

Chapitre 2 : AERODYNAMIQUE, AEROSTATIQUE ET PRINCIPES DU VOL



Force aérostatique



□ Définition de l'aérostatique

- Étude des gaz qui ne sont pas en mouvement (contraire de l'aérodynamique)
- Utilisation du « **Principe d'Archimède** » = principe de **flottabilité** dans l'air

Le plus léger monte 

Gaz utilisés dans l'aérostation

- **Masse Volumique MV** (= masse d'un litre de ce gaz) :

Gaz : Air	Air chaud	Gaz d'éclairage	Hélium	Dihydrogène
MV (en g/l) : 1,3	1,1	0,5	0,2	0,1

1 litre d'air pèse
1,3 grammes

« Gain »
de 0,2 g/l

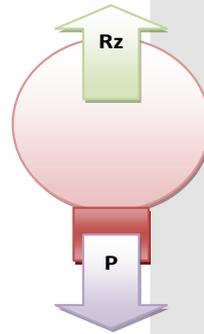
Exemples :
gaz de houille,
méthane

Inerte et très léger
mais **coûteux**

Gaz très
inflammable

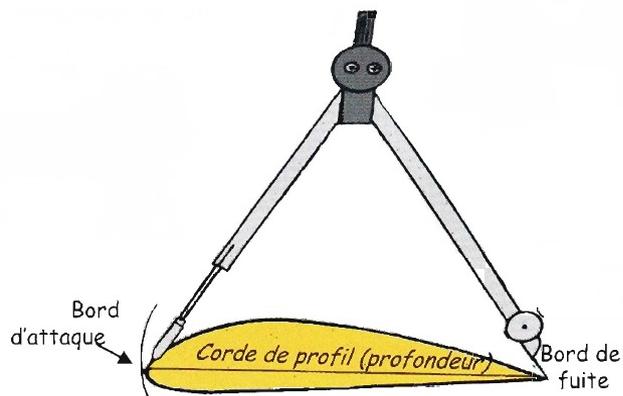
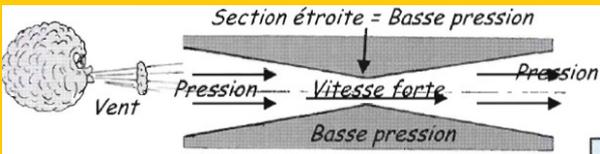
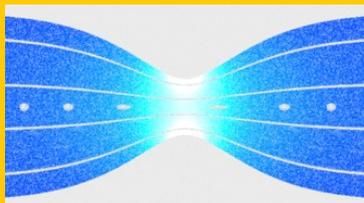
Calcul de la masse maxi du ballon (MMB)

- La portance aérostatique R_z compense le poids P du ballon
- **Masse Maxi du Ballon** = (**MasseVolExt** – **MasseVolBallon**) x **VolumeBallon**
- Quand la **température extérieure augmente**, la force ascensionnelle **diminue** (car MVE diminue)
- **Exemple** : Volume de la montgolfière gonflée, $V_B = 10\ 000\ m^3$
Masse volumique de l'air extérieur : $MVE = 1,225\ kg/m^3$
Masse volumique de l'air chauffé du ballon : $MVB = 1,1\ kg/m^3$
- Réponse : **$MMB = (1,225 - 1,1) \times 10\ 000 = 0,125 \times 10\ 000 = 1\ 250\ kg$**



P

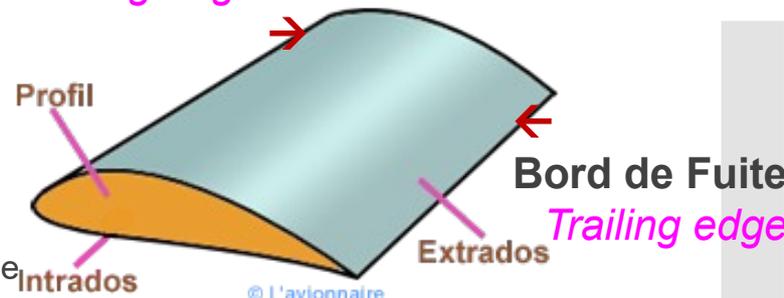
Déplacement dans un fluide



□ Définitions et vocabulaire

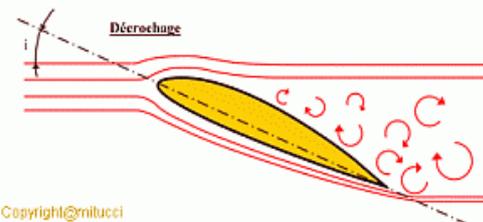
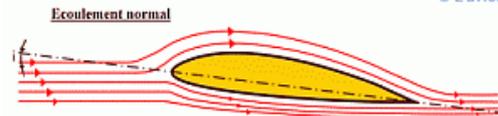
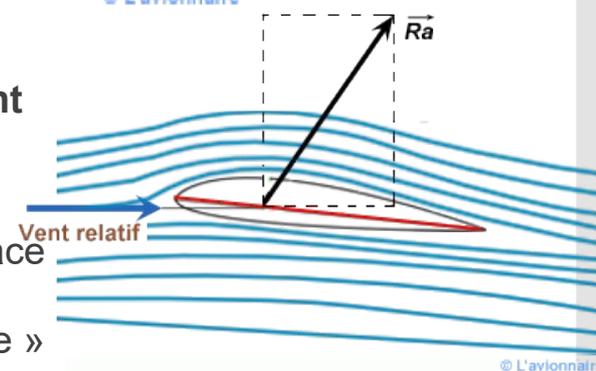
- **Aérodynamique** : étude des gaz qui sont en mouvement (contraire de l'aérostatique)
- Vocabulaire de l'aile *wing* :
 - ✓ **Extrados et intrados**
 - ✓ **Profil airfoil** : coupe verticale de l'aile
 - ✓ **Bord d'attaque et bord de fuite**
 - ✓ **Corde** de profil : ligne joignant
- **Vent relatif VR** : attaque l'aile **parallèlement**

Bord d'Attaque
Leading edge



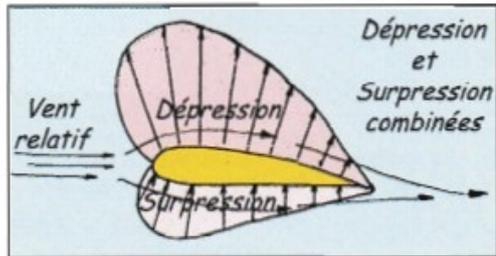
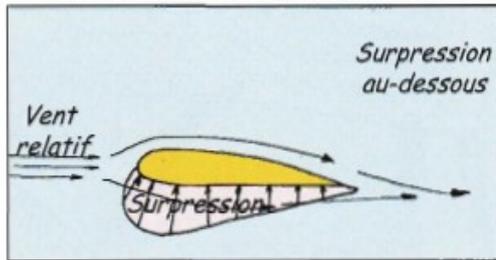
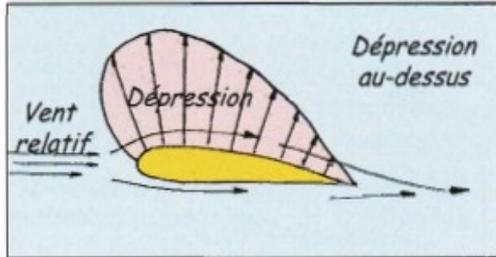
□ Équation de Bernoulli

- Résistance de l'air proportionnelle à la surface
- **Effet Venturi** : « Plus les molécules d'air vont vite, moins elles appuient sur la surface »
- **Pression** + $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot V = \text{constante}$
- Chemin au-dessus de l'aile plus long :
 - ✓ → air plus rapide sur l'extrados
 - ✓ → dépression plus forte au-dessus
 - ✓ → **résultante aérodynamique** « Ra »



P

Force aérodynamique



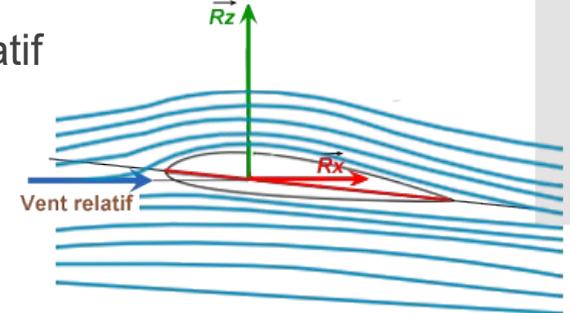
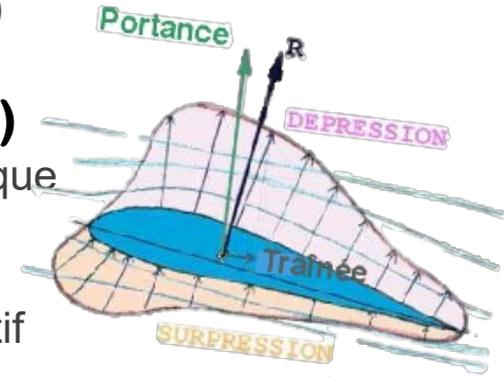
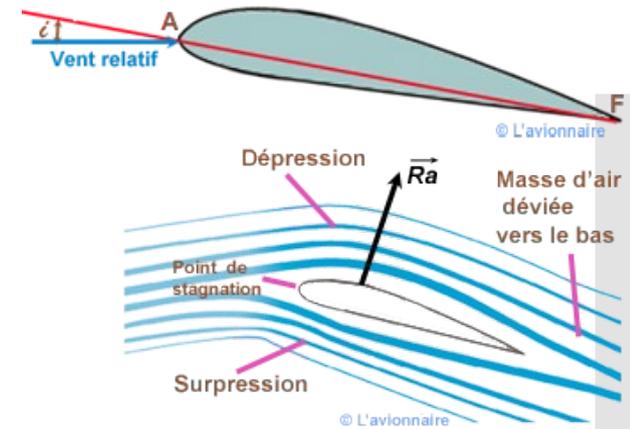
Conséquences du vent relatif

- **Vent relatif VR** « attaque l'aile » = parallèle à la trajectoire mais de direction opposée
- Forme un **angle d'incidence i** avec le profil de l'aile
- Sur l'extrados : **dépression** (75 %)
- Sur l'intrados : **surpression** (25 %)

Résultante aérodynamique (R_a)

- Apparition d'une force aérodynamique
- Décomposée en deux forces :
 - **Traînée R_x drag** vers l'arrière, parallèle au vent relatif
 - **Portance R_z lift** vers le haut, perpendiculaire au vent relatif

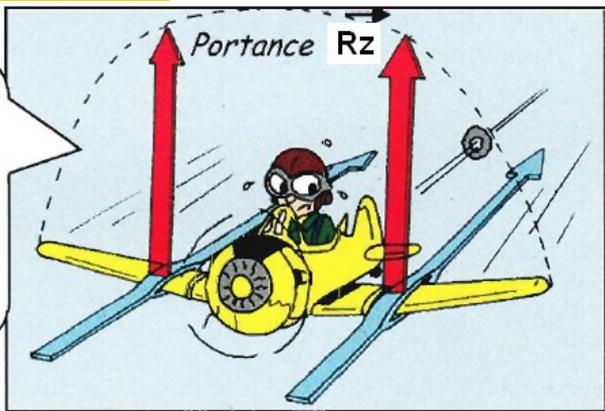
« La portance est une fleur qui naît de la vitesse »
 Capitaine Ferdinand FERBER
 (1862-1909)



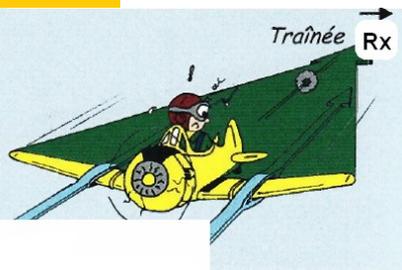
P

Formule de la portance

La force de portance s'applique en un point de la corde de profil, appelé *centre de poussée*. Il est situé, le plus souvent, dans le tiers avant de la *corde*.



