations subies par la structure entrent en résonance (vibrations simultanées et de même fréquence).

1- FUSELAGE :

Pour résoudre ce problème, les premiers avionneurs utilisèrent des structures dites en poutre de Warren, associées à un revêtement très léger, par exemple: en toile (dans le passé), ou en plastique (aujourd'hui). Ce type de structure a parfois été utilisée sans revêtement sur certains hélicoptères, et sur les tout premiers avions.

1.1 - Construction en treillis :



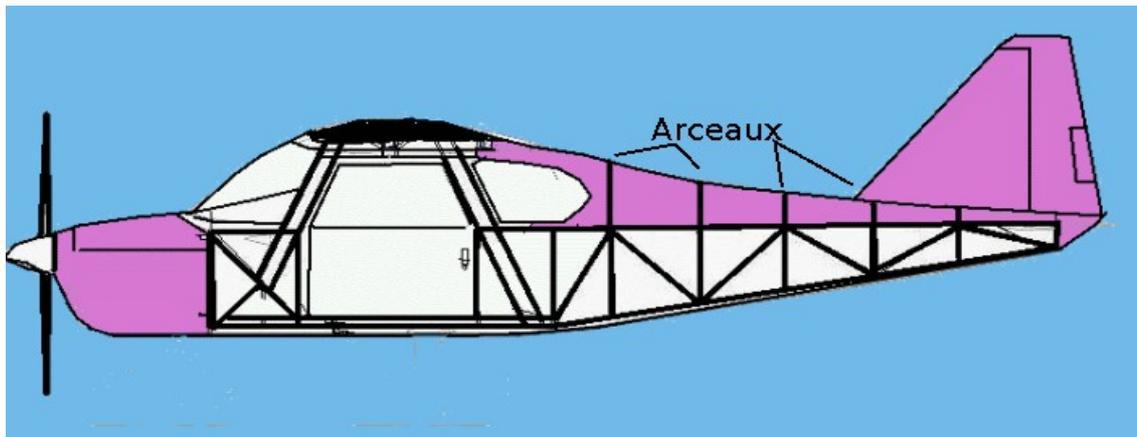
Le fuselage est constitué d'un treillis en bois ou en tubes métalliques qui assurent la tenue mécanique, qui est recouvert de toile ou d'une feuille de métal.

1.2 - Construction en bois coffré ou bois entoilé

Cette technique, la plus ancienne, utilise des bois résineux de type Hemlock, Spruce ou pin d'Oregon, des bois dur de type Frêne ou Hêtre et des feuilles de contreplaqué d'okoumé ou de bouleau.

1.3 - Construction en tubes d'acier

Cette technique utilise des tubes d'acier spéciaux (25CD4S, 15CDV6) assemblés en treillis et soudés en atmosphère neutre. L'entoilage est ensuite réalisé directement sur le treillis ou sur une structure secondaire en bois ou aluminium. Ce type de construction est principalement rencontré pour les gouvernes et fuselages d'appareils de voltige, ces parties travaillant peu.



La structure réalisée est ensuite entoilée avec des tissus de lin, de coton ou des tissus synthétique de type dacron, ou coffrée. Certains appareils réalisés ainsi il y a plus de 50 ans et ayant été réentoilés tous les 15 ans volent toujours de façon admirable.

Les deux principaux problèmes des fuselages en poutre de Warren sont:

- 1) Ils sont inoccupables en totalité (impossible de mettre des passagers sur des barres et de la toile).
- 2) Leurs revêtements très (trop) légers ne sont pas compatibles avec les contraintes liées aux hautes vitesses et aux hautes altitudes (pressurisation).

S'il faut un revêtement plus rigide, de la tôle par exemple, pourquoi ne pas lui demander de participer lui aussi à la rigidité générale de la structure de l'avion?

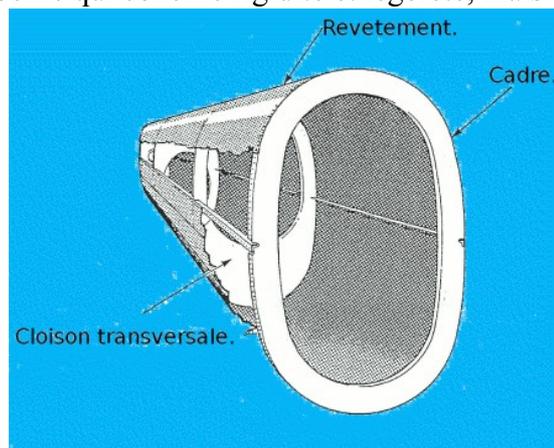
Partant de là, il y a deux possibilités:

1.4 - La structure monocoque:

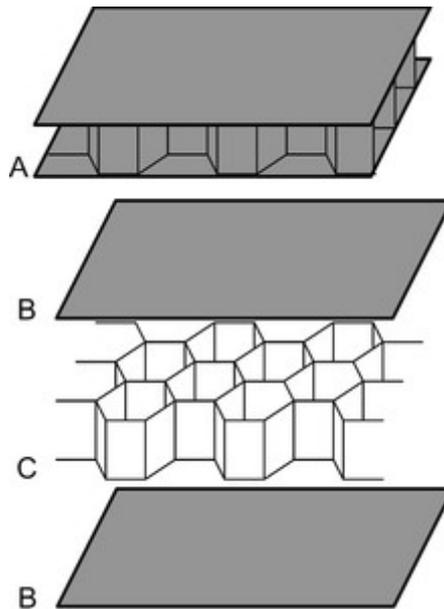
Le revêtement assure lui-même la rigidité de la structure;

pour que cela soit possible, il faut soit:

- Un revêtement en tôle épaisse: trop lourd, et donc inutilisable sauf, peut être, sur les petits avions.
- Un "gaufrage" en nid d'abeille qui concilie rigidité et légèreté, mais qui est complexe et cher à fabriquer.



Un gaufrage "nid d'abeille", ça ressemble à ceci

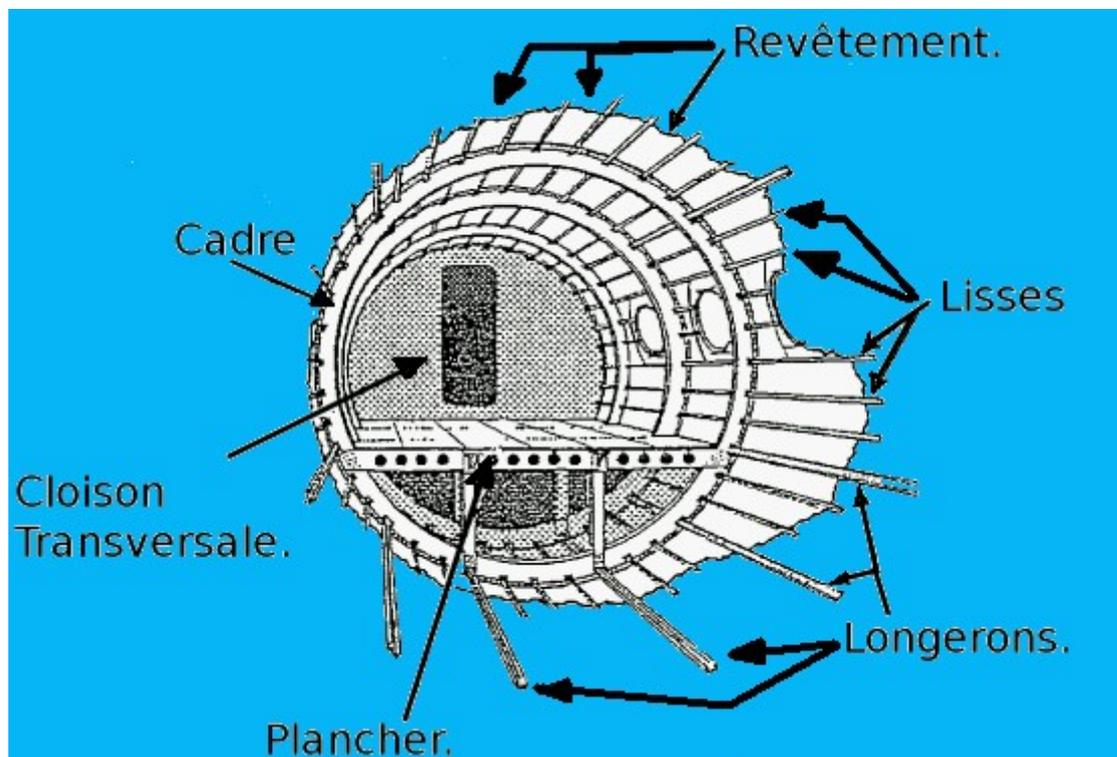


En plaçant une telle structure entre deux panneaux, on réalise une sorte de "sandwich" nid d'abeille, d'une résistance comparable à une paroi pleine, mais très nettement plus légère.

1.5 - La structure semi-monocoque:

cette fois, le revêtement ET la structure interne (le châssis) se partagent les efforts de résistance. C'est cette solution qui est largement la plus utilisée aujourd'hui.

Un fuselage semi-monocoque, est conçu comme ceci:



On y trouve:

- 1) Des longerons:** ce sont des poutrelles, généralement d'aluminium, en H, ou en I, qui supportent l'essentiel des efforts (surtout en flexion) du fuselage.
- 2) Des lisses:** beaucoup plus fins que les longerons, leur participation à la rigidité de l'ensemble est nettement plus modeste, mais ils sont absolument nécessaires pour supporter le revêtement, et lui donner sa forme. Sur certaines constructions récentes, les lisses, plus nombreux, et plus solides assurent seules la rigidité de la cellule, qui, dès lors, ne contient aucun longeron.
- 3) Des cadres:** Ils donnent la forme au fuselage et supportent les lisses et en partie le revêtement.
- 4) Des cloisons transversales:** leur rôle est comparable à celui des cadres, mais elles sont très nettement plus solides. Elles seront donc placées là où les contraintes sont plus importantes (emplacements d'aile, zone d'attache des moteurs, empennage, train d'atterrissage etc...).
- 5) Un revêtement** qui doit participer aussi à la rigidité générale. Il est fait de tôles ou de panneaux sandwich.
- 6) Un plancher** qui augmente encore la rigidité du tout.

Les avantages de la formule semi-monocoque sont:

La solidité, la facilité de construction, l'habitabilité maximale du fuselage, et ce que l'on appelle la protection totale.

La protection totale signifie que la structure conserve une rigidité suffisante même lorsqu'un des éléments est fortement endommagé.

D'où: le concept fail-safe.

Il s'agit de s'assurer qu'une défaillance n'en entraîne pas d'autres. Pour garantir cette protection totale, il existe plusieurs techniques:

- 1) La redondance:** certaines pièces, ou certains systèmes sont simplement doublés, voir triplés, afin que si une défaillance se produit, une autre pièce, ou un autre système jumeau du premier prenne la relève.
- 2) L'utilisation de longerons partagés en sections longitudinales,**
Il s'agit d'un longeron dont les moitiés (supérieure, et inférieure) sont réunies par une jonction rivetée. Si une section (supérieure, ou inférieure) de ce longeron est fortement endommagée, l'autre section est encore suffisante pour supporter la charge.
De plus, une fissure qui se formerait sur une des deux sections, et qui se propagerait serait arrêtée au niveau de la jonction, car il y a discontinuité (séparation).
- 3) Le choix de matériaux dans lesquels les fissures se propagent lentement.**
- 4) L'utilisation "d'arrêteurs de fissures".**
Si une fissure apparaît sur la paroi, et se propage, elle sera arrêtée par la zone renforcée (en mauve). Ce quadrillage de renfort étant collé, et donc ne faisant pas partie du même "bloc" en quelque sorte, il ne sera pas "contaminé" par la fissure car il y a discontinuité (séparation dans la matière).
Que ce soit pour les longerons, ou pour les parois on arrête les fissures grâce à une discontinuité, pourquoi? Vous avez déjà tous pu remarquer que lorsque vous vouliez déchirer quelque chose d'assez résistant, c'est le démarrage qui est le plus difficile. Si, par exemple vous déchirez une revue, il vous faut fournir un effort très intense au début, puis une fois que la déchirure a commencé, elle se poursuit plus facilement.
Pour traverser une zone de discontinuité, ou une séparation, une fissure rencontre une résistance comparable à celle d'un départ.
Pour la même raison, et aussi étrange que cela puisse paraître, on peut arrêter une fissure grâce à un.....trou! Sans trou, les forces de déchirement se concentrent sur la "pointe" de la déchirure qui progresse facilement.
Avec trou, les forces de déchirement se répartissent tout autour du trou, et pour que la fissure se poursuive de l'autre côté, il faut une contrainte plus grande. Cela correspond de fait à une sorte de nouveau départ de la fissure, donc à plus de résistance.

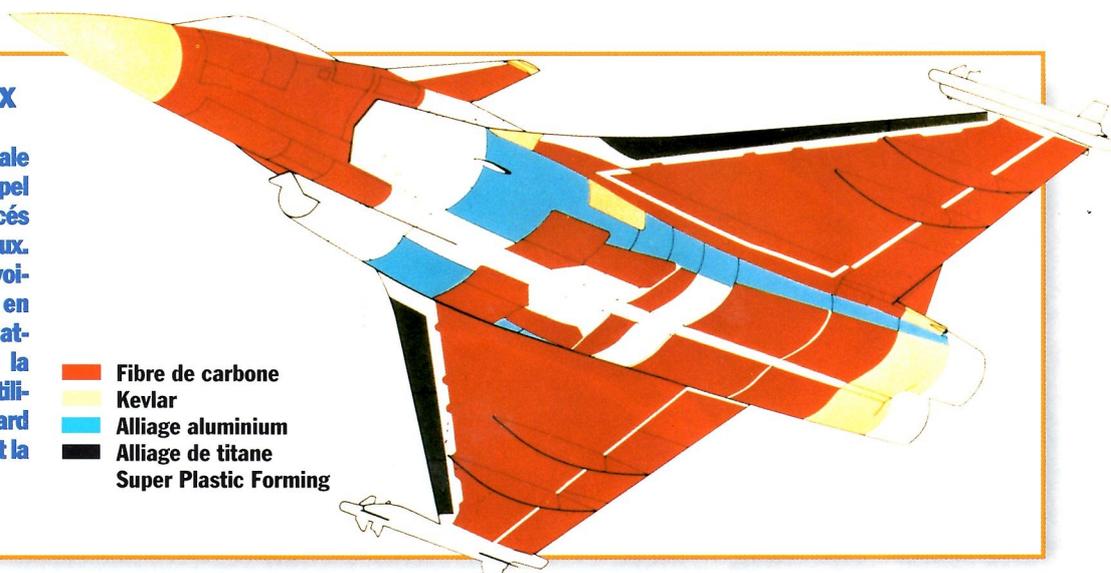
1.6 - Matériaux entrant dans la fabrication des avions :

Nom de l'alliage	Désignations normalisées	Utilisations aéronautiques
ZICRAL	33-7075 AZ 5 GU DIN N° 3.4364	Revêtements d'extrados – longerons d'ailes – lisses – empennages – trains d'atterrissage
DURALUMIN	33 – 2024 AU 4 G 1 AU 2 GN 33 – 2017 33 – 2618 DIN N° 3 – 1305	Revêtements d'intrados - circuits hydrauliques – circuits pneumatiques – canalisations d'huile – nids d'abeilles – fuselages – longerons et nervures d'intrados – structures coque – ailettes de compresseurs axiaux – roue de compresseur centrifuge
ALPAX	AS 12 UN	Pistons de moteurs – pistons de compresseurs
DURALINOX	AG 3 DIN N° 3.3524.1	Nids d'abeille – circuits hydrauliques – circuits pneumatiques – circuits d'huile
ACIERS	Z 10 CNT 18_8 36 NCD 16 SAE 2330 SAE 1095 SAE 4130	Becs de bord d'attaque d'avions supersoniques – ailettes médianes de compresseur réacteur – cheminées et tubulures d'échappement – collecteurs – amortisseurs de trains d'atterrissage – pièces structurelles usinées – tiges d'accouplement – câbles de commandes – ressorts – tubes hydrauliques extérieurs
ALLIAGES DE MAGNESIUM	GA 9 GZ 4	Boîtiers d'instruments de bord - arbor de moteur – éléments de structure – sièges – roues d'avion – tableau de bord – stator et carter de compresseurs de turbomachines – mât radio
ALLIAGES DE TITANE	T-A 6 V 4 T-A 3 Cr	revêtement sur avion supersonique - train d'atterrissage – attache de voilure – cadres – lisses – cloison parefeu
MONEL	Ni Cu 29 Fe	Rivets – collecteurs d'échappement – soupapes

Les matériaux

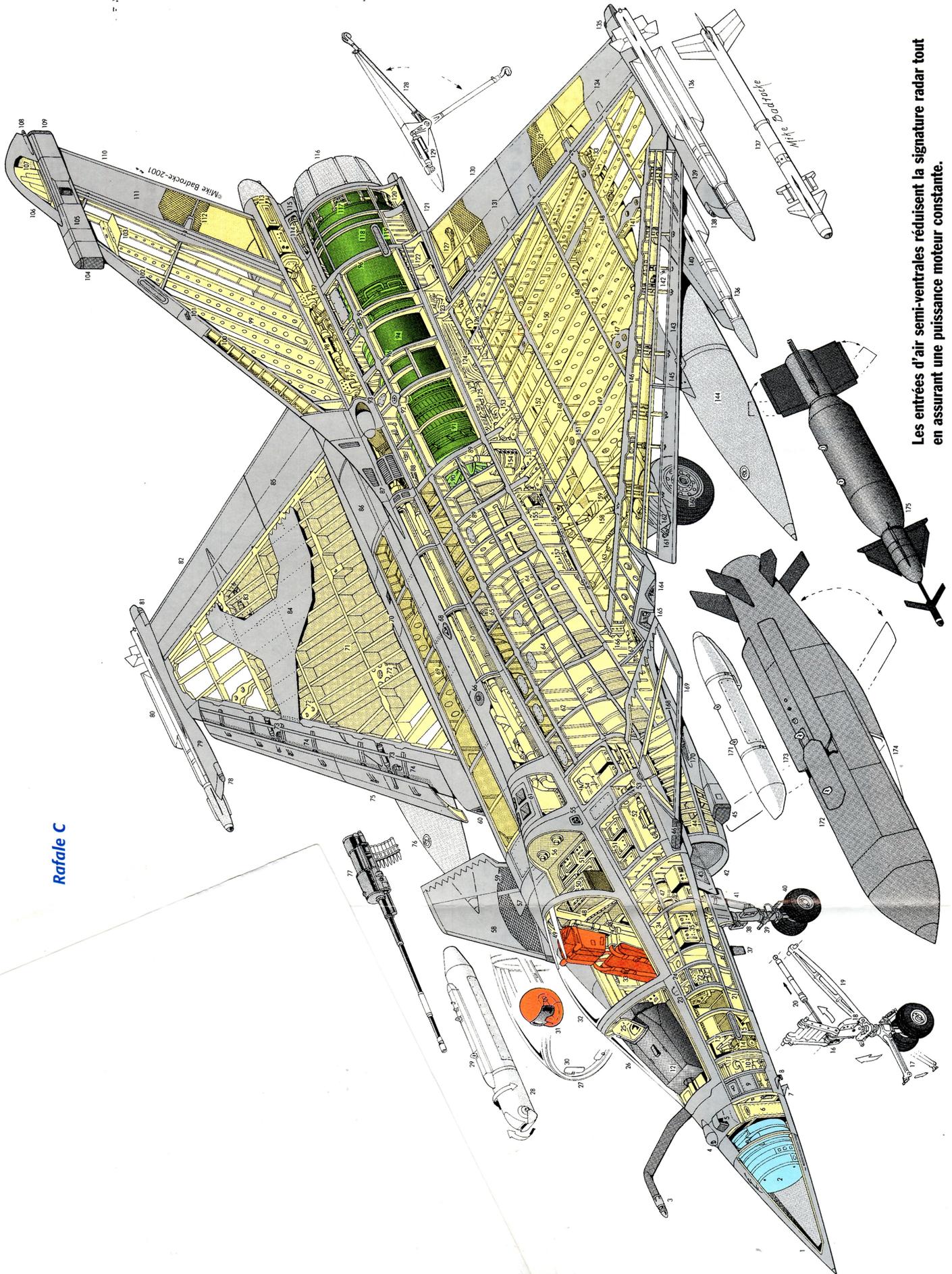
La structure du Rafale fait largement appel à des matériaux avancés et à des alliages spéciaux. Les extrémités de la voilure et le nez sont en Kevlar; les bords d'attaque sont en titane; la fibre de carbone est utilisée dans les plans canard pilotés, dans les ailes et la dérive.

- Fibre de carbone
- Kevlar
- Alliage aluminium
- Alliage de titane
- Super Plastic Forming



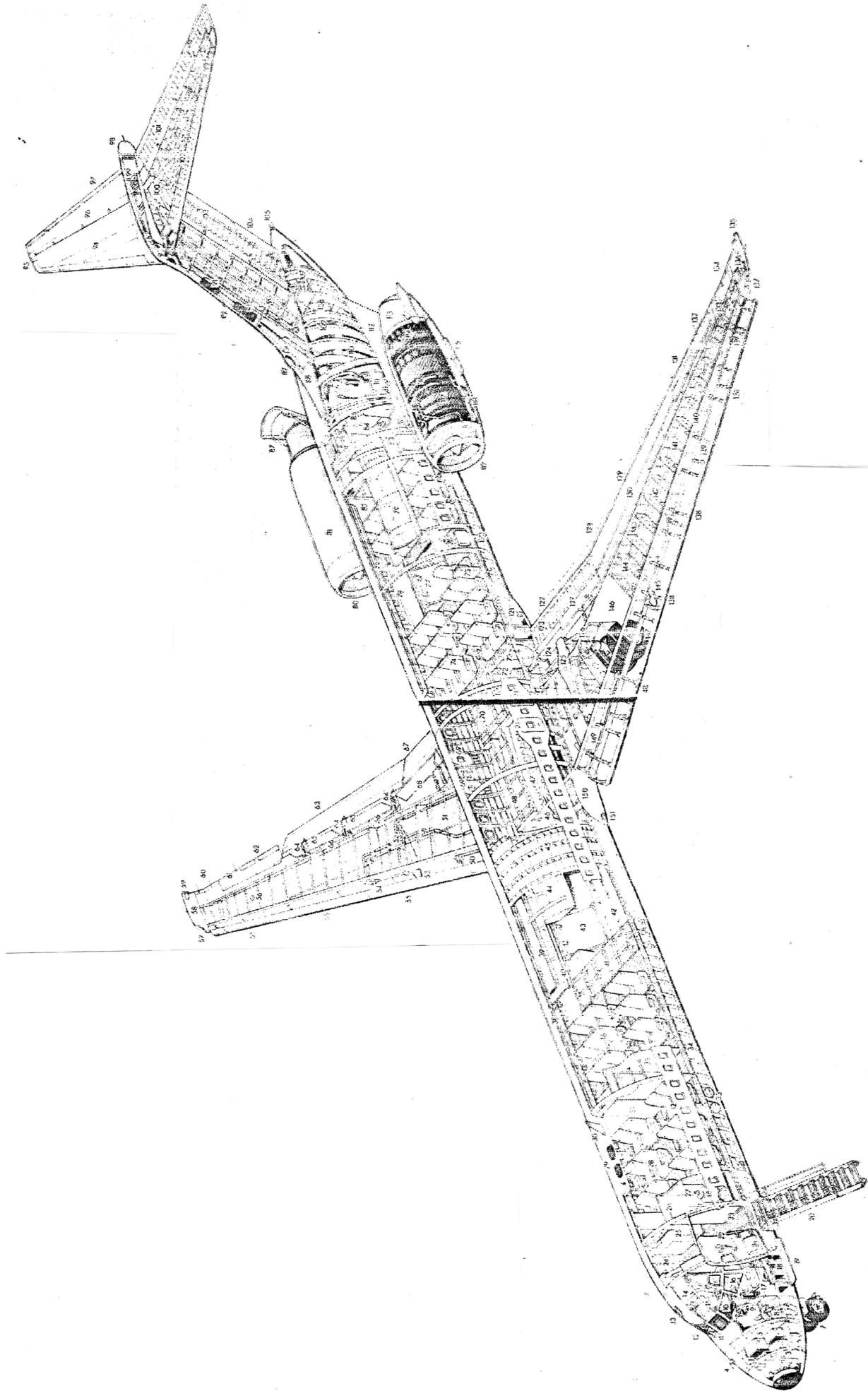
1.7 - Avion militaire :

Rafale C



Les entrées d'air semi-ventrales réduisent la signature radar tout en assurant une puissance moteur constante.

