

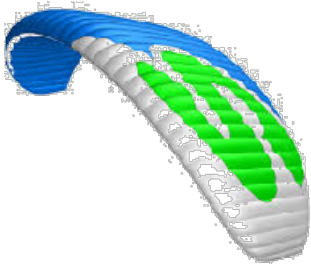
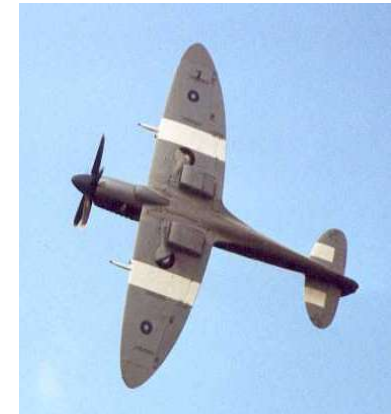
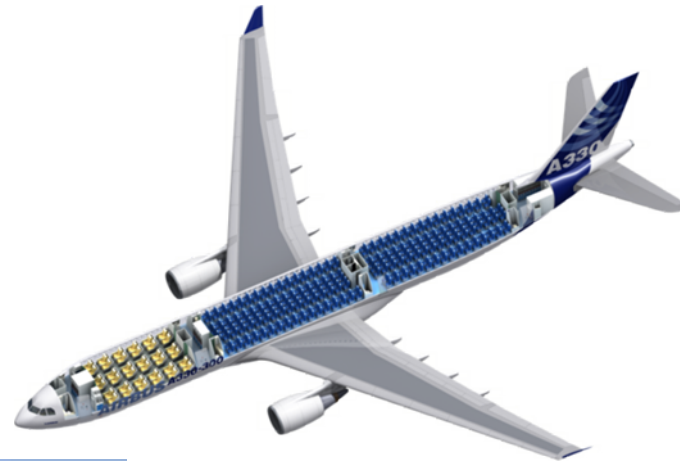


3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.3 Structures et matériaux

3.3.1 Voilures

Version Aout 2025



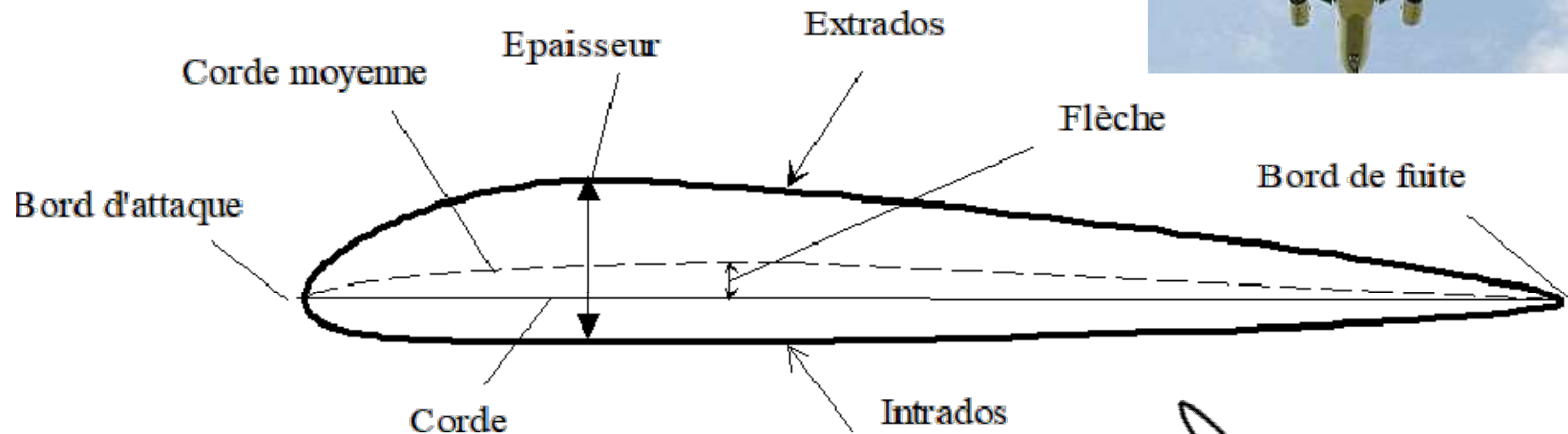
3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Structures et matériaux

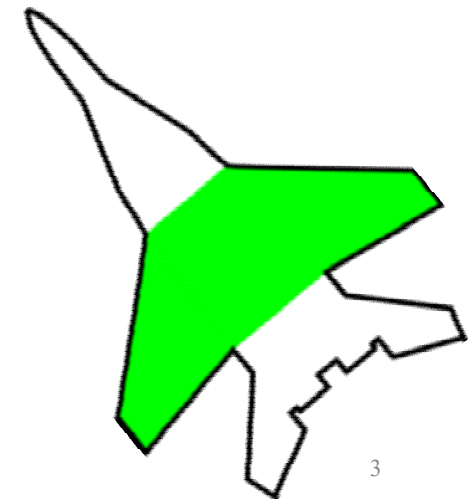
- **Voilures**
 - **Forme**
 - **Nombre**
 - **Dièdre**
 - **Position**
 - **Dispositifs hypersustentateurs**
 - **Efforts sur la voilure**
 - **Structure**
- **Empennages**
- **Fuselages**
- **Matériaux**
- **Atterrisseurs**

Rappels sur la géométrie de la voilure

- **Envergure** : la distance entre les extrémités des ailes



- **Surface alaire** : l'aire des ailes projetée sur le plan en incluant la surface du fuselage reliant les ailes

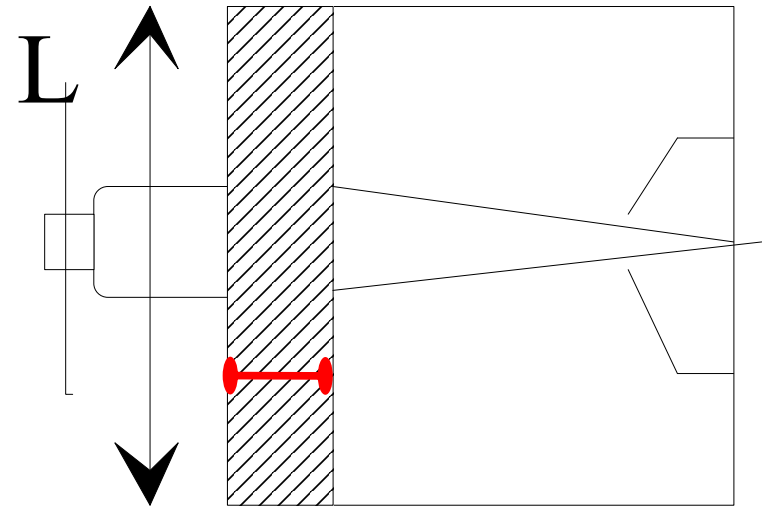


L'allongement

Il est défini par le rapport suivant :

Pour une aile rectangulaire :

$\lambda = \text{envergure} / \text{corde}$



Pour une aile trapézoïdale :

$\lambda = \text{envergure} / \text{corde moyenne}$

Plus l'allongement est important et plus la traînée induite diminue.

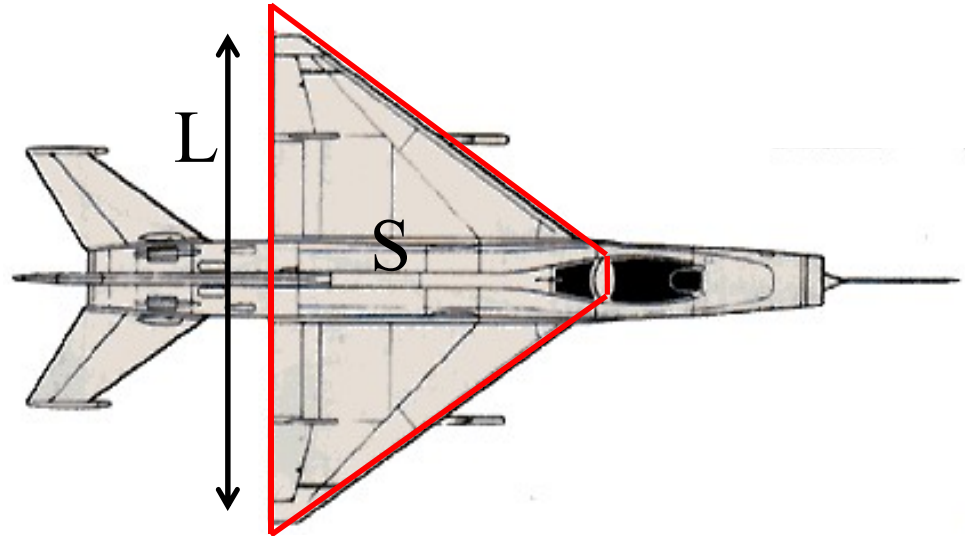


L'allongement

Pour une aile delta :

$$\lambda = L^2 / S$$

(formule valable pour
n'importe quel type
d'aile)

