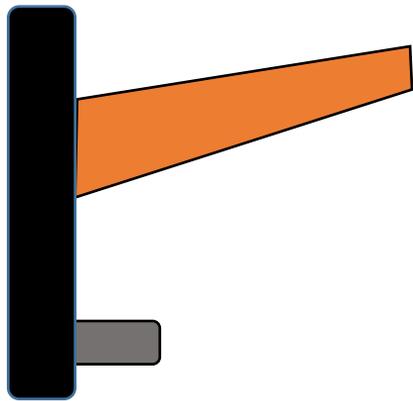


COURS n° 4

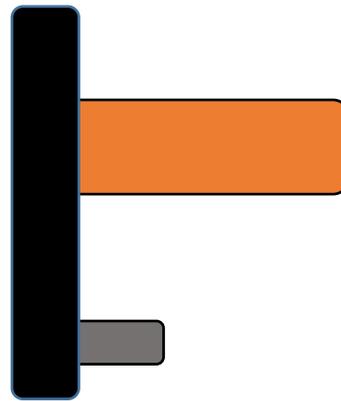
CARACTERISTIQUES D'UNE VOILURE

LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »

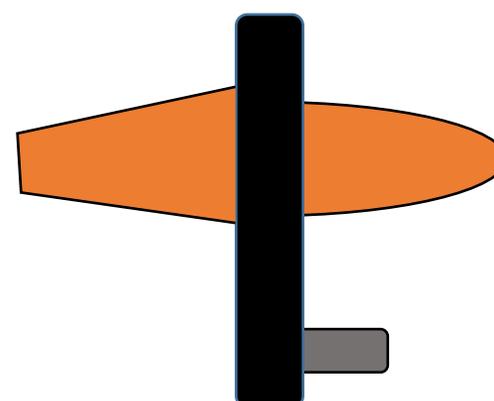
du moins stable ... au plus stable



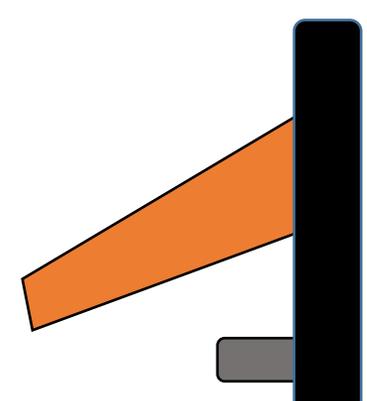
Trapézoïdale en flèche inversée



Rectangulaire

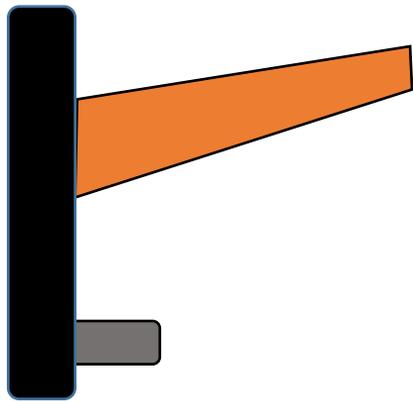


Trapézoïdale et Elliptique



Trapézoïdale en flèche

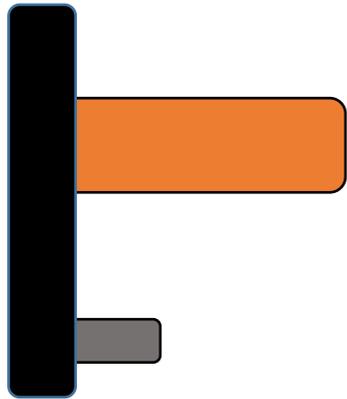
LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »



Trapézoïdale en flèche inversée



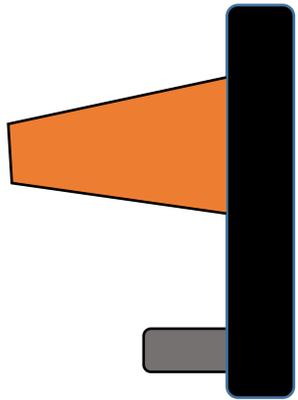
LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »



Rectangulaire



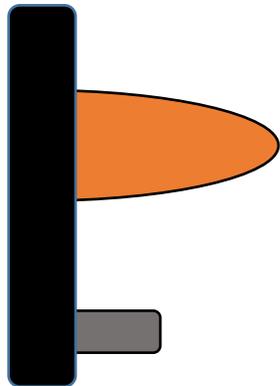
LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »



Trapézoïdale



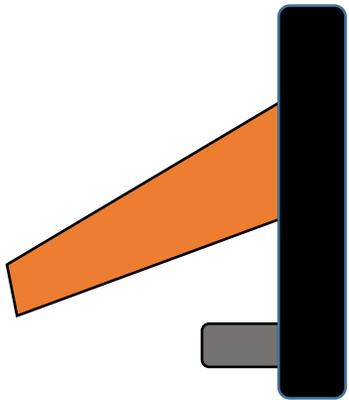
LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »



Elliptique



LES FORMES D'AILES : « Formule Classique »

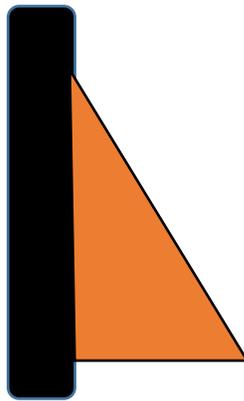


Trapézoïdale en flèche

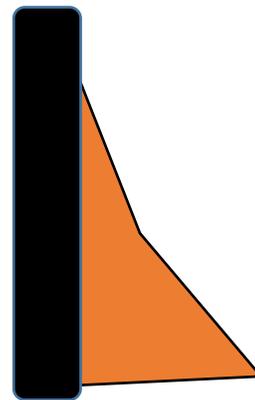


LES FORMES D'AILES : « Formule Canard »

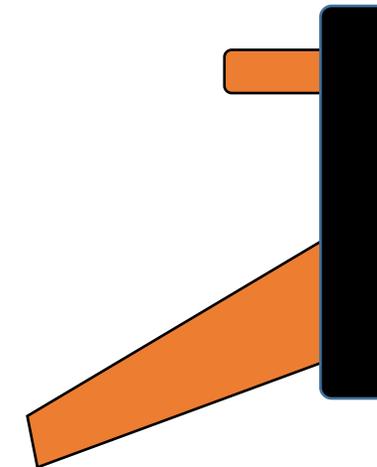
du moins stable ... au plus stable



Delta

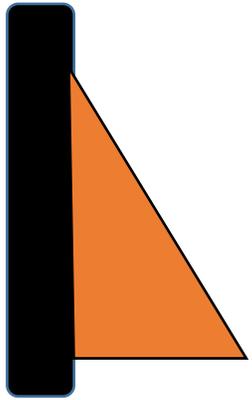


Gothique



Trapézoïdale en flèche

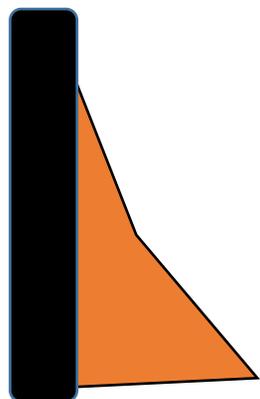
LES FORMES D'AILES : « Formule Canard »



Delta



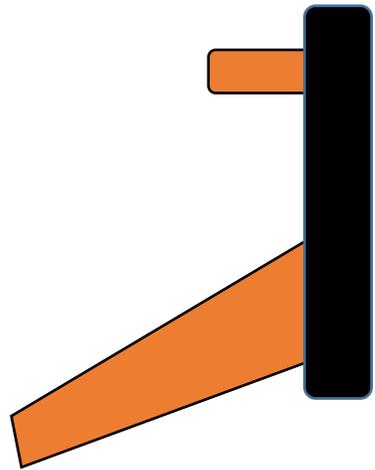
LES FORMES D'AILES : « Formule Canard »



Gothique



LES FORMES D'AILES : « Formule Canard »

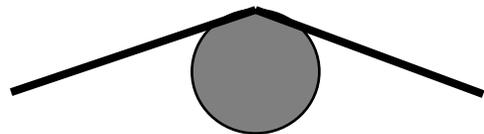


Trapézoïdale en flèche

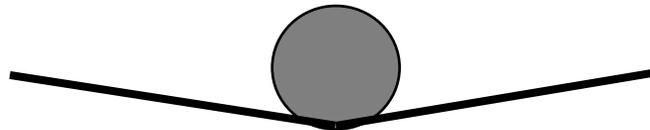


LES FORMES D'AILES :

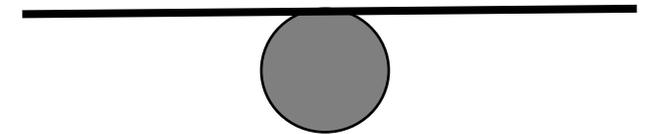
du moins stable ... au plus stable



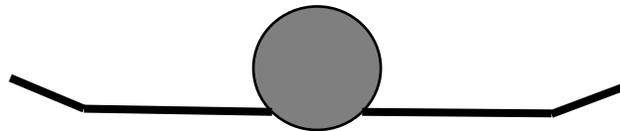
Haute
Dièdre négatif



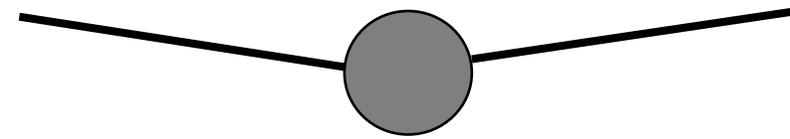
Basse
Dièdre positif



Haute
Dièdre nul

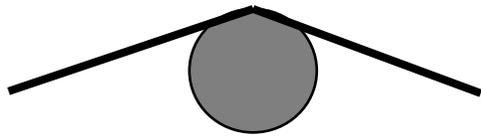


Basse
Dièdre en bout



Médiane
Dièdre positif

LES FORMES D'AILES :



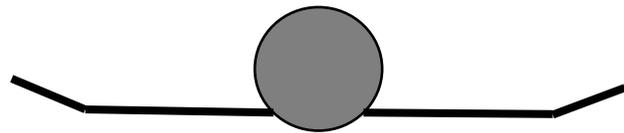
Haute
Dièdre négatif

Ici, le dièdre est l'angle formé par les 2 ailes, avec une pente vers le bas (comme un toit), c'est pour cela qu'on dit que le dièdre est négatif.