1.8 - Avion civil : DC9 - 80



2 - LES AILES :

2.1 - Historique :

La surface de voilure nécessaire au vol dépend de la masse et de la vitesse et donc de la puissance des moteurs disponibles. Au début de l'aviation les moteurs disponibles étaient peu puissants, la vitesse faible ; il fallait donc une grande surface portante, ce qui a conduit à réaliser des aéronefs à plusieurs voilures superposées reliées entre elles par des mâts et des haubans, car les techniques de l'époque et les matériaux employés ne permettaient pas de construire des structures donnant des portes-à-faux importants. Les appareils multiplans étaient donc la réponse la plus appropriée compte-tenu des techniques des débuts de l'aviation, surtout pour les appareils de combat qui ont grandement contribué aux progrès, parce que les contraintes qu'ils devaient subir étaient très élevées.

Dans la première moitié du XX^e siècle, on a donc construit des avions biplans (à deux voilures superposées) voire triplans (à trois voilures superposées). Ceci permettait d'obtenir une portance supplémentaire sans trop augmenter l'envergure et la masse de l'aile. Avec l'augmentation de la puissance des moteurs, l'apparition de nouvelles méthodes constructives et de nouveaux matériaux, l'amélioration des moyens de calcul et de dimensionnement et le développement de la science de la résistance des matériaux, la construction d'avions à ailes métalliques plus épaisses mais sans haubans a permis de réduire la traînée et de gagner en vitesse.

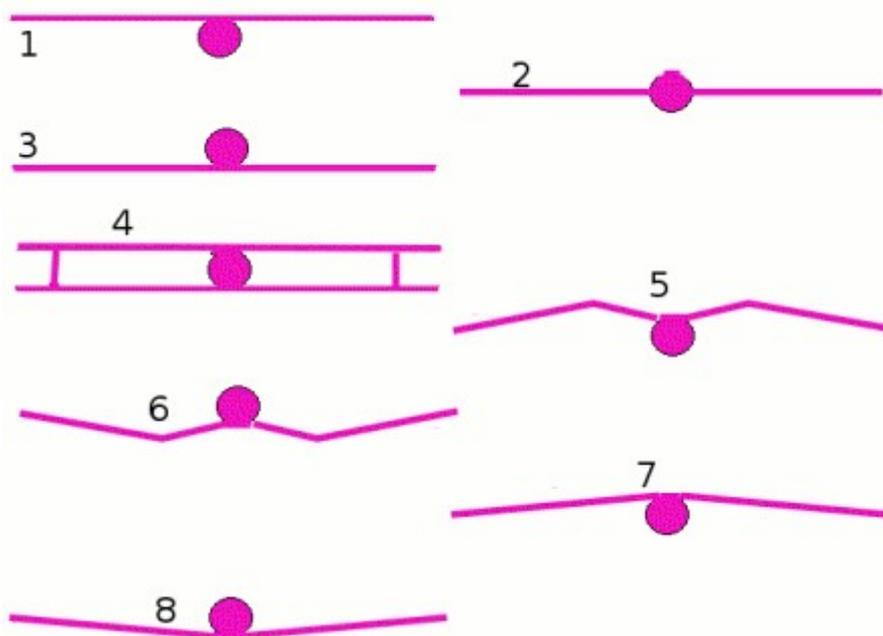
Depuis la Seconde Guerre mondiale, la quasi-totalité des avions sont *monoplans* : leur voilure est constituée de deux ailes en porte à faux ou cantilever placées de chaque côté du fuselage.

Les ailes sont des éléments extrêmement importants de la cellule, elles assurent la portance et sont "porteuses" de différentes gouvernes, quand ce n'est pas le train d'atterrissage.

Elles sont donc soumises à des contraintes énormes, tant en flexion qu'en torsion. Leur structure doit donc tenir compte de ces faits et présenter une rigidité maximum.

2.2 – Types et formes :

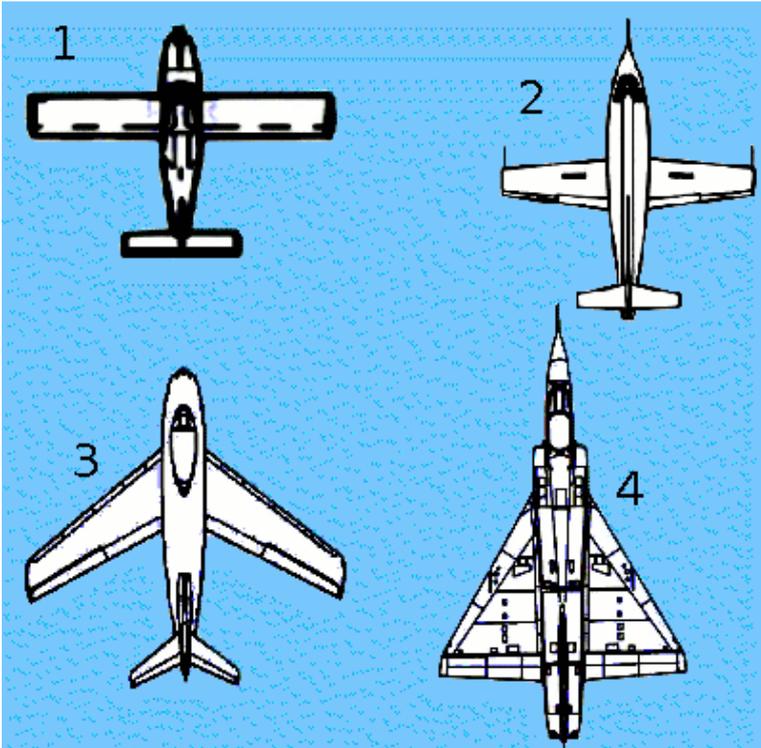
2.2.1 - On peut "classer" les types d'ailes d'après leur position et leur forme transversale.



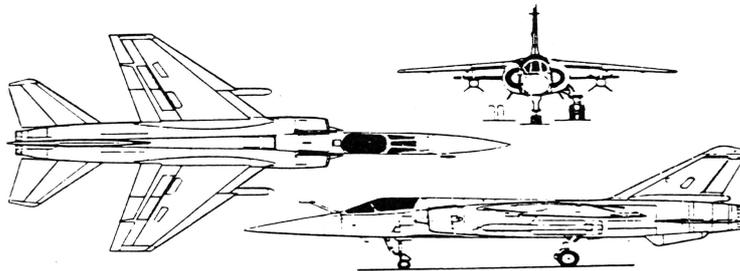
Aile haute (1), aile médiane (ou moyenne) (2), aile basse (3), biplan (4), aile en M (5), surtout pour les hydravions, en plaçant les moteurs au niveau le plus haut sur les ailes pour les éloigner des projections d'eau, aile en W (6), (F4 Corsair, Junker Stuka), pour permettre, en plaçant le train d'atterrissage au point le plus bas, d'augmenter la garde au sol, et permettre l'emploi d'une hélice plus grande, en dièdre négatif (7), en dièdre positif (8).

2.2.2 - On peut aussi différencier les ailes suivant leur forme.

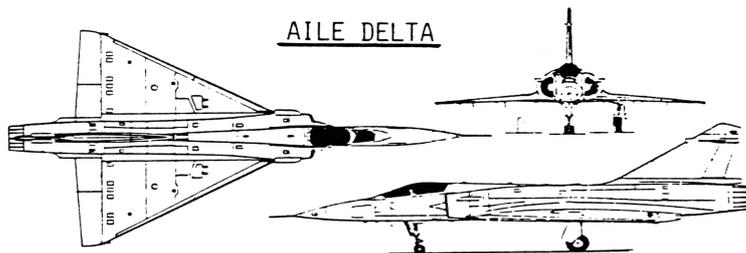
Aile droite (1), aile trapézoïdale (2),
aile en flèche (3), aile delta (4).



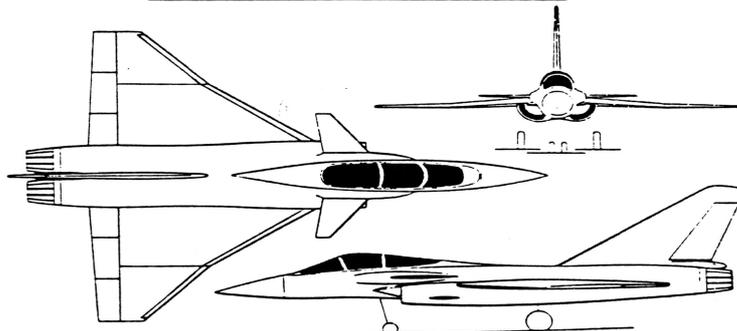
AILE EN FLECHE AVEC EMPENNAGE HORIZONTAL ARRIERE



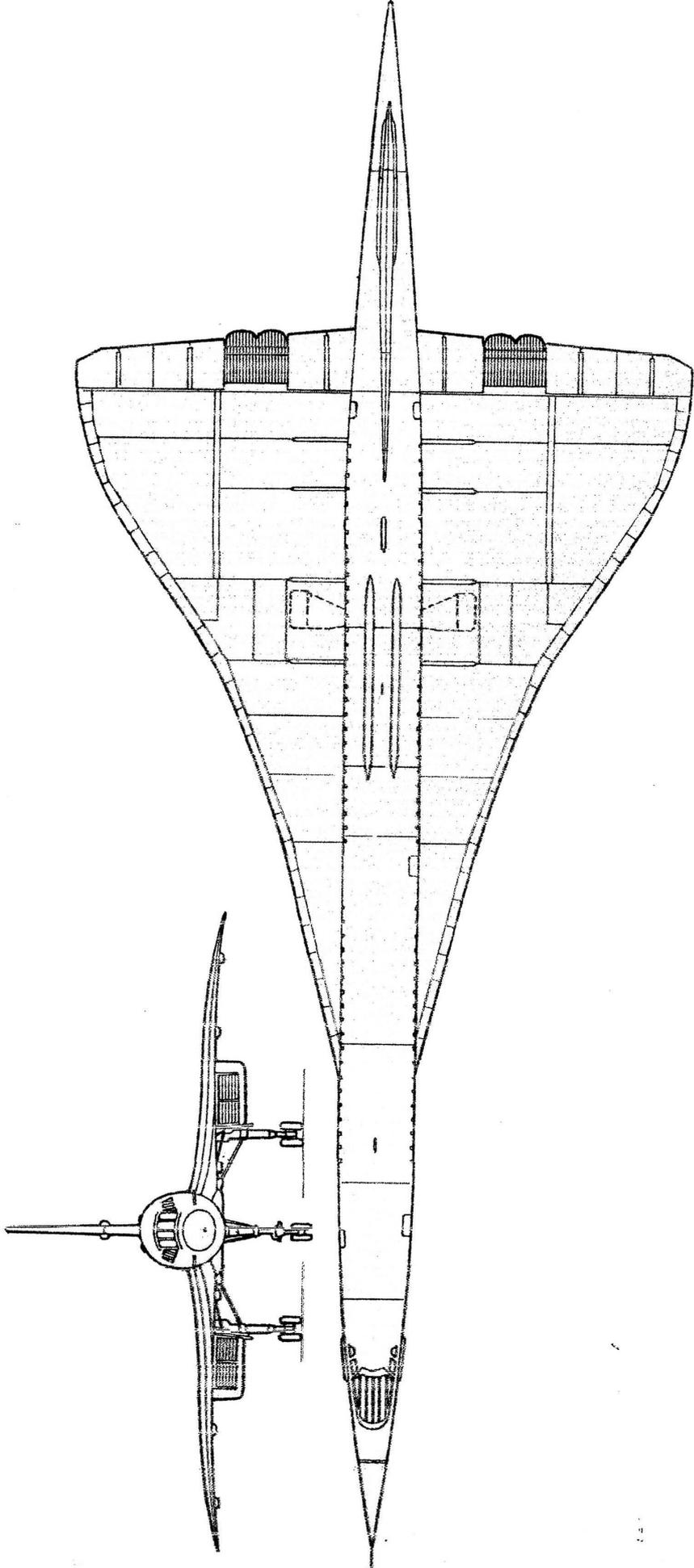
AILE DELTA



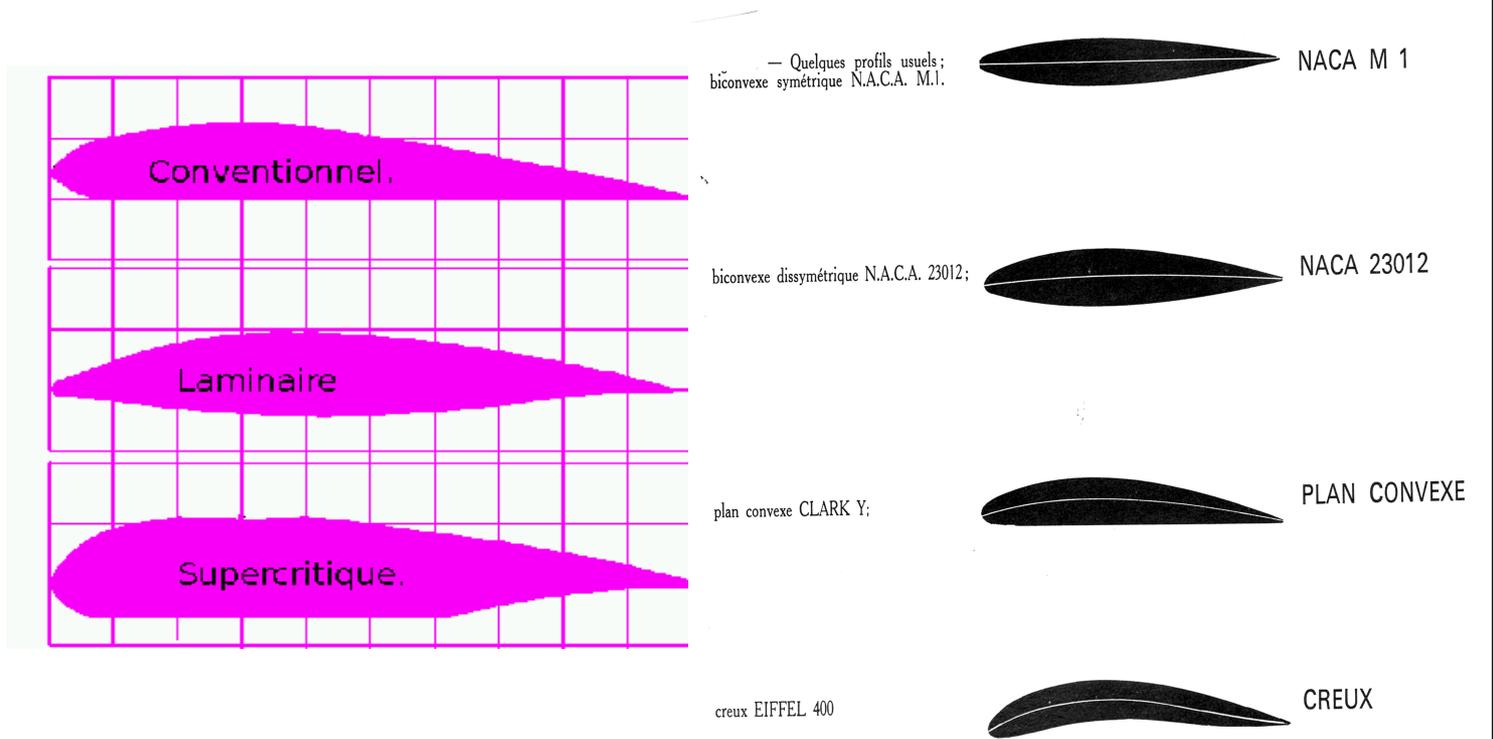
AILE DOUBLE DELTA ET "CANARD"



Aile gothique : Concorde



2.3 – Les profils



2.3.1 - Historique :

Au cours du temps, les profils ont évolué et chaque nation a développé son propre programme de recherche sur les profils. Le plus fameux fut le programme américain NACA .

Toute personne possédant une culture aéronautique aura entendu parler des profils NACA, suivi d'une série de chiffres.

Le NACA, pour National Advisory Commite for Aeronautic, fut créé dans les années 50 et est l'équivalent de l'ONERA français. Cet organisme créa essentiellement des profils laminaires.

Prenons l'exemple du profil 23012 (Dr-300), le premier chiffre représente une courbe relative de 2%, puis le deuxième et 3ème chiffre le double de l'abscisse de la flèche maximum et enfin l'épaisseur relative de 12%

Il existe bien sûr beaucoup d'autres profils mais ils demeurent assez peu utilisés dans l'ensemble.

Ainsi on peut citer les profils français Eiffel dont les premiers furent élaborés par l'ingénieur du même nom.

Mais la famille la plus connue après les profils NACA est celle des Clark

- **Le profil classique**, qui met plutôt l'accent sur la portance; il est bombé au dessus (extrados),et quasiment plat en dessous (intrados).

- **Le profil laminaire**, sensé favoriser un écoulement laminaire (donc non turbulent) sur une plus grande plage, et par conséquent, diminuer la trainée aérodynamique. C'est un profil biconvexe.

- **Le profil supercritique**, plus épais, et présentant une zone quasiment plate sur l'extrados. Il permet un plus grand emport de carburant dans les ailes, et est bien adapté aux avions volant en haut subsonique, car ce type de profil limite les instabilités liées au Mach critique (apparition de zones soniques ou supersoniques sur les ailes, et donc d'ondes de choc bien avant Mach1).

Une **voilure supercritique** est un type de voilure dont la vitesse critique est plus grande que pour une voilure conventionnelle. Au-delà de cette vitesse, l'écoulement d'air sur la partie supérieure de l'aile atteint localement la vitesse du son ce qui produit une [trainée d'onde](#).

Les voilures supercritiques ont été conçues par la **NASA** dans les années 1960 avant d'être testée sur le Vought F-8 Crusader. Le Dassault Falcon 50 fut le premier avion civil à être équipé d'une voilure supercritique. Les effets étant une augmentation de la vitesse de croisière, économie de carburant, augmentation de la capacité des réservoirs.

Le profil des ailes qui équipent les avions de ligne modernes (famille Dassault, Airbus, ...) est supercritique. La vitesse des avions de ligne (de l'ordre de Mach 0.8) est relativement proche de la vitesse du son (Mach 1). Les filets d'air subissent une accélération autour d'un profil en particulier sur l'extrados de l'aile.

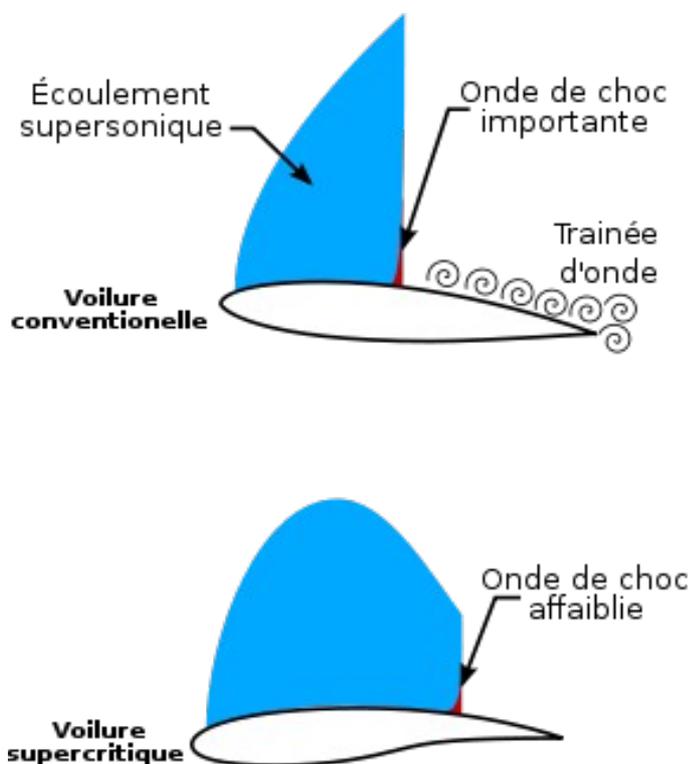
Cette accélération donne naissance, sur les profils classiques, à des zones où la vitesse d'écoulement est localement supersonique (Mach supérieur à 1). Cette zone d'écoulement supersonique génère une onde de choc qui s'accompagne d'une importante dégradation des performances de l'avion.

Sur les profils supercritiques, le nombre de Mach local maximal à l'extrados est atteint rapidement, et reste sensiblement stationnaire lorsque le Mach général augmente. L'intensité du choc de recompression (à l'arrière de l'onde de choc la vitesse redevient subsonique) reste ainsi limitée¹.

Ce type du profil, en plus de ces avantages aérodynamiques, permet donc de disposer d'une épaisseur relative plus importante, permettant d'accroître la capacité en carburant dans la voilure.

La forme du profil supercritique est caractérisé par :

- une ligne moyenne à double courbure, inversée dans la partie avant (concavité vers le haut),
- un extrados aplati,
- un intrados « creusé » dans sa partie arrière.

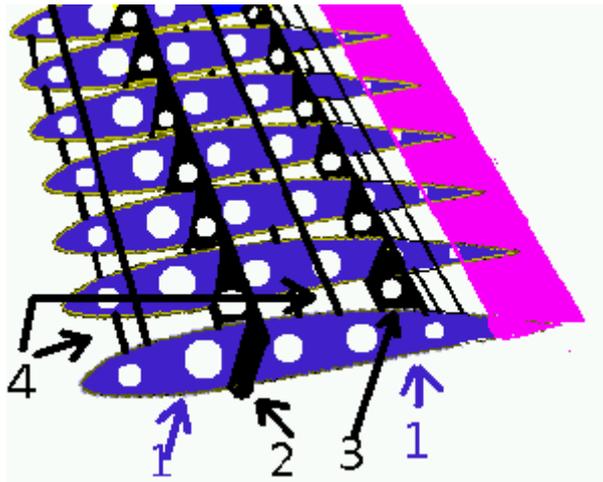


2.4 - La structure interne des ailes.