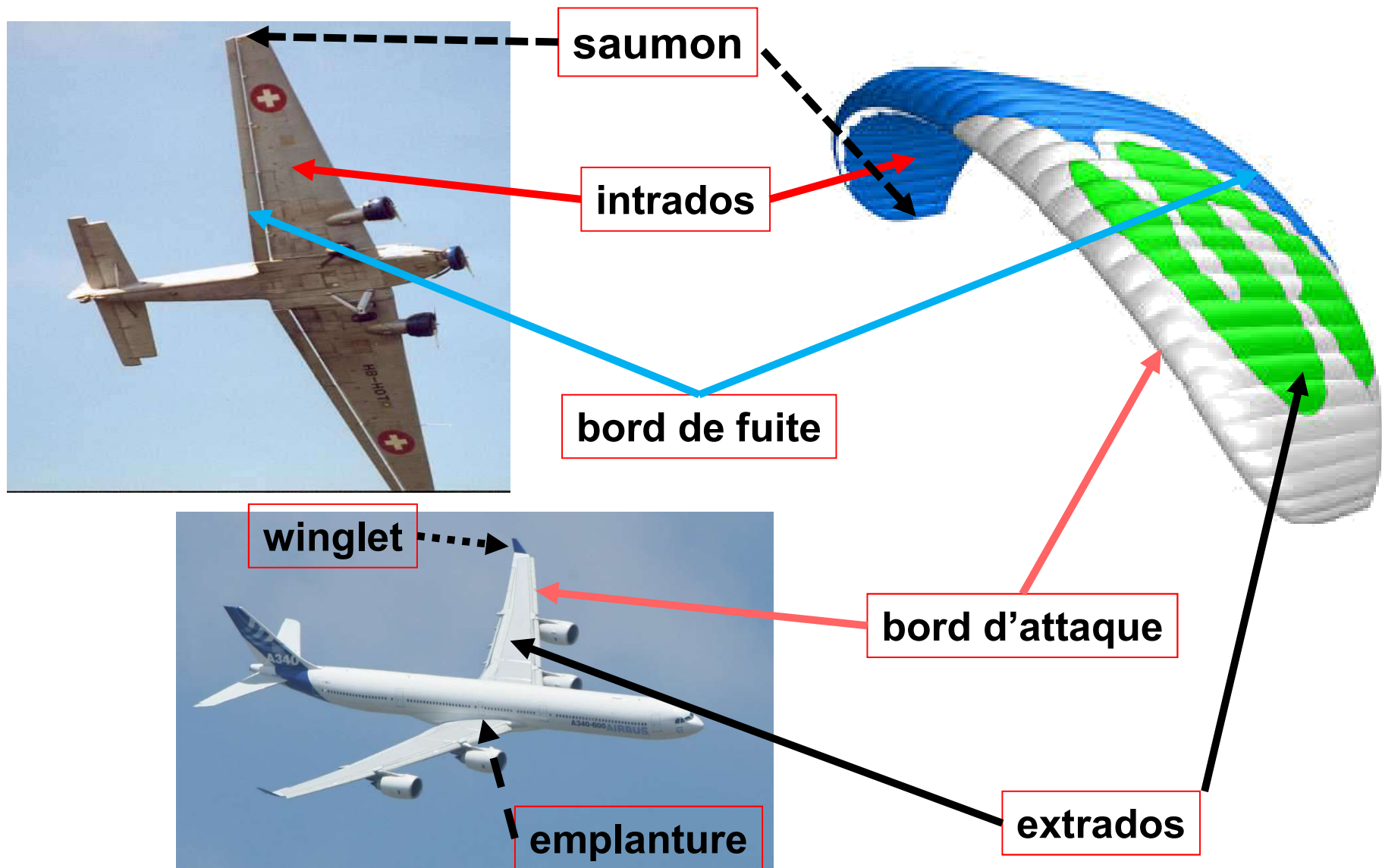


L : envergure de l'aile,

S : surface de l'aile, en incluant la surface du fuselage reliant les ailes

Les avions de ligne et les planeurs ont de **grands allongements**

Différentes parties de l'aile



Les différentes formes d'ailes

Ailes droites



Piper Cub

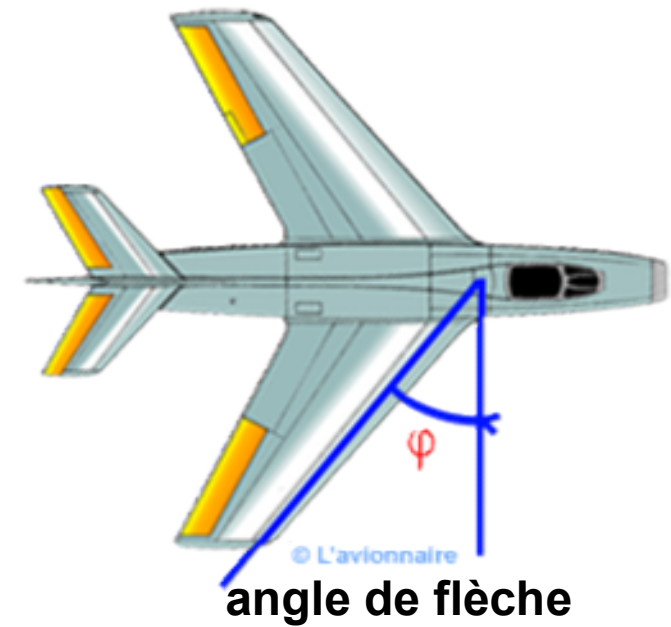
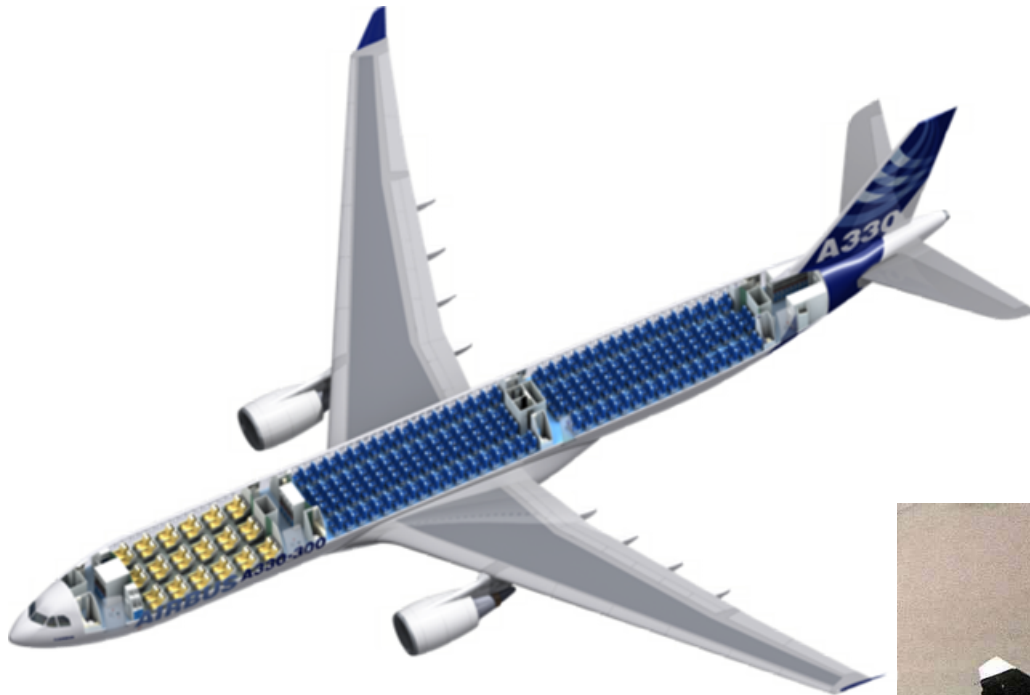
Ailes elliptiques



Spitfire

Les différentes formes d'ailes

ailes en flèche



Les différentes formes d'ailes

ailes trapézoïdales



Lockheed F-22 Raptor

Les différentes formes d'ailes

ailes delta



à géométrie variable



Les différentes formes d'ailes

gothique

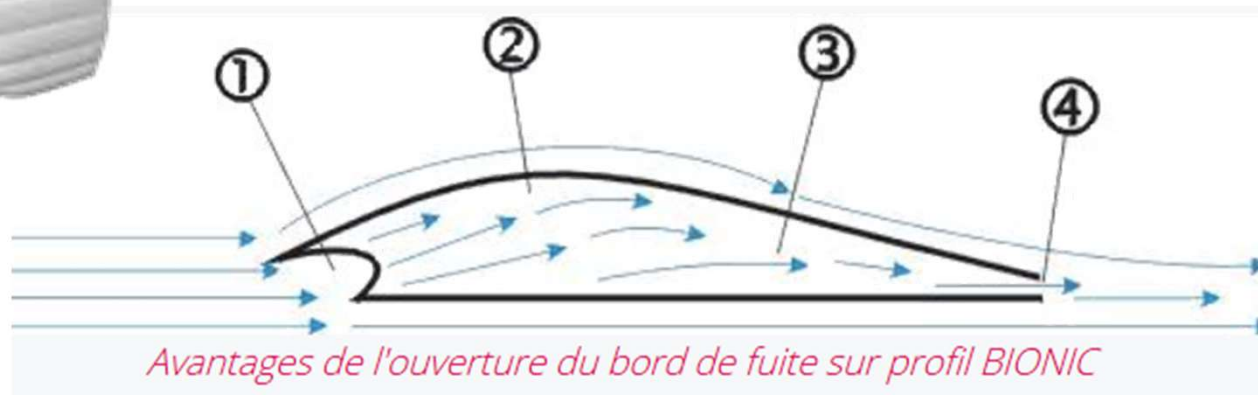
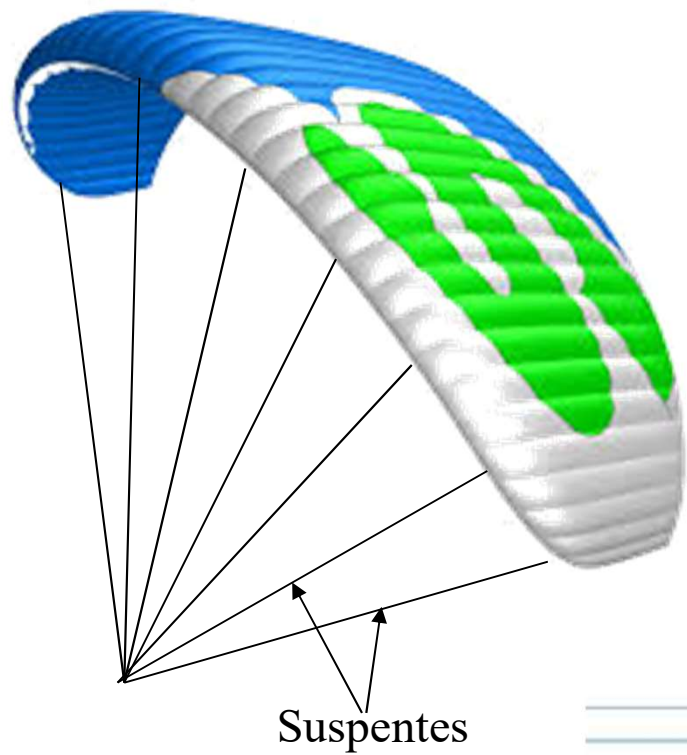


ailes volantes



Les différentes formes d'ailes

ailes parapente et paramoteur



Les différentes formes d'ailes

**Une voilure en trapèze à forte cambrure
au moment de l'atterrissage !**



© enim.tn

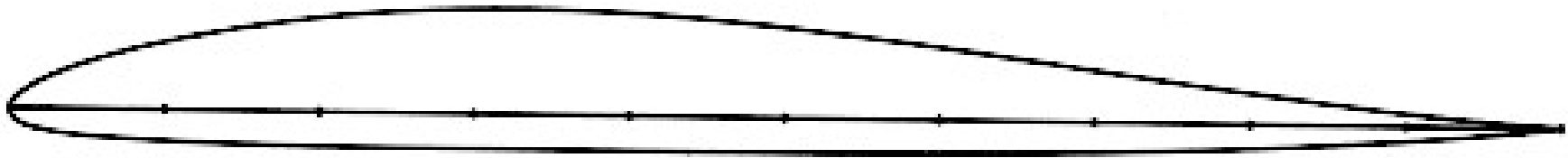
Différentes formes d'ailes pour différents usages



Patrouille d'un drone Neuron avec un Rafale et un Falcon 7X.