La formule est du même type pour la **Traînée** :

$$R_x = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$$


Masse volumique de l'air (ρ)
→ dépend des température, pression...

$$R_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z$$

Rh \hat{o}

Vitesse Surface

Coefficient de Portance

Coefficient de portance
→ dépend du profil d'aile et de l'incidence

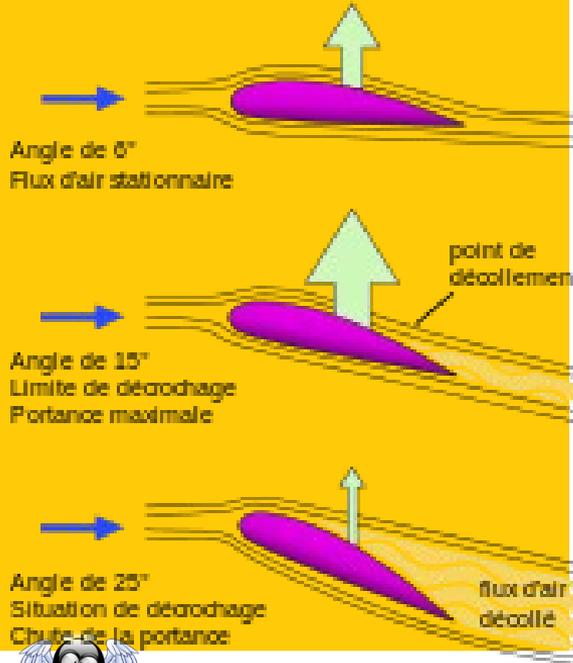
Vitesse de l'aéronef
→ c'est la vitesse dans la masse d'air

Surface alaire
→ modifiable avec des dispositifs hyper-sustentateurs

Incidence et décrochage

VENT RELATIF

PORTANCE

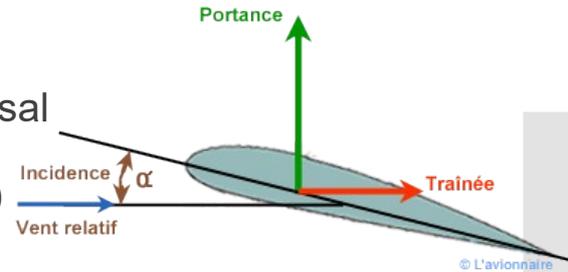


Angle d'incidence *Angle of Attack*

- α ou i *AoA*, angle autour de l'axe transversal

(axe traversant l'avion de gauche à droite)
entre **corde de l'aile et vent relatif**
(trajectoire)

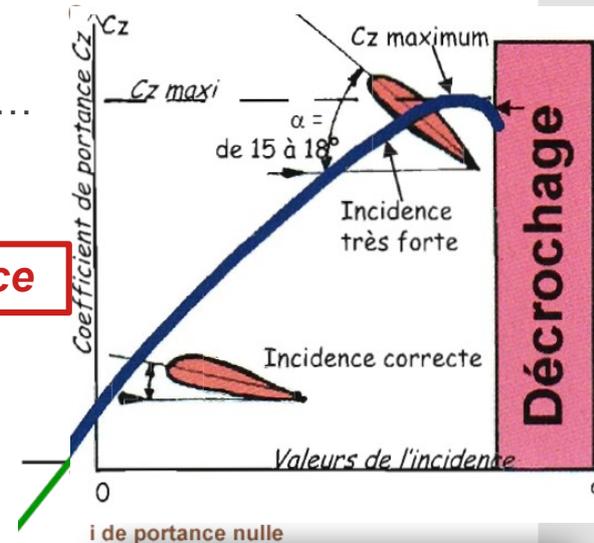
- Quand α augmente, la **portance lift** R_z
(et la **traînée drag** R_x) augmentent aussi...



Decrochage *stall* :

se produit toujours à la même incidence

- ...Jusqu'à l'**angle de décrochage**
stall angle (environ 15 à 20°)
- Décollement des filets d'air de l'aile
Écoulement tourbillonnaire de l'air
- Diminution brutale de la portance
- Déclenchement sonore et/ou lumineux de
l'avertisseur de décrochage
stall warning indicator
- Tremblements de l'avion = *buffeting*
- Enfoncement ou basculement
brutal de l'avion = **abattée vers l'avant**
(l'arrière de l'aile décroche d'abord)



Source : Photo ONERA, H.Werlé

P

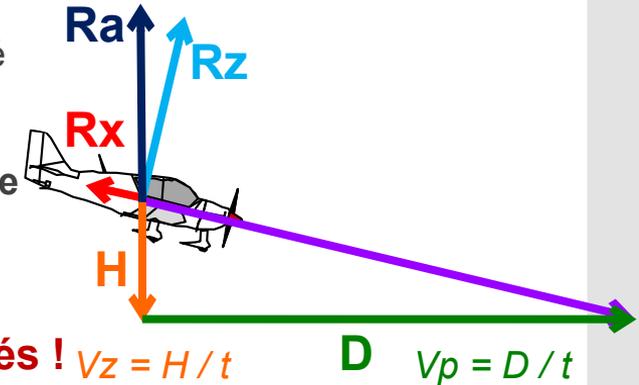
Finesse et plané

■ Définition de la finesse

- **Capacité de plané** (sans moteur) d'un aéronef
- Formule de la **finesse Lift/Drag ratio** :

$$f = \frac{Rz}{Rx} = \frac{Cz}{Cx} = \frac{D}{H} = \frac{Vp}{Vz}$$

D = distance horizontale parcourue en vol plané
H = hauteur perdue lors du vol plané
Rz = portance **Rx** = Trainée
Cz = coeff de portance **Cx** = Coeff de traînée
Vp = Vitesse propre horizontale de l'avion
Vz = Vitesse verticale



Attention : calculer avec les mêmes unités ! $Vz = H/t$ D $Vp = D/t$

Exemple :

Un planeur est lâché à une hauteur de 1000m, il parcourt 38 km avant de toucher le sol, calcule sa finesse

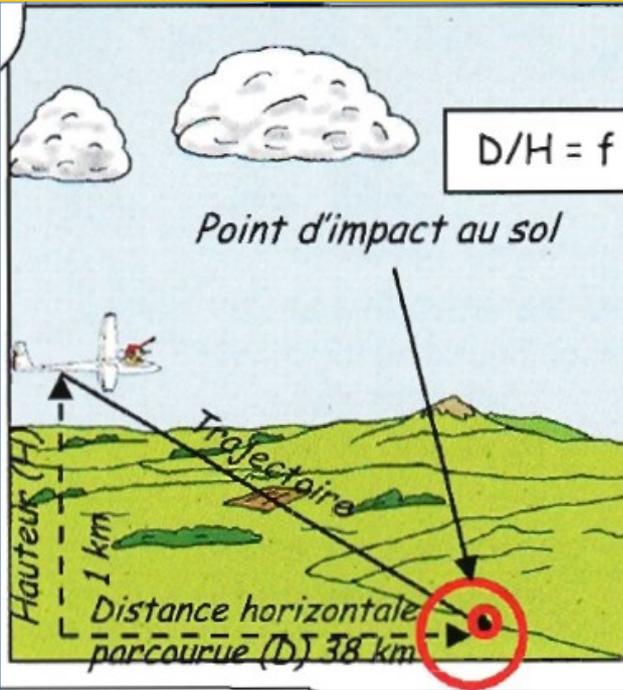
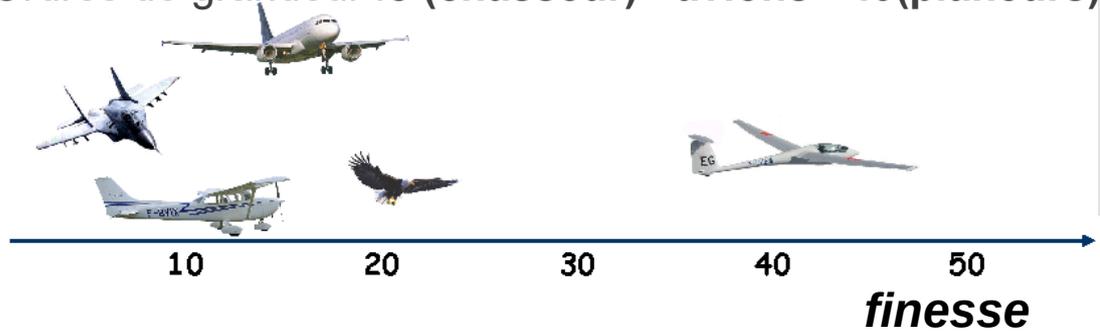
$$f = 38/1 = 38$$

Car 1000m = 1km

Optimisation de la finesse

f maximale pour une vitesse précise, la **vitesse de « finesse max »**

Si la masse augmente, la vitesse de f max augmente aussi
 Ordres de grandeur : **8 (chasseur) < avions < 40 (planeurs)**



P

Polaire

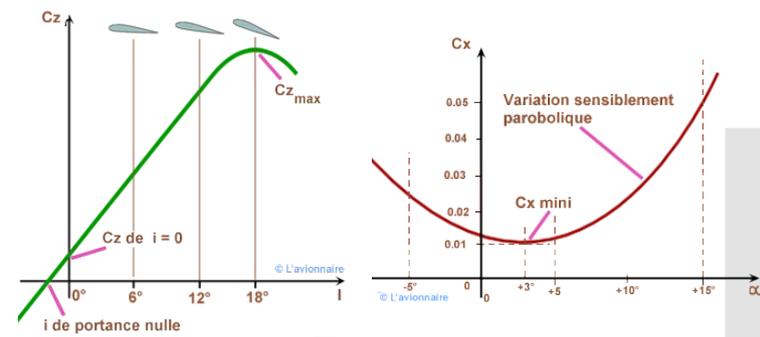
Courbe qui représente le coefficient de Portance C_z en fonction

du coefficient de traînée C_x



Construction de la polaire

- Courbes d'évolution des coefficients C_z et C_x en fonction de l'incidence
- Courbe de **C_z en fonction de C_x**

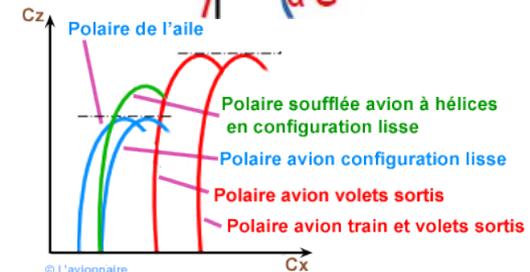
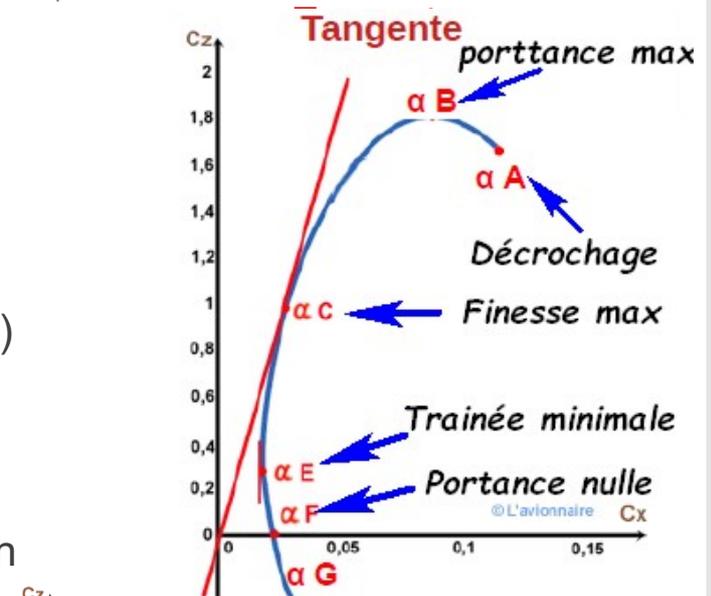


Points caractéristiques

- G: portance négative (voltige)
- F: **portance nulle** ($C_z = 0$)
- E: **traînée minimale** (C_x min)
- C: **finesse max** ($f = C_z/C_x$ max)
- B: **portance maximale** (C_z max)
- A: **décrochage** (incidence max)

Propriétés de la polaire

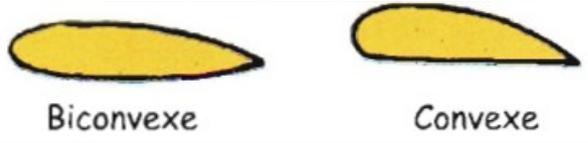
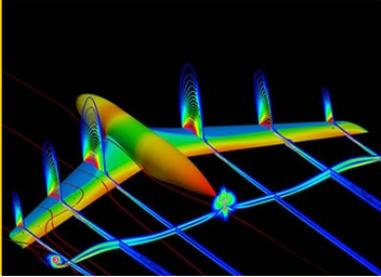
- Polaire de l'aile variable en fonction de la modification du profil (sortie des bords ou volets)
- Polaire **de l'aile** différente de la polaire **de l'aéronef**



P

E

Profils d'aile



Simple courbure



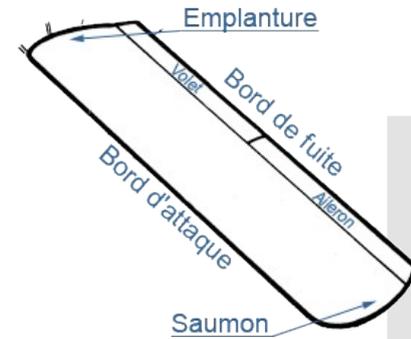
Double courbure



9

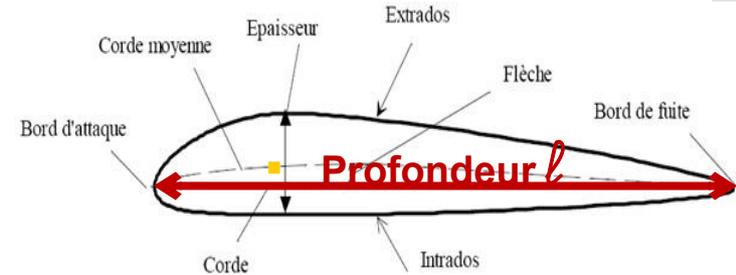
Vocabulaire de l'aile wing

- **Voilure**, profil aérodynamique *airfoil*
- **Emplanture**, **saumon**, **karman** (carénage d'emplanture)
- **Extrados**, **intrados**, **bord d'attaque** *leading edge*, **bord de fuite** *trailing edge*