HAWKER
HARRIER

LES FORMES D'AILES :

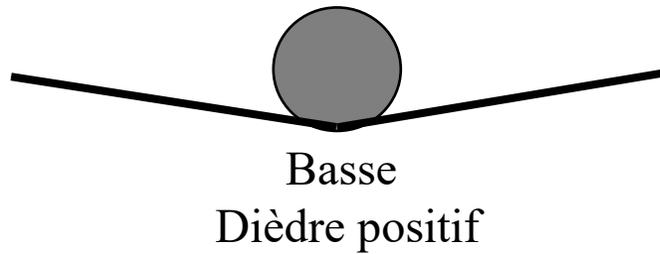


Basse
Dièdre en bout



ROBIN
DR400

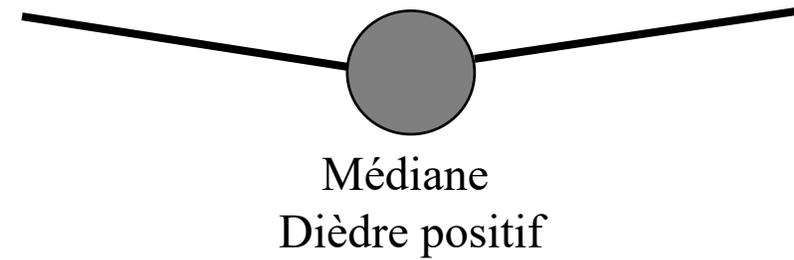
LES FORMES D'AILES :



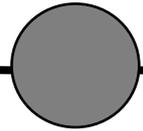
Ici, l'angle formé par les 2 ailes est ouvert vers le haut, c'est pour cela qu'on dit que le dièdre est positif.



LES FORMES D'AILES :



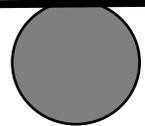
LES FORMES D'AILES :



Médiane
Dièdre nul



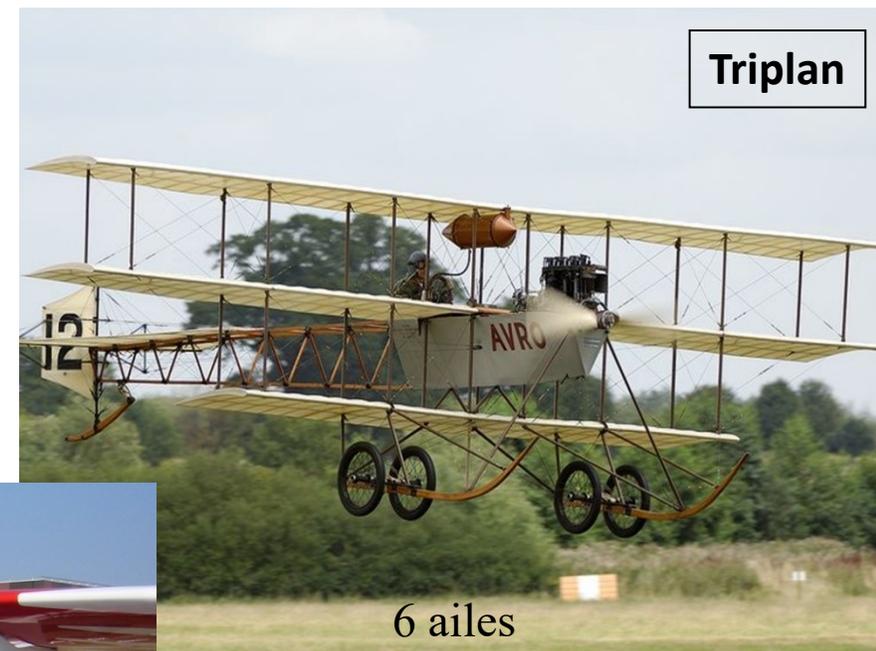
LES FORMES D'AILES :



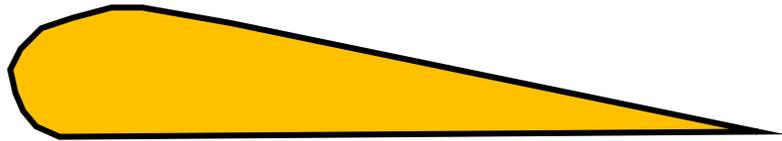
Haute
Dièdre nul



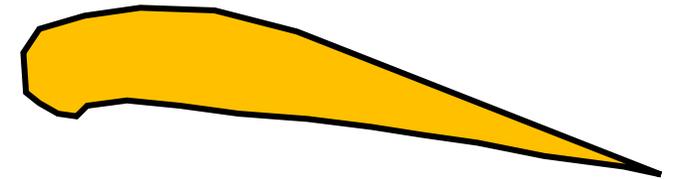
LE NOMBRE D'AILES :



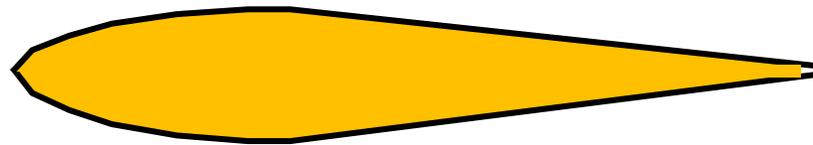
LES PROFILS D'AILES



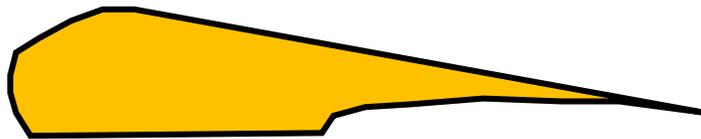
Plan - convexe



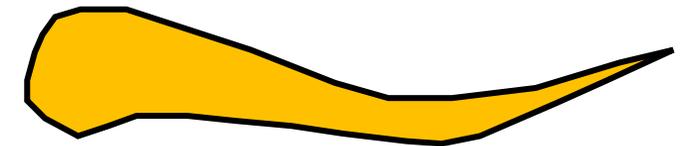
Creux



Symétrique biconvexe



Supercritique



Double courbure auto-stable

LES PROFILS D'AILES

Toutes choses égales par ailleurs :

- Une aile épaisse a plus de traînée qu'une aile fine
- Une aile épaisse décroche à une incidence plus forte qu'une aile fine
- Une aile épaisse est moins sensible au givrage qu'une aile fine
- Une aile à fort allongement a moins de traînée qu'une aile à faible allongement

LES DISPOSITIFS HYPO & HYPER SUSTENTATEURS

Il est avantageux de diminuer la vitesse d'atterrissage et, par conséquent, la distance d'atterrissage mais également de décoller le plus rapidement possible, à faible vitesse.

Pour cela, il est indispensable d'obtenir une **portance momentanément très élevée**.

Il a donc été mis au point des **organes auxiliaires à l'aile** qui ont pour but d'augmenter artificiellement la portance de l'aile lorsque cela est nécessaire, d'où leur nom de **dispositifs hypersustentateurs**.

Ils peuvent être classés en 2 familles :

- Ceux qui améliorent l'écoulement de l'air sur l'aile aux grandes incidences, en retardant l'apparition du décrochage : ce sont les **FENTES**.
- Ceux qui, modifiant la courbure des profils dans la portion d'aile qu'ils intéressent, entraîne une augmentation de la portance, sans modifier de façon notable l'incidence de décrochage : ce sont les **VOLETS**. [Flaps]

Il existe de nombreux modèles de dispositifs hypersustentateurs plus ou moins complexes ; nous décrirons les plus répandus.

LEURS OBJECTIFS

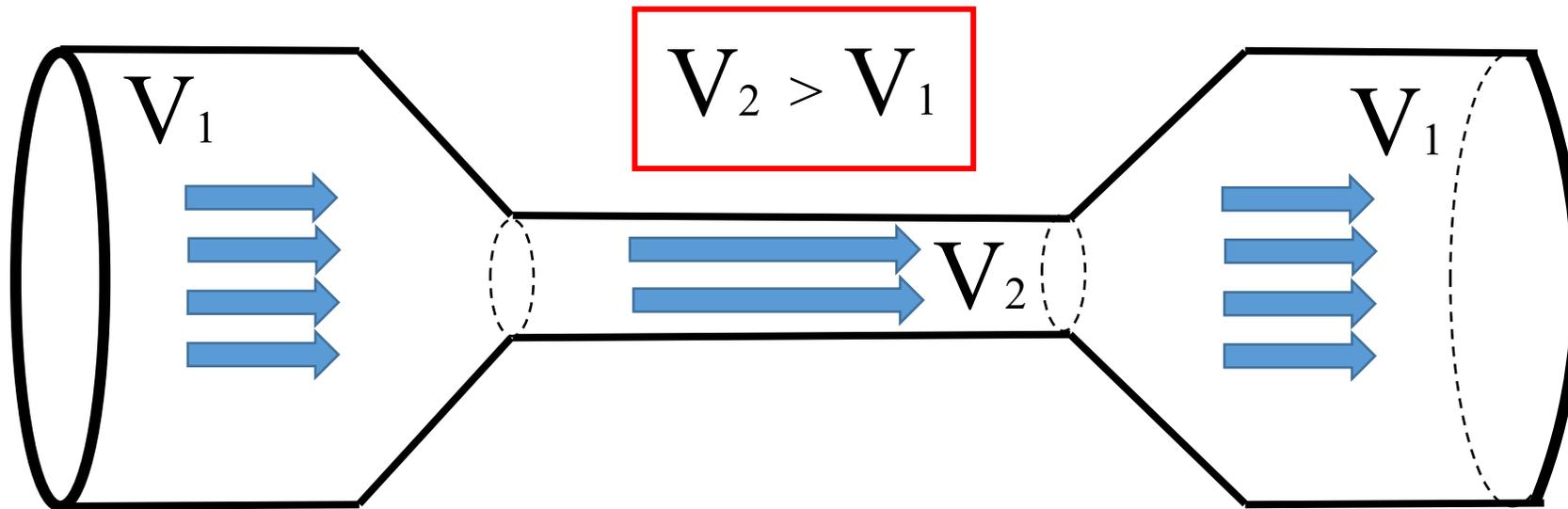
- Augmenter la portance à basse vitesse
- Diminuer la finesse (C_z / C_x) par augmentation de la traînée

LES MOYENS

- Augmenter la surface de l'aile
- Augmenter la courbure de l'aile
- Augmenter simultanément la surface de l'aile et la courbure de l'aile

L'EFFET VENTURI

Pour conserver le même débit, le fluide doit accélérer dans la portion rétrécie du conduit : c'est l'effet Venturi.