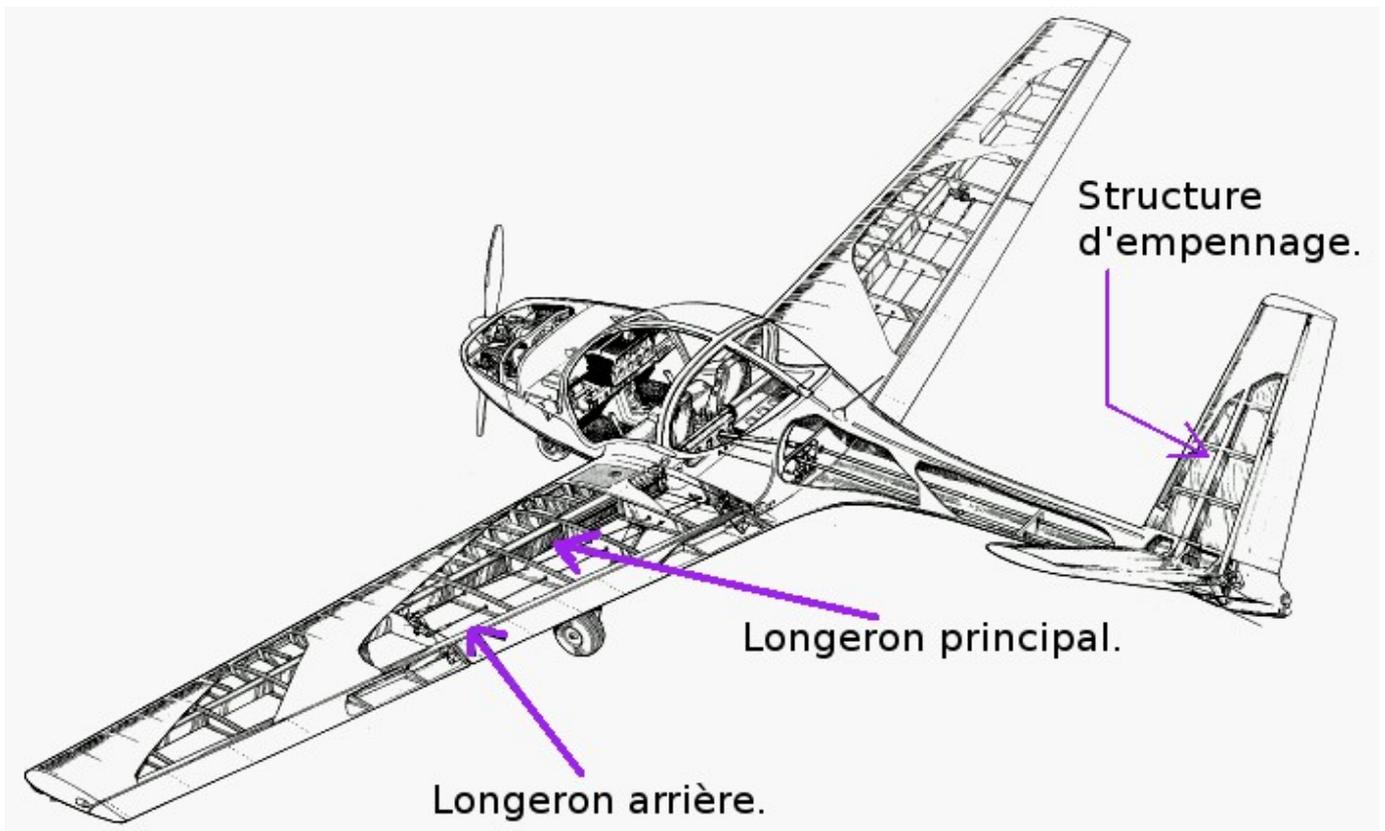
Elle est faite de longerons pour supporter la majorité des contraintes (en flexion), ainsi que de nervures pour donner la forme, transmettre aux longerons les efforts venant du revêtement et supporter une grande partie des contraintes en torsion.

A cela s'ajoute un revêtement et souvent des lisses.

En fait, tout cela peut faire penser à la structure du fuselage.



- 1) Nervures.
- 2) Longeron principal.
- 3) Longeron arrière.
- 4) Lisses.



Les longerons assurent la liaison aile-fuselage, mais dans certains cas, on peut trouver un longeron non rattaché au fuselage, servant uniquement à la rigidité de l'aile, on parle alors de faux longeron.

Comme les longerons de fuselage, les longerons d'aile peuvent être conçus suivant le concept faille-safe, ou à protection totale .

L'épaisseur et/ou le nombre de longeron peut varier suivant les contraintes prévues pour l'avion; en particulier, les avions de voltige aérienne ont plus de longerons.

Les nervures n'occupent pas toujours toute la corde de l'aile, si un dispositif hypersustentateur existe au bord d'attaque, elles s'arrêtent au longeron avant sur lequel le dispositif en question vient s'articuler.

La voilure peut également être le support de différents systèmes de navigation comme les feux de position (aux extrémités), les phares d'atterrissage, ou de pilotage (détecteur de décrochage). Y sont également fixés d'autres dispositifs, par exemples de fines tiges parfois terminées par des brosses en fibres de carbone (déperditeur de potentiel) permettant d'éliminer la charge électrostatique formée par la friction de l'air.

Sur les avions modernes et en particulier sur les avions de combat, le revêtement participe souvent à la rigidité et à la résistance de l'ensemble.

Le cas le plus probant est le revêtement à raidisseurs intégrés. Les ailes des avions de combat moderne sont souvent faites de caissons à raidisseurs intégrés.

Une telle structure multi-longerons en caissons à raidisseurs intégrés peut résister à des contraintes énormes.

Le facteur de charge limite que peuvent encaisser les avions de combat moderne est régulièrement de 9g en usage "normal", mais en fait la résistance de la structure est telle qu'ils peuvent souvent encaisser plus de 12g, voir plus de 15 pour la famille Sukhoï 27, 30, etc...

Pour donner une idée sur ce qu'est un facteur de charge limite, disons qu'un avion dont le facteur de charge limite est de 10g est un avion dont la structure est capable de résister à 10 fois le poids de l'avion, cette force étant appliquée aux ailes sous forme de portance.

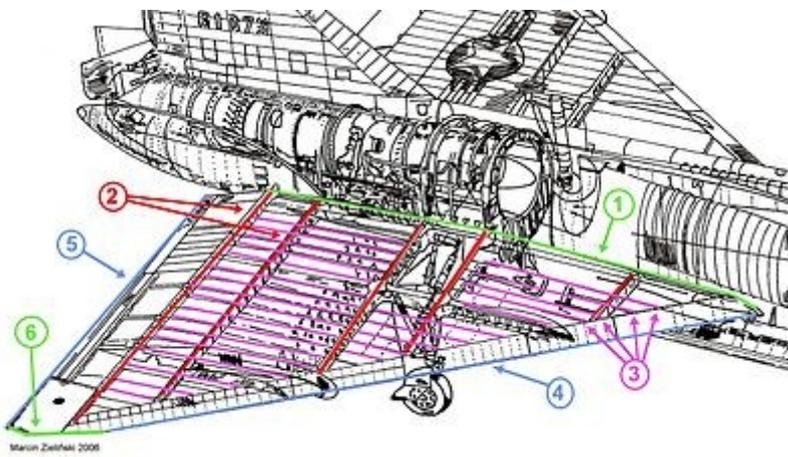
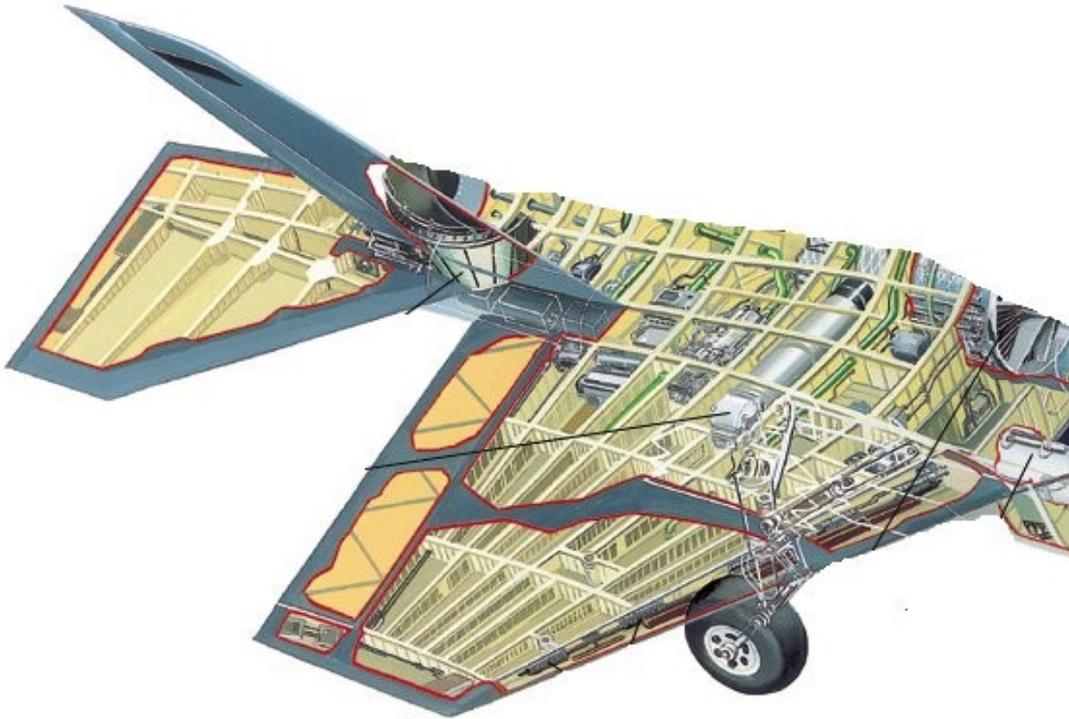
Exemple de construction :

Structure voilure sur avion de combat

L'aile du Rafale:



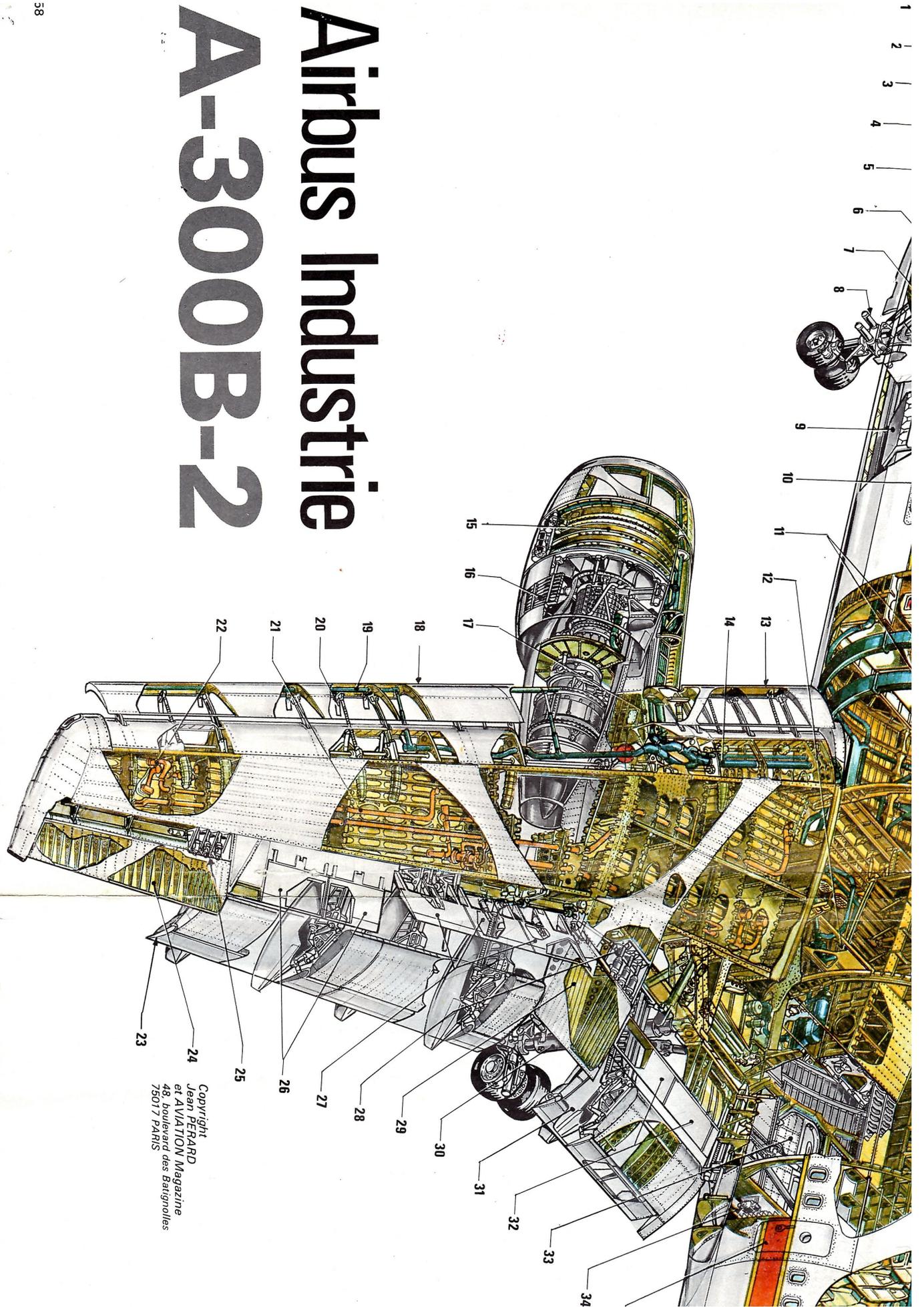
Celle du F35:



- 1 - Emplanture
- 2 - Longerons
- 3 - Nervures
- 4 - Bord d'attaque
- 5 - Bord de fuite
- 6 - Saumon

Airbus Industrie

A-300B-2

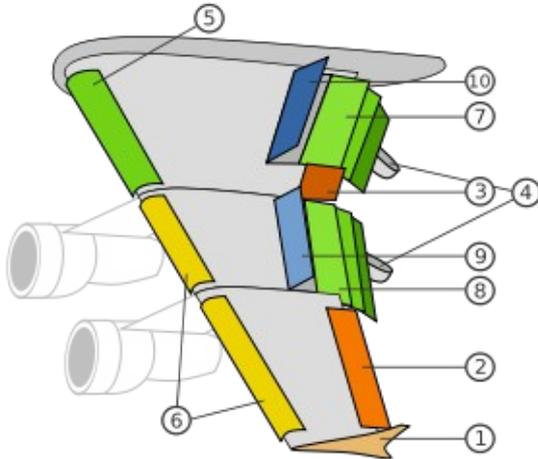


Copyright
Jean PERARD
et AVIATION Magazine
48, boulevard des Batignolles
75017 PARIS

3 - LES GOUVERNES

De bord d'attaque et de bord de fuite

Généralités :



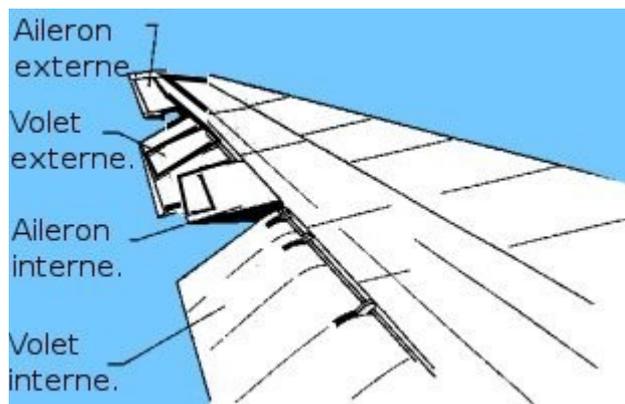
1. [Ailette verticale marginale](#) (*Winglet* en anglais)
2. [Aileron](#) basse vitesse
3. [Aileron](#) haute vitesse
4. Rail de glissement des volets
5. Becs de bord d'attaque de type [Krüger](#)
6. Becs de bord d'attaque de type [slats](#)
7. Volets intérieurs de type [Fowler](#)
8. Volets extérieurs de type [Fowler](#)
9. Spoilers (destructeur de [portance](#))
10. Spoilers / [aérofreins](#)

3.1 - Les ailerons:

Ce sont des surfaces mobiles situées au bord de fuite de l'aile, généralement vers les extrémités de la voilure afin de pouvoir travailler avec le bras de levier le plus long possible. Leur fonction est de faire pivoter l'avion autour de l'axe de roulis en faisant varier différentiellement la portance des deux ailes.

Pour les avions volant à haute vitesse, les forces aérodynamiques peuvent devenir si gigantesques que les ailerons placés aux extrémités des ailes pourraient, en s'abaissant, provoquer une torsion de l'aile la faisant "piquer du nez", et produire ainsi l'effet exactement contraire à celui escompté; c'est ce qu'on appelle l'inversion d'ailerons.

Les risques liés à cette inversion d'aileron ont amené à choisir, pour les avions rapides, de partager les ailerons en deux sections: une aux extrémités d'ailes pour les basse vitesses (ailerons externes), et une autre plus près du fuselage pour les hautes vitesses (ailerons internes).



Il existe un autre problème lié à l'usage des ailerons, c'est ce que l'on appelle le **lacet inverse**.

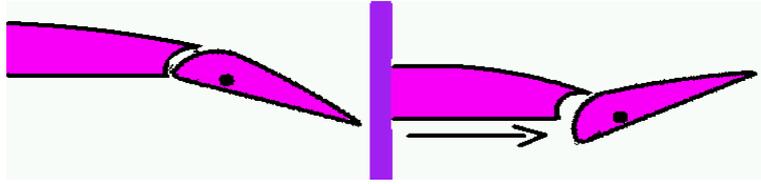
3.1.1 - Le lacet inverse :

Il résulte d'un différentiel de traînée entre les deux ailes. Le supplément de portance demandé pour faire monter l'aile extérieure au virage augmente **la traînée induite** par la portance et la traînée de profil à cause du braquage vers le bas de l'aileron. Inversement, l'aile intérieure au virage voit sa traînée diminuer. Le pilote annule le lacet inverse par une action sur la gouverne de direction, créant ainsi un moment de rotation en **lacet** dans le sens favorable au virage. On appelle cette action **la conjugaison des commandes**.

En résumé : au cours d'un vol en ligne droite, chaque fois que votre avion (planeur) tendra à s'incliner, vous apporterez les corrections nécessaires au retour à l'inclinaison nulle en conjuguant l'action sur les commandes.

3.1.2 - Comment lutter contre le lacet inverse :

Première solution: faire en sorte que l'aileron qui se lève le fasse avec un déplacement plus grand que celui qui s'abaisse. L'aileron levé offrant alors une plus grande surface "au vent", sa trainée sera plus grande; cette plus grande trainée de pression et frottement obtenue sur l'aileron levé compensant alors le surcroît de trainée (surtout induite) de l'aileron baissé. Ce système s'appelle: **ailerons différentiels**.



Deuxième solution: l'aileron Frise (du nom de son inventeur)

Comme vous le voyez sur le dessin, la position très reculée du point de pivot a pour résultat que le bord inférieur de l'aileron levé dépasse sous l'intrados de l'aile, et subit la pression de l'air à cet endroit (flèche). La trainée ainsi produite compense le supplément de trainée de l'aileron baissé.

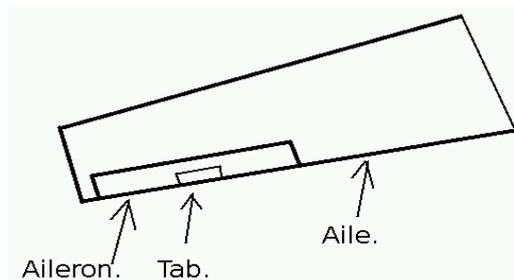
Troisième solution: les déporteurs, mais nous en parlerons plus loin.

Les ailerons servent au contrôle en roulis, ils peuvent tout aussi bien produire que réprimer ce roulis.

Toutefois, s'il existe une différence de quantité de carburant entre les deux ailes, ou d'une manière générale, une charge plus lourde d'un côté de l'avion que de l'autre, un déséquilibre constant sur l'axe de roulis apparaît. Si rien n'est fait, cela obligera le pilote à compenser ce déséquilibre par une pression latérale constante sur le manche, ce qui n'est pas l'idéal.

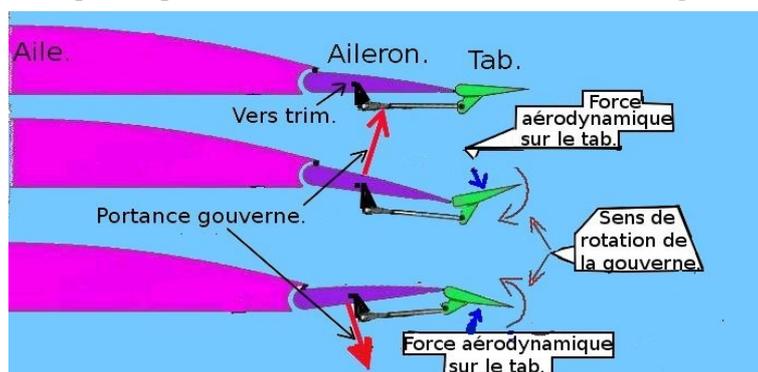
Pour remédier à ce problème, il est possible de placer un ressort dans la tringlerie de commande des ailerons; ce ressort agira sur les ailerons pour leur donner l'inclinaison juste nécessaire à rééquilibrer l'avion; la tension de ce ressort, peut être réglée en intensité, et en orientation (côté aile gauche, ou côté aile droite) par une petite manette à pas de vis située dans le poste de pilotage.

Une autre façon de contrer un déséquilibre constant de ce genre est d'équiper les ailerons de tabs (ou trim-tabs, dans ce cas). Ces tabs sont de petits volets mobiles placés au bord de fuite de la gouverne, et dont la position est commandée par une sorte de petite roue placée dans le poste de pilotage (le trim).



Étant placés sur le bord de fuite de la gouverne, il travaille loin du pivot de gouverne, et donc avec un bras de levier important; il n'a donc besoin que de produire une force très légère pour être capable d'influencer la position de la gouverne.

Les tabs fonctionnent par braquage en sens contraire de celui choisi pour la gouverne, la force aérodynamique qui agit alors sur eux provoque un pivotement, en sens inverse, de toute la gouverne, comme ceci :



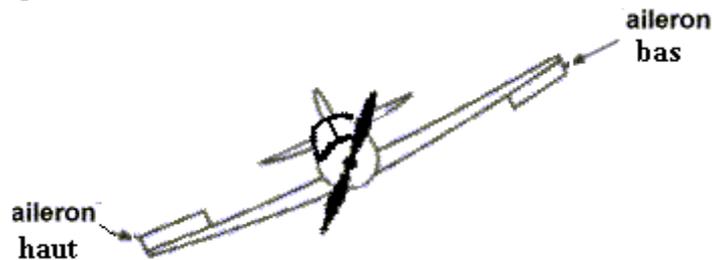
La traînée aérodynamique totale est l'addition de trois traînées différentes, à savoir:

-**La traînée de pression**: due à la pression de l'air sur la "face avant" de l'avion, et parfois augmentée de la traînée de culot (zone de dépression à l'arrière d'un objet mal profilé).

-**La traînée de frottement**: due, comme son nom l'indique, au frottement de l'air sur la surface totale de l'avion.

-**La traînée induite**, sorte de "prix à payer" pour la portance, souvent "révélée" par les tourbillons d'extrémités de voilure, elle est directement proportionnelle à la portance. En d'autre terme, plus de portance = plus de traînée induite.