Exemples de profils d'aile

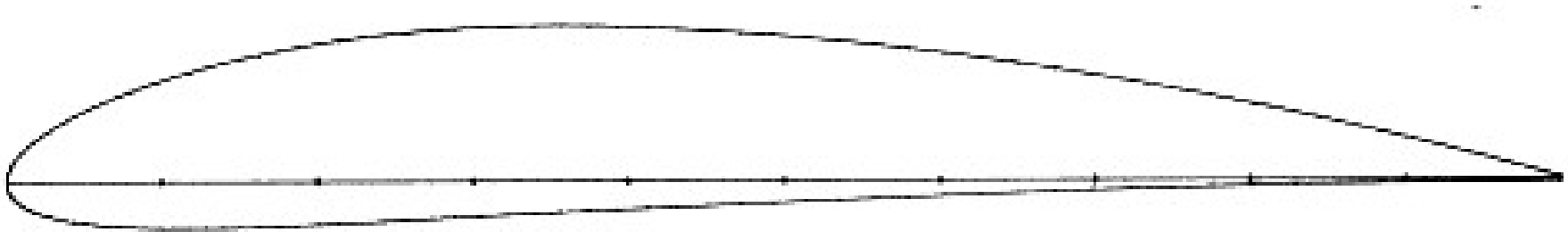
profil B29



Un profil **plan convexe** qui porte bien même à faible incidence, mais qui est légèrement instable. Il est utilisé en aviation générale.

Exemples de profils d'aile

profil NACA 4412

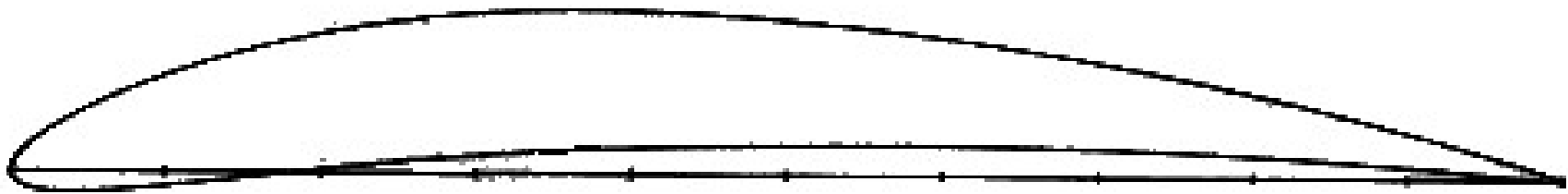


Un profil **biconvexe dissymétrique** qui porte bien même à incidence nulle et qui est très stable. Utilisé dans l'aviation de loisir.

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics (devenu NASA en 1958)
A établi un code de 4 à 6 chiffres donnant les paramètres des profils d'aile

Exemples de profils d'aile

profil Eppler 471



Un profil **cambré ou creux** qui est très porteur mais qui est assez instable. Lorsque l'incidence augmente il cherche à cabrer.

du nom de Richard Eppler, professeur à l'université de Stuttgart

Exemples de profils d'aile

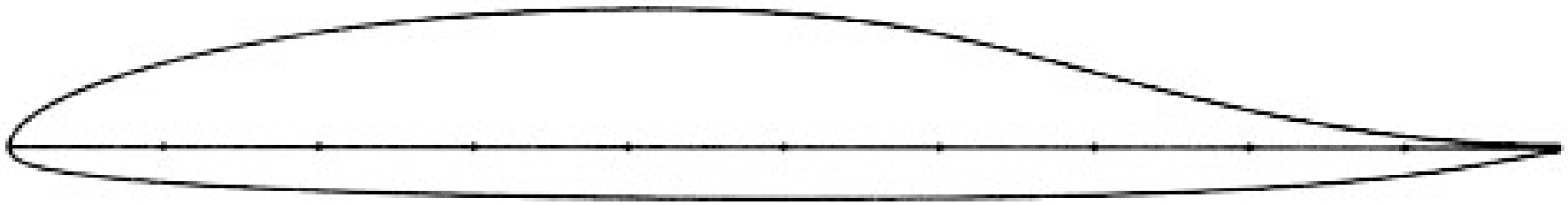
profil NACA 0009



Un profil **biconvexe symétrique** qui ne porte pas aux faibles ou très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige.

Exemples de profils d'aile

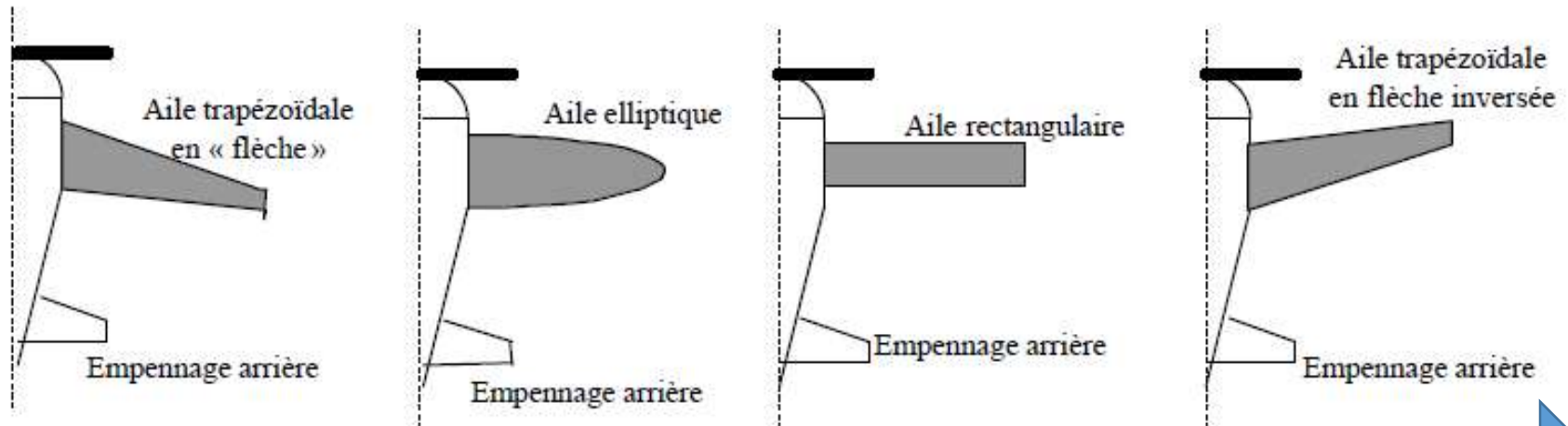
profil Roncz



Un profil à **double courbure** (ou **autostable**) qui présente l'avantage d'une grande stabilité mais qui a une portance moyenne et une traînée assez forte.

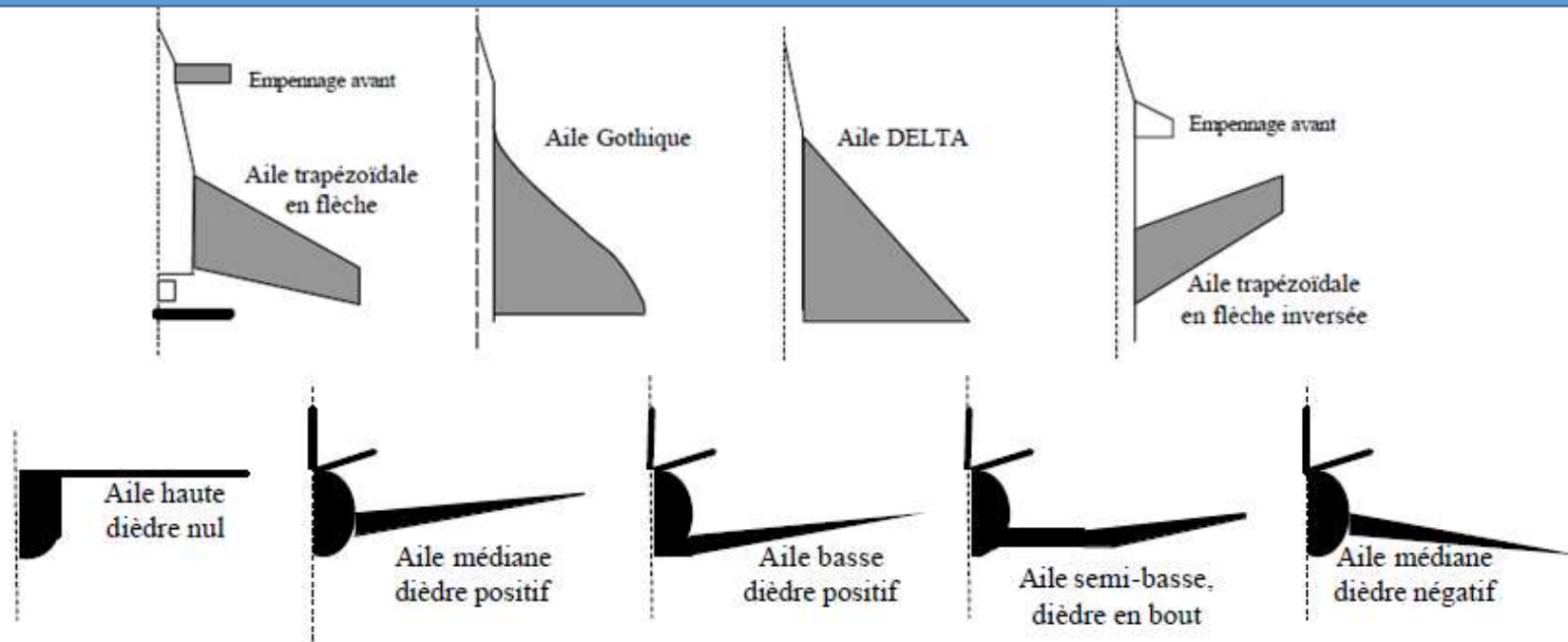
* du nom de John Roncz, un constructeur américain indépendant

Influence de la forme et dièdre de l'aile sur la **stabilité** de l'avion



+ Stable

- Stable



Géométrie de l'aile : **nombre de plans**

monoplan



Morane-Saulnier 225 C1 (1933)

biplan



De Havilland Tiger Moth (1932)



DR 400 (1972)



Staggerwing (1933)