Deux illustrations de l'effet Venturi :

- ❑ Le Mistral est un vent qui souffle du nord vers le sud dans la vallée du Rhône où il est accéléré par effet Venturi entre les contreforts des Alpes et du Massif central.
- ❑ Si, pour faire sortir son troupeau de moutons dans le même laps de temps, le berger ouvre la porte de l'enclos à moitié, les moutons devront passer la porte deux fois plus vite (en admettant que les moutons ne passent pas les uns sur les autres).

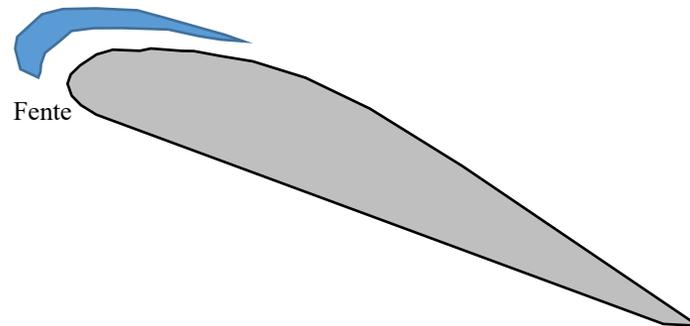
LES DISPOSITIFS A FENTES

Leur principe est de ménager, dans la partie avant du profil, un orifice convergent qui fait communiquer l'intrados et l'extrados.

Sur un profil d'aile classique, il existe un décollement des filets d'air sur l'extrados autour d'un angle d'incidence de 15° .

Un système à fente permet à l'air, qui s'introduit dans la fente, d'être accéléré par effet Venturi (loi de Bernoulli) et de communiquer son énergie à l'écoulement perturbé de l'extrados. Cela a comme effet de recoller les filets d'air sur une grande partie du profil faisant ainsi reculer vers l'arrière le point de décollement.

Ainsi, l'incidence de décrochage peut passer de 15° à 26° ou plus.



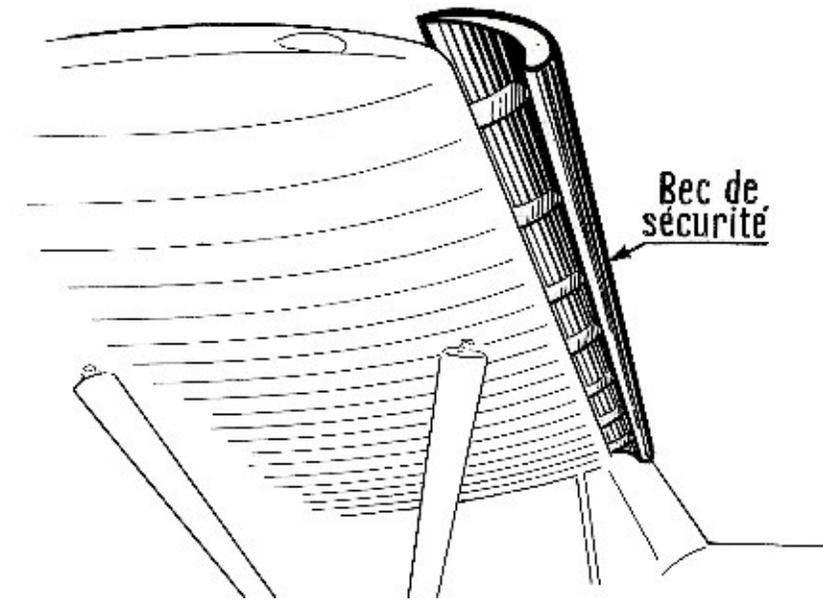
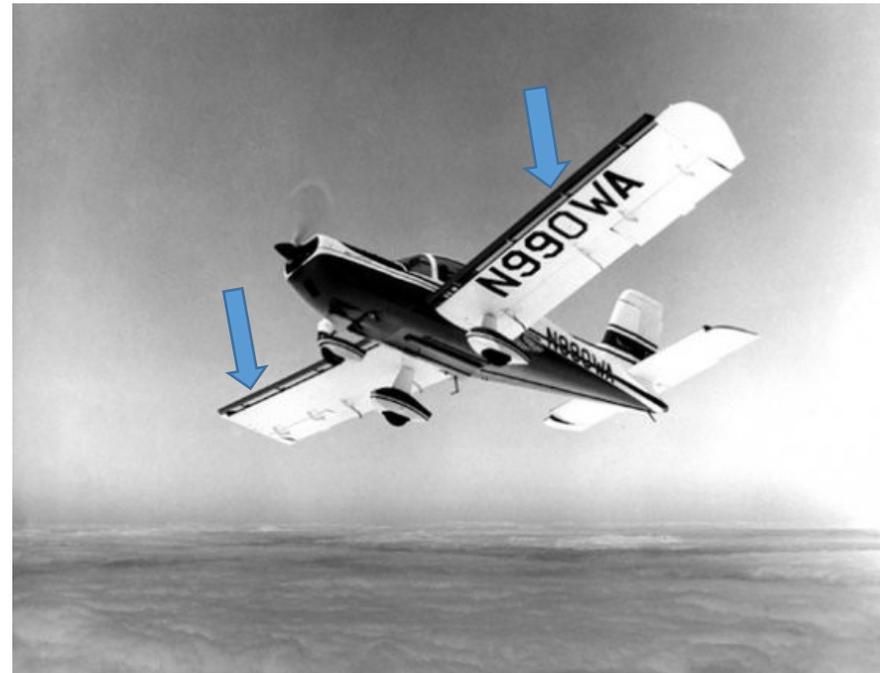
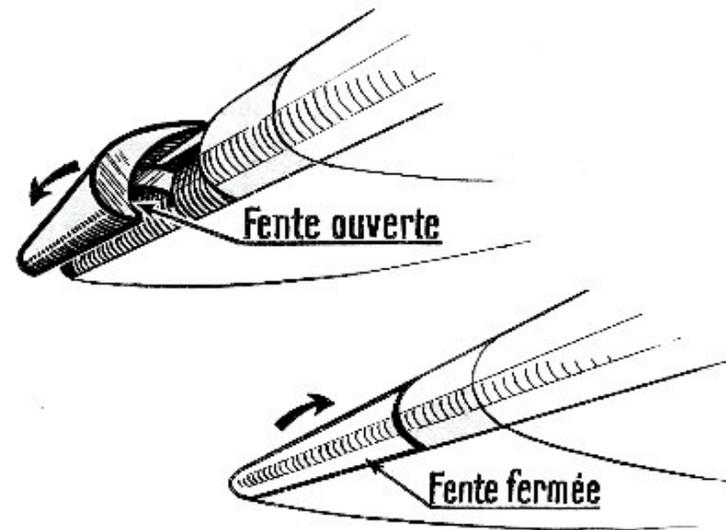
LES BECS

- ❑ Ce sont des **dispositifs du bord d'attaque**.
- ❑ Il en existe de plusieurs types : fixe, commandé, automatique
- ❑ Leurs effets :
 - ❑ Augmentation du C_z max
 - ❑ Augmentation modérée du C_x
 - ❑ Augmentation de l'incidence max

LES BECS

Plusieurs modèles ou types :

- Bec fixe : efficace à basse vitesse mais augmente la traînée à grande vitesse
- Bec automatique : reste en position rentrée à grande vitesse sous l'effet du vent relatif et sort automatiquement à basse vitesse par son propre poids
- Bec basculant commandé par le pilote
- Bec de sécurité à fente, fixe ou automatique
- Bec à fente et basculant (Handley Page)



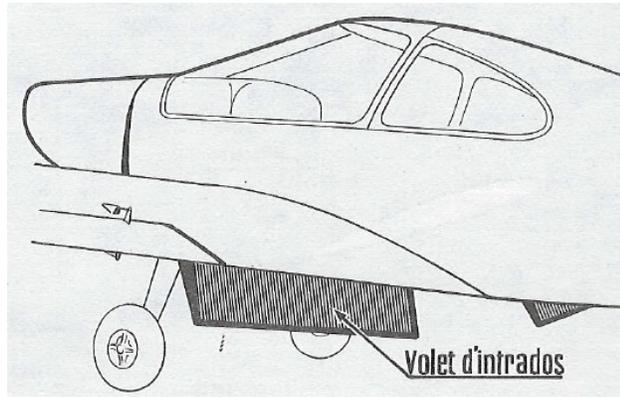
LES VOLETS

- ❑ Ce sont des **dispositifs du bord de fuite**.
- ❑ Il en existe de plusieurs types : volets d'intrados, volets de courbure
- ❑ Leurs effets :

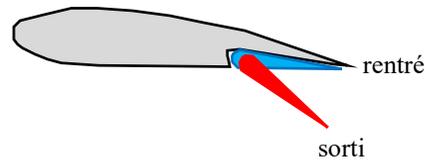
- ❑ Augmentation du C_z max
- ❑ Forte augmentation du C_x

LES VOILETS

Volet d'intrados

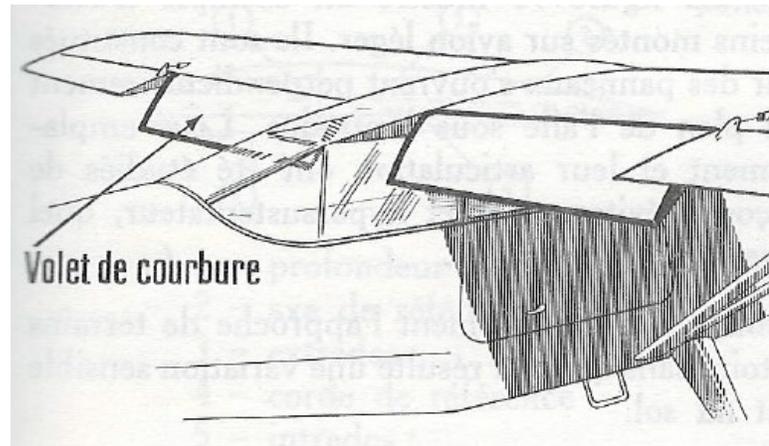


Volet mobile qui déforme l'intrados mais pas l'extrados

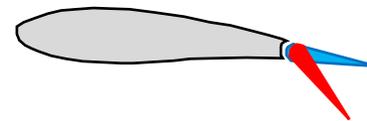


Volet de courbure

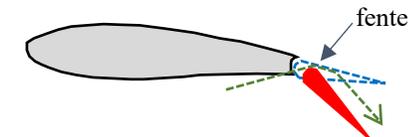
Augmentation de la courbure générale de profil



Volet de courbure ordinaire



Volet de courbure à fente simple

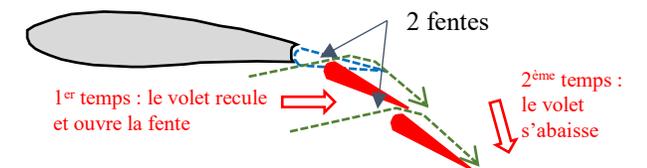


Le système du volet « Fowler » : (du nom de son concepteur, ingénieur américain qui mit au point les volets de courbure du *Constellation*)

Il combine un mouvement de translation et de rotation du volet qui commence par reculer derrière le bord de fuite puis qui pivote vers le bas en ouvrant une fente entre le bord de fuite de l'aile et l'avant du volet. Il en résulte une augmentation de la surface et de la courbure de l'extrados.