Lorsqu'un avion vire, il s'incline vers l'intérieur du virage, pour cela, les ailerons de l'aile extérieure au virage s'abaissent afin d'augmenter la portance et relever l'aile, tandis que les ailerons de l'aile intérieure au virage se relèvent pour diminuer la portance et abaisser l'aile.



Il y a donc plus de portance sur l'aile qui se trouve à l'extérieur du virage (celle qui se relève). S'il y a plus de portance, il y a aussi plus de traînée surtout induite. les traînées de pression, et de frottement augmentent aussi mais bien moins fortement.

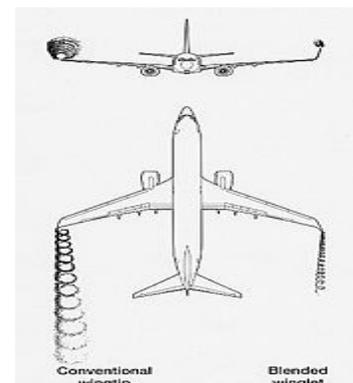
En conséquence :

Valeur de la traînée induite

- La traînée induite est nulle :
 - si la portance est nulle
 - si l'allongement est infini
- La traînée induite est moindre :
 - si l'allongement est grand et si le C_z est petit (C_z 0.1 à 0.3, avion rapide)
- La traînée induite est importante :
 - si l'allongement est petit et le C_z fort (aile delta au décollage).

3.2 - Winglet ou ailette verticale marginale :

Une **winglet** est une ailette sensiblement verticale située au bout des ailes d'un avion et qui permet de réduire la traînée induite par la portance sans augmenter l'envergure de l'aile.

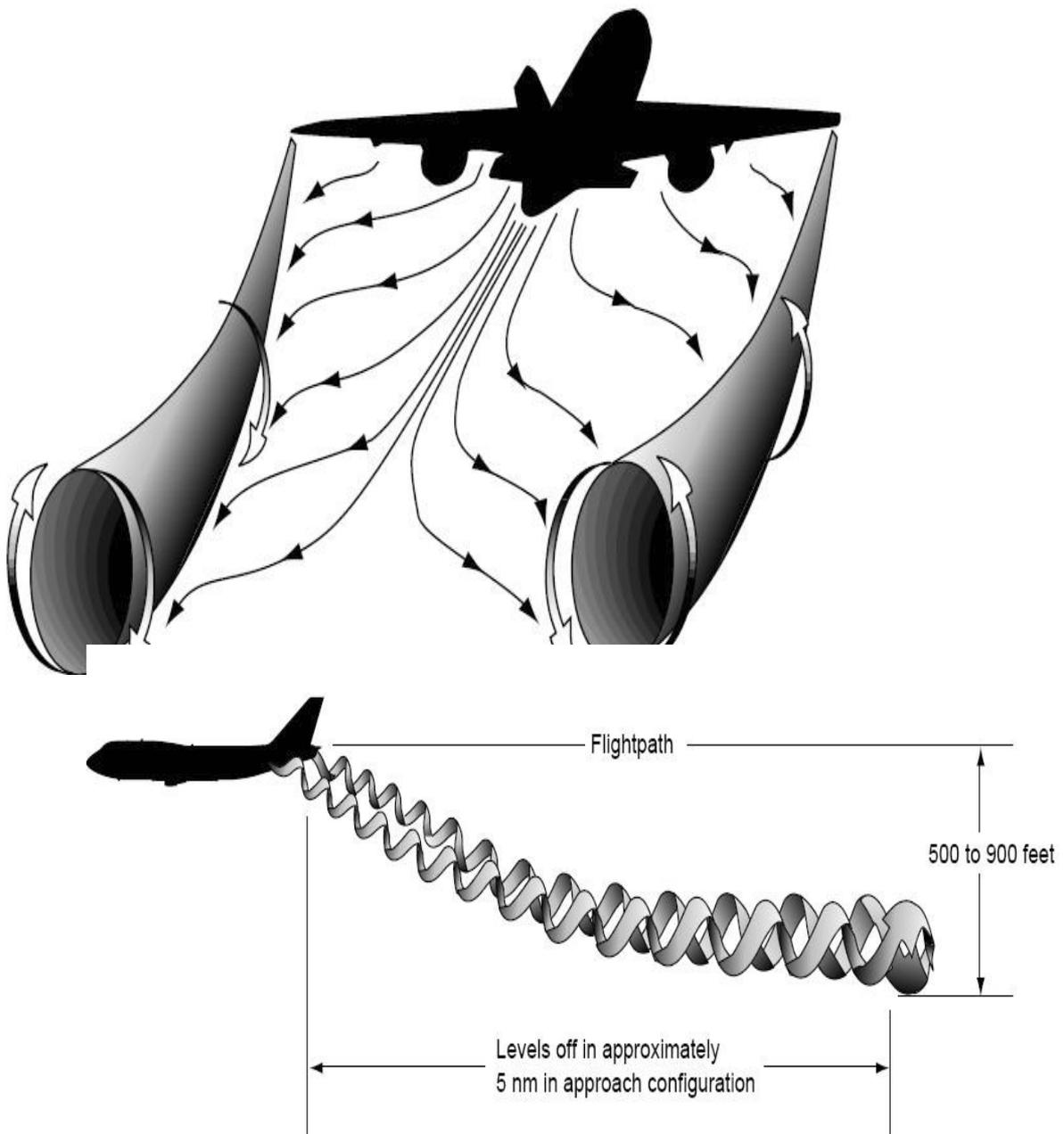


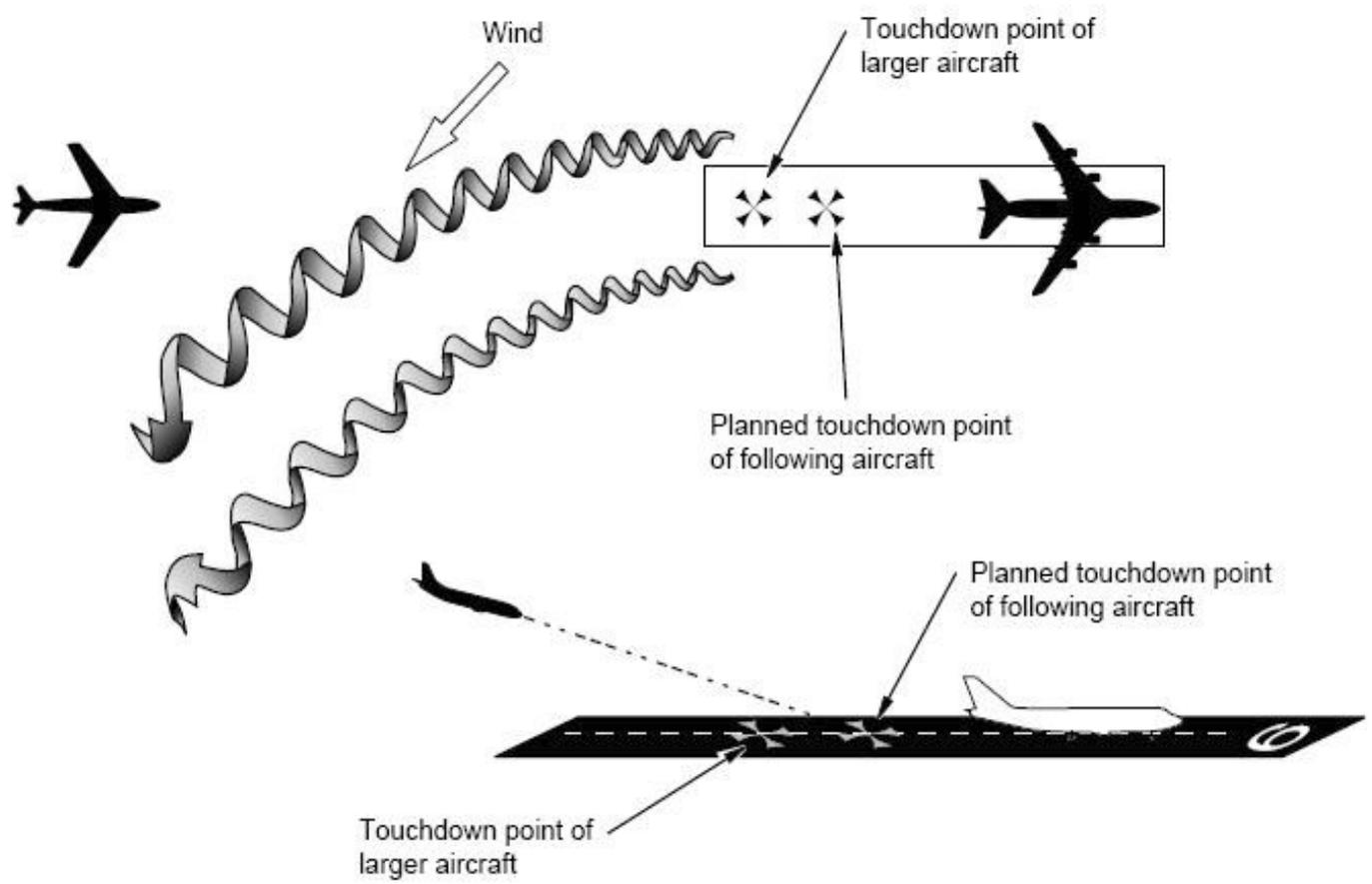
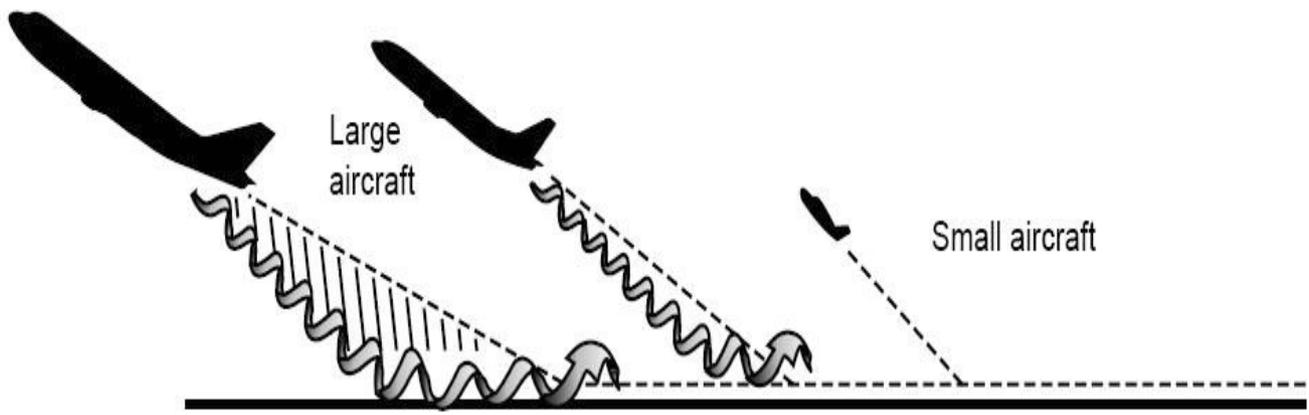
3.2.1 - Principe

Le winglet vise à récupérer une partie de l'énergie tourbillonnaire induite par la portance. À l'extrémité de l'aile, le flux de l'intrados en surpression relative a tendance à passer sur l'extrados en dépression relative, générant un tourbillon marginal. Ce dernier augmente non seulement la traînée de l'avion mais cause de la turbulence derrière l'appareil qui persiste sur de longues distances. Il est particulièrement dangereux d'entrer dans ce tourbillon derrière un avion gros porteur, ce qui conduit à des temps et des distances de séparation minimales dans la gestion des mouvements d'avions.

Une façon de pallier cet effet est d'allonger l'aile. Cependant un allongement plus grand (à surface égale) provoque une augmentation des efforts de flexion de l'aile et une augmentation de son épaisseur, donc une masse accrue. Correctement positionné, le winglet peut récupérer une partie de l'énergie du tourbillon. Cela a pour effet d'augmenter l'allongement effectif de l'aile et de réduire la traînée induite par la portance, sans augmenter l'envergure.

La *winglet* recevant un flux d'air oblique peut redresser ce flux et développer une portance latérale légèrement dirigée vers l'avant, ce qui peut annuler sa traînée propre. Le gain d'efficacité est de l'ordre de quelques pourcents et varie avec l'incidence (l'efficacité sera nulle ou même négative à forte vitesse) ; le chiffre de 2 % pourrait être retenu comme valeur moyenne.





3.3 - Les dispositifs hypersustentateurs:

Les dispositifs hypersustentateurs sont des dispositifs mis en œuvre sur un avion pour que les ailes conservent leur portance à la vitesse la plus basse possible, et réduire ainsi la vitesse de décrochage.

3.3.1 - Les différentes formes de volets hypersustentateurs :

Volets de bord de fuite

Volet de courbure ou simple

Volet d'intrados

Volet à fente

Volet Fowler

Becs de bord d'attaque

Bec à fente fixe

Bec à fente rétractables

Bec Krüger

Bec basculant

3.3.1.1 - Les volets de bord de fuite:

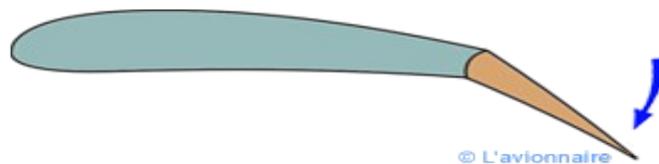
Ils sont, comme les ailerons, fixés au longeron arrière sur lequel ils s'articulent.

Les modèles simples, d'intrados, et à fente(s), pivotent simplement, tandis que les volets Fowler se déplacent vers l'arrière ET s'abaissent augmentant ainsi aussi bien la surface de l'aile que sa courbure.

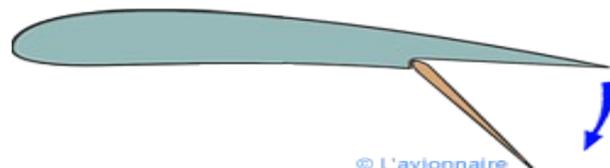
Le **volet simple** augmente la portance en augmentant la courbure de l'aile.

Le volet de courbure articulé à la partie arrière de l'aile se braque vers le bas. C'est le système le plus ancien, le plus simple et le plus répandu sur les avions légers.

Il peut aussi se braquer vers le haut lorsqu'on souhaite augmenter la vitesse sur trajectoire sans modifier notablement la finesse (diminution de la portance et de la traînée). C'est le cas des planeurs qui souhaitent traverser très rapidement une zone défavorable, par exemple.

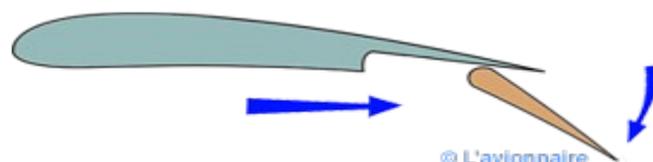


Le **volet d'intrados** fait de même, mais avec le désavantage de produire plus de traînée (formation d'une zone de turbulence derrière le volet, genre traînée de culot).

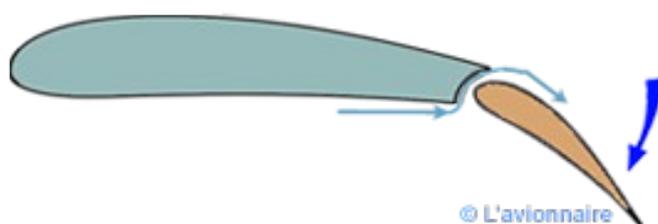


Le volet d'intrados avec déplacement vers l'arrière

Ce type de volet combine un déplacement vers l'arrière pour augmenter la surface alaire avec un braquage vers le bas pour augmenter la courbure

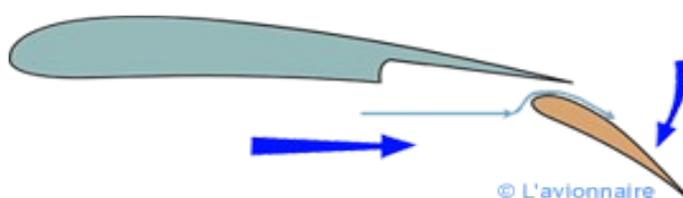


Le **volet à fente(s)** augmente la portance en augmentant la courbure de l'aile, comme les précédents, mais la présence d'une ou plusieurs fentes permet un soufflage de "l'extrados" du volet, ce qui permet d'y diminuer les risques de formation de turbulences, et de décrochage de la couche limite ..



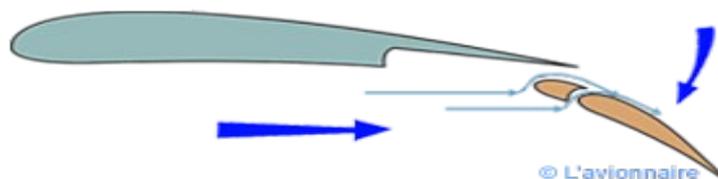
Le **volet Fowler** est un volet à fente(s) qui, EN PLUS augmente la surface alaire, car il recule d'abord, en sortant de son logement et pivote ensuite.

C'est un volet dont le déplacement combine une translation et une rotation : dans un premier temps, il recule pour augmenter la surface alaire puis il se cabre vers le bas pour augmenter la courbure.

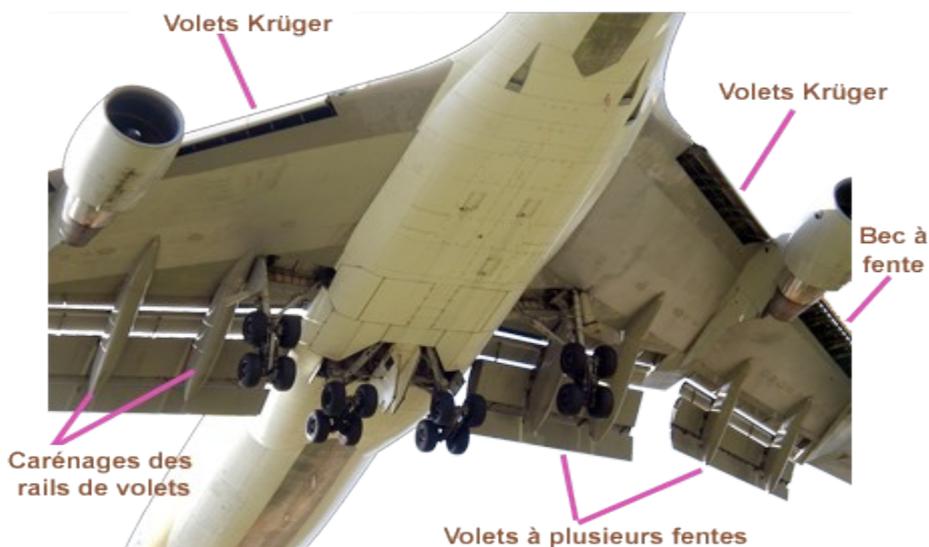


Le **volet Fowler d'intrados avec déplacement vers l'arrière** associé à plusieurs fentes
Ce type de volet peut être en deux ou trois parties, avec une, deux ou trois fentes. Voir ci-dessous photo du Boeing 747.

C'est un système répandu sur les avions de ligne.



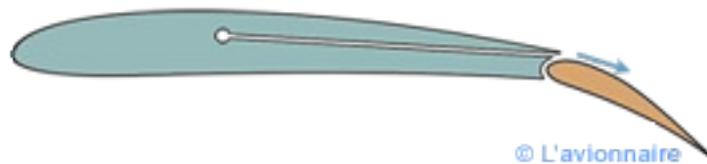
Boeing 747 en phase d'approche juste avant l'atterrissage



Dispositifs divers

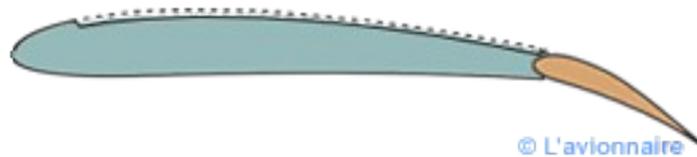
Soufflage

De l'air prélevé du ou des réacteurs est soufflé sur l'extrados au niveau du bord de fuite juste avant les volets lorsque ceux-ci sont abaissés. Exemple le F-104 Starfighter.



Aspiration

La couche limite est aspirée à travers de trous très fins sur l'extrados, ce qui retarde son décollement. Ce système séduisant mais plus employé se heurte à des difficultés techniques (conduites d'aspiration) et consomme beaucoup d'énergie pour être efficace



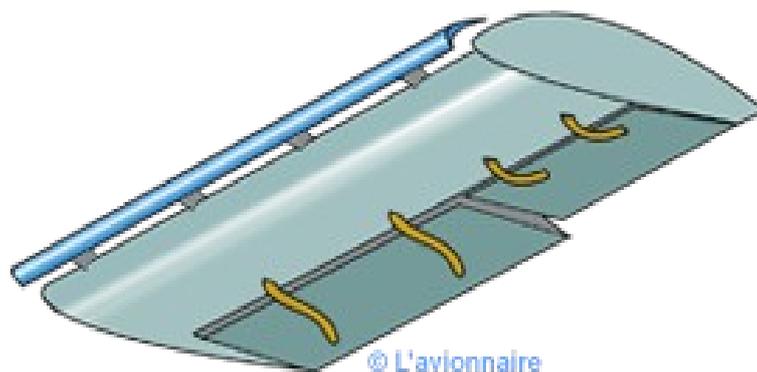
3.3.1.2 - Les becs de bord d'attaque :

Bec à fente fixe

Ces dispositifs fixes ont équipés les premiers avions à décollage et atterrissage court. L'un des avions le plus connu est le Fieseler Fi 156 surnommé Storch (cigogne) qui fut repris et développé après la guerre par Morane-Saulnier sous le nom de MS 502 puis MS 505. Dans les années 1970 cet avion servait encore de remorqueur de planeurs dans certains clubs.

Bec à fente automatique

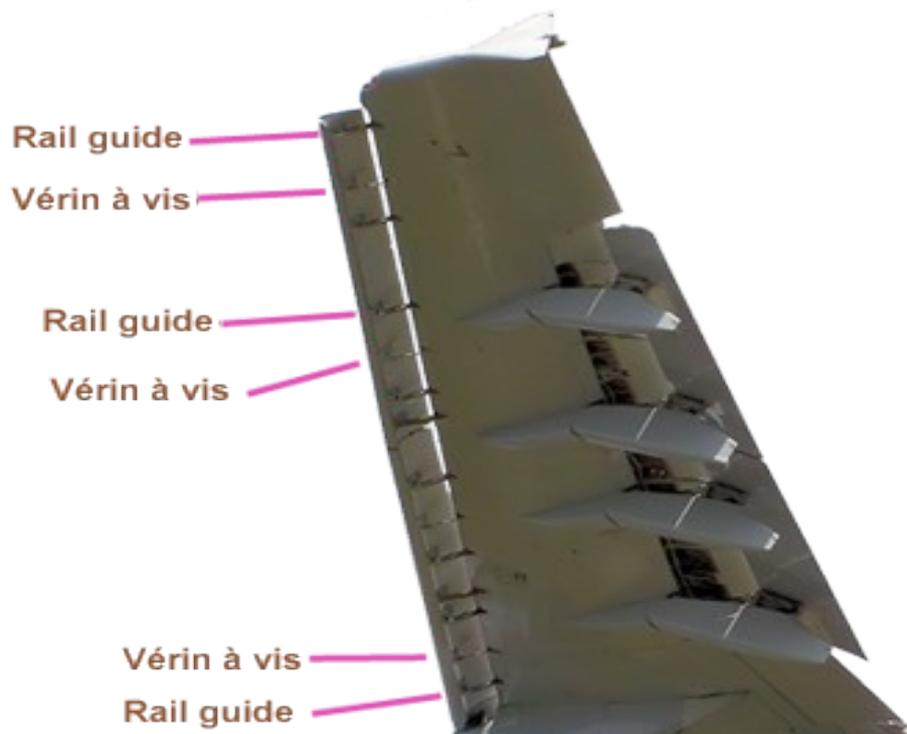
A vitesse élevée les becs sont plaqués contre le bord d'attaque de l'aile et se déploient vers l'avant automatiquement grâce à la dépression locale à incidence élevée. Ces becs sont montés notamment sur les Morane-Saulnier Rallye.