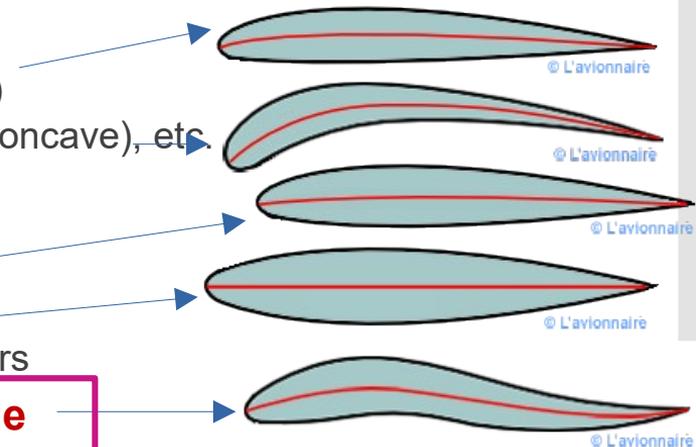
Géométrie du profil d'aile

- **Corde** : ligne reliant les bords d'attaque et de fuite
- **Corde moyenne** = ligne de cambrure
- **Profondeur**, l : longueur de la corde
- **Épaisseur relative**, $e = \frac{h, \text{épaisseur max}}{l, \text{profondeur}}$



Forme du profil

- La forme du profil influe sur **Cz**
- **Convexe** = bombé (contraire de concave)
- Formes **plan-convexe**, **creux** (convexe-concave), etc.
- Profil utilisé généralement : **biconvexe dissymétrique** (le + utilisé)
- Avion acrobatique (voltige aérienne) : vol dos → profil **symétrique**
- Avion de ligne moderne : confort passagers → **double courbure** = profil **autostable**



PE Géométrie de la voilure



Solar Impulse Tour du monde 2016

Evergure b span

- *Airbus A380 : b = 79,80m (73m de long, 24,10m de haut = 79ft)
- « Carré avion » = pour les aéroports, standard de 80m x 80m x 80ft
- *Antonov An225 Mriya : b = 88,4m

Surface alaire S
 $S = \text{surface demi-aile} \times 2 + \text{surface entre ailes}$

Ne pas compter l'empennage

- *Cri-Cri MC-15 : S=3,1m² très faible

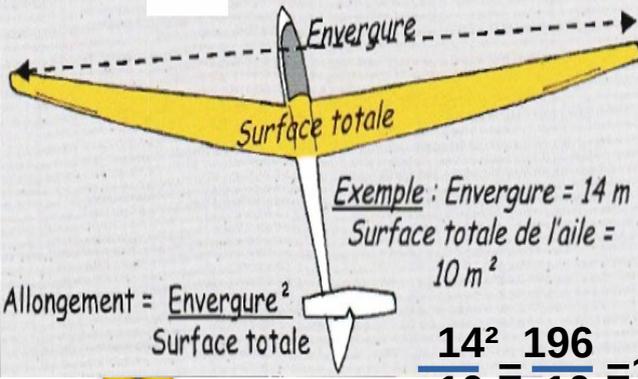
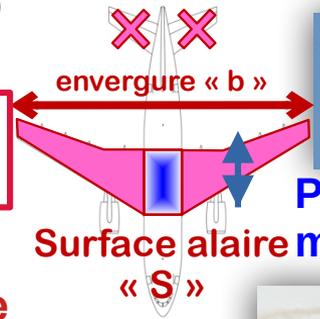
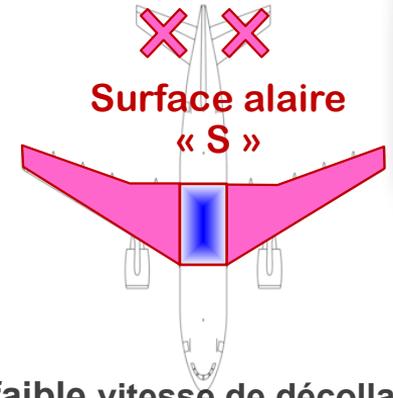
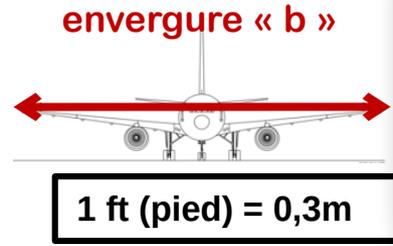
Charge alaire = $\frac{\text{Poids Total}}{\text{Surface Alaire}}$

- *Solar Impulse : faible Charge Alaire → faible vitesse de décollage (croisière < 40kt)

1 kt (nœud) = 1,85km/h

Allongement $\lambda = \frac{\text{Envergure}}{\text{Profondeur}} = \frac{\text{Envergure}^2}{\text{Surface Alaire}}$

- * Planeur: grand λ → grande finesse
- * Rafale : petit λ → faible finesse



P

E

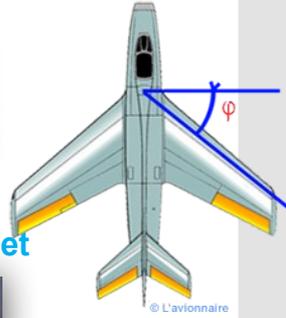


Forme et implantation de la voilure



Dièdre δ (delta) *dihedral*

- Positif \rightarrow stable = avion de ligne, planeur 😊
- Négatif \rightarrow manœuvrable = avion de combat, de voltige 😞
- Dièdre en bout d'aile, **semi-dièdre** = bon compromis pour les avions légers *Jodel Ambassadeur*



Flèche ϕ (phi) *sweep*

- Petite flèche : avion lent / Grande flèche : avion rapide
- Flèche inversée** : manœuvrable à basse vitesse *HFB320 Hansajet*
- Flèche variable** : *F14 Tomcat*



Forme de voilure

Rectangulaire, *Cessna C172*,

elliptique, *Spitfire*,

trapézoïdale en flèche, trapézoïdale en ϕ inversée, Δ (delta), *Boeing B727*,

X29,

Mirage 2000,

gothique, aile volante *Concorde*, *B2*



Implantation des ailes et multiplans

Aile **haute cantilever**, haute **haubanée**, **médiane**, **basse**, *ATR 72*, *C172*, *Mitsubishi KL21*, *Airbus A320*,

en mouette, **mouette inversée** (en W), **biplan**, **triplan**... *Beriev BE12*, *Corsair*, *Waco*, *Fokker DR1*...

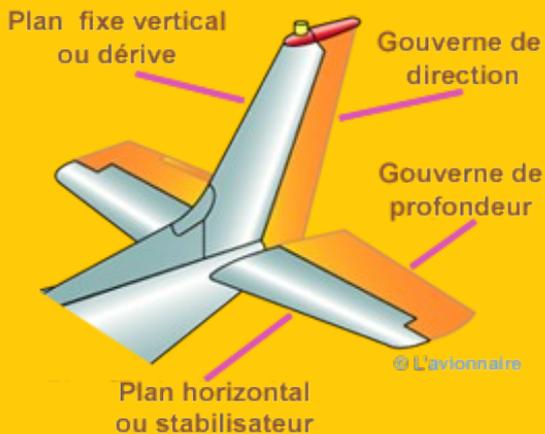


Configuration de la voilure

P

E

Empennage



Composition de l'empennage

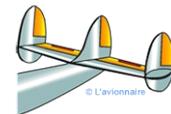
- Empennage = **dérive** + **gouvernes** de direction et de profondeur
- Monobloc** : en une seule partie

Différentes formes d'empennage

- Empennage **classique** ou cruciforme ex : **TB9 Tampico**, **Airbus A320**
- Empennage **en T** (té), ex : **ATR 42**, **Boeing B727**
- Empennage **en V** (vé) ou **papillon** : fonctionnement combiné des gouvernes de profondeur et direction, ex : **Robin ATL**, **Fouga Magister**
- Empennage **double ou multiple**, ex : **B24**, **Sukhoi Su27**

Configuration de la voilure

- Formule classique** : avec un empennage arrière, ex : **Robin DR400-180cv**
- Formule canard** : avec un empennage avant, ex : **Rutan LONG EZ**



P

E



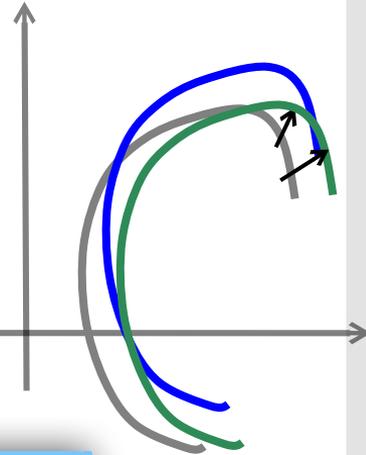
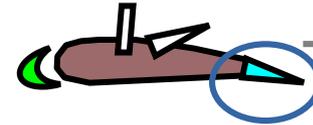
Becs, volets et hypersustentation



□ Hypersustentation

Rappel : portance $Rz = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot Cz$

- Portance Rz très faible quand Vitesse faible (décollage-atterrissage)
→ augmenter Rz : **augmenter Surface et Coefficient Cz**
- Hypersustentation par becs et volets
 - ✓ Rz augmentée jusqu'à 93% (grâce aux becs et volets Fowler)
 - ✓ Mais augmentation parasite de la traînée (mettre du moteur)
- Configurations avion : dispositifs hypersustentateurs :
rentrés = **en « lisse »**, sortis = **configuration atterrissage**

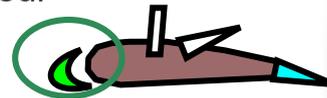


□ Caractéristiques des volets flaps

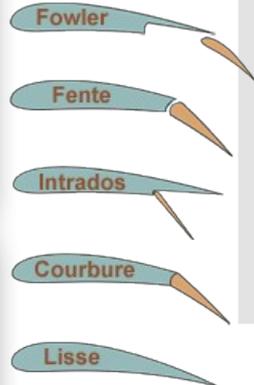
- Dispositif hypersustentateur généralement de **bord de fuite** de plusieurs types possibles : de courbure, d'intrados, Fowler, à fente...
- ...Et parfois de **bord d'attaque**, ex : **volets Krüger** sur **Boeing 727**

□ Caractéristiques des becs slats

- Dispositif hypersustentateur de **bord de d'attaque**
ex : **Morane MS880**



Types de volets

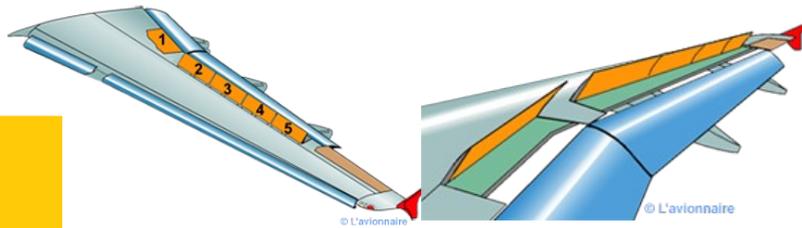


P

E

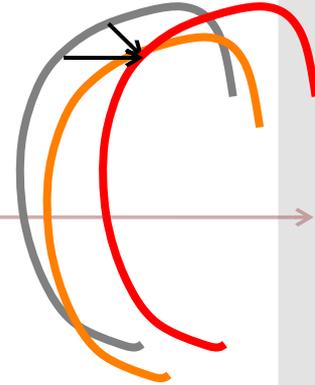


Spoilers et aérofreins



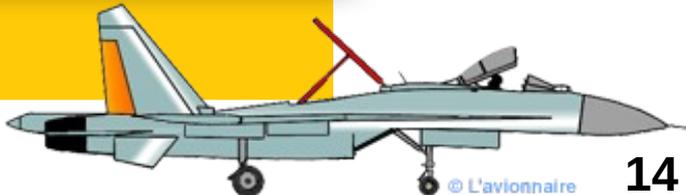
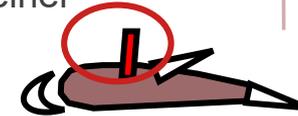
Caractéristiques des spoilers *spoilers*

- Dispositif hypo-sustentateur destructeur de portance
- Exemple : spoilers d'une automobile la plaquant au sol
- Amélioration de la pente de descente et du freinage mécanique à l'atterrissage



Caractéristiques des aérofreins AF airbrakes

- Rôle principal : augmenter la traînée (freiner l'avion)
- Effet secondaire hypo-sustentateur (augmentation de la pente d'approche)
- AF sur les aile, fuselage, cône de queue...
- Exemples sur les aéronefs : planeur **ASK18**, **Transall C160** (intrados et extrados), **Caravelle**...