L'air qui circule dans la fente souffle l'extrados du volet et empêche le décollement prématuré des filets d'air sur celui-ci.

Si le volet est articulé en plusieurs parties, son déploiement ouvre plusieurs fentes.



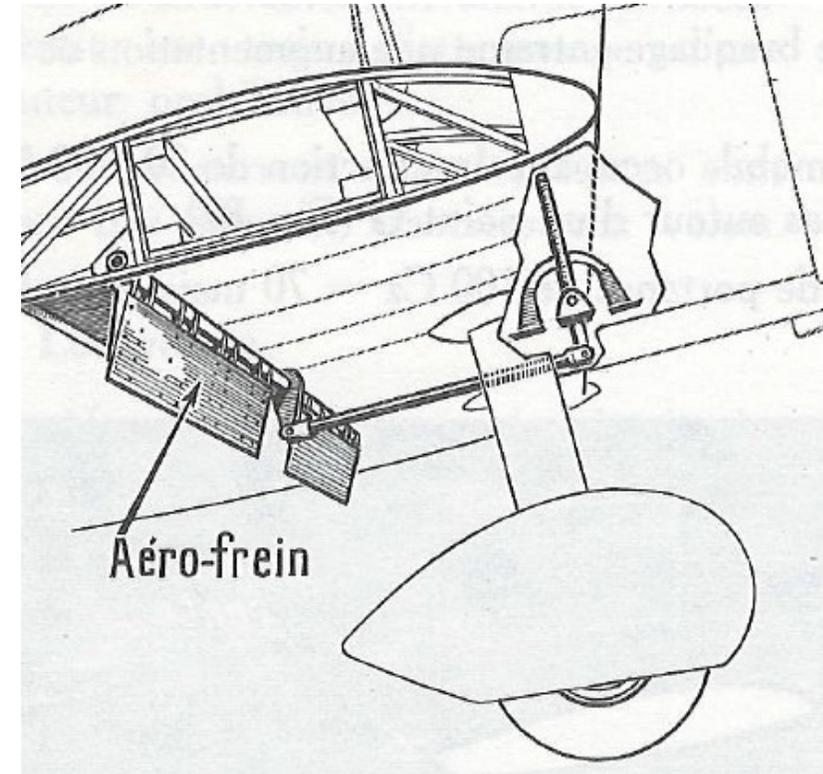
LES AEROFREINS

Leur objectif : Faire décroître la vitesse par freinage en augmentant la traînée.

Il en existe de plusieurs types, sous la forme de **plaques mobiles montées sur les ailes**, toujours **symétriquement** par rapport à l'axe longitudinal de l'avion, soit sur l'extrados, soit sous l'intrados.

En se soulevant sur l'extrados ou en s'abaissant sous l'intrados face au vent relatif, les aérofreins augmentent fortement la traînée.

LES AEROFREINS



Le pilote actionne les aérofreins (rentrés ou sortis) pour réduire la vitesse au cours de la phase d'atterrissage. Ce dispositif est courant sur les planeurs.

LES SPOILERS

Leur objectif : Faire décroître la finesse en dégradant la portance.

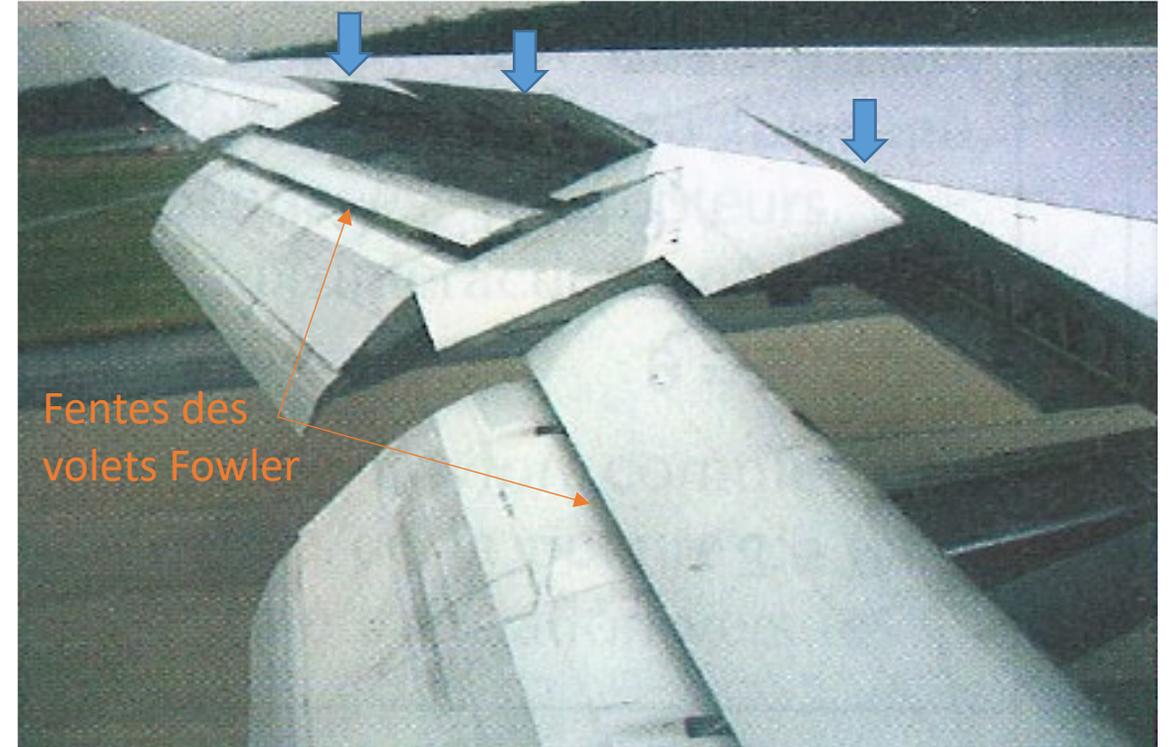
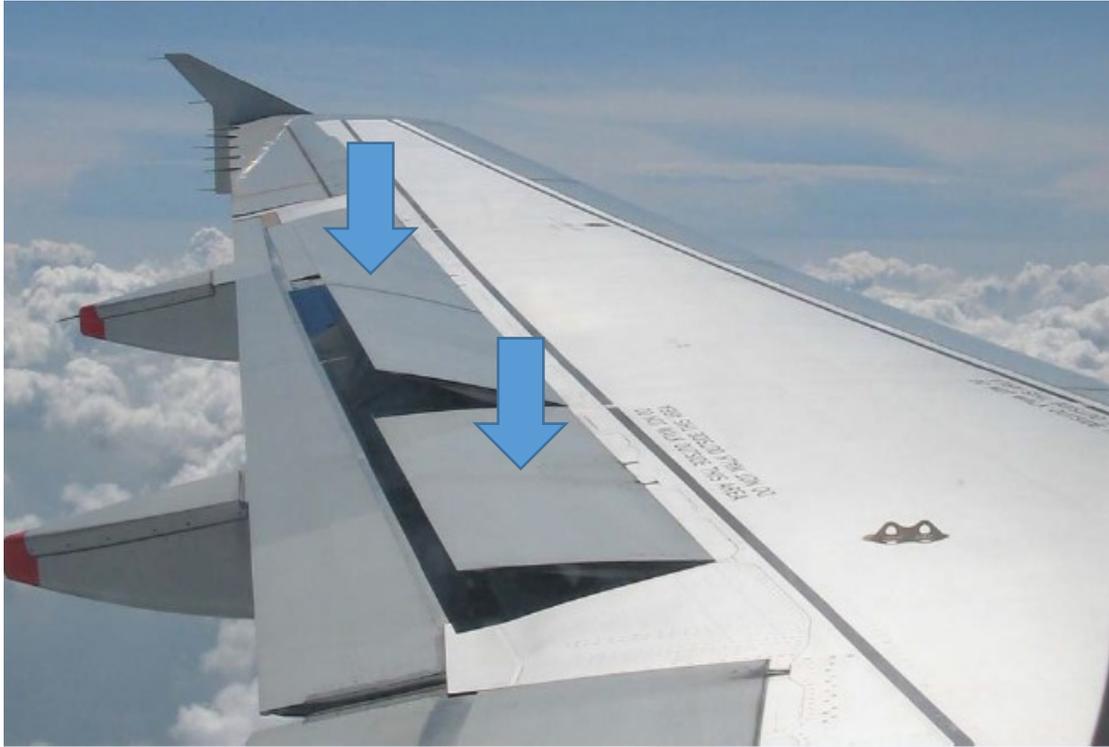
Ils dégradent fortement la portance et augmente la traînée.

On les appelle aussi des « destructeurs de portance » ou, pour les anglo-saxons, des « spoilers ».

Ils se présentent sous la forme de plaques mobiles montées sur les ailes, souvent sur l'extrados.

En se soulevant face au vent relatif, les spoilers diminuent la portance et augmentent la traînée, permettant le freinage mais également un contrôle du roulis.

LES SPOILERS



Le pilote actionne les spoilers (rentrés ou sortis) pour modifier la finesse de l'aile, éventuellement contrôler le roulis (sortie asymétrique) ou réduire la vitesse. Ce dispositif est courant sur les avions de ligne.

Photo de droite : exemple de freinage sur la piste après le toucher des roues à l'atterrissage

LES COMPENSATEURS

Leur objectif : **Diminuer les efforts aux commandes**

Les moyens:

- Les compensateurs de régime.
- Les compensateurs d'évolution.