3.3.1.3 - Bec à fente commandé ou Slat (en anglais)

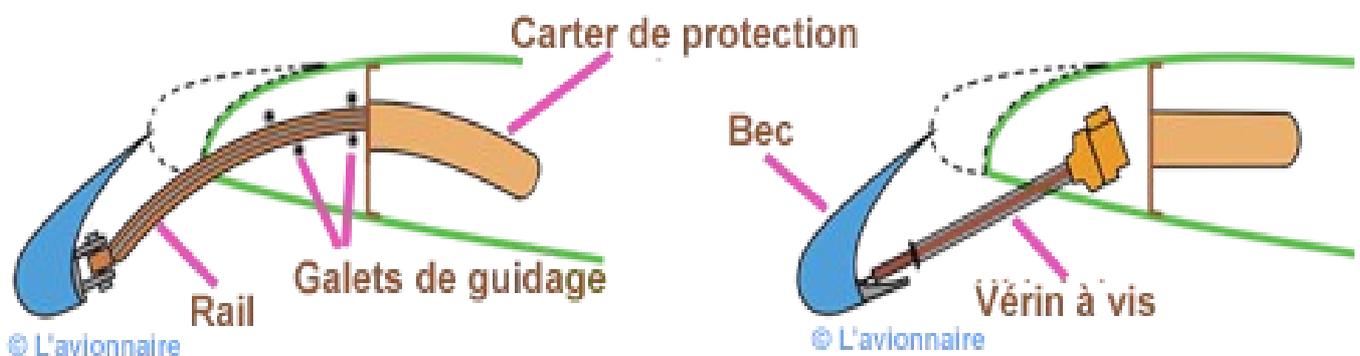
Commandé par le pilote ce bec allie augmentation de la surface, augmentation de la courbure par basculement et traitement de la couche limite par la fente.

Partie d'une aile d'un airbus A300



Principe de fonctionnement

Chaque aile est équipée de plusieurs vérins à vis qui sortent ou rentrent le bec. Celui-ci est maintenu par des rails, eux-mêmes guidés par des galets. La sortie ou la rentrée sont contrôlées par un limiteur de couple et un détecteur de dissymétrie.



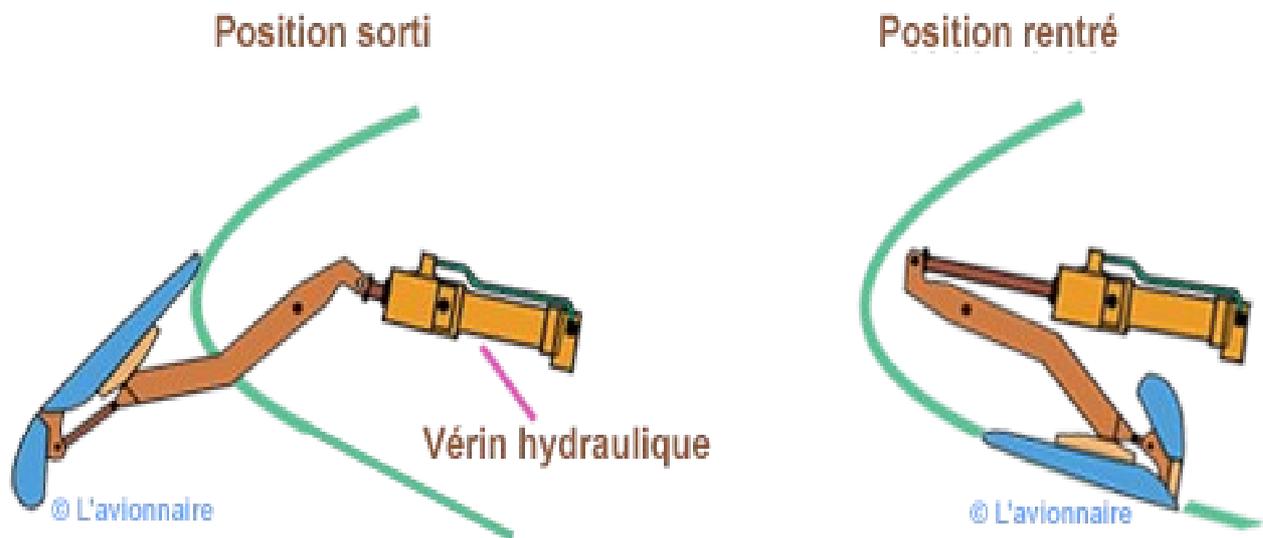
3.3.1.4 - Volet Krüger



Principe de fonctionnement

Plusieurs vérins hydrauliques déploient vers l'avant un volet principal qui vient se positionner contre le bord d'attaque de l'aile. Un deuxième volet très arrondi se déploie également pour se mettre dans le prolongement du premier volet.

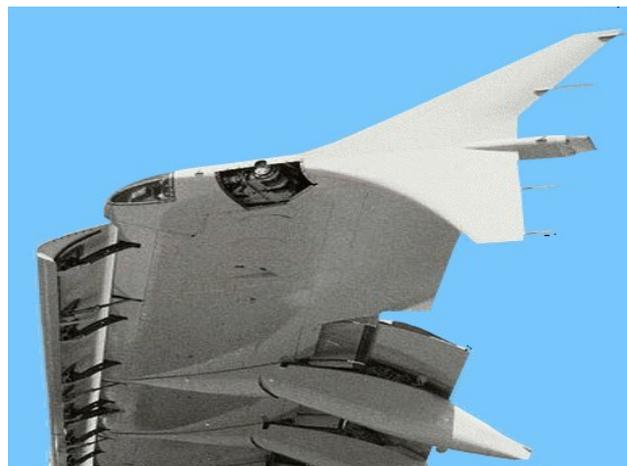
Le but de ces volets est d'augmenter la surface alaire de l'aile ainsi que la courbure.



3.3.1.5 - Tableau récapitulatif de l'amélioration apportée par les dispositifs hypersustentateurs

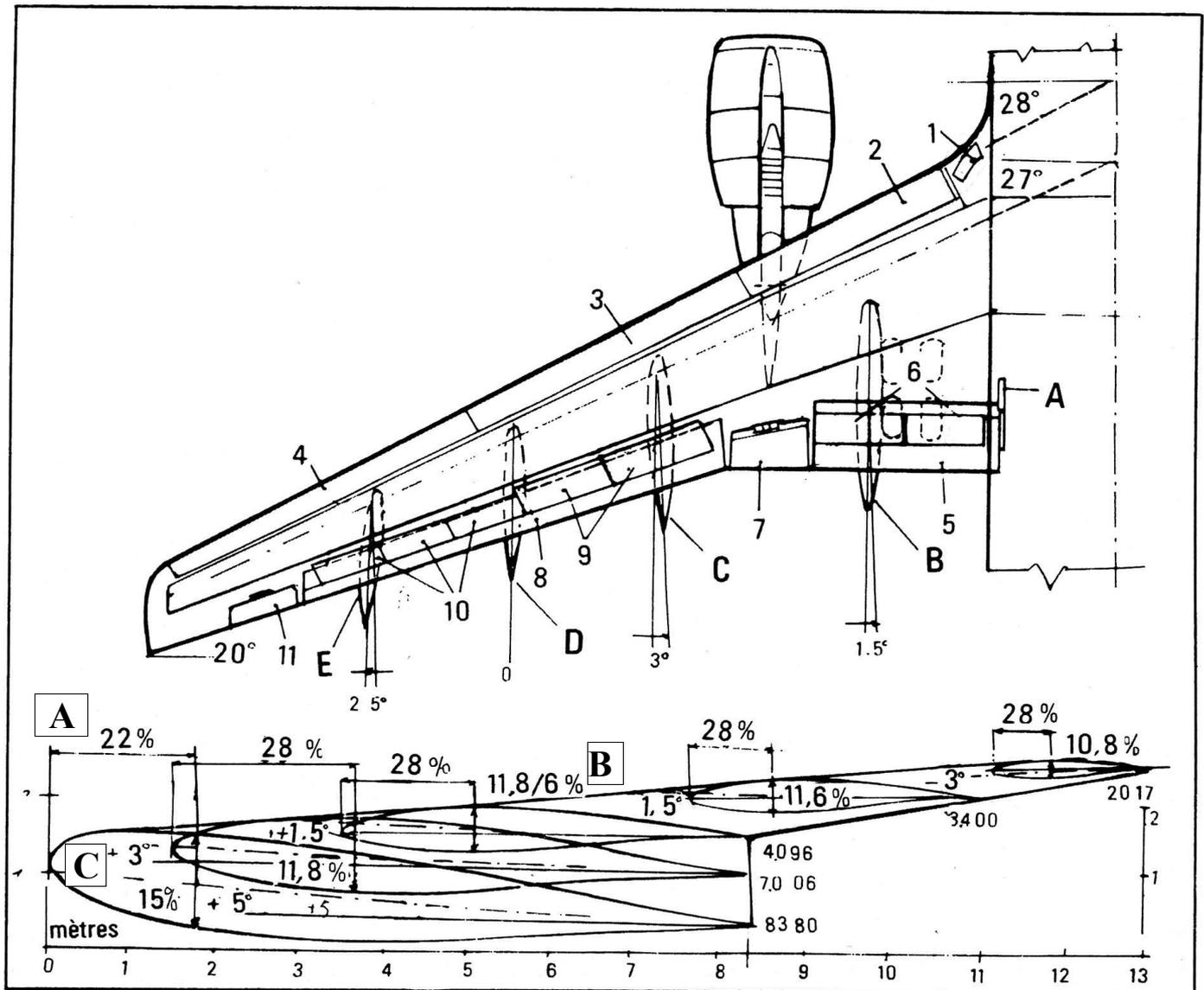
Désignation	Forme de l'Aile	Angle de braquage	Augmentation de portance en %
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51,00%
Volets intrados sans recul		50°	67%
Volet à fente		45°	53%
Volet Fowler surface augmentée de 30%		40°	88%
Bec automatique			26%
Bec et Volet Fowler		Bec - 40° Volet + 40°	93%

En résumé, une image qui montre bien les dispositifs hypersustentateurs de **bord d'attaque (slats)**, ET de **bord de fuite (flaps)**.



Un peu plus de détail :

Ensemble de la voilure de l'Airbus A-310



AviMag 781 (1-7-80)

Caractéristiques :

A- rail de volet à l'emplanture / B- rail de volet central / C - D - E rails de volets extérieurs
 1- volet Krüger ; 2.3.4- becs mobiles de bord d'attaque ; 5- volet interne à déflecteur ;
 6- déporteurs / aérofrein ; 7- ailerons toutes vitesses ; 8- volet externe

En dessous, évolutions du profil :

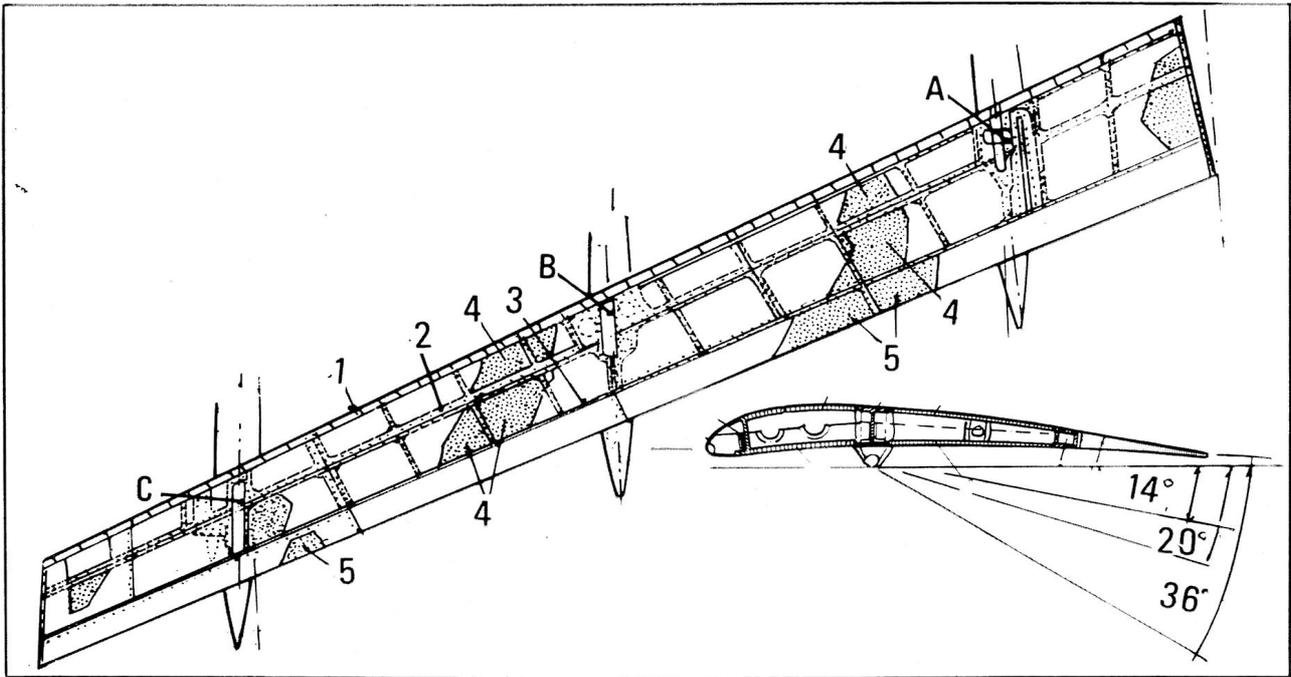
A - épaisseur relative en pour cents

B - épaisseur relative en pour cents de la corde

C - calage du profil en degrés

(En bout de profil, longueur de la corde en mètres)

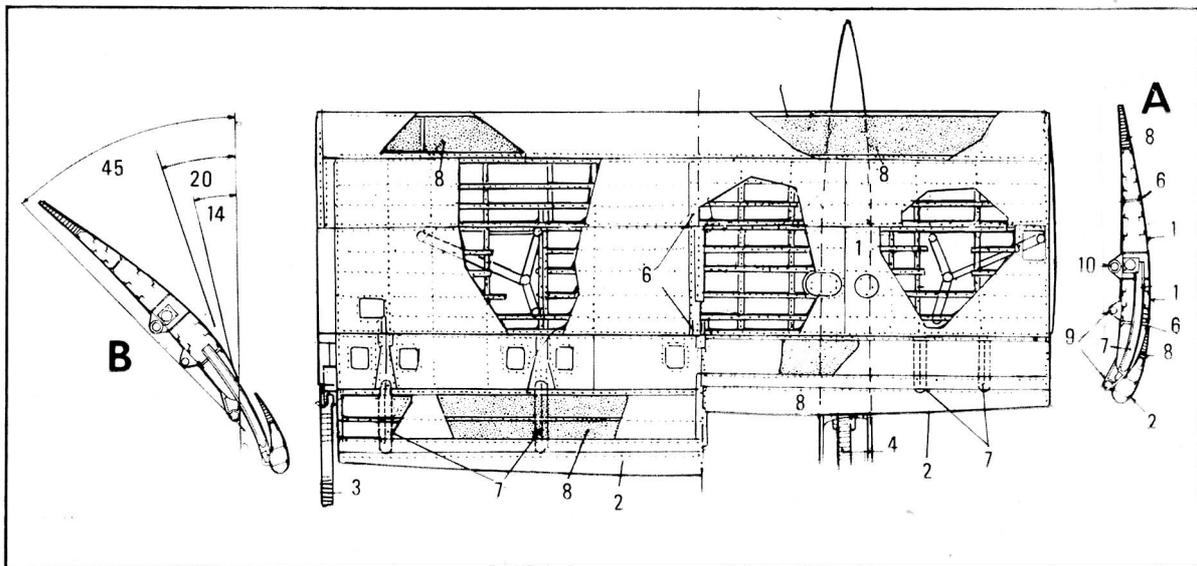
Volet externe :



A, B et C, structure renforcée au niveau des chariots

1 – bord d'attaque / 2 – longeron de caisson avant / 3 – longeron arrière / 4 – structure " Nida " en avant et en arrière du longeron / 5 – structure " Nida " du bord de fuite

Volet interne à déflecteur :

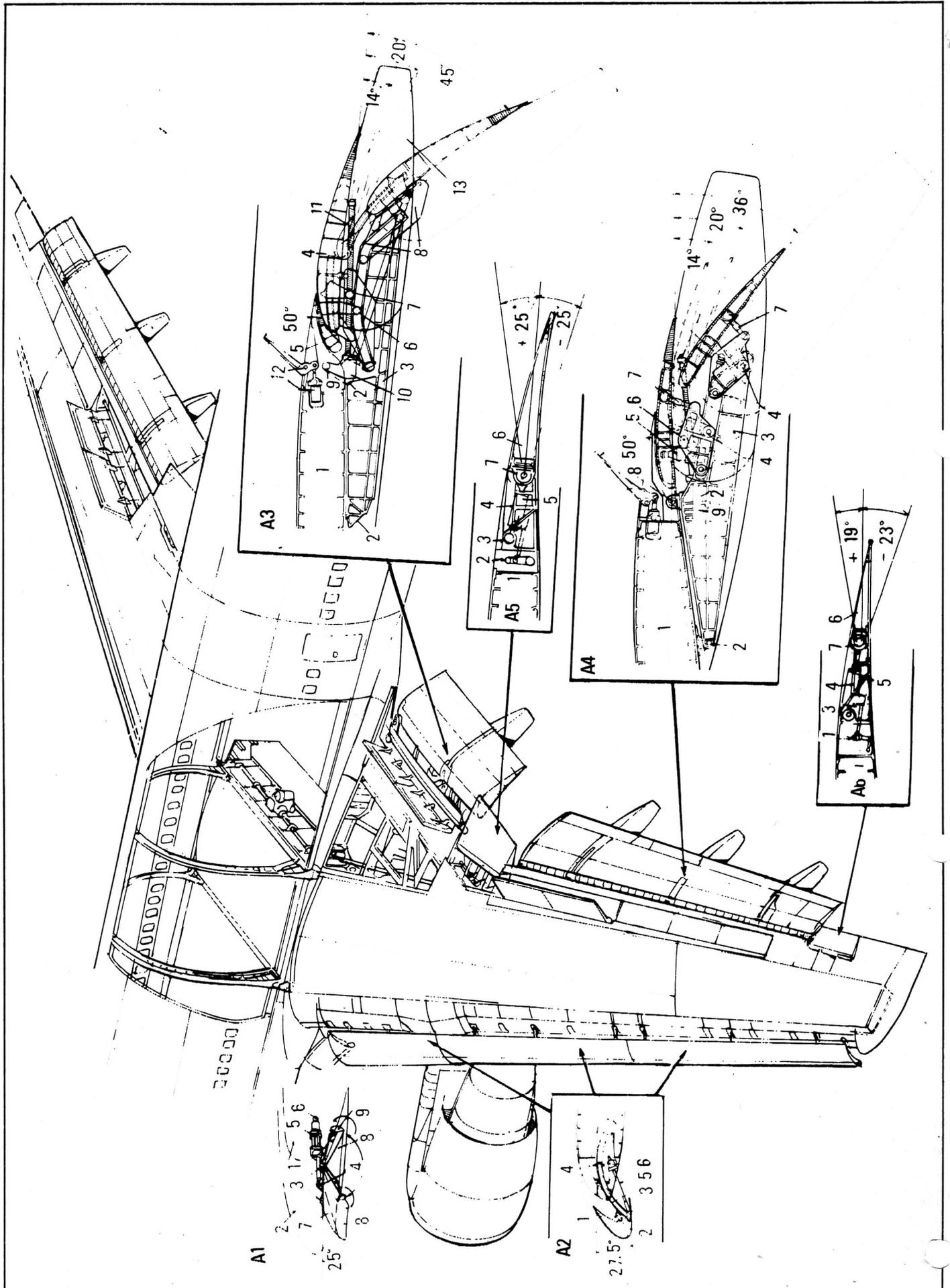


A – position en croisière / B – position à l'atterrissage et en approche

1 – caisson / 2 – bec déflecteur / 3 – rail d'emplanture / 4 – rail central / 5 et 6 – longerons

7 – glissière de bec / 8 – structure " Nida " / 9 – ferrure des chariots / 10 – ferrure de vérin sur volet

Ensemble des gouvernes et des surfaces mobiles de la voilure :



A1 : VOLET KRUGER :

1 – bord d'attaque à la nervure d'emplanture / 2 – carénage d'emplanture / 3 – articulation sur la structure / 4 – attache de vérin / 5 – vérin hydraulique / 6 – point fixe du vérin / 7 – volet / 8 – bec de volet, position sorti / 9 – position rentré

A2 : BECS MOBILES DE BORD D'ATTAQUE :

1 – partie fixe du bord d'attaque / 2 – bec mobile / 3 – rail de guidage / 4 – support de galets / 5 – vérin hydraulique position sorti / 6 – position rentré

A3 : VOLET INTERNE :

1 – caisson de voilure / 2 – attache avant de caisson / 3 – rail de guidage du volet / 4 – volet / 5 – bec mobile à fente / 6 – galet de guidage avant / 7 – coulisse de vérin sur volet / 8 – chariot de guidage sur volet / 9 – arbre de transmission du moteur hydraulique dans le fuselage vers le renvoi d'angle du vérin / 10 – renvoi d'angle / 11 – vérin à vis / 12 – déporteur aérofrein / spoiler / 13 – carénage de rail sur volet

A4 : VOLET EXTERNE :

1 – caisson de voilure / 2 – attache avant de rail de guidage / 3 – rail de guidage de volet / 4 – chariot à galet sur volet / 5 – ferrure d'attache du chariot sur le volet / 6 – arbre de transmission moteur hydraulique / renvoi d'angle / 7 – renvoi d'angle / 8 – spoiler / aérofrein / 9 – carénage de rail sur volet

A5 : AILERON TOUTES VITESSES et A6 : AILERON OPTIONNEL :

1 – caisson de voilure / 2 – timonerie de commande de servo-commande / 3 – articulation de servo-commande sur la structure / 4 – paliers / 5 – vérin de servocommande / 6 – aileron / 7 – longeron d'aileron / 8 – palier d'aileron

En résumé, l'hypersustentation est assurée par 3 bords mobiles de bord d'attaque, couvrant toute l'envergure, et par 2 volets au bord de fuite, un à double fente entre le fuselage et le pylône moteur, l'autre à simple fente de recul sur la partie externe de l'aile. Un bec Krüger, entre le fuselage et le premier bec de bord d'attaque complète l'ensemble.

Normalement chaque demi-voilure ne comporte qu'un aileron situé entre les deux volets, dans l'axe du moteur. Cet aileron est utilisé à toutes vitesses, cependant, en option un aileron basse vitesse peut-être monté en extrémité de voilure.

L'extrados de l'aile porte sept spoilers : deux sur la partie interne (fonction aérofrein / déporteur / assistance des ailerons en roulis, et trois utilisés comme l'assistance des ailerons et comme déporteurs) .