14

P

E



Commandes et gouvernes



Image :
<https://www.avionslegendaires.net>



Axe

Commande

Gouverne

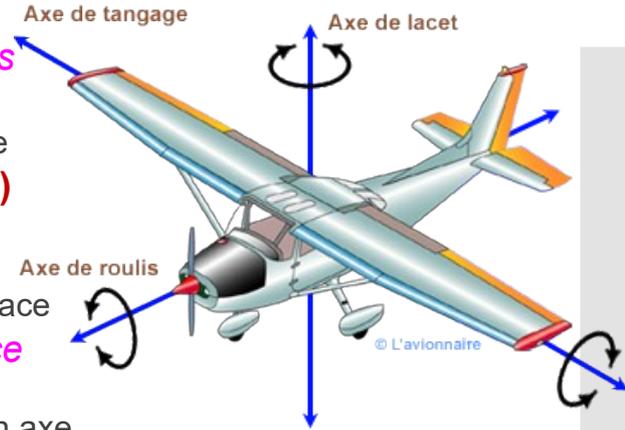
Angle

Stabilité

Contrôle
(indicateur)Éventuel
effet induit

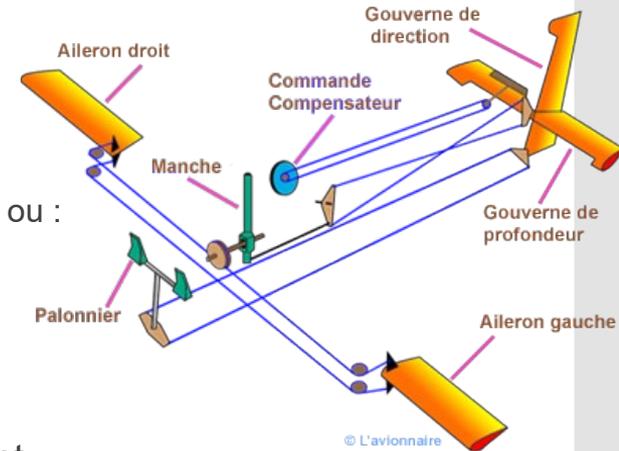
Rotation autour des 3 axes

- Repérage autour de **3 axes axis**
 - ✓ De la position de l'avion
 - ✓ Et de sa variation dans l'espace
- **Commande de vol (principale) (primary) flight control**
 - ✓ Permet au pilote de modifier la position de l'avion dans l'espace
- **Gouverne (flight) control surface**
 - ✓ Partie mobile permettant la rotation de l'avion autour d'un axe
- **Angle** de rotation *angle*
 - ✓ Pour la mesure de cette rotation



Stabilité et contrôle de la rotation

- **Stabilité** autour d'un axe :
 - ✓ Statique (exemple : la dérive...) ou :
 - ✓ Dynamique (grâce à une commande)
- Contrôle de mesure de l'angle au moyen **d'instruments** spécifiques
- Éventuels **effets induits** pouvant apparaître autour d'un autre axe

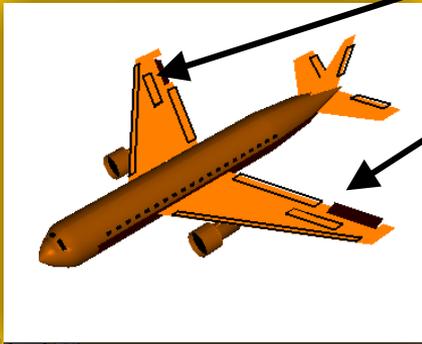


P

E



Autour de l'axe X (de roulis)



Noms de l'axe

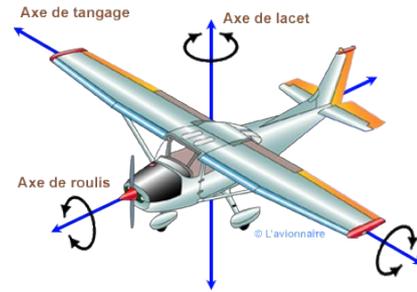
- **X** (on avance vers l'inconnu, X)
- **Longitudinal** (longueur)
- **Roulis roll** (axe de rotation du bateau qui rend malade)

Commande et gouverne

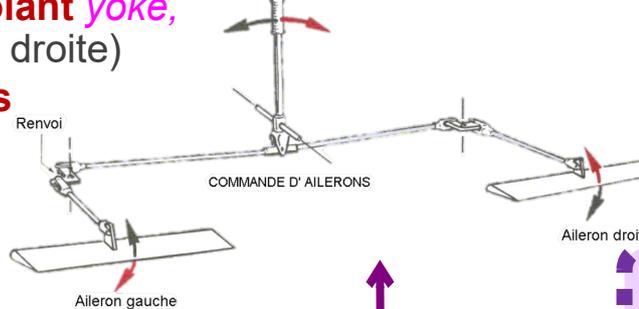
- **Manche stick** ou **volant yoke**, **wheel** (de gauche à droite)
- Agit sur les **ailerons aileron**

Action et angle

- L'aileron intérieur monte et l'aileron extérieur s'abaisse
- La différence de portance provoque un basculement
- Angle d'**inclinaison bank ϕ** (phi) sur le côté



Manche



Roll

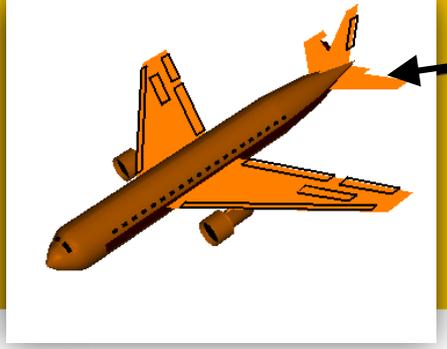
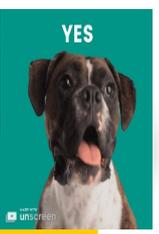
Axe	Des « X » longitudinal de roulis
Commande	Manche ou volant (G/D) <i>Stick, wheel, yoke</i>
Gouverne	Ailerons
Angle	Aileron Inclinaison

Stabilité	Latérale
Contrôle (indicateur)	Aiguille, horizon
Eventuel effet induit	Lacet inverse

Briefings ultérieurs

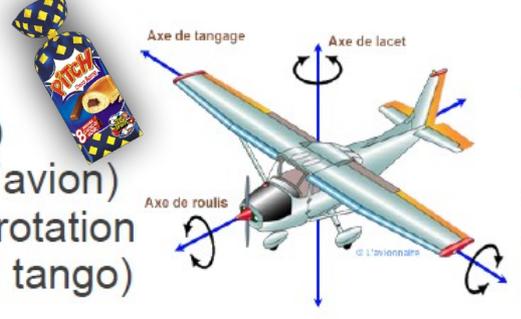
P E

Autour de l'axe Y (de tangage)



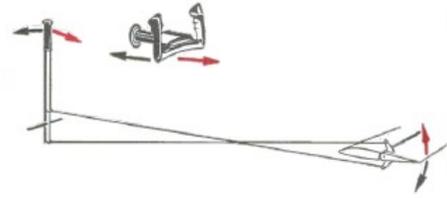
Noms de l'axe

Y (Youpi ! Bras écartés)
Transversal (traverse l'avion)
Tangage *pitch* (axe de rotation utilisé dans la danse du tango)



Commande et gouverne

Manche *stick* ou **volant** *yoke, wheel* (avant /arrière)
 Agit sur la **gouverne** de profondeur *elevator*

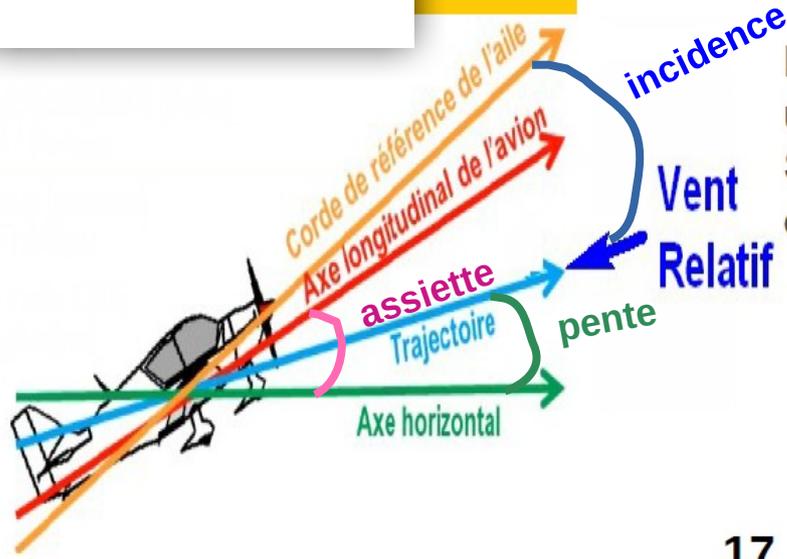


Action et angle

La différence de portance provoque un basculement

Synthèse des **angles** autour de l'axe de tangage :

- ✓ **Incidence** *AoA Angle of Attack* α (alpha) corde / trajectoire
- ✓ **Assiette** *pitch attitude* θ (thêta) longitudinal / horizon
- ✓ **Pente** *slope* γ (gamma) trajectoire / horizon
- ✓ **Calage de l'aile** **FIXE** : corde / longitudinal



Pitch

Axe	Des « Y » transversal de tangage
Commande	Manche ou volant (avant/arrière)
Gouverne	Gouverne de profondeur
Angle	Assiette (incidence, pente)

Stick, wheel, yoke

Elevator

Stabilité	Longitudinale
Contrôle (indicateur)	Horizon artificiel
Eventuel effet induit	Aucun

Briefings ultérieurs

P

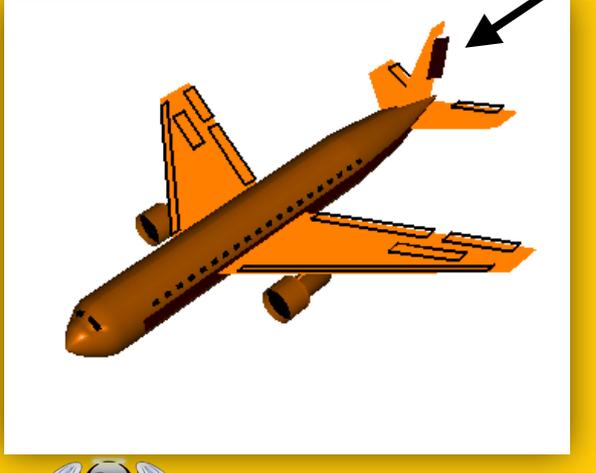
E



Autour de l'axe Z (de lacet)

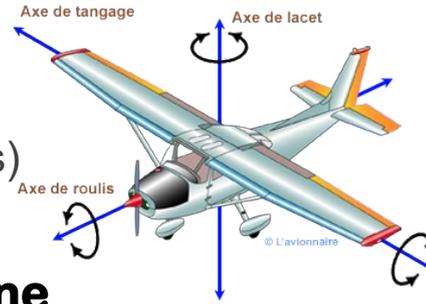


Yaw !



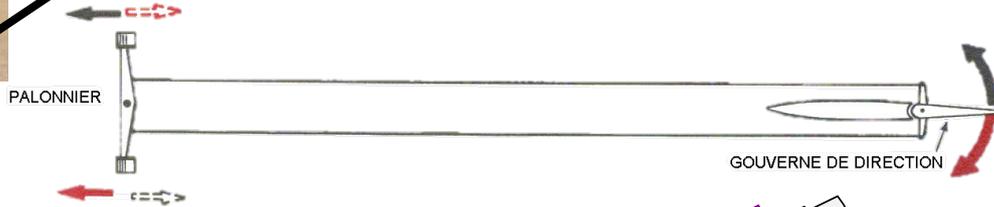
Noms de l'axe

- Z
- Vertical (vers au dessus)
- Lacet yaw



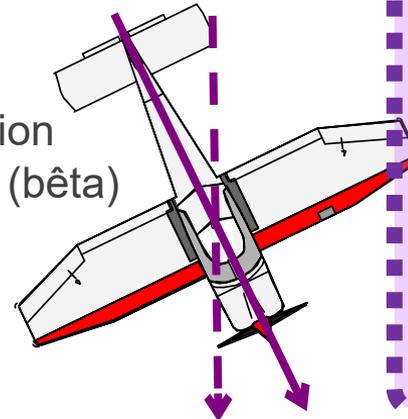
Commande et gouverne

- Palonniers rudder (ou malonniers pour paraplégiques)
- Agit sur la gouverne de direction rudder



Action et angle

- Permet de « craber » l'avion
- Angle de dérapage slip β (bêta)



Axe Des « Z » vertical de lacet

Yaw Commande Palonniers

Rudder Gouverne Gouverne de direction

Rudder Angle Dérapage

Stabilité	De route
Contrôle (indicateur)	Bille
Éventuel effet induit	Roulis induit

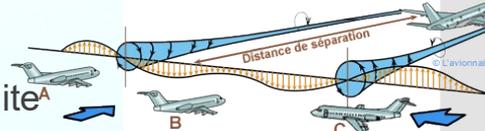
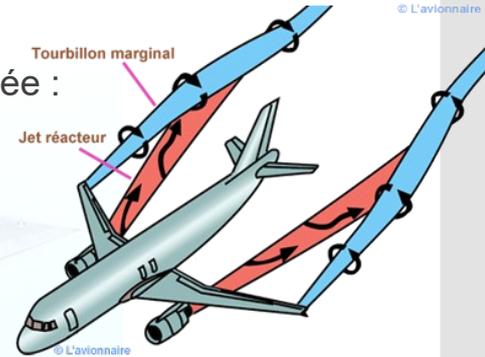
Briefings ultérieurs



Performance aérodynamique

Composition de la traînée totale R_x

- **Traînée induite R_{xi}** : due à la différence de pression entre l'intrados et l'extrados, à l'origine de la portance
- **Traînée parasite R_{xp}** : autres sources mineures de traînée :
 - ✓ R_x de frottement (due à la viscosité des filets d'air)
 - ✓ R_x de forme (due à l'épaisseur des objets)
 - ✓ R_x d'interférence (entre les différents composants) d'où par exemple, le **karman**, carénage d'emplanture d'aile
 - ✓ R_x de compressibilité de l'air



Turbulence de sillage

- **Tourbillons marginaux** = *wake turbulence*, *vortex*
Tourbillons créés en bout d'aile, source de la traînée induite
- **Phénomène dangereux** pour les avions suiveurs
Distance de séparation nécessaire

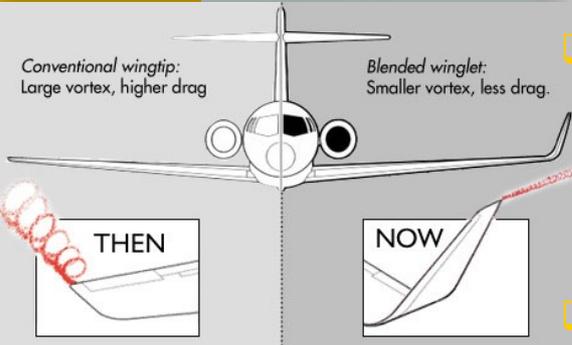
Performance aérodynamique

- Meilleure aérodynamique → plus **faible** traînée (et conso.)
- La performance aérodynamique est améliorée avec :
 - ✓ Des **ailettes de bout d'aile**, appelé aussi **winglet**, **sharklet**...
 - ✓ Un **grand allongement** (planeurs...)
 - ✓ Une **aile propre** : sans poussières, insectes collés
 - ✓ Un **train rentrant** (escamotable) profil d'avion plus aérodynamique

Northrop B2 Spirit, surnommé *Stealth Bomber*

Conventional wingtip:
Large vortex, higher drag

Blended winglet:
Smaller vortex, less drag.