Géométrie de l'aile : **position**

aile haute



aile médiane

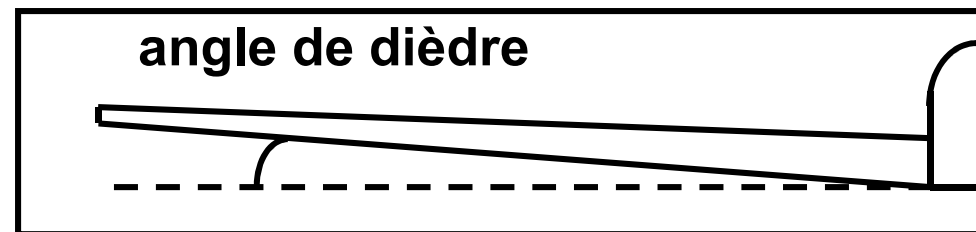


aile basse



Géométrie de l'aile : **le dièdre**

dièdre positif



Géométrie de l'aile : **le dièdre**

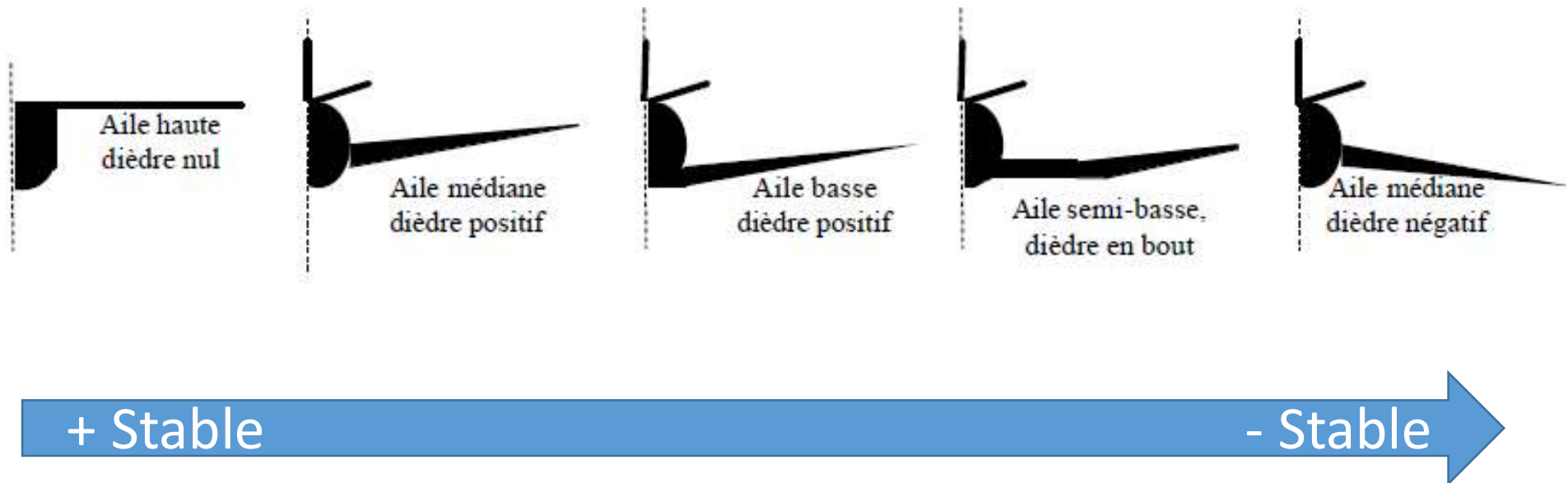
dièdre nul



dièdre négatif



Influence du dièdre et de la position de l'aile



Stabilité statique transversale

Pour assurer une stabilité transversale en roulis on adopte en général les configurations suivantes :

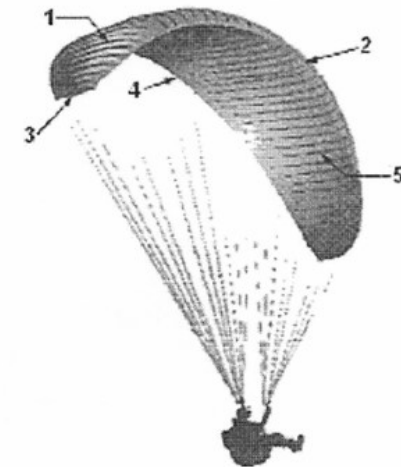
type d'aile	position	dièdre
droite	haute	environ nul
droite	basse	positif
en flèche	basse	faiblement positif
en flèche	haute	fortement négatif

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

3.10 En considérant la figure ci-dessous, les combinaisons correctes sont :

- A. A2, B4, C3, D1.
- B. A2, B4, C1, D3.
- C. A4, B5, C2, D1.
- D. A4, B2, C3, D5.

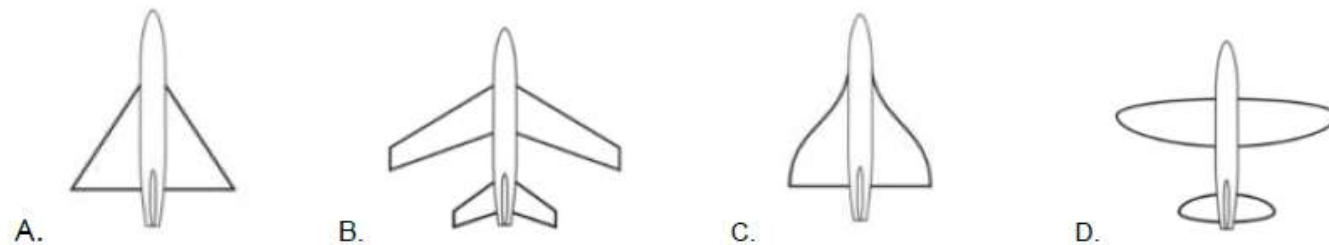
A : Bord d'attaque
B : Bord de fuite
C : Saumon d'aile
D : Extrados



3.4 Sur un parapente, la liaison entre les élévateurs et l'aile est assurée par :

- A. des ficelles.
- B. des cordelettes.
- C. des lignes.
- D. des suspentes.

3.14 - Un avion à ailes en flèche est représenté par la figure :



Décollage

Après le décollage l'avion doit accélérer vers sa vitesse de croisière et Montée vers son altitude de vol.

- Pour un bon décollage que recherche t on?

- Vitesse:

- ~~Basse?~~

- Elevée?

- Distance de décollage:

- Longue?

- ~~Courte?~~

- Manœuvre

- Facile

- ~~Difficile~~

**Au décollage on recherche le
meilleur compromis entre:
Bonne portance
Faible trainée**

Atterrissage

Après l'atterrissage l'avion doit s'arrêter.

- Pour un bon atterrissage que recherche t'on?
 - Vitesse:
 - Basse?
 - ~~Elevée?~~
 - Distance d'atterrissage:
 - ~~Longue?~~
 - Courte?
 - Manœuvre
 - Facile
 - ~~Difficile~~

**A l'atterrissage on
recherche la meilleure
Portance**

3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Structures et matériaux

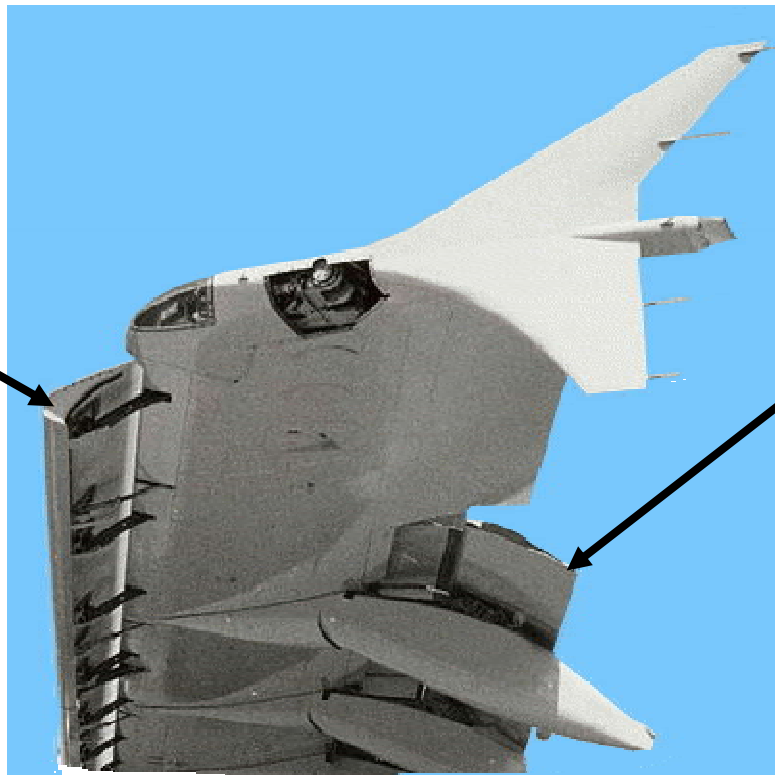
- Voilures
 - Forme
 - Nombre
 - Dièdre
 - Position
 - Dispositifs hypersustentateurs
 - Efforts sur la voilure
 - Structure
- Empennages
- Fuselages
- Matériaux
- Atterrisseurs

Les dispositifs hyper sustentateurs

Hyper = beaucoup, plus
Sustentateur = porteur

→ **dispositifs qui augmentent la portance**

les dispositifs de bord
d'attaque



les volets de bord
de fuite

Volets et becs de bord d'attaque



Un Morane-Saulnier MS880 Rallye, avion qui a formé de nombreux pilotes en club (1959-1985)

Les volets de bord de fuite

Les volets de bord de fuite **augmentent la portance en modifiant la cambrure de l'aile** et parfois aussi sa surface.

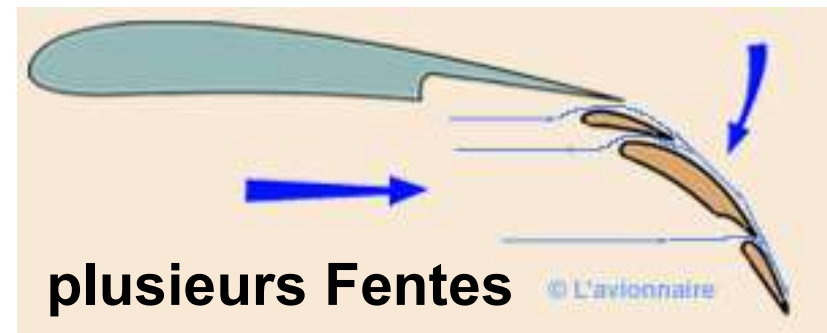
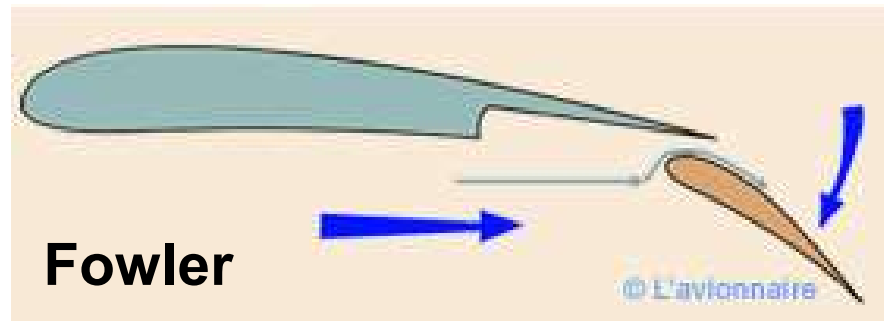
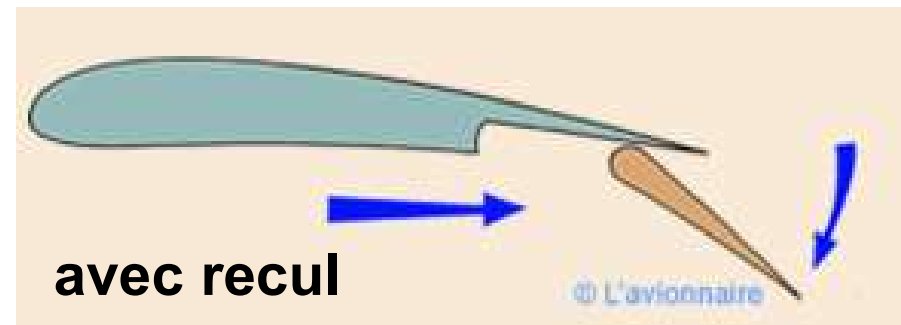
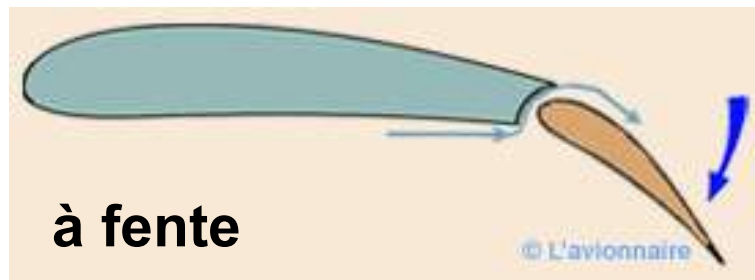
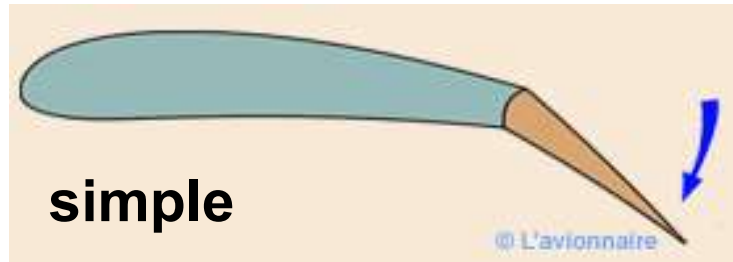
Les effets des volets de bord de fuite:

- augmentation plus ou moins importante de la portance (en fonction du braquage utilisé)
- augmentation importante de la traînée
- augmentation de la sensibilité au vent



Augmentation de la portance → réduction de la vitesse de décrochage

Les volets de bord de fuite



Dispositifs les plus courants.

Les volets de bord de fuite

simple



DR400

double fente

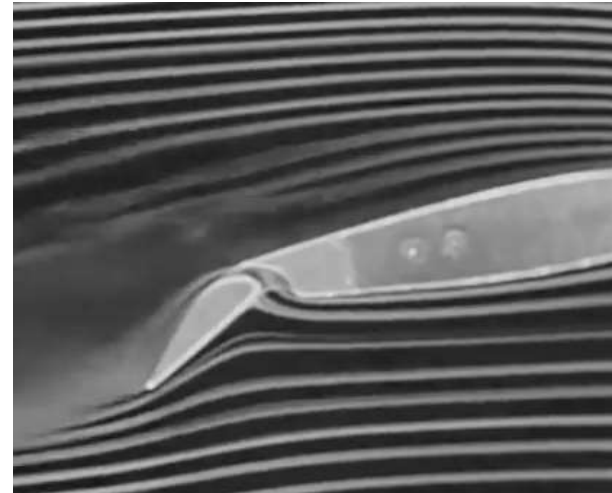
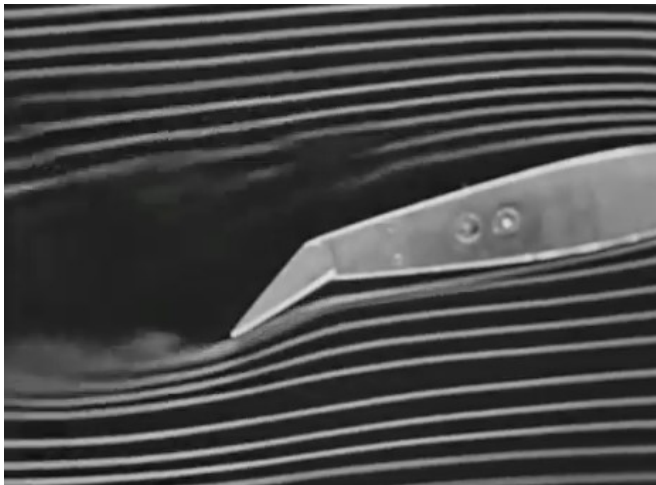
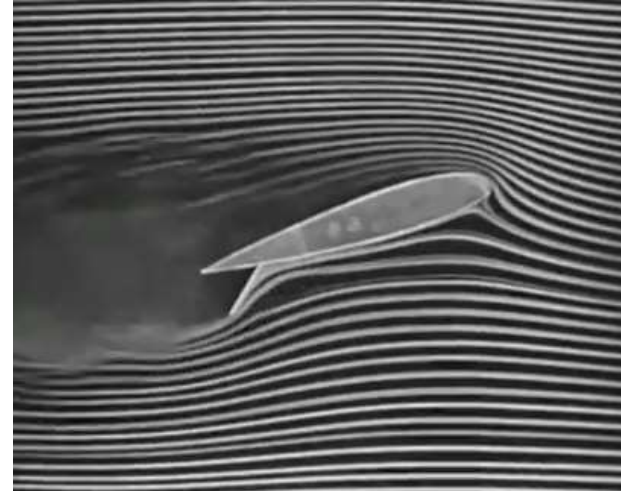
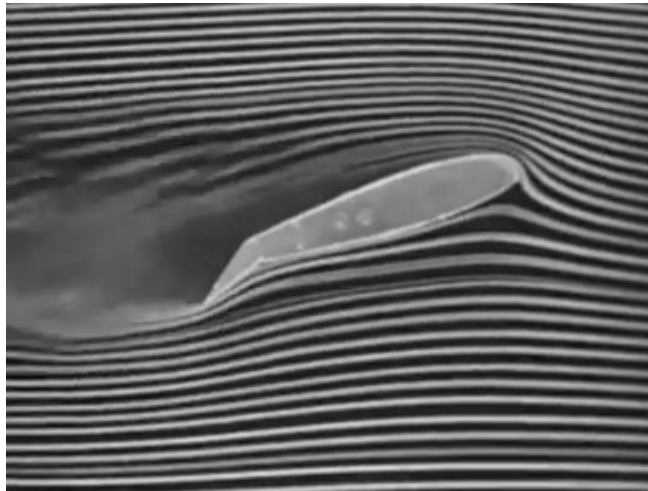


Fowler

Les volets de bord de fuite

simple vs intrados
simple vs à fente

**les volets modifient la
géométrie de
l'écoulement de l'air
autour de l'aile**



Les volets de bord de fuite : utilisation normale

Décollage

effets recherchés

- **diminuer la vitesse de décollage**
- **garder une bonne accélération**

solution : braquage limité des volets (1^{er} cran)

Atterrissage

effets recherchés

- **diminuer la vitesse d'« approche**

solution : braquage maximum des volets (sauf si vent fort)

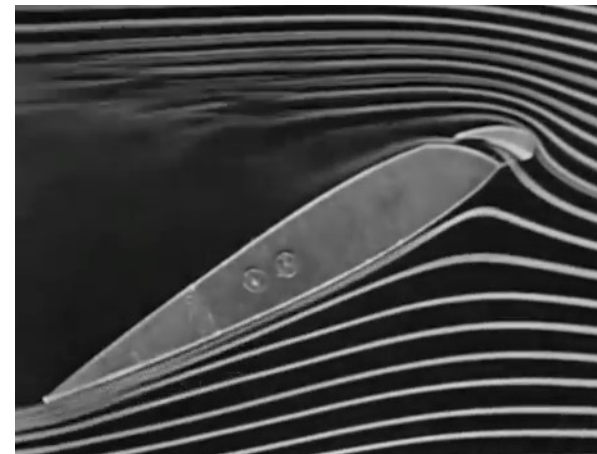
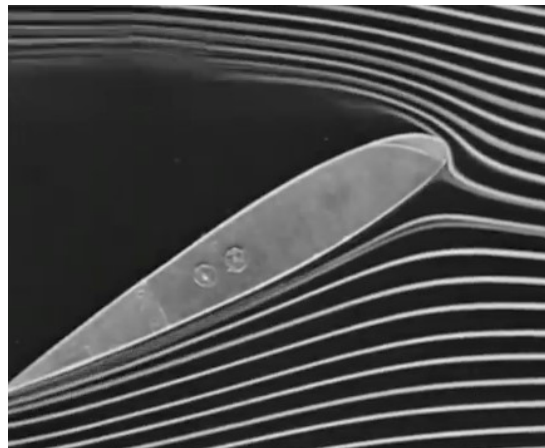
Les dispositifs de bord d'attaque

Les becs de bord d'attaque augmentent la portance en modifiant la cambrure de l'aile et parfois sa surface.

Les effets des becs de bord d'attaque :

- augmentation plus ou moins importante de la portance (en fonction du type utilisé)
 - **réduction de la vitesse de décrochage**
- mais :
 - augmentation de la traînée
 - augmentation de la sensibilité au vent

comme les volets,
les becs modifient
la géométrie de
l'écoulement de l'air
autour de l'aile



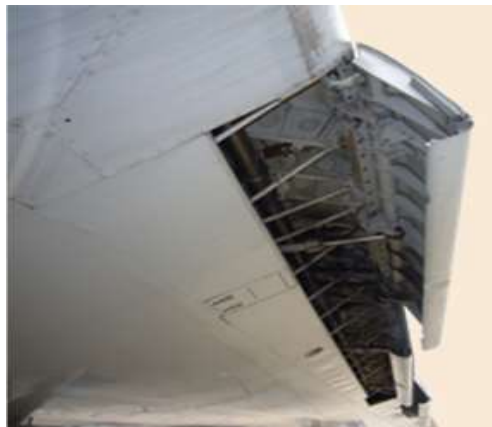
Les dispositifs de bord d'attaque : géométries les plus courantes