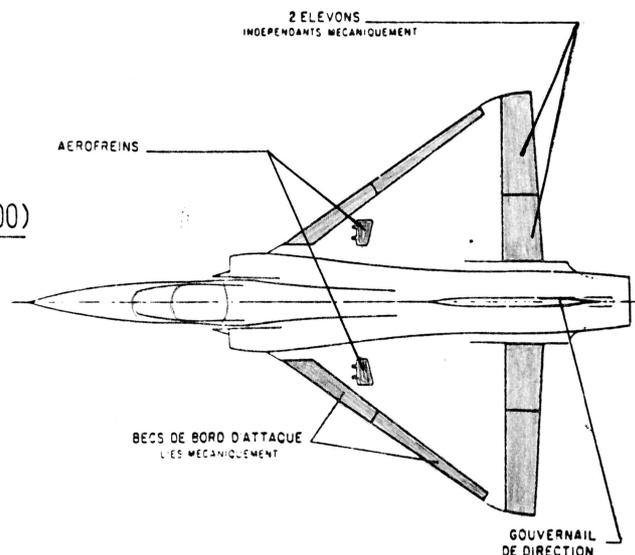
Les braquages des différentes surfaces mobiles sont indiqués sur les dessins. En ce qui concerne les volets, les braquages maximaux (45° et 36°) correspondent à la configuration d'atterrissage , les braquages intermédiaires (20°) à la configuration d'approche et le braquage le plus faible (14°) à la position de décollage.

Autre avion, autre voilure :

Un **élevon** est la gouverne placée sur chaque bord de fuite d'une aile delta conjuguant l'action de gouverne de tangage (volet de profondeur) à celle de roulis (aileron).

Le terme est dérivé de l' *élevon*, contraction de *elevator* (gouverne de profondeur) et *aileron*.

GOUVERNES
DE VOILURE
DELTA
(MIRAGE 2000)

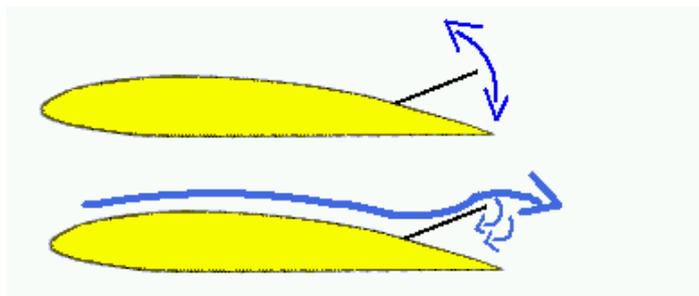


3.4 - Les déporteurs, ou destructeurs de portance:

Les ailerons ne sont pas toujours irréprochables dans leur fonction de commande en roulis.

Sans qu'il soit question de les supprimer, il est intéressant de les assister par un autre système qui n'aurait pas les mêmes inconvénients.

Ce système, ce sont les déporteurs.



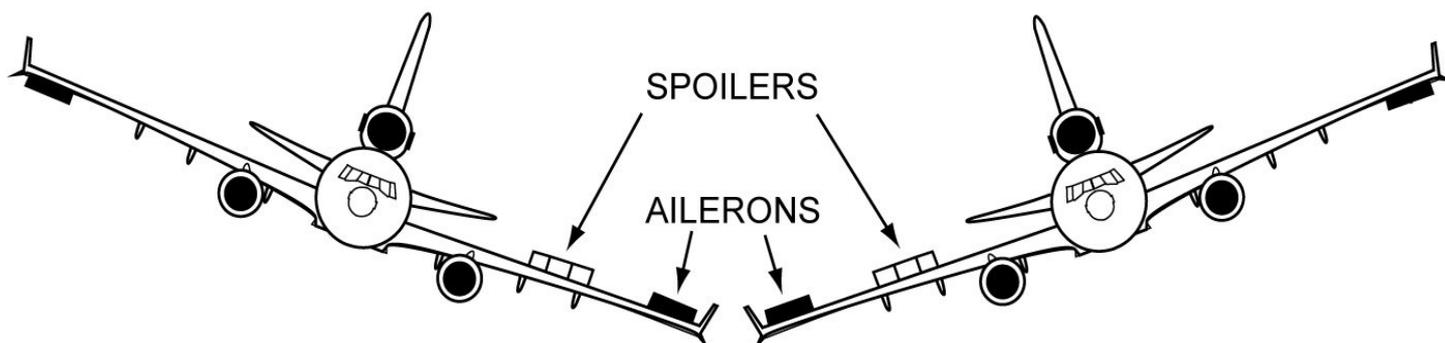
3.4.1 - Un spoiler, ou un **destructeur de portance**, est une surface mobile, située sur la voilure, qui diminue la portance d'une partie d'une aile. L'action des spoilers peut être conjuguée ou substituée à celle des ailerons pour un pilotage plus fin.

L'effet de freinage aérodynamique associé est utilisé :

- symétriquement (des deux côtés) pour ralentir l'avion et/ou lui permettre de prendre une pente de descente plus forte,



- asymétriquement (d'un seul côté ou bien avec du différentiel entre les deux ailes) pour générer des moments de lacet et de roulis favorables au virage (procédure utile à basse vitesse, quand les ailerons ont moins d'efficacité).



- Effet sur le lacet et sur le roulis : utilisés en différentiel gauche-droite, ils peuvent servir à piloter en lacet (en direction), par effet de leur traînée différentielle, et en roulis (en combinaison avec les ailerons), par leur effet sur la portance de chaque aile. Ils sont utilisés notamment à basse vitesse pour augmenter l'effet des ailerons et lutter contre le lacet inverse.

Les spoilers sont également très utiles lors du roulage après l'atterrissage puisqu'en diminuant la portance des ailes, le poids de l'avion est alors supporté en plus grande partie par le train d'atterrissage, ce qui est une condition nécessaire à un freinage efficace.

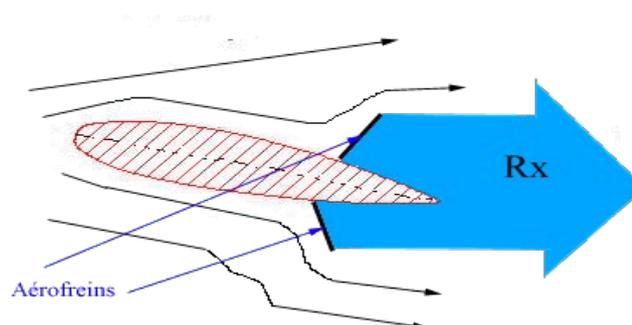


Ils ont un fonctionnement proche des aérofreins qui, eux, ne sont pas forcément sur les ailes n'ont donc pas forcément un lien direct avec la portance.

3.4.2 - Un aérofrein est un dispositif générateur de turbulences aérodynamiques servant à augmenter la traînée. Il est doté de surfaces mobiles modifiant l'écoulement de fluide autour du mobile.

Effets aérodynamiques

- Effet sur la traînée et sur la portance : les aérofreins placés sur les voilures d'avions augmentent la traînée et diminuent la portance, par décollage des filets d'air de la surface de l'aile. Ils sont utilisés :
 - pour contrôler la pente de vol ou d'approche, pour augmenter la pente de descente sans augmenter la vitesse (effet de freinage). Ils font partie des éléments essentiels au pilotage d'un planeur en approche pour l'atterrissage.
 - pendant l'atterrissage car, en plus de leur freinage propre, ils augmentent l'efficacité des freins en diminuant la portance de la voilure et en reportant le poids sur les roues. En générant plus de traînée, ils génèrent aussi plus de bruit.



3.5 - LES EMPENNAGES :

L'empennage classique est constitué d'un ensemble de surfaces portantes positionnées pour avoir une incidence faible ou nulle lorsque l'aéronef est en vol de croisière stable. En cas de perturbation de cet équilibre l'angle d'incidence induit par le mouvement crée une force qui ramène l'aéronef en position neutre. Afin d'augmenter le moment, les surfaces sont éloignées au maximum du centre de gravité et placées, le plus souvent, en queue de fuselage. La taille de ces éléments est conditionnée par la présence de facteurs déstabilisants (panne pour les multimoteurs, forte hypersustentation, plage de centrage importante) et par le degré de stabilité recherché. L'empennage est relativement important pour un avion de transport de passagers; relativement faible pour un avion de chasse afin de ne pas entraver la manœuvrabilité de l'appareil.

La stabilisation en **lacet** est obtenue par une surface verticale, appelée stabilisateur vertical ou dérive.

La stabilisation en **tangage** est obtenue par une surface horizontale, appelée stabilisateur horizontal. L'équilibre de l'aéronef pouvant être modifié en fonction du chargement et de la consommation de carburant, cette surface horizontale comporte une partie mobile, ou est entièrement mobile, afin d'assurer un moment de compensation. En vol stabilisé l'incidence peut donc être légèrement positive ou négative afin de maintenir l'appareil horizontal.

Chacune de ces surface comporte aussi des parties mobiles pour modifier volontairement l'équilibre en lacet, le gouvernail pour le contrôle du virage, et l'équilibre en tangage, la gouverne de profondeur pour le contrôle du cabré ou du piqué.

En dehors des arrangements « classiques » on trouve aussi :

- des empennages constitués de surfaces inclinées, empennage en V, assurant en même temps l'équilibre et le contrôle dans les deux plans ;
- des empennages entièrement mobiles ;
- des aéronefs sans empennage où la stabilisation et le contrôle sont obtenus par des surfaces mobiles disposées sur l'aile ou en avant de l'aile.

3.5.1 - Types d'empennages :

3.5.1.1 - Empennage horizontal :

L'empennage horizontal se compose généralement d'une partie horizontale qui peut présenter plusieurs variantes :

- un [plan horizontal](#) fixe muni d'une [gouverne](#) de profondeur mobile, c'est le type « classique ».
- un plan horizontal réglable muni d'une [gouverne](#) de profondeur. Le [calage](#) du plan horizontal peut être réglé en vol pour assurer l'équilibre convenant aux conditions de vitesse et de [centrage](#) (*trim*).
- un plan horizontal mobile muni d'un volet de profondeur mobile également, l'ensemble formant la gouverne de profondeur. Les deux surfaces pivotent dans le même sens, le volet se braquant plus que la partie avant (empennage des [Airbus](#)).
- un plan horizontal "monobloc" mobile muni d'un petit volet arrière ; les deux surfaces pivotent dans le même



sens, le petit volet arrière (*tab*) servant à la fois de compensateur d'effort (pour diminuer les efforts nécessaires au manche pour déplacer le plan horizontal) et de *trim* de profondeur en T : Le plan de profondeur peut être monté en haut de la dérive :

- pour diminuer l'effet de sol (stabilité en tangage des avions à [effet de sol](#)),
- dans le cas des planeurs, pour minimiser la traînée et ne pas accrocher la végétation en cas d'atterrissage dans la campagne.

Empennage en V :



Sur certains modèles, l'empennage est composé de deux parties obliques, réalisant un empennage « papillon ».

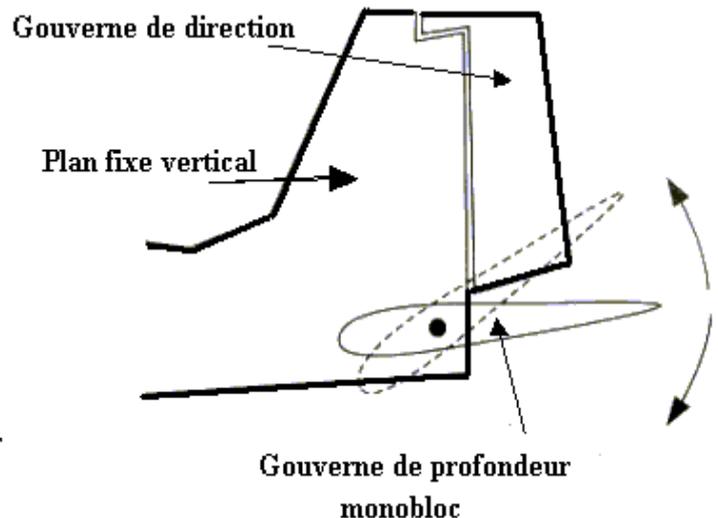
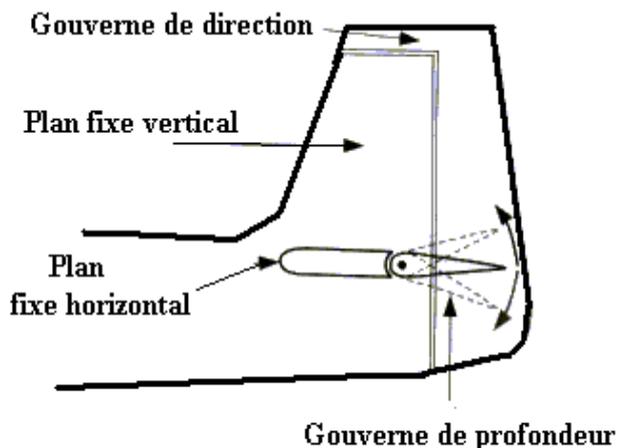
Empennage cruciforme :



3.5.1.2 - La gouverne de profondeur :

La structure interne de la gouverne de profondeur est semblable à celle d'une aile, d'ailleurs les impératifs de rigidité sont grosso modo les mêmes.

Il en existe plusieurs modèles, le plus connu étant celui où la gouverne de profondeur vient s'articuler sur un plan fixe; un peu moins connu, la gouverne de profondeur monobloc :



encore un peu moins connu, le modèle où la gouverne de profondeur s'articule sur un plan "fixe" qui est lui-même réglable en incidence .

Ce système permet un réglage de la contribution du plan arrière à la portance, et donc du centrage.

Comme les ailerons, et la gouverne de direction, la gouverne de profondeur est elle aussi équipée de tabs permettant au pilote de ne pas avoir besoin de compenser continuellement un déséquilibre constant en tangage qui serait du, par exemple, à la répartition des charges dans l'avion.

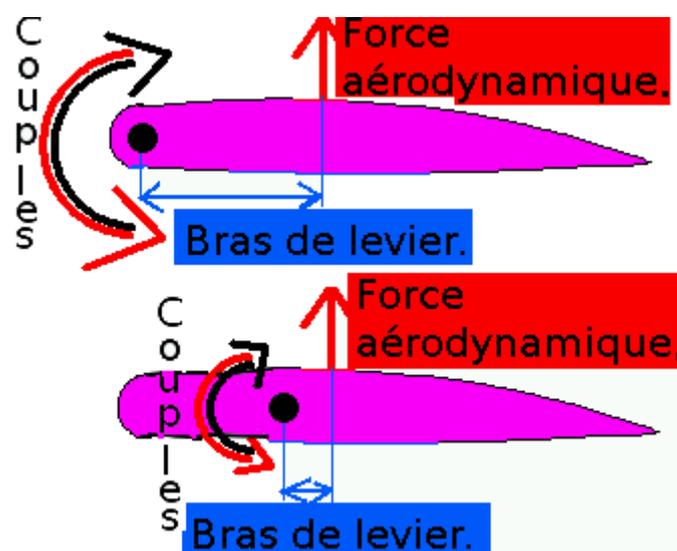
3.5.2 - La compensation aérodynamique.

La force qu'il est nécessaire d'exercer sur une commande de gouverne pour la faire pivoter dépend de la force aérodynamique qui s'exerce sur elle de la part de l'écoulement d'air. Cette force aérodynamique est, elle, directement proportionnelle à la taille de la gouverne, à son braquage, et au carré de sa vitesse.

Il est donc tout naturel de penser que le pilote peut avoir des difficultés (au moins) à piloter un avion dont les gouvernes sont de grande taille (gros avion), ou dont la vitesse est élevée.

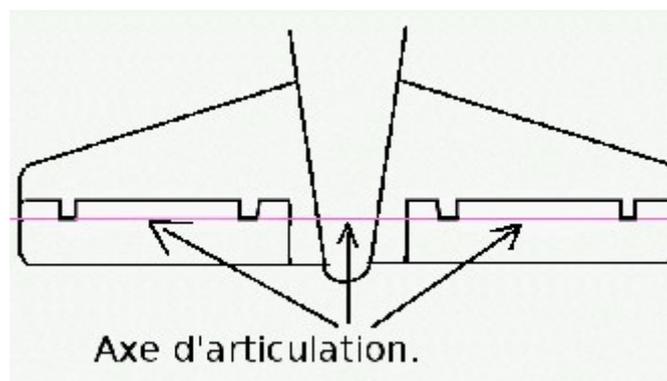
Il est possible d'utiliser les forces aérodynamiques elles mêmes pour diminuer les efforts du pilote, en s'assurant toutefois que les commandes ne deviennent pas trop molles, et que la logique: plus de braquage = plus d'effort soit respectée.

Une façon courante de compenser est de reculer l'axe d'articulation de la gouverne pour le rapprocher du "centre de portance" de la gouverne (centre des forces aérodynamiques), et ainsi réduire le bras de levier avec lequel la force aérodynamique agit sur la commande.



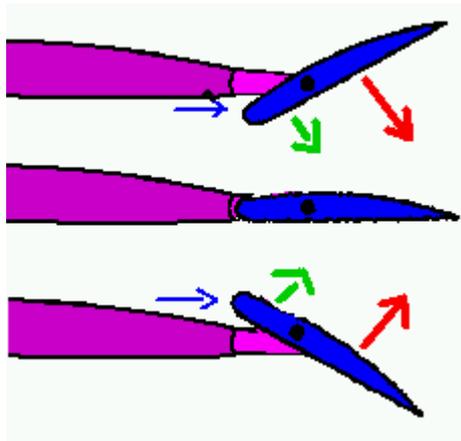
Comme montré sur le dessin ci dessus, le couple de forces produit sur l'axe de la gouverne (gros point noir) par la force aérodynamique (en rouge), ainsi que le couple de force nécessaire pour braquer la gouverne (en noir) sont nettement plus petits lorsque l'axe de pivotement de la gouverne est plus près du centre des forces aérodynamiques (le centre de portance de la gouverne).

La charnière de la gouverne de profondeur prend alors un aspect de ce genre:

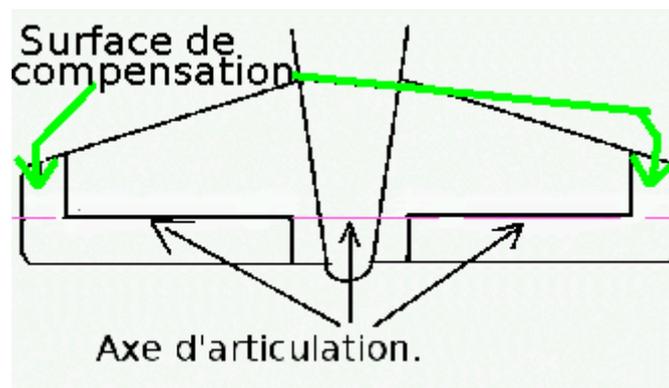


La compensation par réduction du bras de levier de la force aérodynamique (le moment de charnière si vous préférez), peut être vue sous un autre angle; en effet, on peut considérer que l'axe d'articulation n'a pas été déplacé, et que la partie de la gouverne qui se trouve devant, donc en amont de l'axe d'articulation, est une surface supplémentaire placée en avant de manière à ce que la force aérodynamique sur cette partie tende à favoriser le pivotement de la gouverne, et ainsi à aider le pilote dans ses "efforts". C'est ce que l'on appelle la surface de compensation.

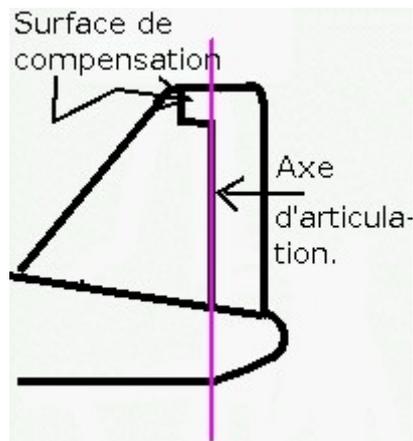
Beaucoup de modèles de gouverne sont à surface de compensation, comme ceci:
De profil:



Du dessus:



Ca marche aussi pour la gouverne de direction.



3.5.3 - Empennage vertical :

3.5.3.1 - Monodérive :

L'empennage vertical se compose généralement d'une partie fixe et d'une partie mobile :

- une dérive verticale fixe,
- un [gouvernail](#) (ou [gouverne](#) de direction).

Il existe des empennages verticaux « monoblocs » (toute la surface pivote) ; cette disposition se rencontre sur des avions légers (Jodel, Luciole, Volksplane).

3.5.3.2 - Multi-dérive :

L'empennage vertical peut être double ou triple sur certains avions, généralement multi-moteurs à hélices.

Les Lockheed P-38 sont généralement bidérives. L'allongement effectif de l'empennage horizontal est augmenté par l'effet de plaque d'extrémité des dérives. Il joue également un rôle structural en joignant les deux poutres.



3.5.3.3 - Autres systèmes de compensation d'effort :

Les servocommandes irréversibles fournissent la totalité des efforts nécessaires au braquage des gouvernes. L'effort du pilote étant nul, il est indispensable de lui fournir un effort artificiel lui permettant de ressentir une sensation de pilotage.

Compensation de régime sur les sensations artificielles :

La compensation de régime, consiste à annuler l'effort pilote sur la commande. La commande de trim est montée en série directement liée au corps de la sensation artificielle d'une bielle à ressort ou d'une came en cœur.

Plusieurs dispositifs :

- les servoventiles : dispositif qui transforme un signal électrique en signal mécanique
- La Servo Commande Electro Hydraulique (SCEH) : les signaux sont directement reçus, analysés et amplifiés par le calculateur.
- Le limiteur de débattement (Rudder Travel) : système faisant varier le débattement de la gouverne de manière inversement proportionnelle à la vitesse de l'avion, pour un même déplacement de la commande pilote et un même effort.
- l'amortisseur de lacet (Yaw Damper) : système d'amortissement des oscillations latérales autour de l'axe de lacet

Dispositifs de freinage au sol:

Le système de freinage installé sur les avions légers, bien que simple, doit être malgré tout efficace, pour des raisons évidentes de sécurité.

On a pratiquement toujours recours à l'hydraulique, sauf sur certains appareils de construction amateur de faible puissance, dont les freins sont actionnés par câbles.

Les freins agissent sur les roues du train principal, et sont soit simultanés (les 2 roues sont freinées en même temps, soit différentiels, ce qui permet de diriger l'avion au sol, sans avoir recours à un train secondaire directionnel.

Les freins peuvent être du type « à tambour » (en voie de disparition car difficiles à régler), ou à disques.

D'autres moyens :

- l'inversion de la poussée (pour réacteurs), le parachute frein, la crosse (escamotable) surtout sur porte-avions, la barrière d'arrêt en arrêt d'urgence

4 - ATERRISSEURS :

4.1 - Historique :

L'histoire des trains d'atterrissage remonte à 1876. **Alphonse Pénaud** et **Paul Gauchot**, deux inventeurs français, brevètent le plan d'un monoplane amphibie biplace révolutionnaire pour son époque. Une des nouveautés de cet aéroplane est qu'il possède un train d'atterrissage rétractable avec amortisseurs à air comprimé. Mais ce n'est pas avant 1917 que les premiers appareils dotés de trains d'atterrissage partiellement rétractables feront leur apparition et ils ne deviendront communs qu'à la fin des années 20. À cette époque, les performances des avions s'étaient tellement améliorées que l'avantage aérodynamique des trains rétractables justifiait amplement la complexité et le surpoids du système.