Compensateurs et autres gouvernes



Image : wikimedia Bruce C. Cooper

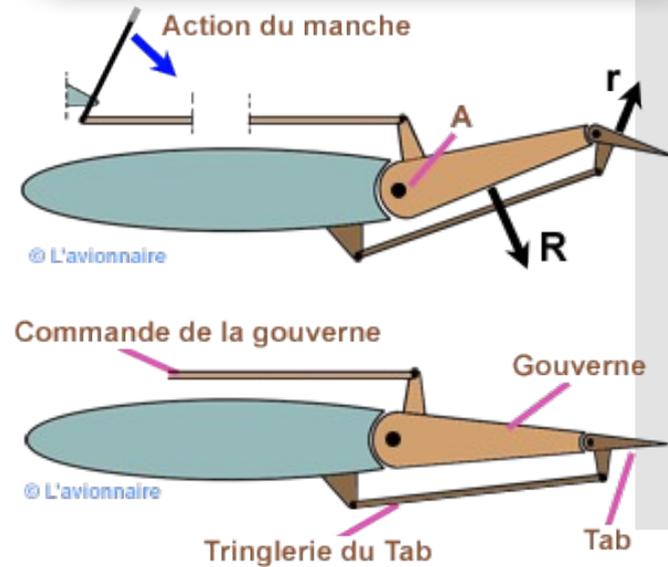
Compensateurs

- **Compensateur trim tab**
- Gouverne secondaire, petite surface ou dispositif monté à l'extrémité d'une gouverne principale
- Rôle : **réduire ou annuler l'effort** exigé du pilote pour manœuvrer les gouvernes de vol
- Sur les avions légers, principalement sur la gouverne de profondeur



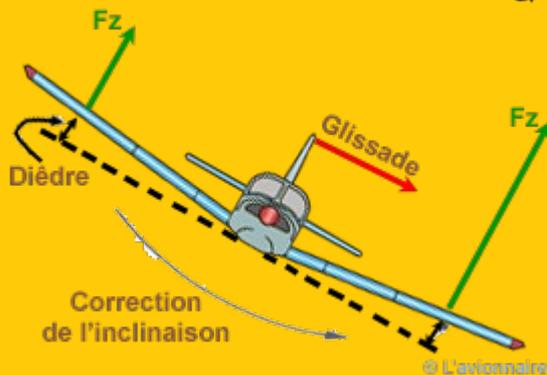
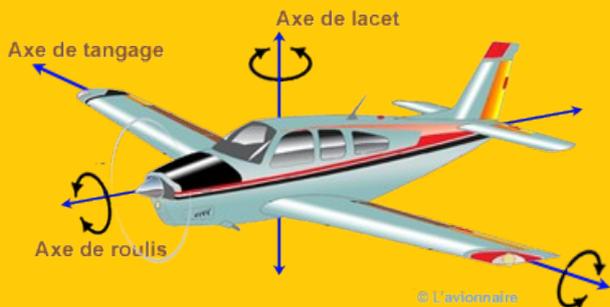
Flaperon et spoileron

- **Aileron haute-vitesse flaperon** = gouverne sur avion de ligne contrôlant l'avion autour de l'axe de roulis (axe X)
- À haute vitesse, il fait office d'**aileron**
- À basse vitesse, il fait office de **volet**
- Compense aussi le roulis **aileron trim**
- Utilisé asymétriquement, le **spoiler** peut jouer ce rôle **spoileron**



P

Stabilité



Stabilité de l'aérodyn

- Aptitude à revenir à l'équilibre initial quand il a été modifié par le pilote ou par un agent extérieur (ascendance, turbulence...)



Stabilité du trièdre avion

- **Stabilité latérale (X)**
 - ✓ Améliorée par l'**effet dièdre** (dièdre positif, flèche positive)
- **Stabilité longitudinale (Y)**
 - ✓ Améliorée par le **stabilisateur** (sur l'empennage horizontal)
- **Stabilité verticale (Z)**
 - ✓ = stabilité de route = stabilité directionnelle (**symétrie** du vol)
 - ✓ Améliorée par la **dérive**

Axe	Des « X » longitudinal de roulis	Des « Y » transversal de tangage	Des « Z » vertical de lacet
Commande	Manche ou volant G/D	Manche ou volant (AVT/ARR)	Palonniers
Gouverne	Ailerons	Gouverne de profondeur	Gouverne de direction
Angle	Inclinaison	Assiette (incidence pente)	Dérapage

Stabilité	Latérale	Longitudinale	De route (symétrie)
Contrôle (indicateur)	Aiguille, horizon	Horizon artificiel	Bille
Eventuel effet induit	Lacet inverse	/	Roulis induit

→ Effet secondaire « **roulis hollandais** »
 → **Stabilité « spirale »** en virage et conjugaison des commandes



Symétrie du vol



« Le pied chasse la bille »

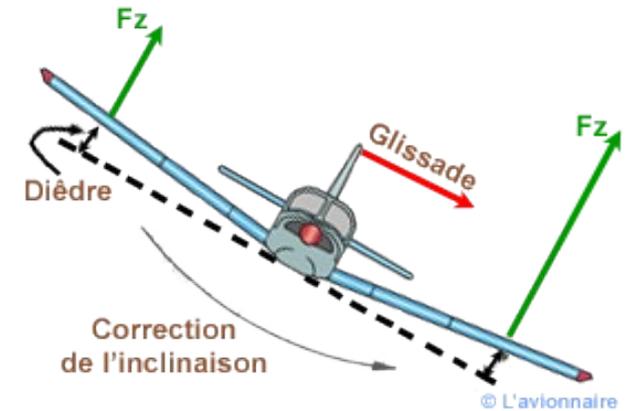
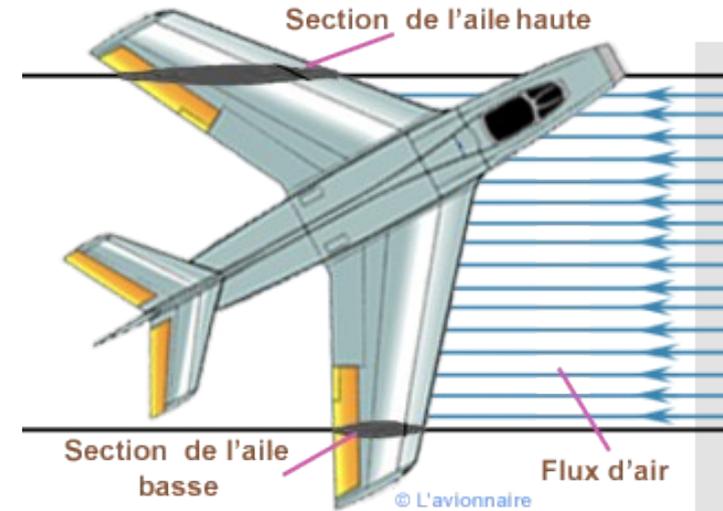


Conduite de la symétrie

- Rotation autour de l'**axe de lacet** (axe Z = axe vertical)
- Commande sur les **palonniers**
- Action sur la gouverne de direction
- Angle de dérapage** *slip angle*
- Contrôle de la symétrie sur la **bille**

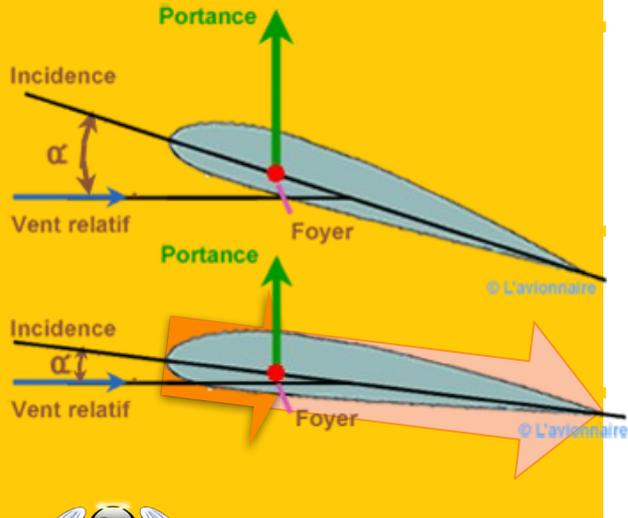
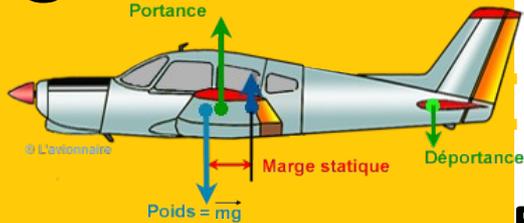
Contrôle en virage

- Mise en virage au manche
- Effet de **lacet inverse**
→ le nez vers l'extérieur,
et l'aile intérieure en avant
→ glissade (pas dangereux)
- Mettre du pied dans le virage
- Conjuguer les commandes**
= action simultanée
« manche et palonniers »
pour conserver la symétrie de vol
- Si pas assez de pied : **glissade**
vers l'intérieur (sain)
- Si trop de pied : **dérapiage**
vers l'extérieur (dangereux)



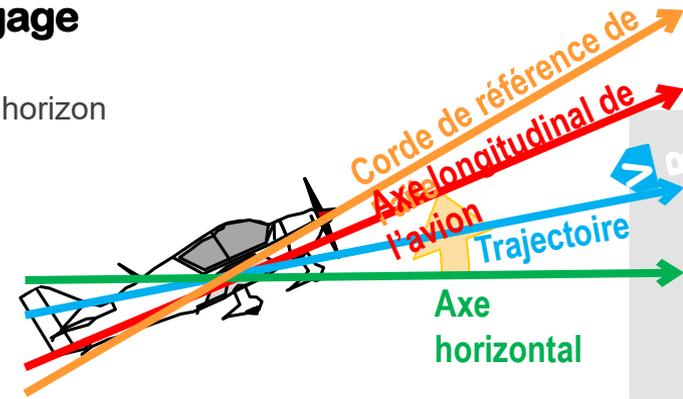
P

Équilibre longitudinal



Quelques rappels autour de l'axe de tangage

- Synthèse des angles autour de « Y »
 - ✓ **Assiette θ** (thêta) *pitch attitude* axe longitudinal / horizon
 - ✓ **Pente γ** (gamma) *slope* trajectoire / horizon
 - ✓ **Incidence α** (alpha) *AoA angle of attack* trajectoire / corde de l'aile
 - ✓ **Angle de calage de l'aile** (FIXE pour un avion donné) corde de l'aile / axe longitudinal avion



Stabilité longitudinale :

aptitude à revenir à une position d'équilibre en **tangage**

Pente γ + incidence α
=
Assiette θ + Angle de calage

Forces et points d'application

Centre de Gravité (CG) = centre de masse (CM) *centre of gravity*

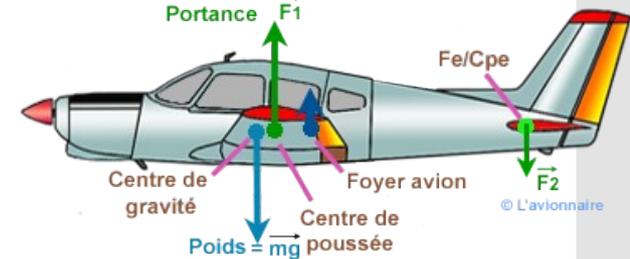
- ✓ Point d'application des **forces de pesanteur** (le poids).
- ✓ Évolue en vol pendant que les réservoirs de carburant se vident.
- ✓ **Centrage** = placement du **Centre de Gravité** dans une plage de valeurs acceptables (équilibrées), répartir les passagers,....

Centre de Poussée (CP) *centre of pressure*

- ✓ Point d'application de la **force aérodynamique** (décomposée en portance + traînée).
- ✓ Avance sur l'aile quand l'incidence augmente.

Foyer (F) *aerodynamic centre (neutral point)*

- ✓ Point d'application des **variations de PORTANCE**.
- ✓ Se situe en un **point fixe** généralement situé (pour une aile en subsonique) à environ **25 % de la corde aérodynamique moyenne** de l'aile à partir du bord d'attaque *Mean Aerodynamic Chord (MAC)*.