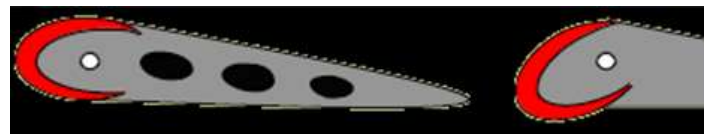
bec fixe



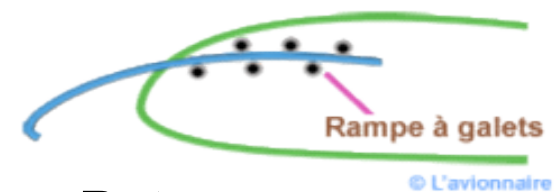
bec mobile



Krueger



basculant

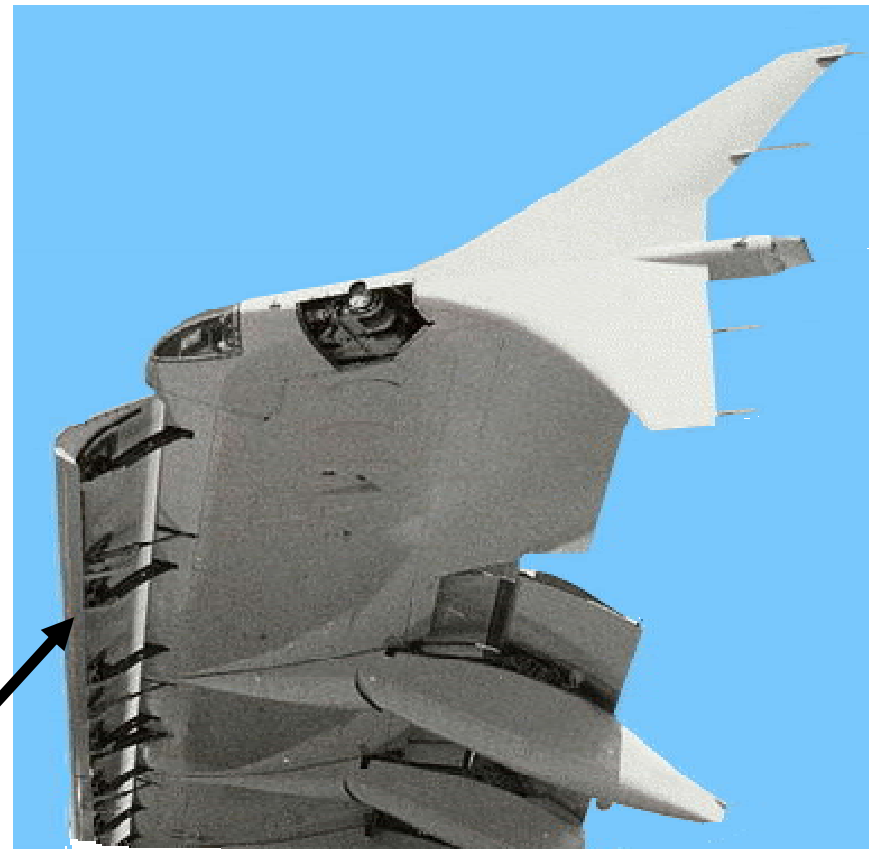


Betz

Les dispositifs de bord d'attaque : bec de bord d'attaque (slat) mobile



**automatique, sur
un Rallye MS 880**



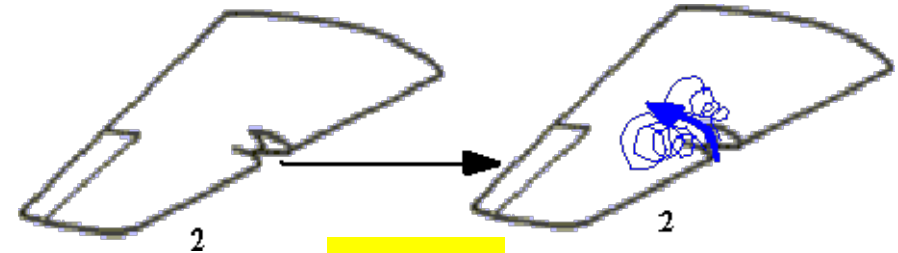
commandé (A310)

D'autres dispositifs de bord d'attaque

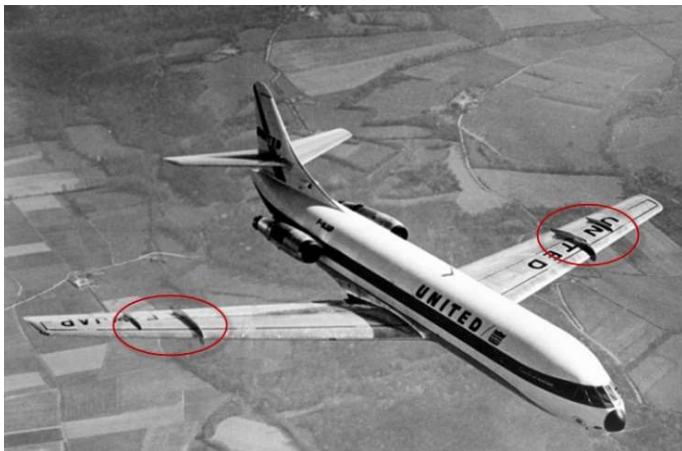


SU7

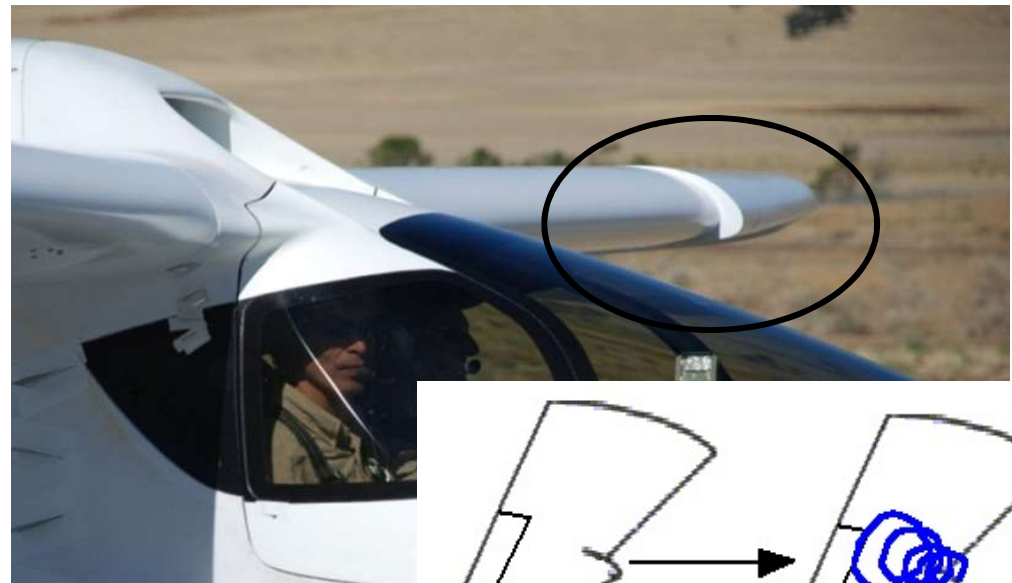
cloison



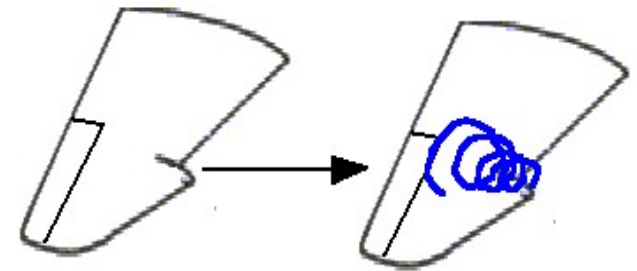
fente



Caravelle



dent de scie / décrochement



41

Les dispositifs de bord d'attaque : utilisation normale

Décollage

Ces dispositifs ne sont en général pas utilisés.

Atterrissage

effets recherchés

- diminuer la vitesse d'« approche
- solution : déploiement maximum des becs

Les dispositifs hyper sustentateurs : impact sur la portance

Désignation	Forme de l'aile	Angle de braquage	Augmentation de portance en %
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%
Volet intrados sans recul		50°	67%
Volet à fente		45°	53%
Volet Fowler		40°	88%
Bec automatique			26%
Bec et Volet Fowler		40°	100%

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Les volets sont sortis :

- a) pour voler aux faibles vitesses.
- b) pour voler aux grandes vitesses.
- c) au moment de l'atterrissage et du décollage.
- d) les réponses a et c sont exactes.

2.4 - En phase d'atterrissage, le pilote sort les volets hypersustentateurs. L'objectif est :

- A. de conserver la portance à vitesse réduite.
- B. de réduire la portance et d'augmenter sa vitesse.
- C. de diminuer la traînée.
- D. d'augmenter la vitesse.

Parmi les dispositifs suivants, lequel n'est pas un dispositif hypersustentateur :	
a)	les volets à fente.
b)	les becs de bord d'attaque.
c)	les aérofreins.
d)	les volets Fowler.

En phase d'atterrissage, le pilote sort le 1er cran de volet. Ce volet est un :

- a) hypersustentateur de bord de fuite.
- b) hypersustentateur de bord d'attaque.
- c) hyposustentateur de bord de fuite.
- d) hyposustentateur de bord d'attaque.

2.5 - Les dispositifs hypersustentateurs ont pour but :

- A. de diminuer la portance à vitesse élevée (par exemple : pour une descente d'urgence).
- B. d'augmenter la vitesse de décrochage pour certaines manœuvres.
- C. de diminuer la traînée pour certaines manœuvres.
- D. de diminuer la vitesse de décrochage dans certaines phases de vol (par exemple : au décollage et à l'atterrissage).

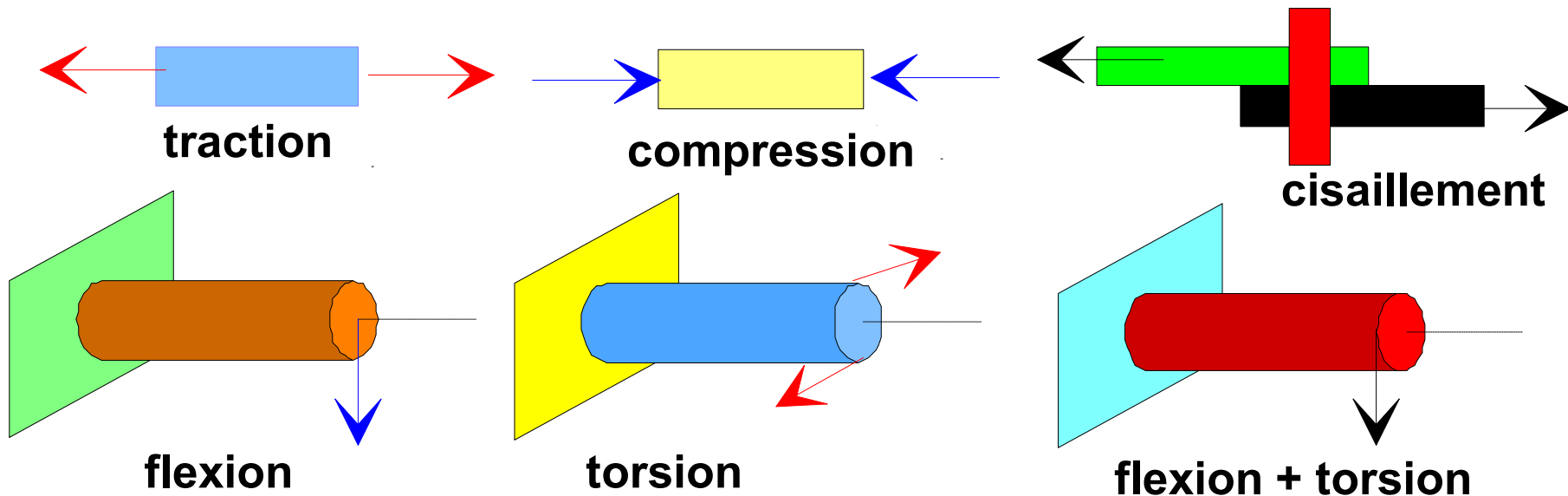
3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.2 Structures et matériaux

- Voilures
 - Forme
 - Nombre
 - Dièdre
 - Position
 - Dispositifs hypersustentateurs
 - Efforts sur la voilure
 - Structure
- Empennages
- Fuselages
- Matériaux
- Atterrisseurs

Les sollicitations mécanique subies par les éléments de l'avion

Elles sont de plusieurs types, contribuent à la **fatigue** des pièces et assemblages, et **peuvent conduire à la déformation permanente où à la rupture des éléments de l'avion**



Les voilures subissent des sollicitations mécaniques particulièrement importantes, pendant des durées longues, et d'autant plus fortes que le facteur de charge est élevé

Efforts auxquels les voilures sont soumises?