4.2 – Types de train :

4.2.1 - Train d'atterrissage tricycle :

Ces dispositifs, fixes ou escamotables se composent :

- d'un train principal, proche du centre de gravité et supportant la majorité de la masse de l'avion
- d'un train auxiliaire (roulette de nez ou de queue) doté d'un dispositif permettant, au sol, de diriger l'aéronef (roue directrice)



4.2.2 - Train d'atterrissage classique :

Il se compose d'un train principal et d'une roulette de queue (roue folle)



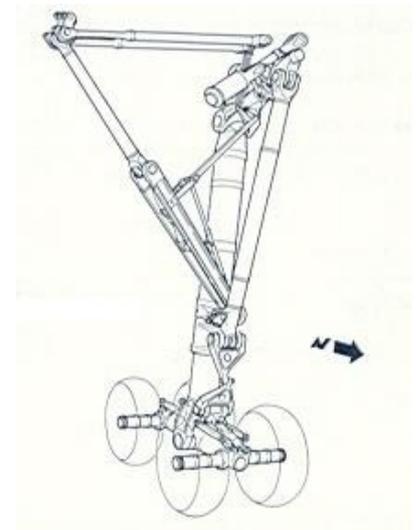
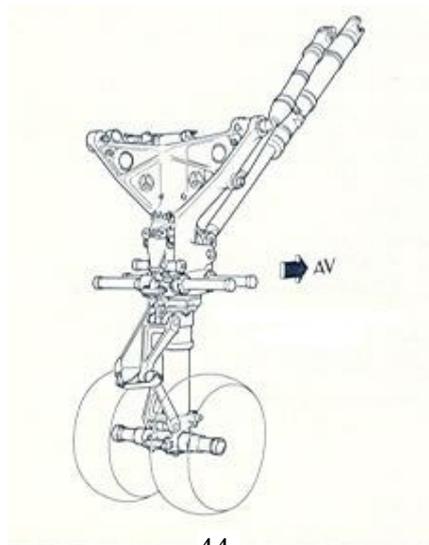
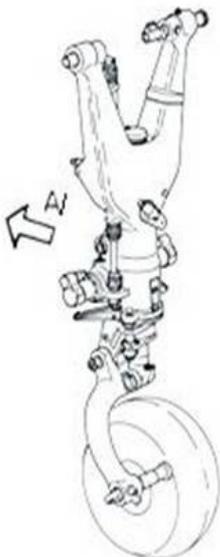
Chaque train a une dénomination différente selon le nombre de roue l'équipant :

On distingue principalement :

la roue simple

diabolo

boggie

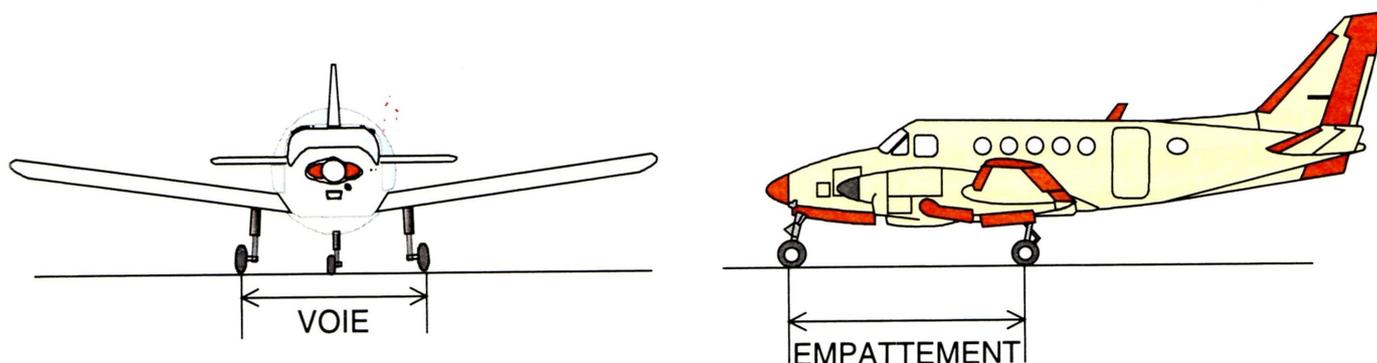


Il a pour fonction :

- au roulage, il assure la stabilité, la maniabilité et le freinage

- à l'atterrissage, au moment de la prise de contact avec le sol, il absorbe l'énergie cinétique acquise par la vitesse.

L'ensemble du train d'atterrissage est caractérisé par sa voie (distance séparant les roues du train principal) et son empatement (distance entre les axes du train auxiliaire et du train principal).



Sur la majorité des avions de tourisme, ce train est fixe et est généralement doté de carénages aérodynamiques, afin de réduire la traînée qu'il génère . Ces carénages, généralement réalisés en matériaux composites, permettent d'accroître la vitesse de croisière d'environ 5 à 10 km/h, ce qui n'est pas négligeable.

Sur les aéronefs de voyage aérien plus évolués, le train est escamotable.

En effet, mis à part les trains à patins des hélicoptères de faible tonnage ou encore les trains à lames souples utilisés parfois sur des avions très légers, le train d'atterrissage est formé de plusieurs atterrisseurs, en général trois, dont la caractéristique peut-être essentielle, est de constituer des structures à géométrie variables.

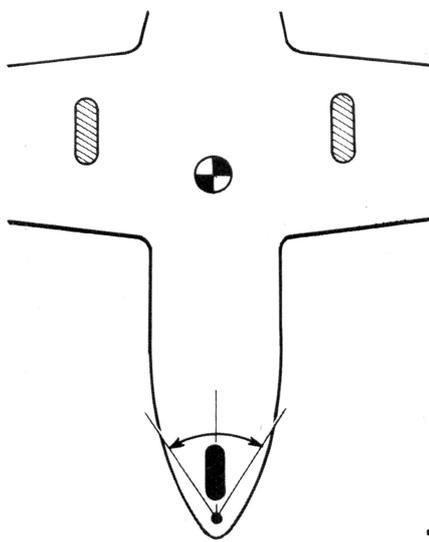
Mais ce n'est pas tout, pour améliorer la manœuvrabilité au sol et pour optimiser les masses des structures, tant celle de l'avion, que celle du train, il faut pouvoir orienter les roues des atterrisseurs avant, voir dans quelques cas , rares il est vrai, celle des atterrisseurs principaux.

Enfin, sur les avions cargo, il arrive souvent, pour faciliter les opérations de chargement et déchargement, que le train d'atterrissage permette un changement de configuration au sol.

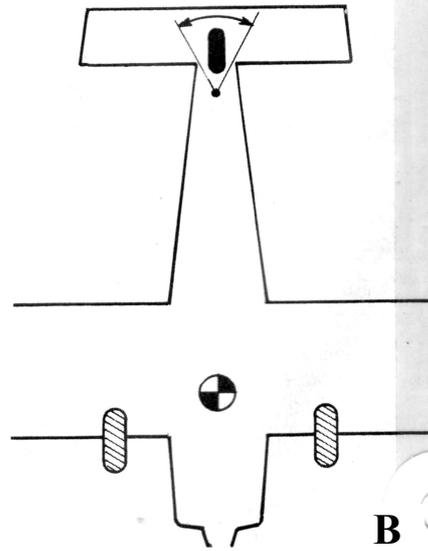
Toutes ces fonctions sont obtenues par des cinématiques, assez caractéristiques des atterrisseurs, mais dont le choix pour résoudre un problème donné, c'est à dire pour équiper un avion déterminé, dépend avant tout de cet avion lui-même : les différentes formules d'atterrisseurs sont faites pour s'adapter aux différentes formules d'avion.

Les trains d'atterrissage

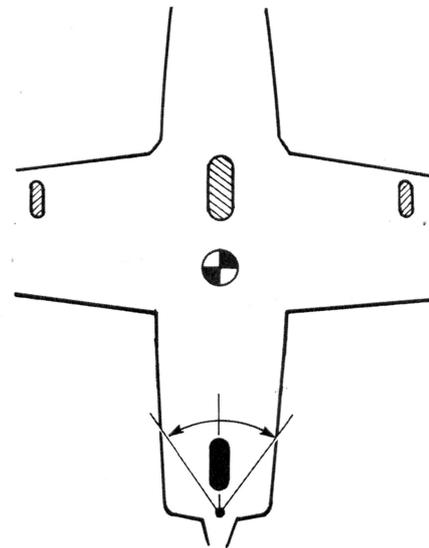
En ce qui concerne la géométrie des trains, un classement logique est difficile. Il est remplacé ici par un tableau accompagnant les croquis ci-dessous et ci-contre, définissant le positionnement sur l'avion des éléments constituant l'atterrisseur. Pour chaque type d'architecture, un commentaire succinct résume les avantages et les inconvénients, suivant le domaine d'utilisation.



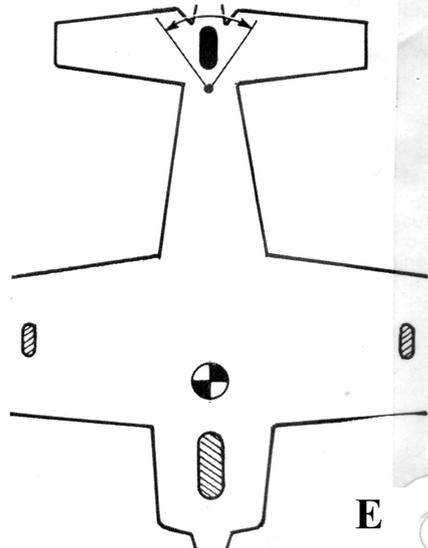
A



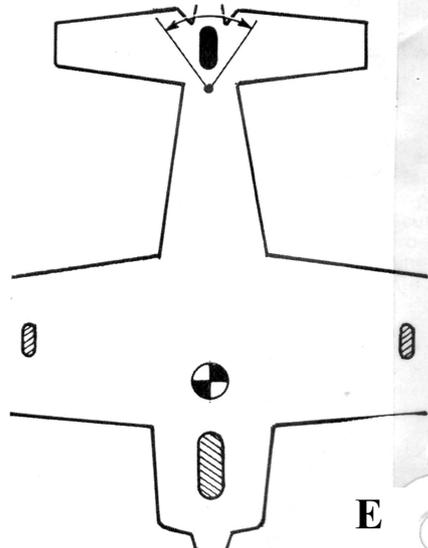
B



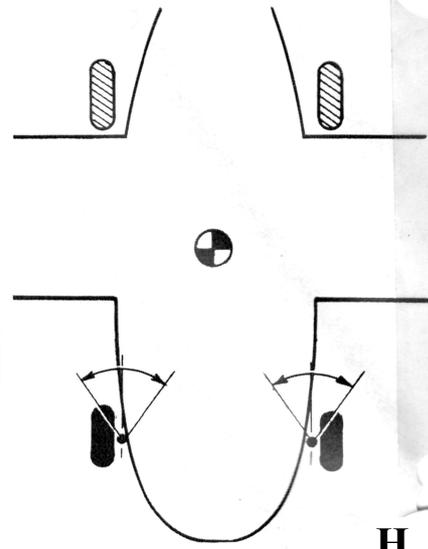
C



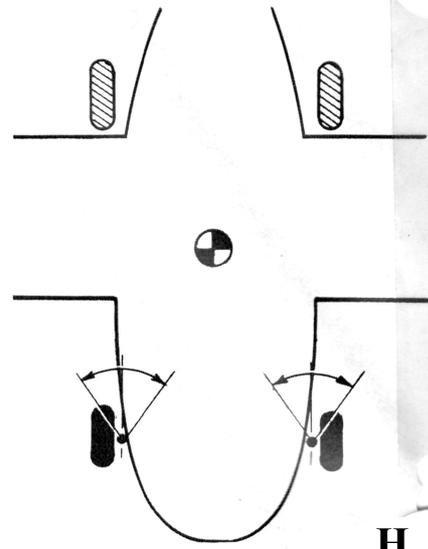
D



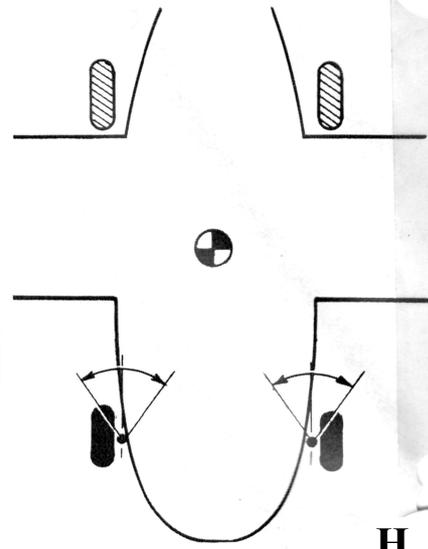
E



F



G



H

Avantages et inconvénients des différentes configurations :

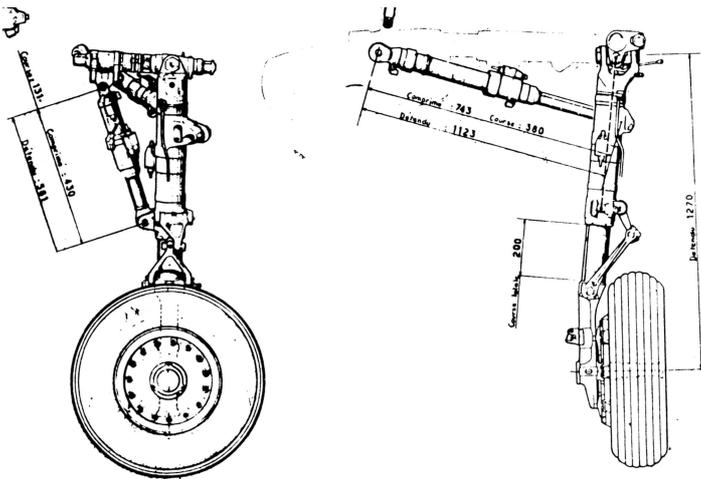
TYPE DU TRAIN	STABILITE		MAUVAIS TERRAIN	SOL GLISSANT	VENT TRAVERSIER	NEIGE AVEC SKIS	CHAVIREMENT	REALISATIONS
	ROULEMENT	FREINAGE						
Tricycle A	Aisé avec bonne visibilité	Bon sur piste en dur sèche.	Délicat, posé cabré, le rabattement sur le nez est brutal. Posé trois points, la vitesse est plus grande et il y a risque de rupture avant.	Délicat, surtout s'il y a vent traversier. Un dispositif anti-blocage est nécessaire pour éviter l'embarquement. Ou la réversion.	Aisé sur piste sèche. Délicat sur piste mouillée ou glacée.	Mauvais sur pentes ou, sur neige profonde. Le ski avant doit être surdimensionné pour ne pas s'engager.	Dépend de la voie.	Tous les avions de transport. Beaucoup d'avions militaires. Beaucoup d'avions légers.
Classique B	Si l'assiette au sol est forte, roulement délicat et mauvaise visibilité. Si l'assiette au sol est modérée, facile avec bonne conjugaison de roue arrière.	Si le centre de gravité est trop avant (1910-1930), mauvais. Le centre de gravité doit être plus arrière. Alors, si la roue arrière est tenue ou bloquée, bonne tenue.	Bon. L'avion peut et doit être posé cabré. Le train avant, robuste, prend tout. On peut freiner dès l'impact si centre de gravité bien placé.	Stable au freinage si la roue arrière est bloquée. La réversion reste utile.	Plus délicat que le tricycle, si la dérive est réduite.	Excellent, on peut toujours se poser et décoller trois points.	Dépend de la voie.	Avions légers.
Tandem à assiette fixe C	Comme sur auto bien centrée.	Si la prédominance est à l'avant, excellent.	Très robuste. Une seule voie.	Stabilité auto, plus stabilité avion.	Si les balancines sont fixes, elles limitent le vent acceptable. Avec balancines commandées on peut épauler le vent.	Doit être excellent mais le ski avant droit doit avoir une charge superficielle moindre pour ne pas engager.	Balancines.	REP (1905). « Vautour ». B-47. B-52.
Axial tricycle D	Voir tricycle.	— d° —	— d° —	— d° —	Voir tandem.	Voir tricycle.	Balancines.	RF-8. SNCASO MB-10 (3 roues tandem).
Axial classique E	Voir classique.	— d° —	— d° —	— d° —	Voir tandem.	Voir classique.	Balancines.	Fourrier RF-3, 4, 5, 7 certifié sur neige en monoski.
Tricycle à assiette fixe F	Comme auto bien centrée (60% avant).	Sur l'avant seul excellent.	Très bon	Très bon sur sol boue.	Très bonne tenue par l'orientation de roue avant.	?	Dépend de la voie. On avait envisagé une roue arrière axiale fixe, et deux balancines.	SNCASE SE-100 (1938). Pourrait être utilisé sur avion genre Cessna 177 RC, en reculant le train actuel et reportant 60% du poids sur le train avant.
Quadricycle deux voies G	Voir tricycle.	— d° —	Excellent, les roues avant, peu chargées, préparent la voie aux roues arrière.	Voir tricycle.	— d° —	?	Le meilleur.	Messer. « Gigant ». Train arrière multi-roues. Sikorsky S-55. Chinook C-53, mais inversé - roues directrices arrière.
Quadricycle à assiette fixe H	Automobile	Automobile si prédominance avant.	Automobile, deux voies.	Automobile si centré en avant de 50%	Maximal.	?	Maximal.	« Aerocar » Taylor.

4.3 - Les cinématiques de train escamotable :

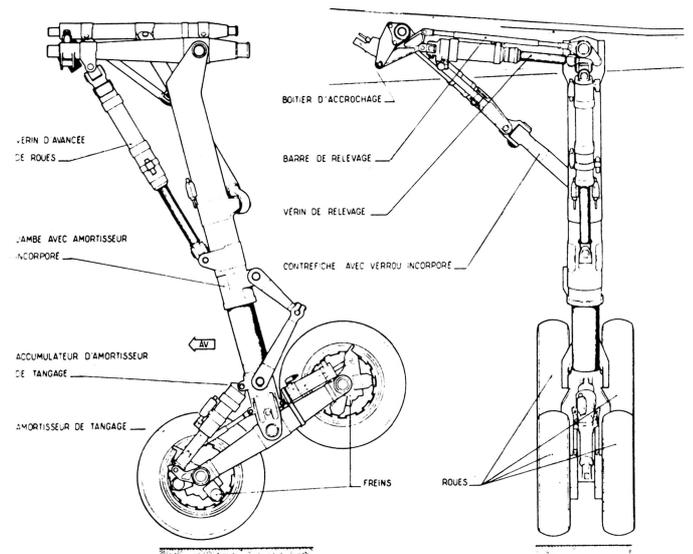
Ce qui est demandé au train escamotable c'est d'être, en quelque sorte, aussi discret que possible lorsqu'il n'est pas utilisé, c'est à dire pendant le vol. Une fois rentré, il doit donc se loger dans une soute de volume très restreint et de très faible maître couple et dont l'emplacement est imposé, en fonction de la structure de l'avion.

On conçoit aisément que selon la géométrie de l'avion lui-même, les solutions diffèrent pour résoudre ce problème. De fait chaque cas est particulier. Aussi existe-t-il une grande variété de cinématiques du train escamotable.

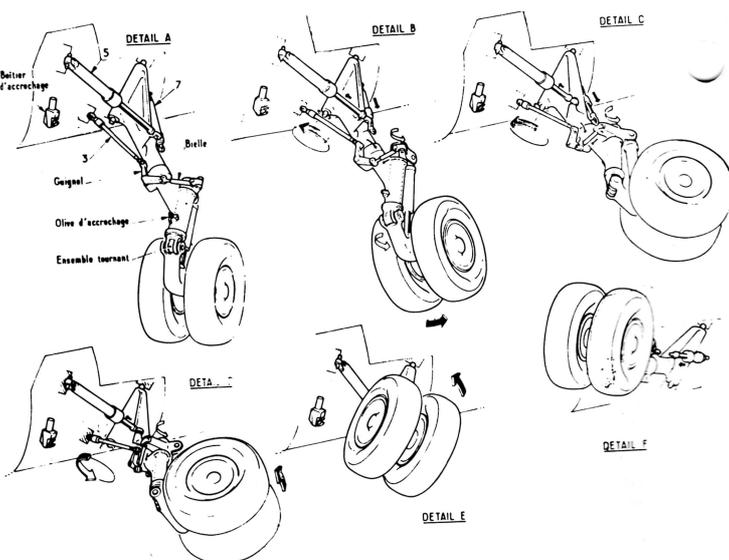
Quelques exemples :



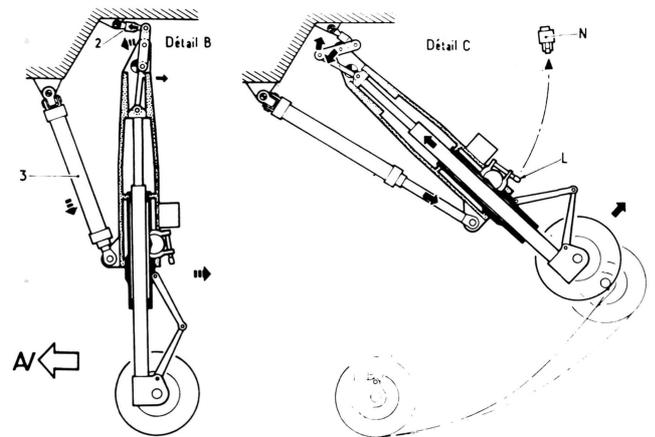
Atterrisseur principal du Mirage III E



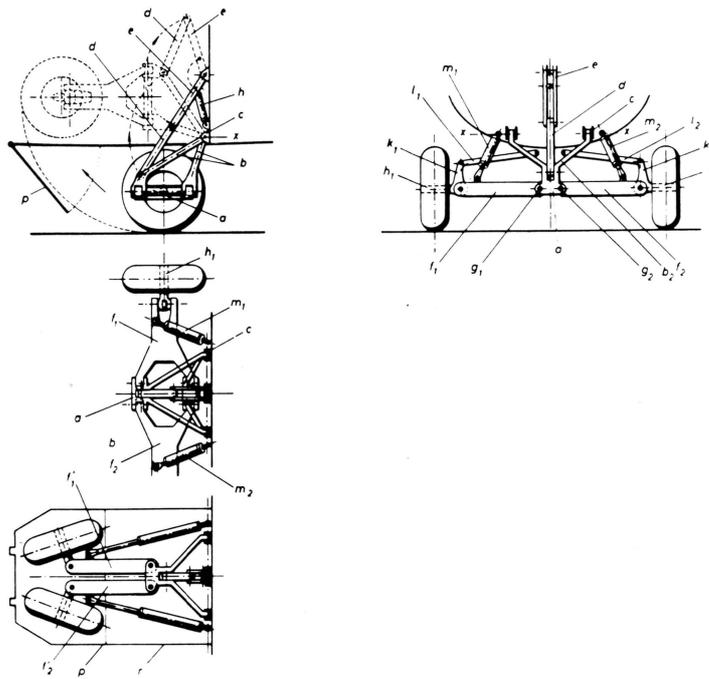
Atterrisseur principal du Mirage IV A



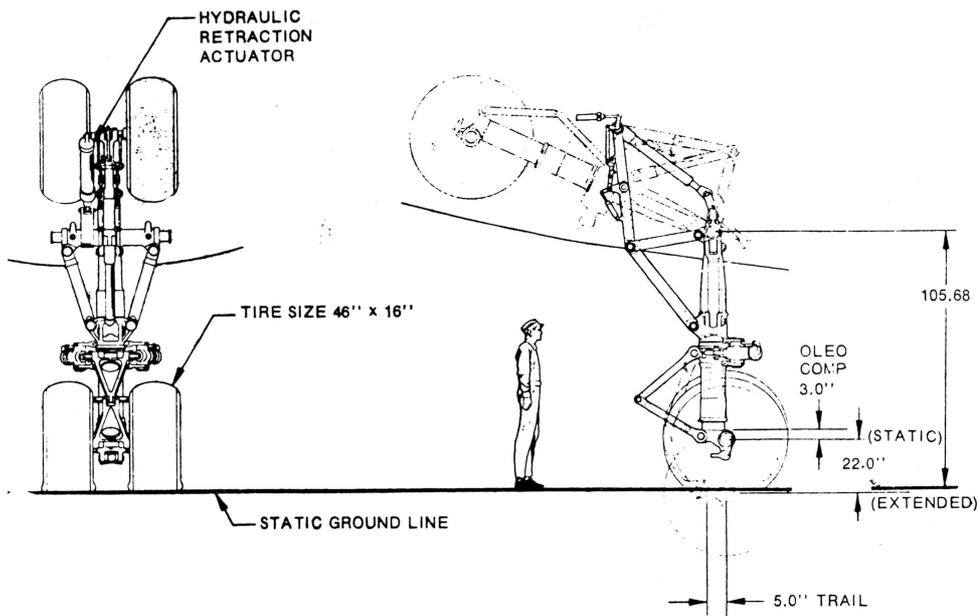
Atterrisseur principal du Mirage F1



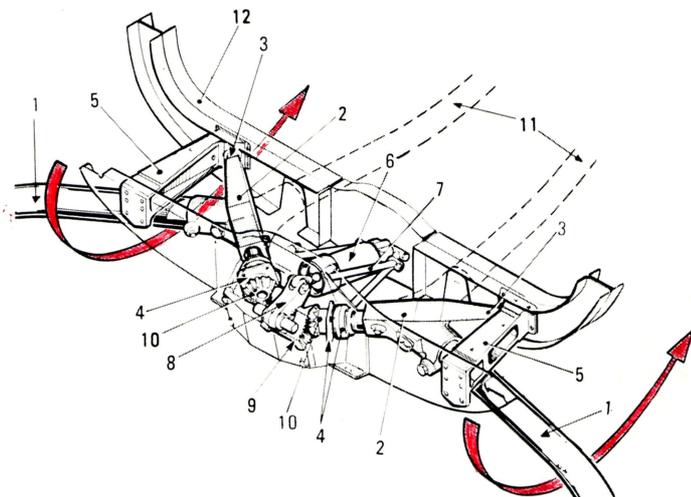
Atterrisseur auxiliaire avant du Mirage F1