LES COMPENSATEURS DE REGIME

Leur but : diminuer les efforts aux commandes en vol stabilisé

Ce sont des surfaces fixes ou articulées montées sur les gouvernes

- ❑ FLETNER : **dispositif fixe** souvent retrouvé sur la gouverne de direction. Il s'agit d'une petite plaque d'aluminium ou de contreplaqué fixée sur le bord de fuite de la gouverne.
- ❑ TAB ou TRIM : **dispositif mobile**, c'est-à-dire articulé, pratiquement constant sur la gouverne de profondeur : il est indispensable pour obtenir un pilotage très stable en croisière.

Les avions sophistiqués ont un système de TAB ou TRIM sur chacun des trois axes. Les TAB ou TRIM sont mis en œuvre par le pilote par le biais d'une chaîne de commande **mécanique** (câble) ou **électrique** (servo-commande).

LES COMPENSATEURS DE REGIME

TAB de direction : si la gouverne est braquée d'un côté, le petit aileron se braque dans le sens opposé et diminue l'effort du pilote pour maintenir la gouverne en position braquée.

TAB de la gouverne de direction: compensateur de régime sur l'axe de lacet

TRIM de la gouverne de profondeur : compensateur de régime sur l'axe de tangage

TRIM de profondeur : le pilote règle le braquage à piquer ou à cabrer du petit aileron en fonction de l'assiette et de la vitesse qu'il désire, ce qui diminue son effort aux commandes sur l'axe de tangage en vol stabilisé.



LES COMPENSATEURS D'EVOLUTION

Leur but : diminuer les efforts aux commandes lors des évolutions de l'avion autour de son centre de gravité

Ce sont soit des formes particulières de gouverne, soit des dispositifs additionnels fixes montés sur les gouvernes

- BEC ou CORNE de gouverne de direction ou de profondeur.
- PALETTES ou MASSELOTTES d'ailerons.

On les retrouve en particulier sur les avions de voltige qui sont très maniables et destinés à de fréquentes évolutions sur les 3 axes (tangage, roulis, lacet).

LES COMPENSATEURS D'EVOLUTION

Corne de gouverne de direction : si la gouverne est braquée d'un coté, le vent relatif appuie sur la corne supérieure de l'autre coté et diminue l'effort que doit faire le pilote sur le palonnier pour maintenir l'action en lacet

Corne de la gouverne de direction: compensateur d'évolution sur l'axe de lacet



Corne de la gouverne de profondeur : compensateur d'évolution sur l'axe de tangage

Corne de gouverne de profondeur : si la gouverne est braquée à piquer, le vent relatif appuie sur la corne supérieure et diminue l'effort que doit faire le pilote sur le manche pour maintenir la trajectoire



Palettes d'ailerons : compensateur d'évolution des avions de voltige sur l'axe de roulis

Les palettes d'ailerons: elles diminuent l'effort sur le manche en roulis à grande vitesse (tonneau voltige) et permettent de mieux contrôler l'arrêt du roulis en diminuant l'effet de vibration ou de « flutter »

DECOLLAGE & ATERRISSAGE

[Take off]

[Landing]

LE DECOLLAGE

Il comporte plusieurs phases successives :

[1] D'abord une **accélération** pendant la **phase de roulement** sur la piste, provoquée par la force de traction délivrée par le(s) moteur(s), jusqu'à ce que la vitesse qui permet la sustentation de l'avion soit atteinte. C'est la **vitesse de rotation**.

[2] Quand la vitesse de décollage est atteinte, le pilote effectue **la rotation** : il soulève le nez de l'avion pour afficher l'assiette de montée. L'augmentation de l'incidence qui accompagne cette manœuvre augmente la portance.

[3] Une fois que l'avion a quitté le sol, il continue d'accélérer sur sa trajectoire de **montée initiale**. Le décollage se termine quand l'avion dépasse une hauteur de 15 m (distance par rapport au sol).

N.B. : La distance de décollage peut être plus longue que la piste.

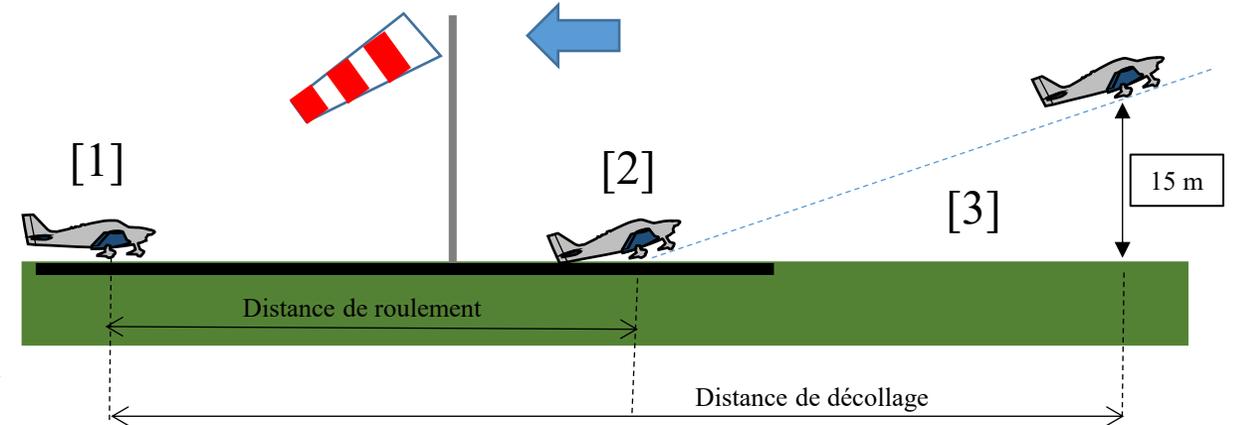
Pour améliorer la force du « vent relatif », **le décollage s'effectue face au vent** réel. Cela permet de diminuer la distance de décollage.

L'**utilisation des volets** permet également de diminuer la distance de décollage en améliorant le coefficient de portance C_z .

La distance de décollage augmente avec la **température** et l'**altitude** : quand l'air est chaud, il est moins dense ; ρ diminue aussi avec l'altitude.



La manche à air indique le sens et la force du vent



L'ATERRISSAGE

Il comporte plusieurs phases successives :

[1] L'avion descend le long d'un plan et sur un axe aligné sur la piste que l'on appelle la **finale**. Sa trajectoire est stabilisée à la **vitesse d'atterrissage**.

[2] Près du sol, le pilote réduit la pente pour raccorder sa trajectoire avec le plan horizontal du sol. On dit qu'il « **arrondit** » en modifiant progressivement l'assiette de l'avion à cabrer, en même temps qu'il réduit les gaz : cela a pour effet de réduire la vitesse et de faire décroître la portance jusqu'au toucher des roues sur la piste.

Le contact avec la piste se fait sur le **train d'atterrissage principal**, c'est-à-dire en gardant la roue avant au dessus du sol pour les avions à train tricycle.

N.B. : pour les avions qui ont une roulette de queue, on peut poser les trois roues en même temps.

[3] Le reste de la piste est utilisé pour la **décélération** de l'avion, éventuellement aidée par le freinage, jusqu'à une vitesse « contrôlée » qui permet de dégager la piste et de circuler dans la zone de manœuvre et le parking en toute sécurité.

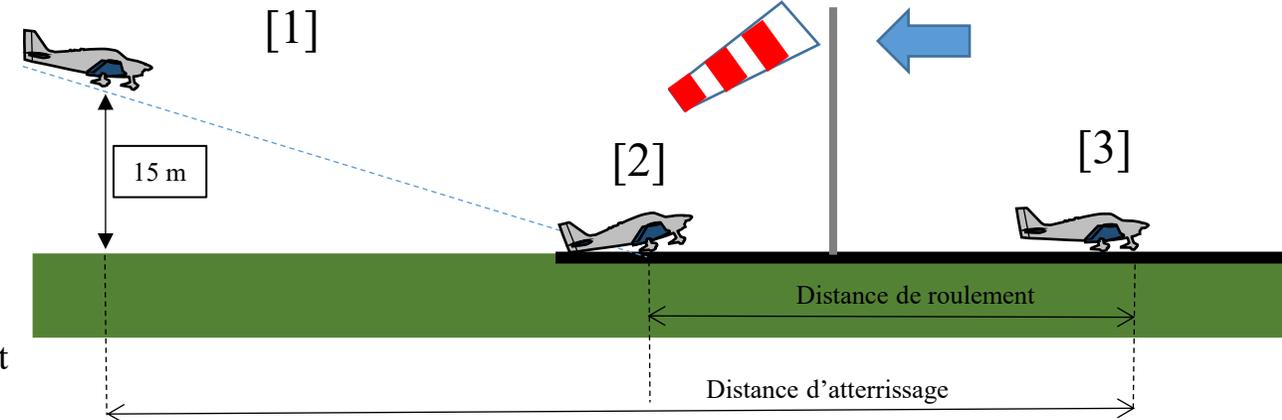
L'atterrissage **s'effectue face au vent**. Cela permet de diminuer la distance d'atterrissage.

L'**utilisation des dispositifs hypersustentateurs (volets, bords)** permet également de diminuer la distance d'atterrissage en améliorant le coefficient de portance C_z .

La distance d'atterrissage augmente avec la **température** et l'**altitude** : quand l'air est chaud, il est moins dense ; ρ diminue aussi avec l'altitude.



La manche à air indique le sens et la force du vent



LE FACTEUR DE CHARGE

[Load factor]

C'est une grandeur qui traduit l'effort appliqué à l'aile.

Son unité est le G.

$$n = \frac{\text{Portance (Fz)}}{\text{Poids de l'avion (P)}}$$

Plus n est grand, plus l'effort est important.



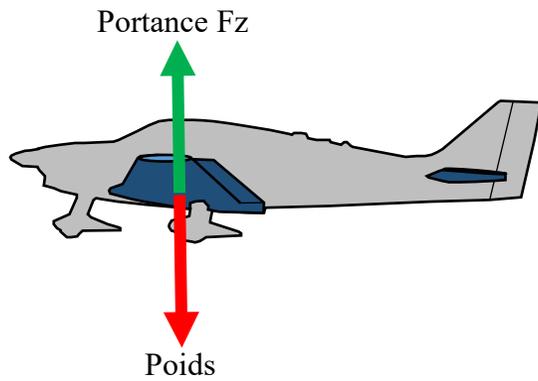
Au sol, l'accéléromètre affiche + 1 G (accélération de la pesanteur terrestre).