- au sol, moteur arrêté
 - flexion vers le bas
 - traction (extrados)
 - compression (intrados)
- au sol en roulant
 - torsion
 - flexion vers le bas
- au décollage
 - torsion
 - flexion vers le haut
- en vol
 - flexion vers le haut
 - traction (intrados)
 - compression (extrados)
- à l'atterrissage
 - flexion vers le bas
 - torsion
- au freinage
 - torsion
 - flexion vers le bas



Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

En vol, sous facteur de charge positif, l'aile d'un avion subit :

- a) une compression à l'extrados.
- b) une traction à l'extrados.
- c) une flexion supportée par le longeron.
- d) les propositions a et c sont exactes.

Pour un avion au sol à l'arrêt, l'aile subit :	
a)	une flexion vers le bas.
b)	une torsion.
c)	une traction.
d)	une compression.

L'extrados de l'aile d'un avion en vol de croisière subit :

- a) un cisaillement
- b) une traction
- c) une compression
- d) une torsion

Au sol, le carburant contenu dans une aile, entraîne sur les longerons :	
a)	un effort de cisaillement.
b)	un effort de flexion.
c)	un effort de torsion.
d)	n'a pas d'influence sur la structure de l'aile.

Structure d'une aile

La structure la plus classique s'apparente à la structure semi-monocoque.

Parallèlement à l'allongement de l'aile, une poutre résistante : le **longeron**. L'aile peut-être **mono-longeron** ou **multi-longerons**.

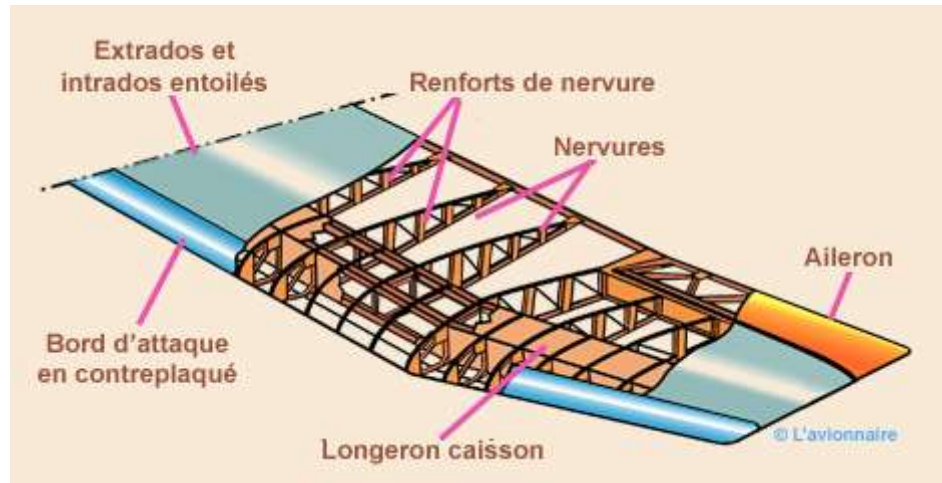
Transversalement au longeron, des **cadres** ou **nervures**.

Le **revêtement** de l'aile est alors en général **non travaillant** (c. à d. qui ne participe pas à la rigidité et à la solidité de l'aile. Par exemple : de la toile)

Une autre structure classique est dite **en caisson** :

Un ensemble d 'éléments longitudinaux et transversaux forme des **caissons recouverts par un revêtement travaillant** (c.à d. qui participe à la solidité de l'aile, par exemple de la tôle d'aluminium)

Structure d'une aile : avion léger

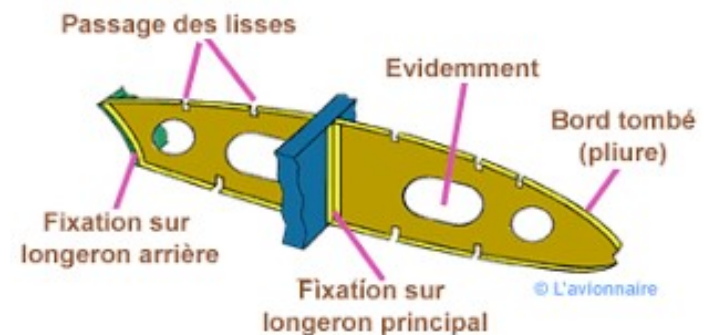
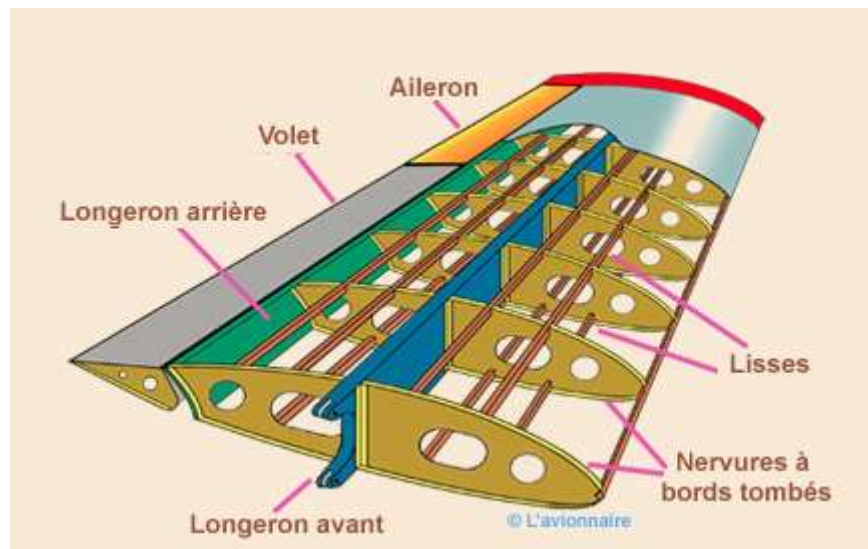


Aile en bois collé de Jodel (D113, Robin DR 400, D140 Mousquetaire)

- 1 seul longeron : un caisson de contreplaqué
- nervures en bois à entretoises
- bord d'attaque renforcé, en contreplaqué
- aile entoilée

Aile métallique. Pour cette aile :

- 2 longerons
- structure renforcée par des lisses d'extrados et d'intrados



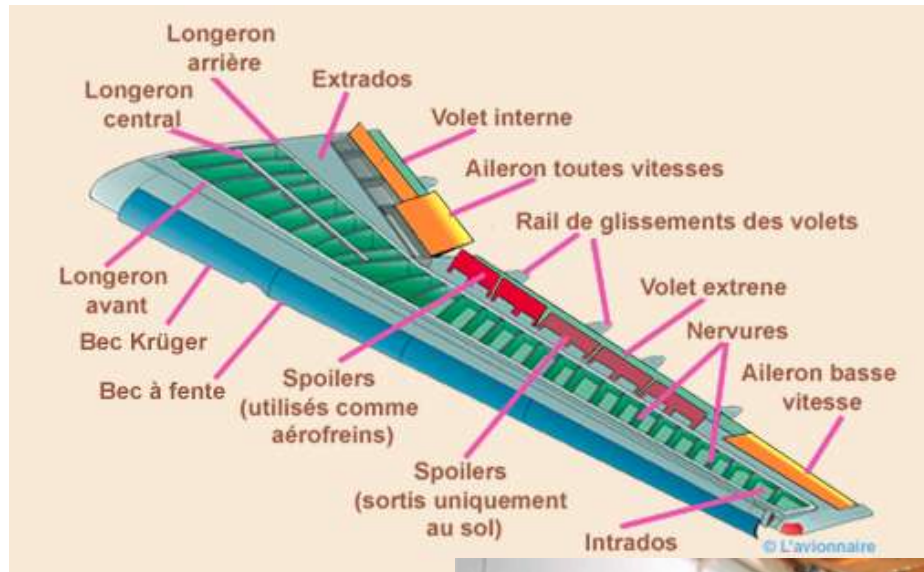
Structure d'une aile : avion de transport commercial