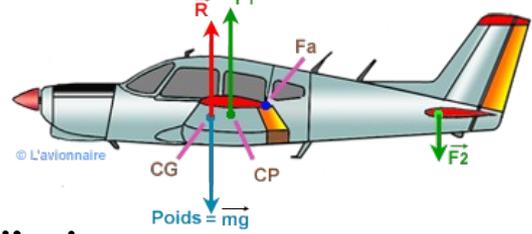


P

Centrage de l'avion



Au-delà de la limite de centrage AVANT : **AVION IMPILOTABLE**
Rotation impossible au décollage



Centrage de l'avion

- L'équilibre longitudinal dépend du **centrage** de l'avion
- **Devis de centrage** (+ de masse et de carburant)
 - ✓ Réalisé par le pilote avant vol
 - ✓ Répartition des masses (passagers, bagages...)
 - ✓ Objectif : que le Centre de Gravité de l'avion soit dans une plage stable et qu'il soit bien équilibré autour de l'axe de tangage.
- Centrage ramené au pourcentage de la longueur de la **corde aérodynamique moyenne** de l'aile **MAC**
Mean Aerodynamic Chord.

Avion centré avant

- **Avion + STABLE** mais **Moins maniable** et nécessite un braquage de gouverne + important
- **Traînée**, consommation et vitesses de décrochage **plus fortes**



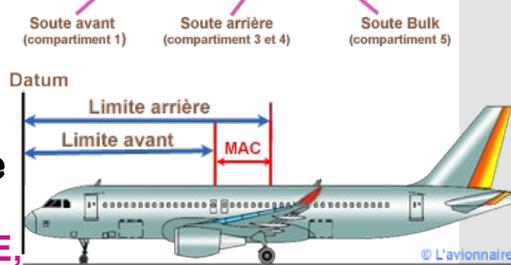
24

Avion centré arrière

- **Avion + MANIABLE** = + **MANŒVRABLE**, il est **plus réactif**, mais **Moins stable**
- **Traînée**, consommation et vitesses de décrochage **plus faibles**



A320																																																																															
DEVIS DE MASSE - CENTRAGE - MESSAGE DE CHARGEMENT																																																																															
(TOUTES MASSES EN KG)																																																																															
WEIGHT AND BALANCE REPORT - LOAD REPORT (ALL WEIGHTS IN KG)																																																																															
180 sièges																																																																															
ADRESSE / ADDRESS:	ORIGINE / ORIGIN:	N° DE VOL / FLIGHT NO:	NUMA TEL AVION / AIRCRAFT REGISTRATION:	COIFFAGE / COVER:	DATE:																																																																										
MASSE DE BASE (BASIC WEIGHT) →	INDICE DE BASE (BASIC INDEX) →	MASSE MAXIMALE / MAXIMUM WEIGHT (GROSS)	SANS CARBURANT (ZERO FUEL)	DECOLLAGE / TAKE OFF:	ATTERRISSAGE / LANDING:																																																																										
CORRECTION (+/-)	CORRECTION (+/-)	CORRECTION	CORRECTION																																																																												
MASSE DE BASE CORRIGÉE / CORRECTED BASIC WEIGHT	INDICE DE BASE CORRIGÉE / CORRECTED BASIC INDEX	MASSE MAXI SANS CARBURANT CORRIGÉE / CORRECTED MAXIMUM WEIGHT	CARBURANT AU DECOLLAGE / FUEL ON TAKE OFF																																																																												
LIMITATION UTILISER (la plus faible des trois "A, B, C") / ALLOWED LOW (SMALLEST OF A, B, C)																																																																															
MASSE EN OPERATIONS / OPERATING WEIGHT	CHARGE OFFERTE / ALLOWED TAKEOFF WEIGHT																																																																														
DEST:	NOMBRE DE PAX / NO. OF PASSENGERS	TOTAL (kg) / TOTAL (kg)	Soute avant / Forward (Section 11, Section 12, Section 13)		Soute arrière / Aft (Section 41, Section 42, Section 43, Section 44)		REMARQUES / REMARKS																																																																								
FTL:	Total		Soute avant / FWD		Soute arrière / AFT		Soute Bulk / YBAC																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PAS / SEAT</th> <th>INDEXE 35</th> <th>INDEXE 40</th> <th>INDEXE 45</th> <th>INDEXE 50</th> <th>INDEXE 55</th> <th>INDEXE 60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MAX = 3 402 kg</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 4 536 kg</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 1 497 kg</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MASSE SOUTES (kg) / COMPARTMENT WEIGHTS</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 48 PAX</td> <td>3</td> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 30 PAX</td> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 42 PAX</td> <td>3</td> <td>7</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAX = 60 PAX</td> <td>4</td> <td>6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TOTAL PAX / PASSENGER WEIGHT</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>7</td> <td>6</td> <td>0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										PAS / SEAT	INDEXE 35	INDEXE 40	INDEXE 45	INDEXE 50	INDEXE 55	INDEXE 60	MAX = 3 402 kg	2	3	0	0			MAX = 4 536 kg	2	2	3	0			MAX = 1 497 kg	0						MASSE SOUTES (kg) / COMPARTMENT WEIGHTS	4	5	3	0			MAX = 48 PAX	3	6					MAX = 30 PAX	2	2					MAX = 42 PAX	3	7					MAX = 60 PAX	4	6					TOTAL PAX / PASSENGER WEIGHT	1	1	7	6	0	
PAS / SEAT	INDEXE 35	INDEXE 40	INDEXE 45	INDEXE 50	INDEXE 55	INDEXE 60																																																																									
MAX = 3 402 kg	2	3	0	0																																																																											
MAX = 4 536 kg	2	2	3	0																																																																											
MAX = 1 497 kg	0																																																																														
MASSE SOUTES (kg) / COMPARTMENT WEIGHTS	4	5	3	0																																																																											
MAX = 48 PAX	3	6																																																																													
MAX = 30 PAX	2	2																																																																													
MAX = 42 PAX	3	7																																																																													
MAX = 60 PAX	4	6																																																																													
TOTAL PAX / PASSENGER WEIGHT	1	1	7	6	0																																																																										



Au-delà de la limite de centrage ARRIÈRE : **AVION IMPILOTABLE**
Risque de basculement en cabré en vol

P Équations du vol

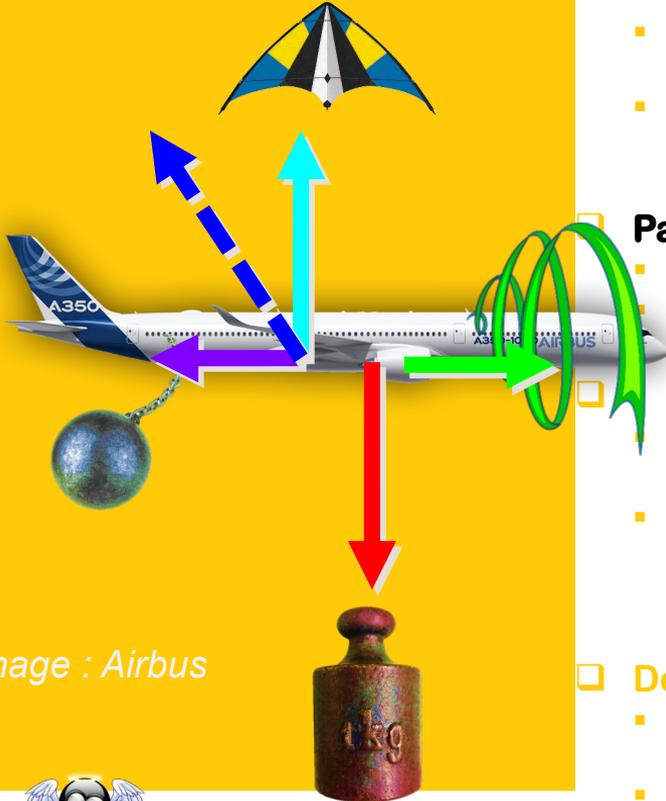


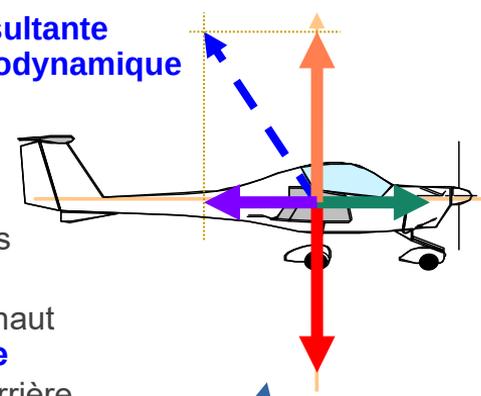
Image : Airbus



□ Vocabulaire du vol stabilisé

- **En palier** = sans monter ni descendre (**horizontal**)
- **Rectiligne** = en ligne droite, sans virage
- **Uniforme** = sans accélérer ni décélérer (**stabilisé**)
- **Poids** *weight*, appliqué au centre de gravité, vers le bas
- **Traction** *thrust*, force de propulsion, vers l'avant
- **Portance** *lift*, appliquée au centre de poussée, vers le haut
composante verticale de la **résultante aérodynamique**
- **Traînée** *drag*, appliquée au centre de poussée, vers l'arrière
composante horizontale de la **résultante aérodynamique**

Résultante
aérodynamique



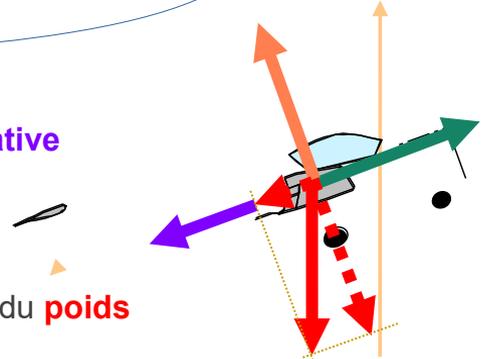
□ Palier stabilisé

- La **Portance** équilibre le **Poids**
- La **Traction** équilibre la **Traînée opposée au vent relative**

Montée

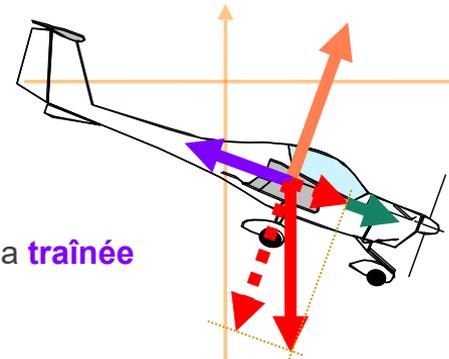
piège

- La **portance perpendiculaire à la trajectoire** est **plus faible**, n'équilibre que la grande composante du **poids**
- La **traction, plus importante**, compense la petite composante du **poids** en plus de la **traînée opposée à la trajectoire**



□ Descente

- La **portance, plus faible**, n'équilibre que la grande composante du **poids**
 - La **traction** et la petite composante du **poids** équilibrent la **traînée**
- ✓ en cas de traction nulle, c'est **un vol plané**



Puissance et vitesse

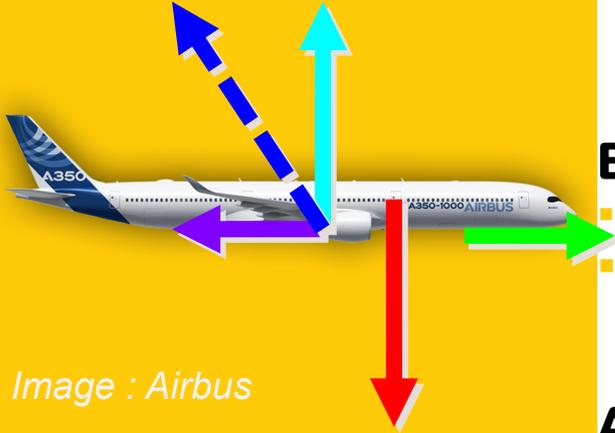


Image : Airbus

Rectiligne

= en ligne droite, sans virage



Influence de la puissance moteur

- **Sur la traction** : plus la puissance est forte, plus la traction est forte et plus la **vitesse propre (Vp) est grande**
- **Sur la résultante aérodynamique** : quand la puissance augmente, Vp augmente et donc **portance (Rz) et traînée (Rx) augmentent**

En palier = sans monter ni descendre (horizontal)

Baisse de puissance en palier

- La puissance baisse → **Vp baisse** → Rz baisse → **l'avion descend**
- Pour maintenir le palier, maintenir Rz en augmentant Cz, donc en **augmentant l'incidence** (tirer sur le manche)