En vol, 0 G correspond à l'état d'apesanteur.

Quand le pilote subit une accélération qui l'écrase dans son siège (force de la tête vers les pieds), il subit une accélération positive : par exemple, + 3G.

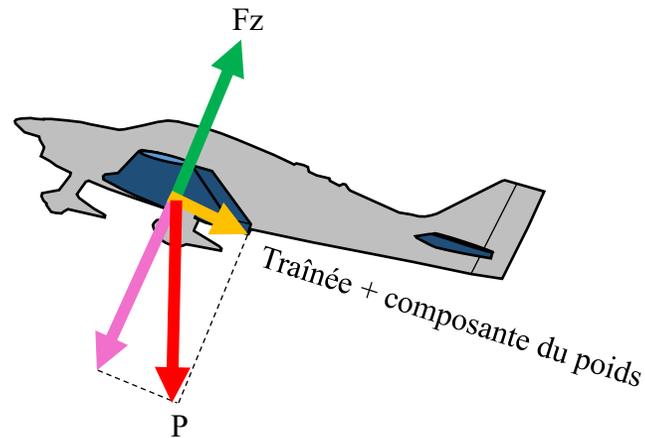
Quand l'accélération a tendance à le faire décoller de son siège, il subit une accélération négative : par exemple - 2G.

En palier rectiligne



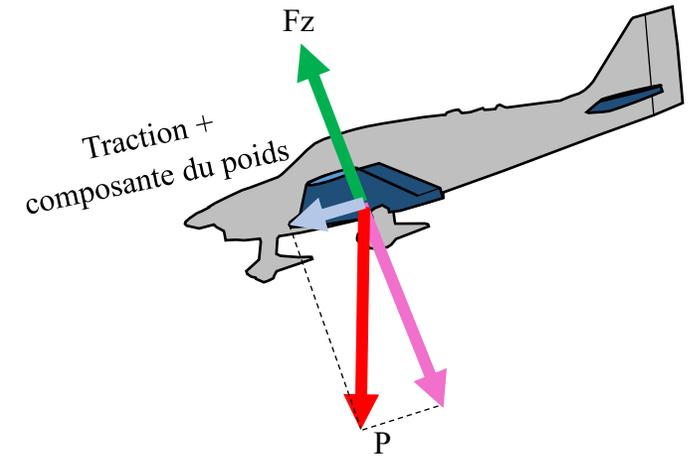
$Fz = P$ donc $n = 1$

En montée stabilisée



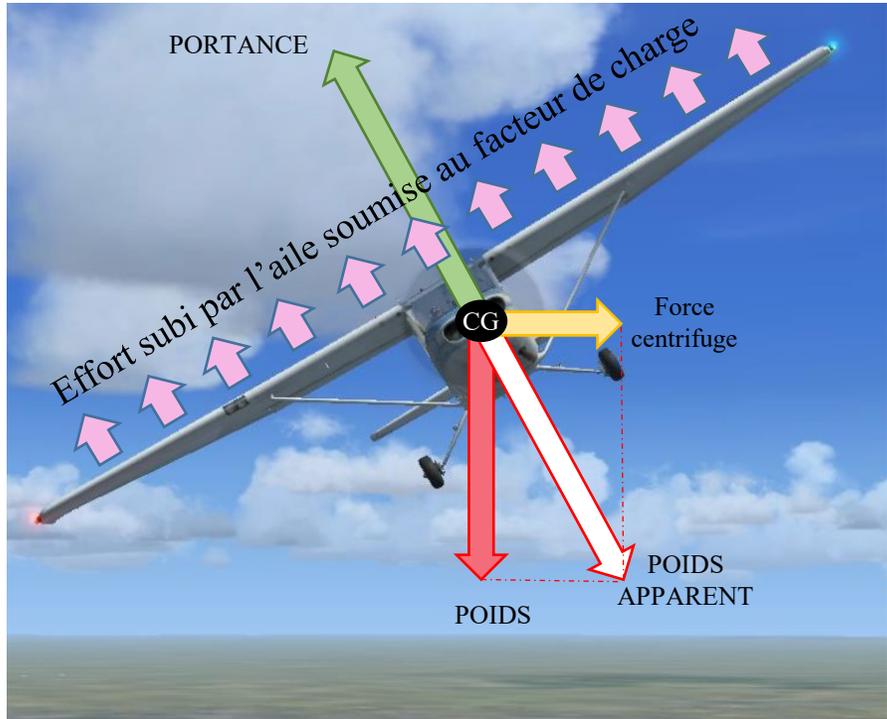
$Fz < P$ donc $n < 1$

En descente stabilisée



$Fz < P$ donc $n < 1$

En virage



$P_{apparent} > P$ donc $n > 1$

$$n = 1 / \cos \phi \quad (\phi = \text{angle d'inclinaison})$$

Par exemple : à 60° d'inclinaison, $\cos \Phi = 0,5$ donc $n = +2 G$

La grande composante du poids correspond au « poids apparent », c'est-à-dire celui subi par la structure de l'aile et par le pilote.

Subir +2G signifie avoir la sensation de peser 2 fois plus lourd pour le pilote, et une contrainte mécanique 2 fois plus forte sur les ailes pendant l'application du facteur de charge.

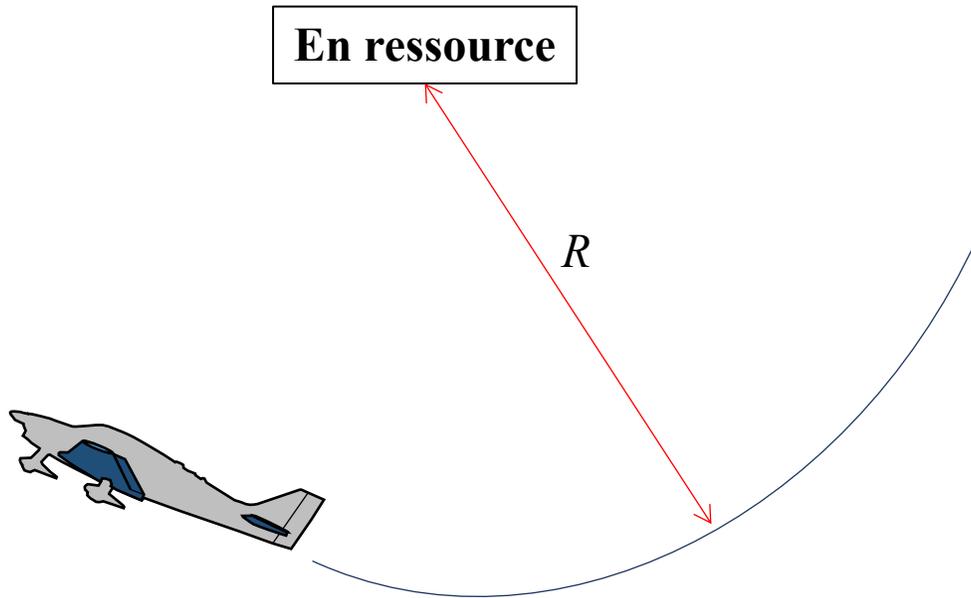
La vitesse de décrochage augmente avec l'inclinaison

$$V_s(\phi) = V_s(0^\circ) \times \sqrt{n}$$

Il faut donc adapter l'inclinaison du virage à la vitesse

Par exemple : à $\phi = 60^\circ$, la vitesse de décrochage est augmentée de 40% car $\sqrt{2} = 1,414$

La vitesse de décrochage (V_s) correspond à la vitesse en dessous de laquelle la portance s'annule car l'incidence de l'aile passe au-delà de l'incidence max. ; rappelez-vous qu'on peut faire varier la portance en modifiant la vitesse ou l'incidence mais chacune dans des sens opposés. Pour voler à faible vitesse, il faut une forte incidence, mais avec la limite de l'incidence max au-delà de laquelle l'aile décroche (cf. cours 2.1.2).



En ressource

$$n = 1 + V^2 / R \cdot g$$

R : rayon de courbure de la trajectoire

Le facteur de charge est :

❑ proportionnel au **carré de la vitesse** de l'avion.

et

❑ inversement proportionnel au **rayon de courbure de sa trajectoire**.

Le pilotage doit donc être souple avec des variations d'incidence de faible amplitude.

A RETENIR :

- Le facteur de charge modifie le « poids apparent » de l'avion et entraîne des **contraintes mécaniques** sur la structure de l'avion et sur ses ailes en particulier, ce qui provoque une fatigue des pièces en bois ou en métal.
- Tous les avions ont des **valeurs limites de facteur de charge** qu'ils peuvent subir sans risquer de se déformer ou de se rompre.
- Ces limites définissent le « **domaine de vol** » de l'avion. Par exemple +4G/-2G.
Ces valeurs sont précisées dans le **manuel de vol de l'avion**.
- Les actions de pilotage ne sont pas les seules à pouvoir déclencher un facteur de charge. En effet, des **turbulences atmosphériques fortes** peuvent provoquer des facteurs de charge importants (rafales verticales, convection puissante, cumulonimbus).
C'est au pilote de les éviter (prévisions météorologiques) ou de réduire sa vitesse de croisière en atmosphère turbulente.

CLASSIFICATION DES AERONEFS

Aéronef : Tout appareil qui peut se soutenir dans l'atmosphère grâce à des réactions de l'air autres que les réactions de l'air sur la surface de la Terre (18 SERA 17.12.2016).

Aérodyn : Tout aéronef dont la sustentation en vol est obtenue principalement par des forces aérodynamiques (OACI 9713,H26).

Aviation : Mode de locomotion utilisant les avions.