nervure

longeron



Structure d'une aile : avion de transport commercial



aile d'un Airbus 300

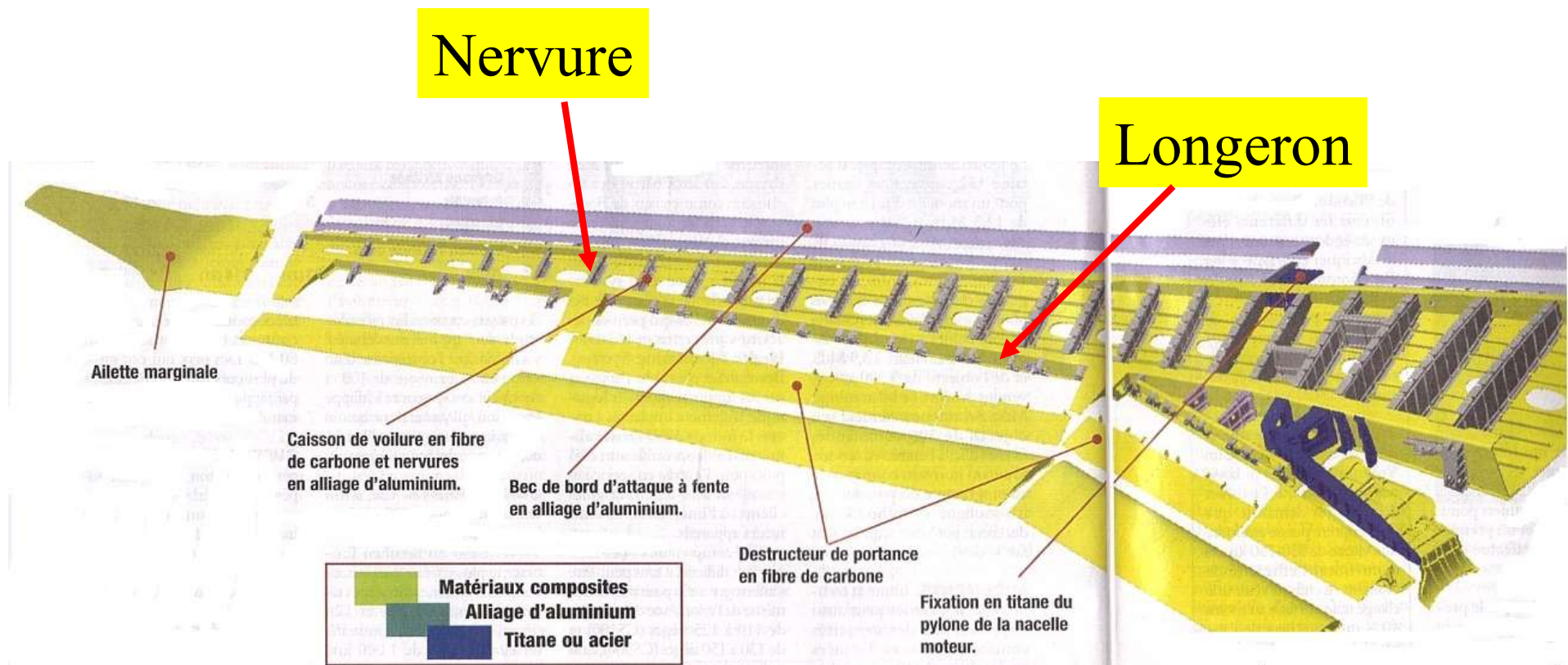


emplanture d'aile
d'un Airbus 380

<http://www.aircraftresourcecenter.com/> Auteur: Carl McGehee

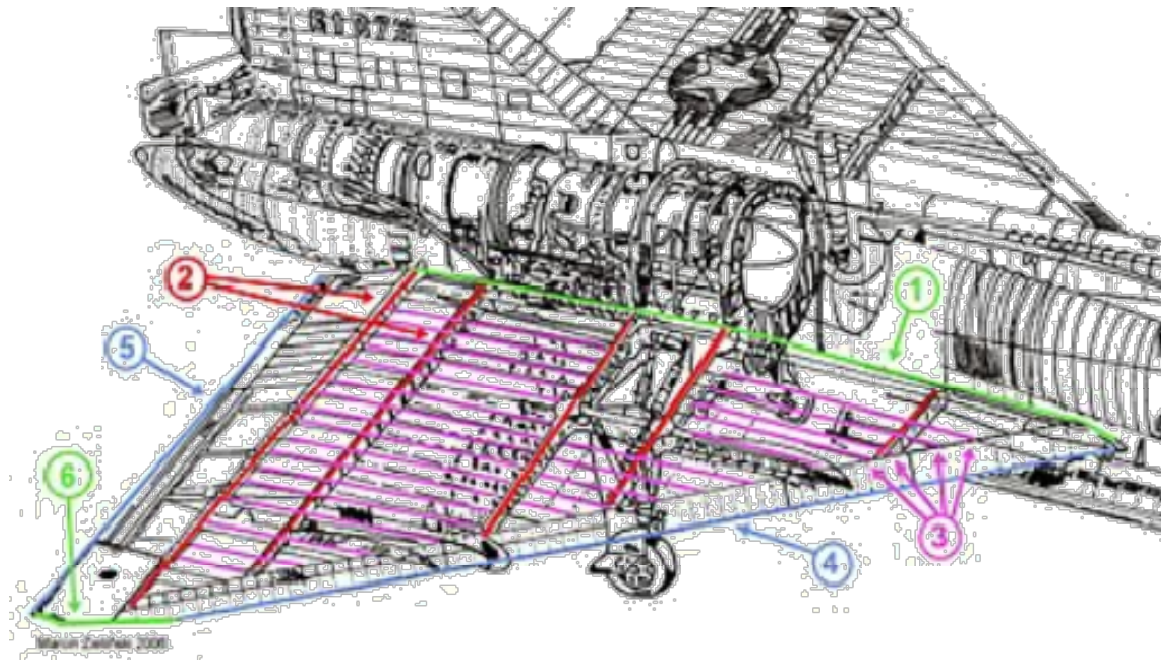
Ailes des Airbus A220 (avant 2020 : Bombardier CSeries)

Un des avions ayant une aile en composite



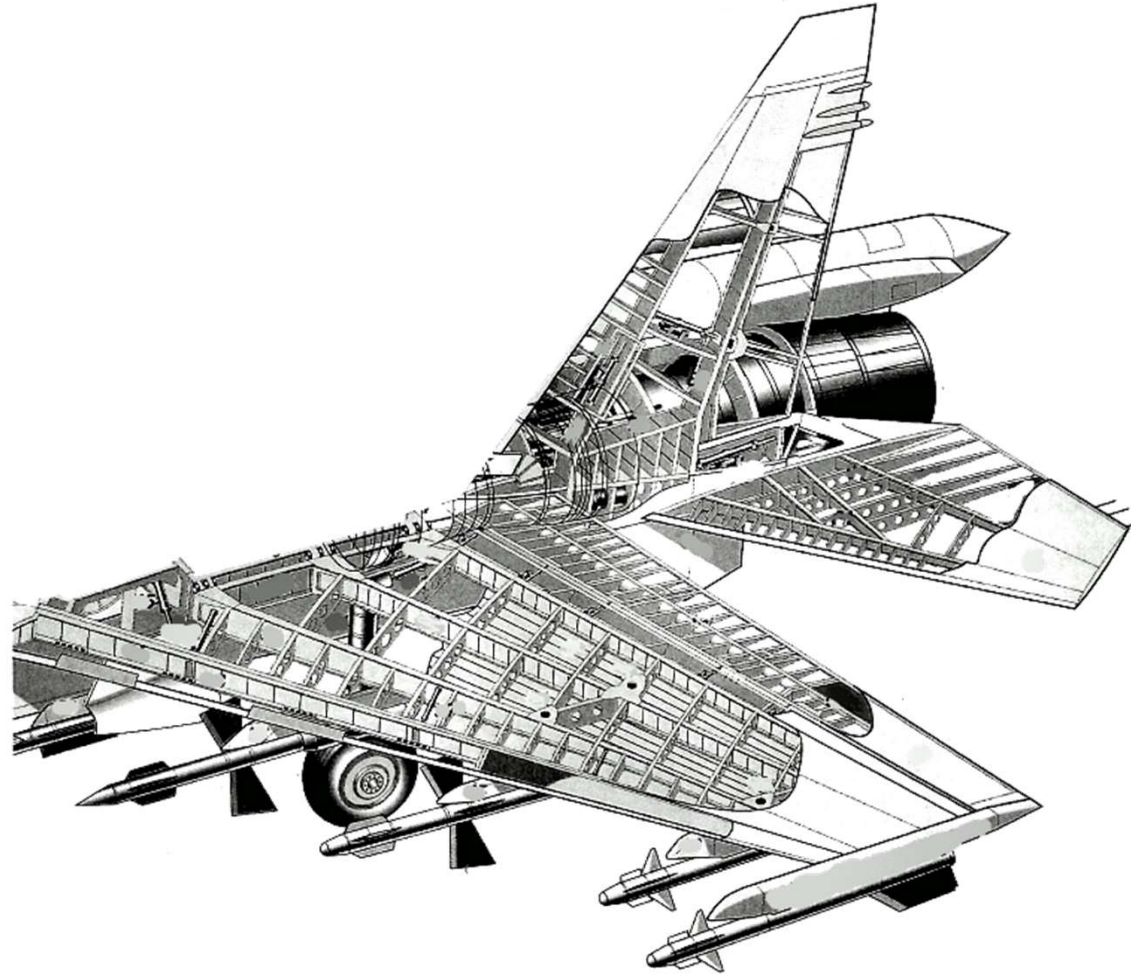
Structure d'une aile : avion de chasse

- la résistance de la structure doit être très forte : il y a plusieurs longerons (ici 5), mais assez minces.



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

Structure d'une aile : avion de chasse (Sukhoï 27)



<http://accrodavion.be/Accrodavions/lastructuredesavions6.html>

Structure d'une aile : avion de chasse (F35)



<http://accrodavion.be/Accrodavions/lastructuredesavions6.html>

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

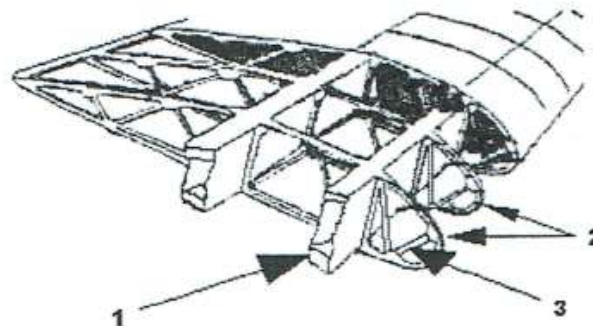
Pour un avion en bois et toile moderne :

- a) seules les ailes sont en bois recouvert toile.
- b) les longerons d'aile sont en bois et les nervures en alliage d'aluminium.
- c) toute la structure est en bois recouvert de toile.
- d) le fuselage est en bois entoilé et l'aile en alliage métallique.

3.10	Dans une aile d'avion, les pièces se situant dans le sens longitudinal de l'aile et assurant la plus grande partie de la résistance sont :
a)	les traverses.
b)	les longerons.
c)	les lisses.
d)	les raidisseurs.

Les éléments 1, 2 et 3 de la structure de l'avion représentée ci-contre sont :

- a) 1 : longeron – 2 : nervure – 3 : entretoise
- b) 1 : nervure – 2 : couple – 3 : lisse
- c) 1 : longeron – 2 : traverse – 3 : semelle
- d) 1 : couple – 2 : entretoise – 3 : traverse



3.11 - Le profil d'une aile est donné par :

- A. les longerons.
- B. les nervures.
- C. les lisses.
- D. les raidisseurs.

Ce module a été conçu et réalisé par un groupe de passionnés,
Merci à eux et nous avons utilisé de nombreuses sources et documents dont:

Productions de l'Académie de Bordeaux. Bernard GUYON, Stéphane MAYJONADE

<http://blog.crdp-versailles.fr/brevetinitiationaeronautique/>

<http://www.lavionnaire.fr/>

http://biacalais.free.fr/cours/Connaissance_Aeronefs-V2.pdf

Cours BIA Lycée Marie Curie et Aéroclub du Dauphiné. Grenoble.

Site commerciaux fabricants avion, hélicoptère, ULM, Voile ...

<https://fr.wikipedia.org>

Fiches de Laetitia Souteyrat

Fiches de Charles Pigaillem

Franck.cazaurang@ims-bordeaux.fr/1_Tech_Struct_Aero.pdf

<http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables>

<http://federation.ffvl.fr/pages/brevet-dinitiation-aeronautique-bia>