Augmentation de puissance en palier

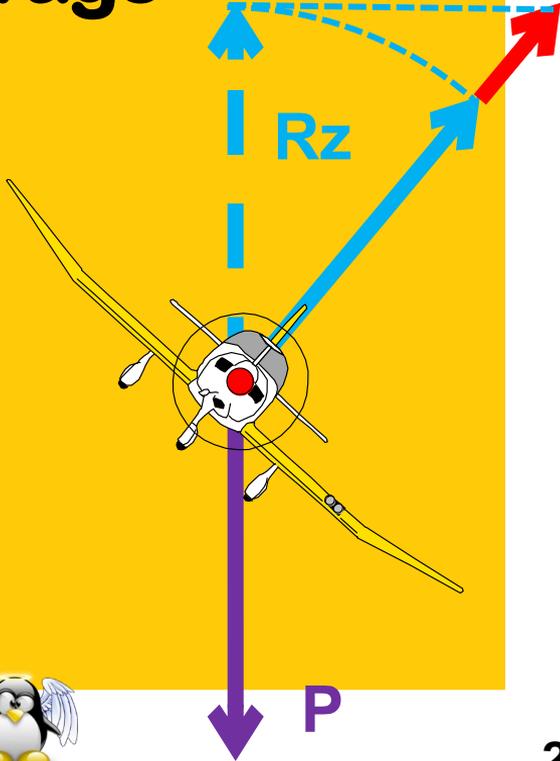
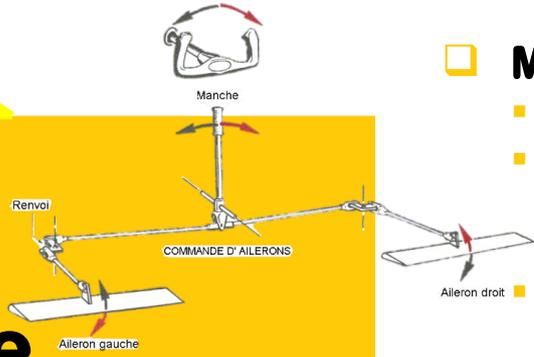
- La puissance augmente → **Vp augmente** → Rz augmente → **l'avion monte**
- Pour maintenir le palier, maintenir Rz en diminuant Cz, donc en **diminuant l'incidence** (pousser sur le manche)
- Pour passer du vol **rectiligne uniforme** au vol en montée, pour conserver la vitesse, le pilote **augmente la puissance**

$$R_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z$$

Rhô → Vitesse Surface → Coefficient de Portance

P

Le virage

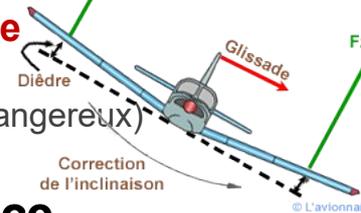


Mise en virage et sortie de virage

- Autour de l'axe **X**, **longitudinal**, de **roulis roll**
- Mise en virage : action sur le manche **stick** ou volant **wheel**
 - ✓ Action sur les ailerons **aileron** : angle d'**inclinaison**
- Puis vol en virage : **manche au neutre**
- sortie de virage** : le manche du **côté opposé**

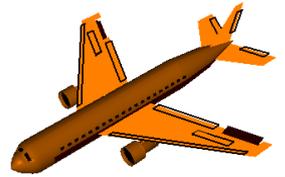
Conduite de la symétrie du virage

- Mise en virage au manche → Effet de **lacet inverse** → **Glissade** (sans danger) → Mettre du pied dans le virage
- Conjuguer les commandes** avec les palonniers pour conserver la symétrie de vol
 - ✓ Commande autour de l'axe de lacet par les **palonniers**
 - ✓ Action de correction sur la gouverne de direction
- Contrôle de la symétrie sur la **bille**
 - ✓ Si trop de pied : **glissade** (sain)
 - ✓ Pas assez de pied : **dérapage** (dangereux)



Équation du virage et puissance

- Pour **conserver le palier**, plus grande portance nécessaire
- Augmentation de la puissance ou de l'incidence**

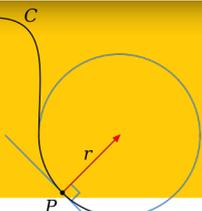
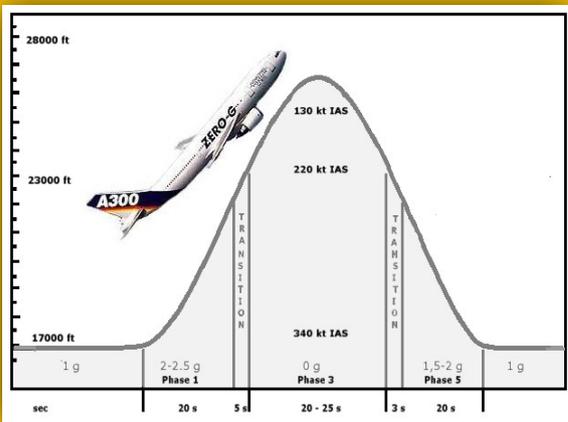


Axe	Des « X » longitudinal de roulis
Commande	Roll Manche ou volant (G/D) Stick, wheel, yoke
Gouverne	Ailerons Aileron
Angle	Inclinaison
Stabilité	Latérale
Contrôle (indicateur)	Aiguille, horizon
Éventuel effet induit	Lacet inverse

P

Le facteur de charge

$$n = \frac{PA \text{ (poids apparent)}}{PR \text{ (poids réel)}} = \frac{Rz \text{ (portance)}}{P \text{ (poids)}}$$



28

Définition du facteur de charge

Facteur de charge « n » *load factor*

Effort appliqué à la structure de l'avion et leurs occupants, **sensation de lourdeur** exprimée en **nombre de « g »**

Valeurs du facteur de charge

Échelle de valeurs du facteur de charge « n » :

$n > 1$: « **n** » **positif** : sensation de tassement, Poids Apparent > Poids Réel

$n = 1$: situation normale, Poids Apparent = Poids Réel

$0 < n < 1$: sensation de légèreté

$n = 0$: sensation d'**apesanteur** Poids Apparent = 0 « impression de flotter »

$n < 0$: « n » négatif : sensation d'être projeté vers le haut

Limites précisées dans le **manuel de vol** de l'avion :

Pour un avion standard en général : $+4 < n < -2$

Pour un avion de voltige en général : $+6 < n < -4$

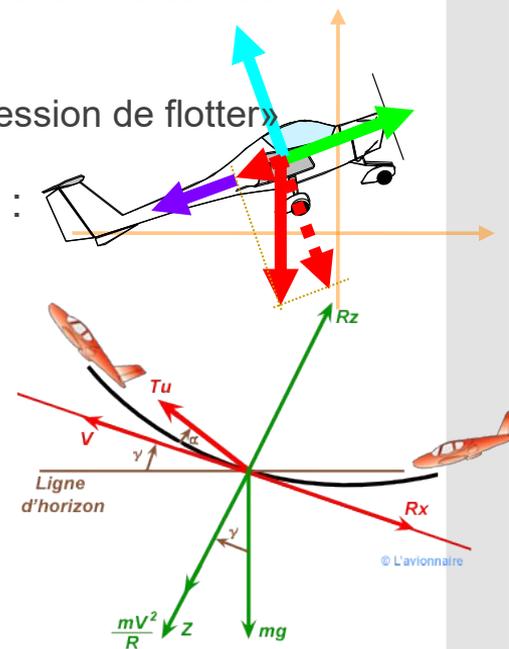
« n » en situations particulières

En palier : $Rz = \text{Poids Apparent} = \text{Poids Réel}$, donc $n = 1$

En montée ou descente : **piège**
 $Rz = \text{Poids Apparent} < \text{Poids Réel}$ donc $0 < n < 1$,
on se sent plus léger

En ressource : tirer brutalement sur le manche
 $Rz = \text{Poids Apparent} > \text{Poids Réel}$ donc $n > 1$,

On prend des « g », d'autant plus que la **vitesse est grande** ou le **rayon de courbure petit**



« n » en virage

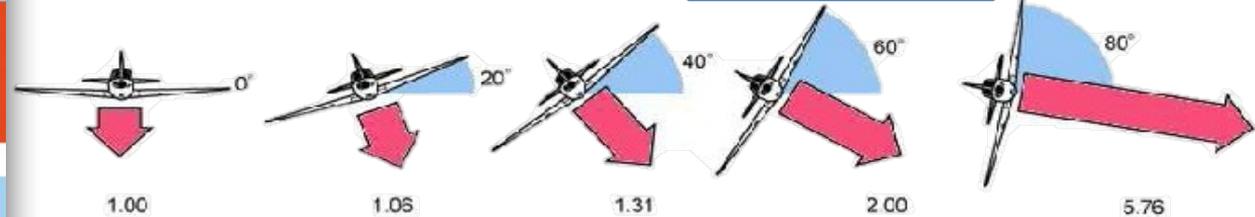
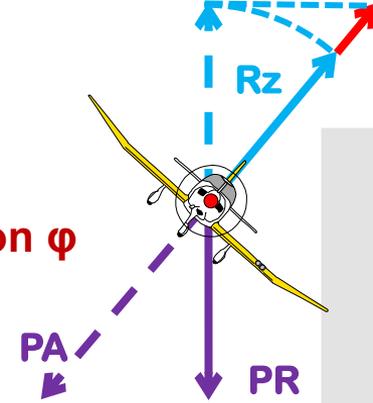
Facteur de charge en virage

- Pour maintenir le vol en palier, la portance doit augmenter
- Le facteur de charge augmente avec l'inclinaison ϕ
- Relation mathématique :

$$n = \frac{1}{\cos \phi} > 1$$

- Exemples :

si $\phi=0^\circ, n=1$; si $\phi=30^\circ, n=1,15$; si $\phi=60^\circ, n=2$



Décrochage sous facteur de charge

Vitesse de décrochage Vs stall velocity

Quand « n » augmente, Vs augmente (avec la racine carrée de « n »)
 Exemple : un avion qui décroche à 50 kt sous 1g, décroche à 100 kt sous 4g ()

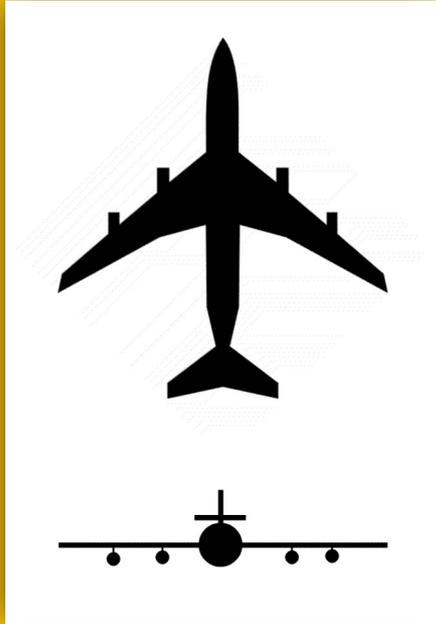
Risque de décrochage accru sous facteur de charge :

Virage serré, ressource « musclée »...

→ **Danger !** Risque de décrochage « dynamique »

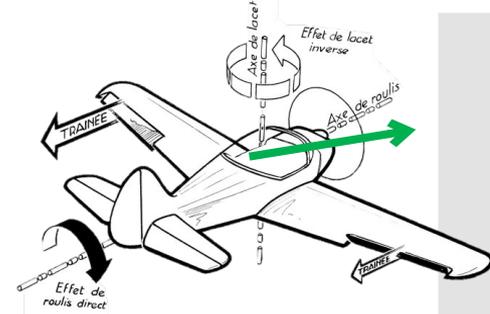
Situations à risque : overshoot de l'axe de piste en dernier virage, orbites ou ressources « au-dessus de la maison des amis »...

Les effets aérodynamiques induits



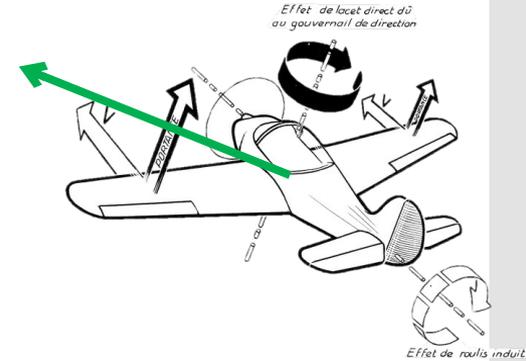
Effet de lacet inverse

- **Mise en virage** (ex : inclinaison à droite)
- Conséquence : aileron droit levé et gauche baissé
- Traînée plus fortes à gauche → **ailé gauche freinée**
- Mouvement de **lacet** en sens inverse (roulis à gauche)
- Correction en **mettant du pied dans le virage**
= « **conjuguer les commandes** »



Roulis induit

- **Crabage** de l'avion (ex : dérapage à droite, lacet) :
- Aile droite masquée (sous le vent) elle reçoit moins de vent relatif
- Portance diminuée sur aile droite
- Inclinaison à droite (**effet dièdre**)
- Correction en mettant du **manche à gauche**
= « **mettre le manche dans le vent** »

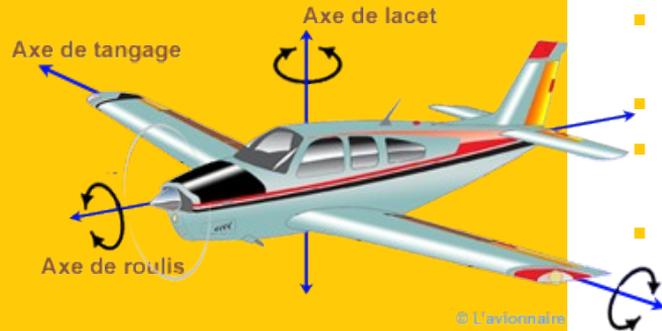


Roulis hollandais *dutch roll*

- Mouvement oscillatoire, **combinaison de l'effet dièdre / roulis induit et du lacet inverse** qui s'entretiennent mutuellement
- Sur les avions de ligne modernes, effet réduit par un équipement appelé « **amortisseur de lacet** » *yaw damper*