CLASSIFICATION DES AERONEFS

PLUS LOURDS QUE L' AIR
(Aérodynes)

Non motorisés

➤ Modèles réduits

➤ Cerfs-volants

➤ Planeurs ultralégers (PUL)

- Parachutes
- Parapentes
- Deltaplans

➤ Planeurs

Motorisés

➤ Modèles réduits

➤ Voilure fixe

- Avions
- Motoplans
- ULM multi-axe (< 500 kg)
- Para-moteur

➤ Voilures tournantes

- Autogires
- Hélicoptères
- Hybrides

PLUS LEGERS QUE L' AIR
(Aérostats)

Ballons

➤ Captif ou libre

➤ A air chaud

➤ A gaz (hélium)

Dirigeables

➤ A structure souple

➤ A structure rigide

➤ Propulsés

Classification des Ultra-Légers Motorisés
Classe 1 : Para-moteur
Classe 2 : Pendulaire
Classe 3 : Multi-axe
Classe 4 : Autogire
Classe 5 : Aérostát ultra-léger
Classe 6 : Hélicoptère ultra-léger

Cerfs-volants



Parachute



Planeurs Ultra-Légers
(PUL)



Deltaplane



Parapente

Planeurs



Modèles réduits



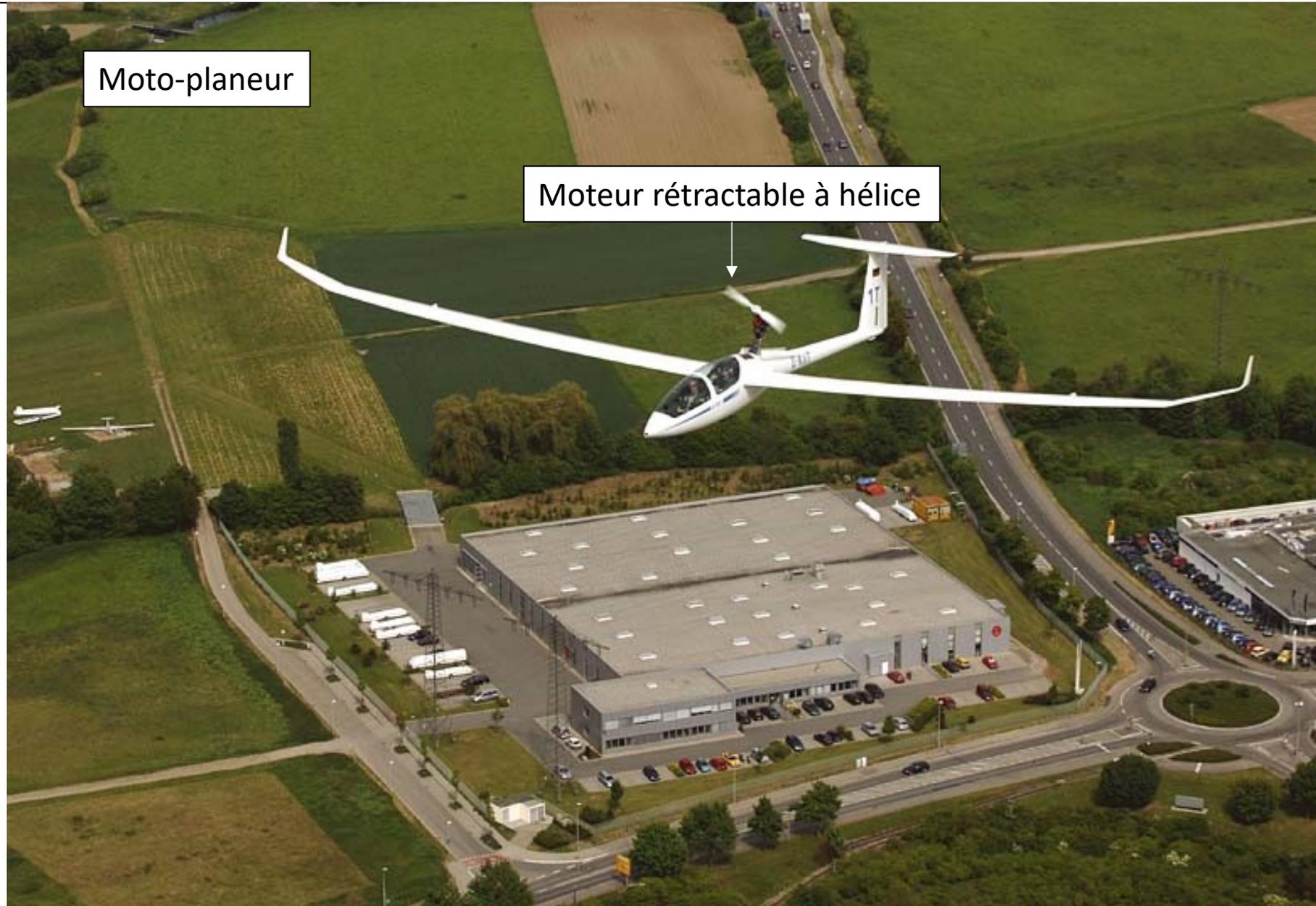


Avions

Réacteur

Hélice

CLASSIFICATION DES AERONEFS



Moto-planeur

Moteur rétractable à hélice



Ultra-Léger Motorisé (ULM) Multi-axe Classe 3

Para-moteur
ULM Classe 1



Moteur à hélice propulsive
à l'arrière du harnais



Le rotor est la voilure tournante qui assure la portance

Le moteur à hélice propulsive assure la vitesse relative dans l'air

Autogire
ULM Classe 4



Classe 1, le paramoteur



Classe 2, le pendulaire.



Classe 3, le multiaxe

Classe 4, l'autogire



Classe 5, l'aérostat ultra-léger



Classe 6, l'hélicoptère ultra léger



CLASSIFICATION DES AERONEFS



Hélicoptères



Hybride



Ballon captif (relié au sol)



Avant le départ d'une course de ballons libres

CLASSIFICATION DES AERONEFS

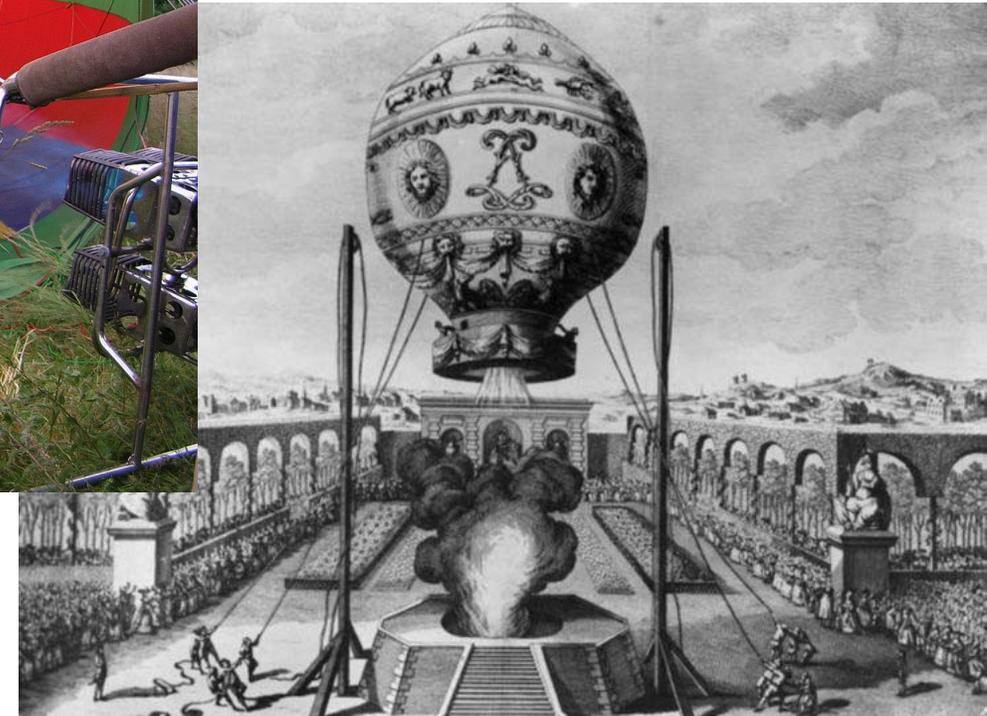


Ballons à air chaud



Le présent :
L'air est chauffé au brûleur à gaz

Le passé :
l'air était chauffé au feu de bois



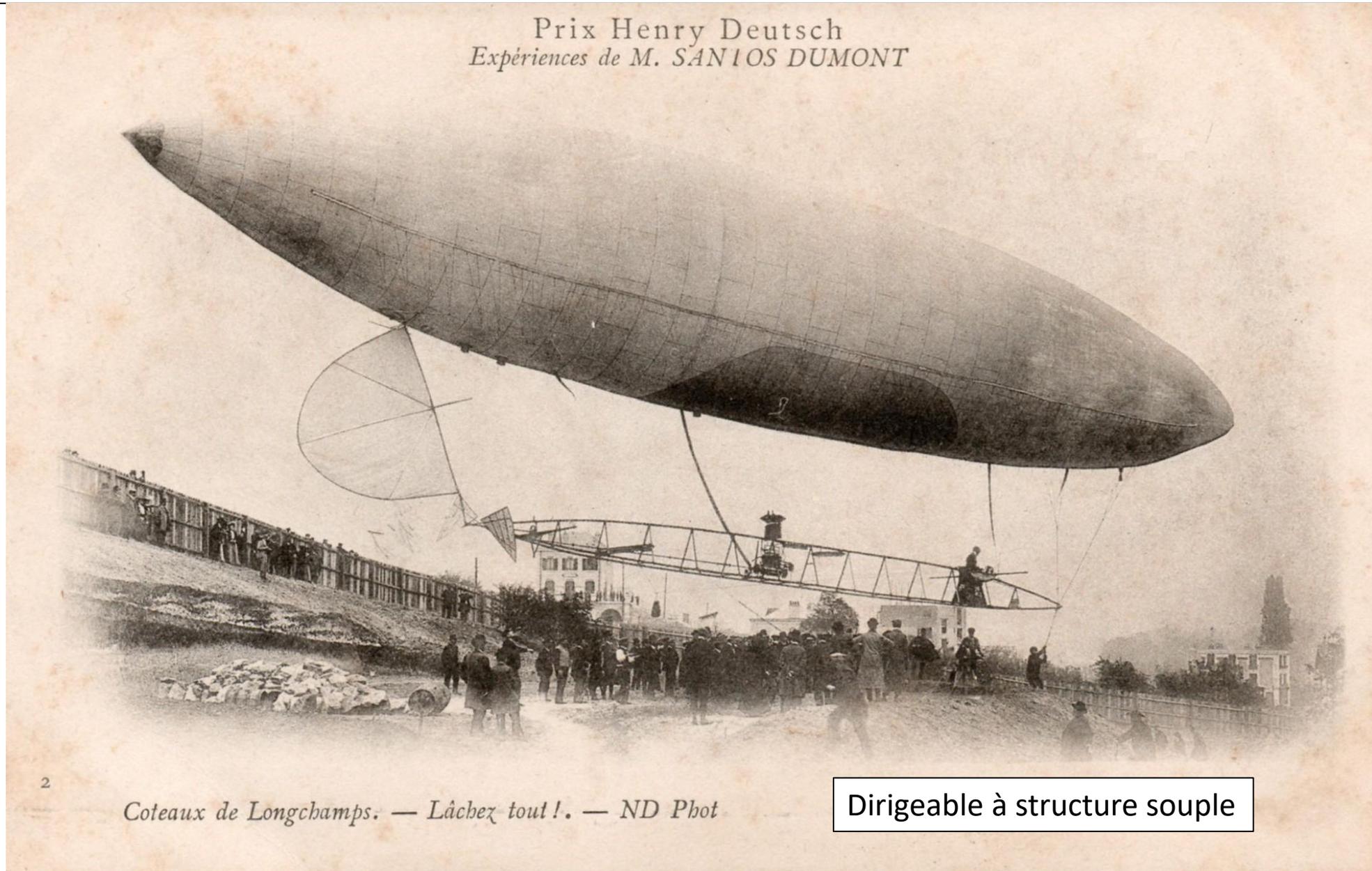


Ballon à gaz (hélium)