Atterrisseur principal du F111

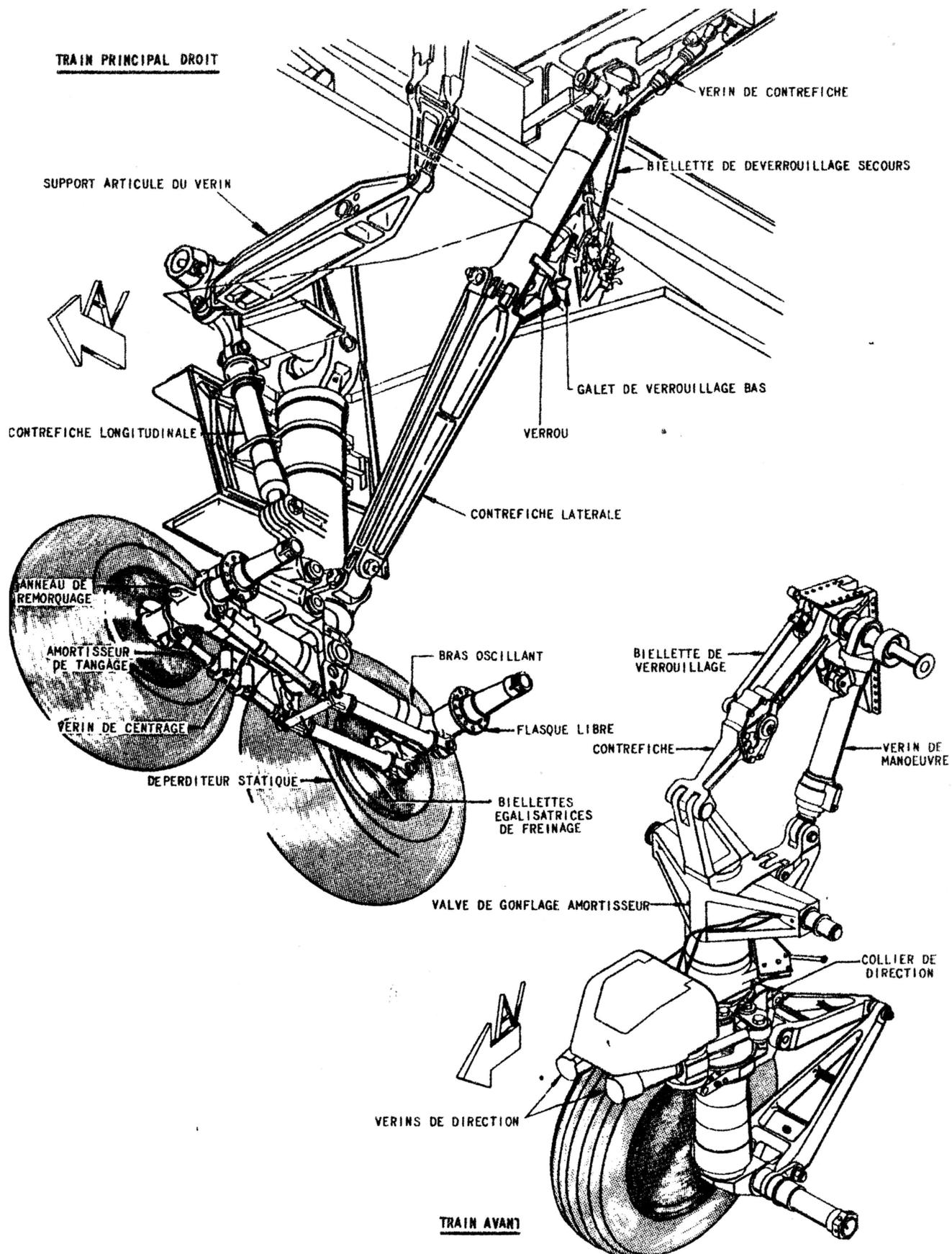


Atterrisseur principal du B747



Train Cessna à tige conique cintrée.
Train principal escamotable

4.4 - Composition d'un train :



5 - LES COMMANDES DE VOL :

Elles transmettent aux gouvernes les ordres commandés par le pilote au moyen :

a) du manche :

mouvement à droite ou à gauche : **ailerons**

mouvement avant ou arrière : **gouverne de profondeur**

b) du palonnier :

gouverne de direction

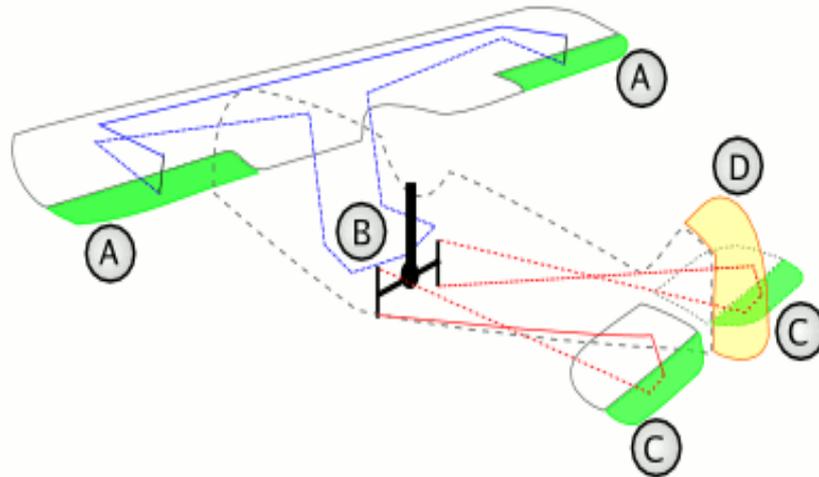
5.1 - Commandes de vol :

Axe de roulis : ailerons (**A**) commandés par le manche latéralement, créant des couples d'inclinaison à gauche ou à droite

Axe de tangage : gouverne de profondeur (**C**) commandée par le manche longitudinalement, créant des couples à cabrer ou à piquer, et agissant sur l'incidence de l'avion

Axe de lacet : gouverne de direction (**D**) commandée par le palonnier, créant un couple en lacet (à gauche ou à droite) et agissant sur le dérapage

Ce sont ces mouvements qui entraînent des changements des forces aérodynamiques en grandeur et en direction, ce qui a pour effet " ultérieur " de modifier la vitesse en grandeur et en direction.



5.2 - Liaison avec les actionneurs :

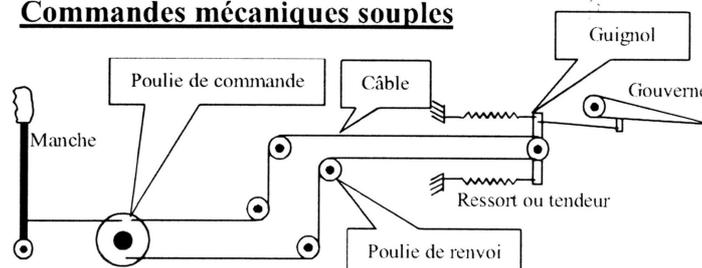
- câbles ou bielles
- hydrauliques : permet une assistance par des servo commandes
- électriques : mini manche relié aux automatismes de l'avion

5.2.1 - La transmission par câble.

Couramment utilisée sur les petits avions, elle est simple, efficace, et n'est pas influencée par les éventuelles distorsions de la cellule, puisque, par nature, les câbles sont flexibles.

Ils ne travaillent qu'en traction, et obligent donc à l'emploi de deux câbles pour un mouvement.

Commandes mécaniques souples



5.2.2 - La tringlerie mécanique rigide.

On l'utilise lorsque l'on ne cherche pas absolument une "insensibilité" aux distorsions de la cellule.

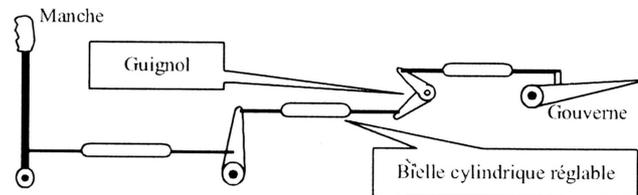
Dans ce cas, les câbles sont remplacés par des barres.

Avantages: Il ne faut qu'une tringle par mouvement (travail en traction ET en "poussée")

Une fois réglée (l'extrémité est munie d'un tendeur à vis, et d'un œil), la tension n'a plus à être régulièrement vérifiée.

Les changements de direction sont assurés par des guignols de renvoi.

Commandes mécaniques rigides



5.3 - Conséquences et remèdes :

Les efforts qu'un pilote doit fournir sur les commandes pour piloter son avion sont fonction de sa taille (sa masse, en fait), et de sa vitesse (le carré de sa vitesse, pour être précis). Il est donc tout naturel de penser que la force physique d'un pilote (même baraqué) est très largement insuffisante pour piloter un avion très rapide, de grande taille, ou les deux.

Pour des avions capables d'évoluer à des vitesses extrêmement différentes, la seule compensation aérodynamique (tabs, par exemple) n'est plus adaptée. En effet, une compensation efficace à 300 Km/h, par exemple, deviendrait une très large surcompensation à 800 Km/h, et au contraire, une bonne compensation à haute vitesse serait inefficace à basse vitesse. Il faut trouver une autre solution, et cette solution ce sont les commandes de vol assistées, ou même servomotrices.

Les commandes assistées ou servomotrices n'impliquent toutefois pas une disparition totale de la compensation aérodynamique. Celle-ci n'a, alors, plus pour but de permettre un pilotage manuel, mais simplement de diminuer les efforts sur la structure. Elle peut dès lors être plus "légère".

5.3.1 - L'assistance hydraulique, et les commandes servomotrices.

On parle d'assistance lorsque la force hydraulique vient simplement s'ajouter à la force musculaire du pilote pour alléger son travail, exactement comme pour la direction assistée des automobiles.

La force hydraulique, dans ce cas, n'élimine pas le lien entre la commande et la gouverne par timonerie classique, mais elle l'assiste simplement.

Si le système hydraulique ne fonctionne pas, les commandes restent utilisables manuellement, mais au prix d'efforts physiques nettement plus importants.

On parle de commandes servomotrice, lorsque la force hydraulique assure la totalité du travail. Le pilote n'ayant théoriquement aucun effort à faire, il ne "sent" pas son avion, aucune action sur les commandes aussi importante soit-elle ne lui demande d'effort différent.

Pour éviter cela, un dispositif spécial faisant pression sur les commandes lui restitue artificiellement une sensation d'effort musculaire "naturel" à faire qui soit en rapport avec l'importance du déplacement de la gouverne, et la vitesse de l'avion.

Avec les commandes servomotrices, il n'y a plus aucun lien directe entre les commandes et les gouvernes, et le pilotage devient donc totalement impossible en cas de panne du système, elles sont utilisées dans les cas où l'avion serait de toute façon totalement impilotable par la seule force musculaire.

Pour palier à cet inconvénient, on double voir triple le système de commande, avec même parfois le choix d'un système de secours radicalement différent.

5.3.2 - Les commandes de vol électriques :

Elles sont une évolution des commandes de vol traditionnelles. En aviation, les commandes de vol sont les systèmes faisant le lien entre le pilote et les gouvernes aérodynamiques qui permettent de modifier la trajectoire de l'avion. L'ensemble est composé d'organes de pilotage (manche par exemple), d'actionneurs (vérins, hydrauliques ou électriques) pour actionner les gouvernes, et d'un système de transmission plus ou moins sophistiqué entre les organes de pilotage et les actionneurs.

Dans les premiers avions, et aujourd'hui encore sur les avions légers, les liaisons entre le manche, le palonnier et les gouvernes de direction et de profondeur étaient réalisées à l'aide de tringles ou de câbles et le pilote exerçait directement sa force sur les gouvernes.

Lorsque les avions sont devenus plus lourds les constructeurs ont ajouté des systèmes hydrauliques d'assistance permettant ainsi de démultiplier l'effort du pilote.

On distingue les commandes de vol primaires (profondeur, aileron, direction, aérofrein, vérin de plan horizontal) utilisées pendant tout le vol et les commandes de vols secondaires (becs et volets) utilisées pendant les phases d'atterrissage et de décollage.

Les actionneurs hydrauliques sont, à puissance égale, plus lourds que les moteurs électriques (il faut inclure le poids du générateur de pression (compresseur) et le poids de la tuyauterie ou des fils transmettant la puissance) ; ils sont par contre plus rapides ce qui explique leur emploi encore très courant. On réduit actuellement (2006) la masse de la tuyauterie nécessaire en augmentant la pression du fluide et en utilisant des tuyauteries de plus faible diamètre.

Dans un premier temps les progrès accomplis sur les servovalves électro-hydrauliques ont permis le développement de commandes entièrement électriques. La fiabilité des systèmes autorisait aussi la suppression de la liaison mécanique pourtant perçue comme un élément important de la sécurité.

Dans un deuxième temps l'apparition de calculateurs numériques rapide a permis de modifier la tâche du pilote. Celui-ci ne détermine plus le mouvement des gouvernes pour en contrôler ensuite les effets grâce à ses instruments de bord mais détermine le mouvement de l'avion laissant au calculateur le soin de commander les mouvements de gouvernes nécessaires en fonction de l'altitude, de la vitesse, etc. Aucun effort physique n'étant plus nécessaire. Certains constructeurs ont pu alors remplacer le système traditionnel (manche et palonnier) par un simple **mini-manche** (Airbus A320, A330, A340, A380). Par ailleurs le calculateur peut interdire des mouvements de gouverne qui entraîneraient des risques pour la sécurité du vol.

Le **minimanche** est un levier permettant d'actionner les gouvernes de roulis et tangage d'un avion équipé de commandes électriques. Il remplace le manche à balai qui équipe les avions à commande manuelle ou assistée. Il est généralement situé à droite du pilote dans un monoplace - la main gauche est utilisée pour la manette de commande des moteurs - ou vers l'extérieur dans le poste de pilotage à deux places - les commandes des moteurs étant communes au pilote et copilote et situées au centre.

Les ordres donnés par le minimanche sont interprétés par l'ordinateur de bord. Cela permet, pour un même déplacement, de faire varier l'ordre résultant en fonction de la configuration de l'avion ou de la phase de vol.

L'introduction du minimanche sur les avions civils permet de dégager l'espace face au pilote, espace qui peut être utilisé pour une tablette de travail. Sur avion militaire, cet espace peut permettre de placer un écran radar plus important.

Le minimanche, comme le manche classique, peut être équipé de boutons commandant les fonctions les plus utiles, radio pour le pilote civil, commande de tir pour le pilote militaire, par exemple.

Le minimanche a été introduit sur les avions civils Airbus depuis l'A 320 jusqu'au plus récent l'A 380 (2011). Le minimanche équipe des avions militaires tels que les F-16 Fighting Falcon, Mitsubishi F-2, Dassault Rafale et F-22 Raptor.

Une commande de vol informatisée comprend des calculateurs redondants qui mettent en œuvre les lois de pilotage de l'avion, ainsi que des règles de sécurité limitant éventuellement les évolutions de l'avion à son enveloppe de vol, c'est-à-dire aux régimes et altitudes sûrs.

Il existe d'ailleurs des différences de philosophie à ce sujet entre les deux principaux avionneurs du marché :

- **Boeing** permet de transgresser ces limites par pression au-delà d'une butée :
- **Airbus** empêche toute évolution au-delà des limites de sécurité.

Chaque approche a ses détracteurs ainsi que ses défenseurs.

Les commandes de vols électriques sont apparues sur les avions civils avec le Concorde₂ (commande de vol électronique analogique) et l'Airbus A320 (commande de vol informatisée complète), puis les autres avions Airbus. Boeing, plus récemment, les a introduites à partir du B777.

Les actionneurs sont à puissance hydraulique. Une innovation de l'Airbus A380 est que certains actionneurs sont à puissance électrique (Electrical Hydrostatic Actuators).

Sur les avions militaires, ce fut le Mirage IV qui a eu le premier des commandes de vols électriques au niveau de la dérive en 1964.

Les premiers à en être équipé en série entièrement furent les F-15 puis F-16 au début des années 1970, puis les Mirage 2000 en 1978.

La présence de commandes électriques pilotées par un ordinateur permet de construire des avions normalement instables (l'avion ne revient pas à une position d'équilibre suite à une perturbation). La réduction des surfaces stabilisant l'avion sur sa trajectoire permet de réduire le poids de l'avion et sa signature radar mais a surtout pour conséquence l'amélioration considérable de la manœuvrabilité. L'avion pourra effectuer des manœuvres rapides en situation de combat aérien et tenter ainsi de sortir du domaine de tir d'un missile ennemi.

6 - CIRCUIT ÉLECTRIQUE :

Généralités :

- a) les moteurs : selsyn ou désyn - en courant continu
 autosyn ou magnésyn - en courant alternatif

b) types de courants :

alternatif : produit par des alternateurs (inverter) triphasés (pourvu d'un régulateur de tension)

tensions : 200 v triphasé $\pm 2v$, 400 hertz

115 v triphasé et monophasé $\pm 2v$

continu : produit par une ou plusieurs génératrices entraînées par les moteurs de l'avion

batterie de bord (mini 24 v), dynamo (la tension doit être régulée), TR

(transfo-redresseurs à partir d'un courant alternatif)

Nota : un alternateur est plus léger qu'une batterie, d'où la tendance sur bimoteur et mono, à remplacer la génératrice par un alternateur.

Le couplage des génératrices à courant continu est plus simple que le couplage des alternateurs.

Les batteries, 3 types, plomb (35A/H en 5h), alcaline cadmium nickel (35 A/H en 1h), alcaline argent zinc (85A/H), batteries de parc (500 A/H).

7 – PROTECTION INCENDIE :

- Détecteurs** :
- à poudre : cartouche à poudre facilement inflammable
 - à bilame : principe de la dilatation de métaux
 - à fusible : même principe que le bilame
 - à thermocouple : la soudure chsude est exposée aux flammes éventuelles, la soudure froide est protégée
 - à ionisation : cellule photoélectrique
 - extincteurs

8 – PROTECTION CONTRE LE GIVRAGE :

8.1 - Généralités :

La formation de givre dépend de deux paramètres qui sont, la température et l'humidité de l'air. L'humidité de l'air n'étant pas mesurée à bord, on utilisera d'autres données connues ou visibles instantanément :

- la température du point de rosée
- une visibilité réduite ($\leq 1\ 000\ m$)
- la présence d'humidité (brume, brouillard , etc)

8.2 - Conditions favorables au givrage :

La température de l'air ambiant est appelée température statique ou SAT (Static Air Temperature). Elle conditionne les risques de givrage au sol si $SAT < 8^\circ$ et forte humidité)

Il existe deux possibilités de lutte contre le givrage :

- le traitement préventif, c'est l'antigivrage
- le traitement curatif, c'est le dégivrage

8.2.1 - Conséquences du givrage :

- déformation des profils d'ailes et d'empennages
- déformation et réduction des entrées d'air et 1er étage compresseur (turbine)
- déformation des profils hélice ($\downarrow N$) et balourds \rightarrow vibrations
- risque de blocage des commandes de vol primaires et secondaires
- alourdissement de la cellule
- obturation des sondes pitots ou anémobarométriques

8.2.2 - Moyens de lutte :

- la génération pneumatique thermique
- la génération pneumatique mécanique
- la génération électrique

8.2.3 - Avertisseurs de givrage :

Le meilleur détecteur est encore la surveillance visuelle assurée par les pilotes et liée aux conditions météorologiques rencontrées en vol : précipitations, TAT, altitude, Néanmoins, il existe plusieurs systèmes de détection.

- la détection visuelle, un support d'essuie- glaces, constitue en outre, un excellent détecteur de givrage
- la détection manométrique, lorsqu'il y a formation de givre, les trous de l'avant du détecteur s'obstruent entraînant une baisse de la pression mesurée.
- la détection par ultrasons, le principe de la mesure d'épaisseur en déterminant le temps de parcours d'une onde acoustique.

L'avantage, détection du givre en temps réel, à partir de quelques dixièmes de mm, selon un processus cyclique, toutes les 60s . Le système fonctionne automatiquement dès la mise sous tension de l'avion.

8.2.4 - Dégivrage voilure et empennages :

8.2.4.1 - Système pneumatique mécanique :

Ce dispositif curatif consiste à déformer les profils bord d'attaque et empennages pour casser la couche de glace, par des mouvements alternatifs de gonflage et dégonflage de cellules tubulaires disposées dans le sens du vol.

Ces systèmes sont utilisés sur des avions équipés de GTP ou GMP de faible puissance, ne pouvant pas fournir de grands débits d'air.(interdit au décollage).

8.2.4.2 - Système électrique :

Système préventif, constitué par des résistances chauffantes protégées par une enveloppe de caoutchouc, (généralement sur turboprop.)