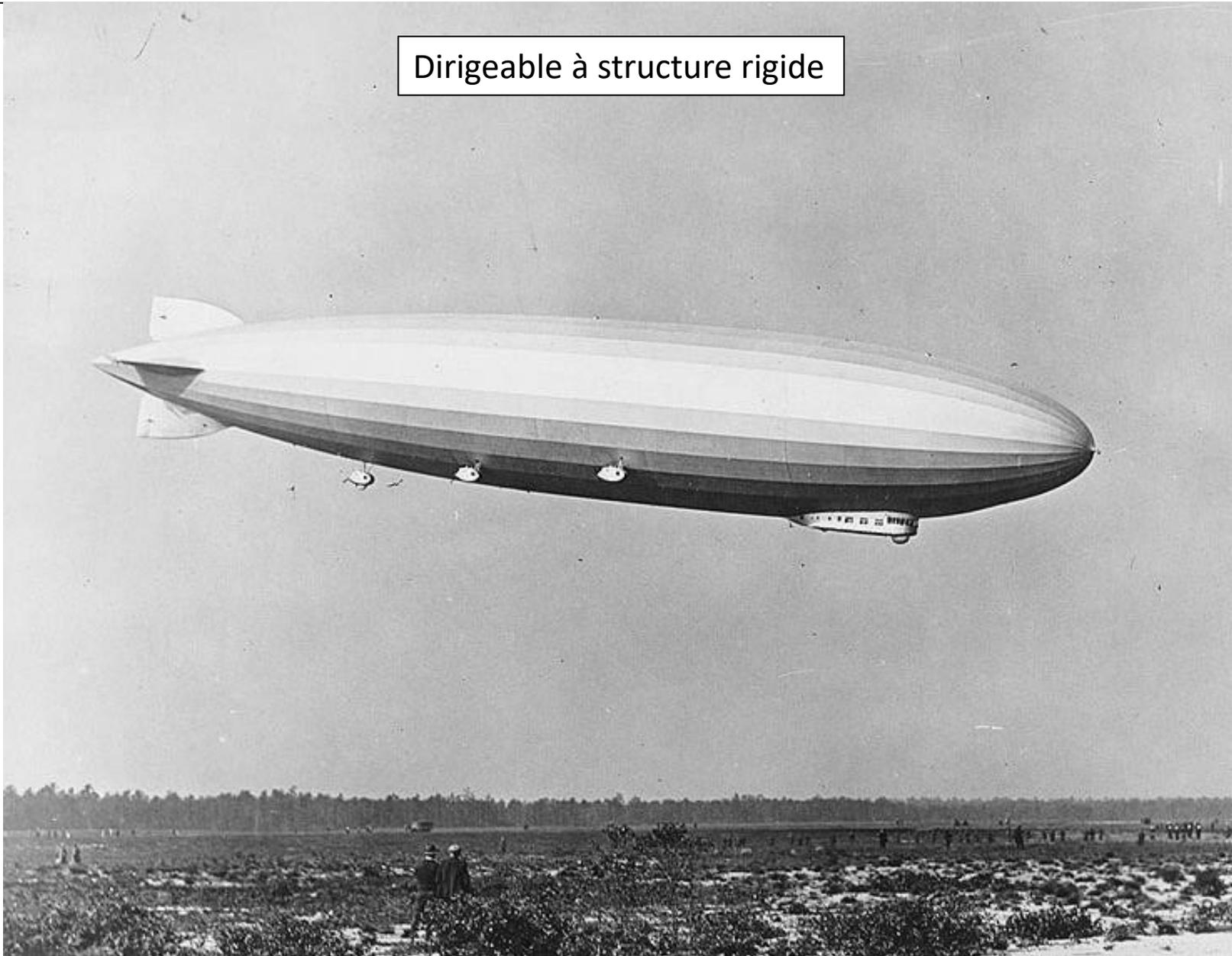
L'hélium est un gaz de faible densité et ininflammable contrairement à l'hydrogène qui a été abandonné depuis le dramatique incendie de l'Hindenburg.

CLASSIFICATION DES AERONEFS



CLASSIFICATION DES AERONEFS

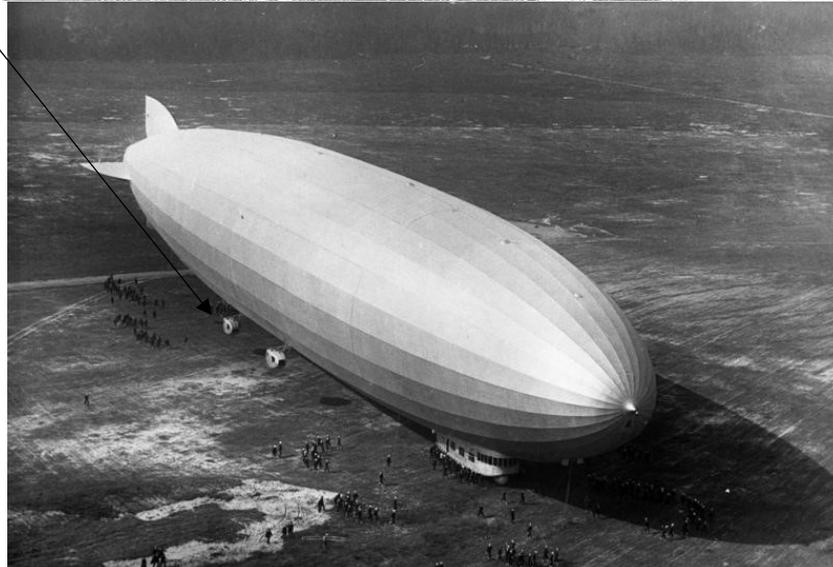
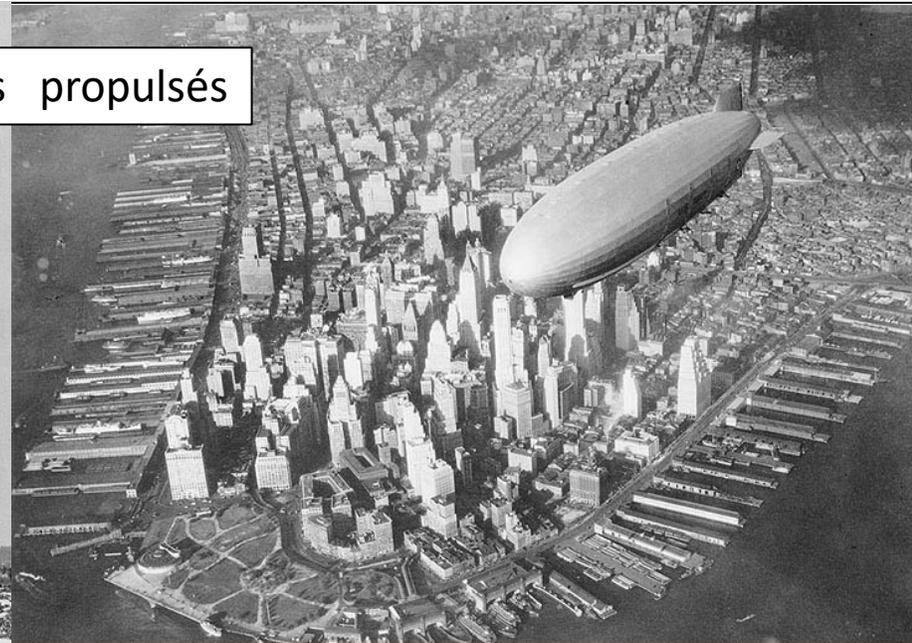
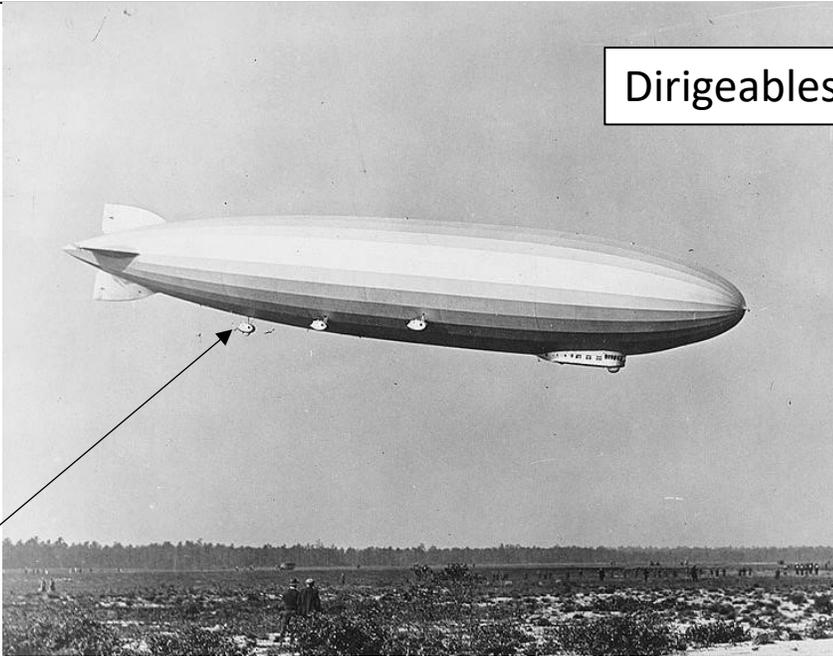
Dirigeable à structure rigide



CLASSIFICATION DES AERONEFS

Dirigeables propulsés

Moteurs



Bundesarchiv, Bild 102-12968
Foto: G. Ang. 1. Januar 1932



Moteur