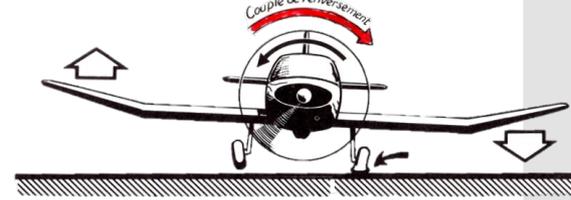
Effets perturbateurs du moteur



□ Couple de renversement

- Rotation hélice (autour de l'axe de roulis)
- Couple** → rotation en sens inverse de tout l'avion autour de l'axe du moteur (roulis)
- Puissance + importante → Effet + important

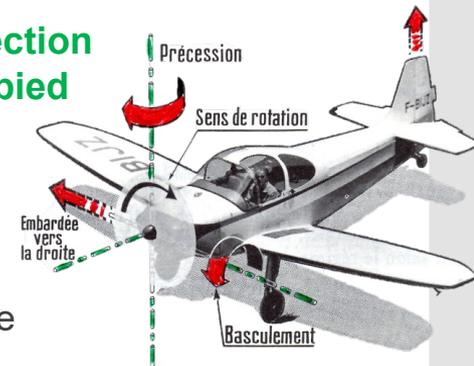
Correction au manche



□ Couple gyroscopique

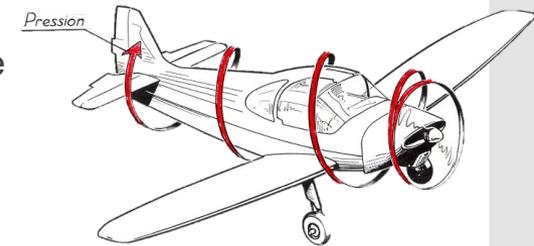
- Mise en montée ou descente cabré/piqué (axe 1 de tangage)
- Rotation hélice (axe 2 de roulis) a un effet sur le 3^{ème} axe, l'axe de lacet appelé **précession**
- Couple** → précession sur lacet (et inversement)
- Le sens, gauche ou droite, dépend des sens de rotation de l'hélice et du virage
- Virage (autour de l'axe de lacet) → effet reporté sur l'axe de tangage (en montée ou descente)

Correction au pied



□ Souffle hélicoïdal (effet girouette)

- Rotation hélice → reflux de masse d'air vers l'arrière tournant dans le même sens
- Dissymétrie** de l'écoulement de l'air sur la dérive, entraînant une rotation autour de l'axe de lacet.
- Provoque en outre une traînée plus forte
- Pour réduire cet effet, **dérive et moteur sont désaxés** lors de la construction (calage déporté)



Correction au pied



P

Décollage



DRD = Distance de Roulement au Décollage
LP = Longueur de Piste
DD = Distance de Décollage
PrD = Prolongement Dégagé
DAA = Distance d'Accélération Arrêt
PA = Prolongement d'Arrêt



Les phases du décollage

- Remonter la piste *to backtrack the runway*
 > S'aligner *to line up* > Décoller *to take off*
- Départ : **lâcher des freins** (LF), accélération (roulement au déco),

$$DRD < LP \text{ (+ sécurité)}$$

- Rotation** (tirer sur le manche)

puis montée initiale :
 passage des 15m sol

$$DD < LP + PrD \text{ (+ sécurité)}$$

- Montée *climb* (vers la croisière)

Cas particuliers

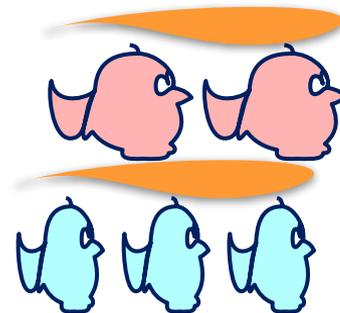
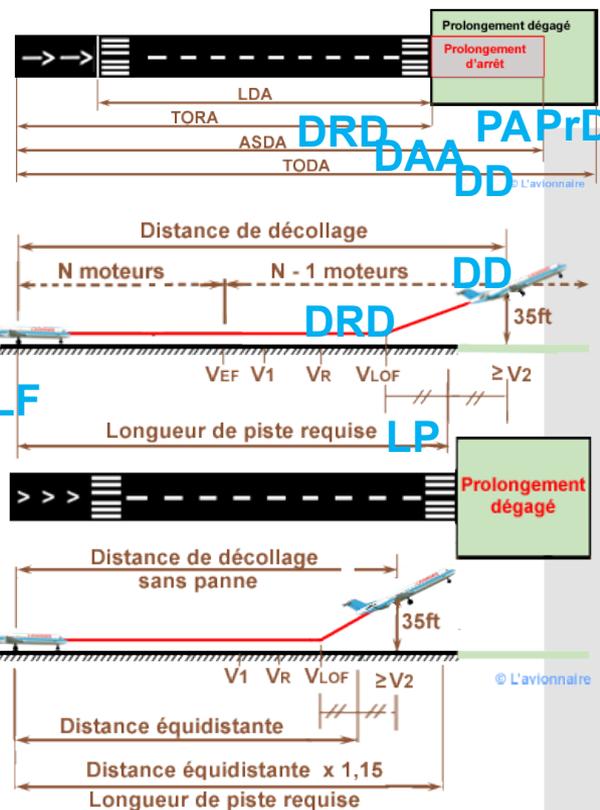
- Décollage interrompu avant la « vitesse de décision » : **accélération-arrêt**
to accelerate-stop $DAA < LP + PA \text{ (+ sécu)}$
- Dans l'eau : **déjauger** *to lift off*

Performances de décollage

Distance de décollage plus courte :

- si décollage **face au vent**
- si **utilisation des becs et volets** (40 kt au lieu de 60 kt)
- si **Température** plus faible, distance de décollage plus courte
- si **Altitude** plus faible (= pression plus forte)

Remarque : idem pour distance d'atterrissage

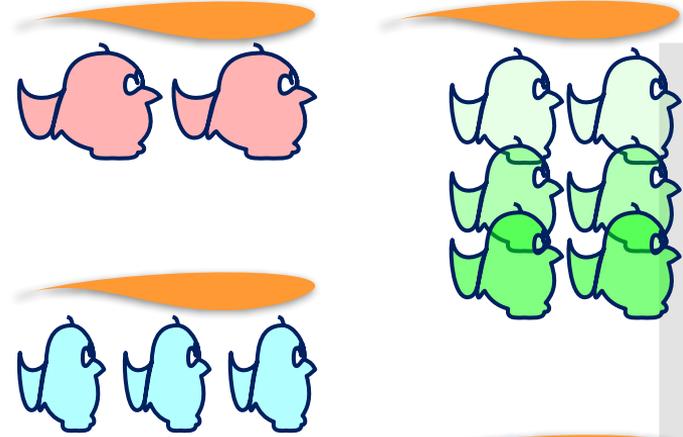


Montée initiale



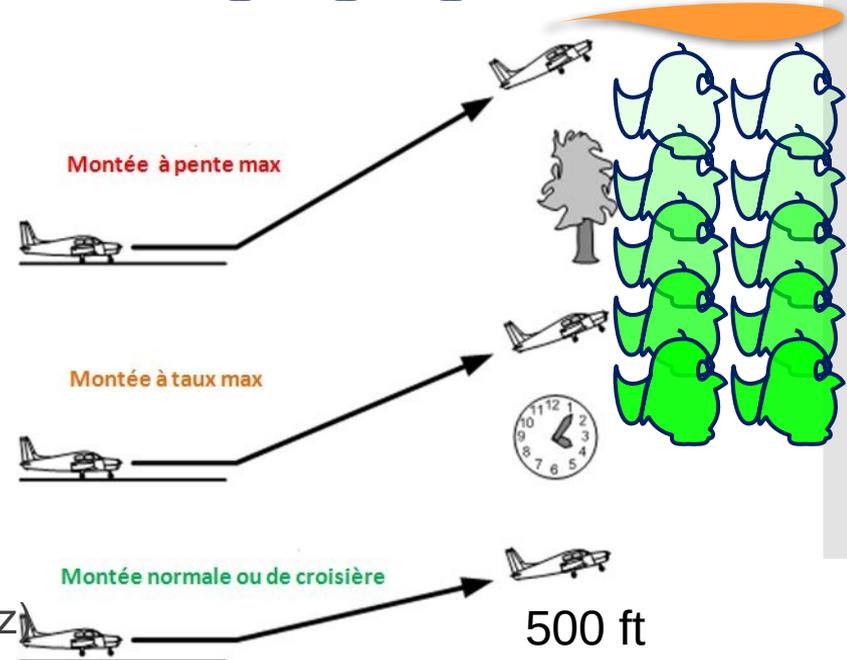
☐ Performances de montée

- Idem pour distance de décollage et d'atterrissage
- Montée plus performante et distance de montée + courte si :
 - ✓ montée **face au vent**
 - ✓ **Température** plus faible
 - ✓ **Altitude** plus faible (= pression plus forte)



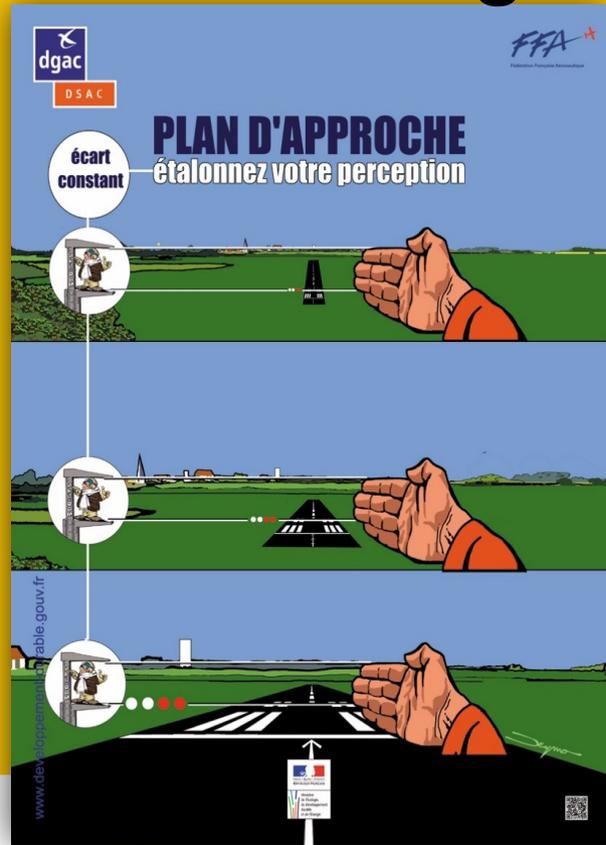
☐ Montées particulières

- **Montée à pente max** : pour **passer un obstacle** en bout de piste
- **Montée à Vz max** : (verticale) pour **arriver rapidement à l'altitude de croisière**
- **Montée normale** : pour **garder une bonne vitesse horizontale** (compromis entre V_p et V_z)



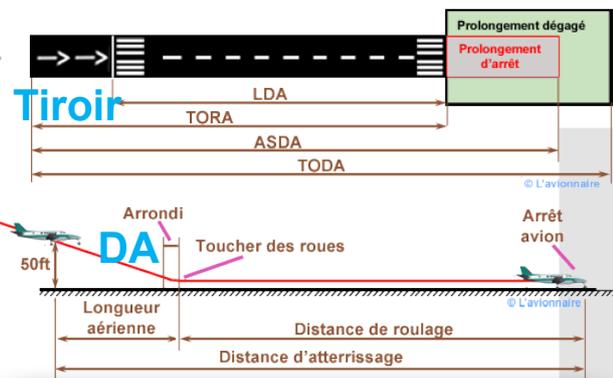
P

Approche finale et atterrissage



De l'approche à l'atterrissage

- Arrivée : descente, approche
- Entrée circuit de piste... finale (< 500ft sol)
- Courte finale : visée **point d'aboutissement**
- Après 50ft, **arrondi** = cabrage avion ($3^\circ \rightarrow 1^\circ$)
- Toucher des roues (franc) : **atterrir to land**
- Décélération lors du **roulement** à l'atterrissage
- Arrêt : atterrissage **complet** ou **stop and go**
- Roulage** vers l'aire de stationnement (TaxiWay)

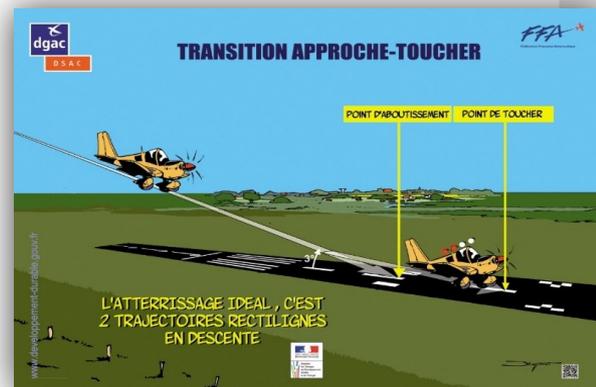


Cas particuliers

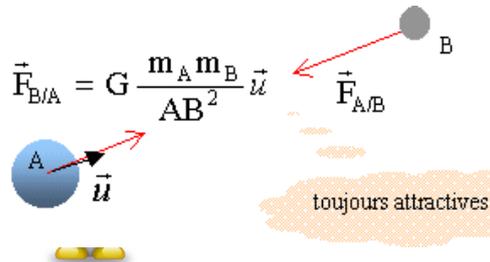
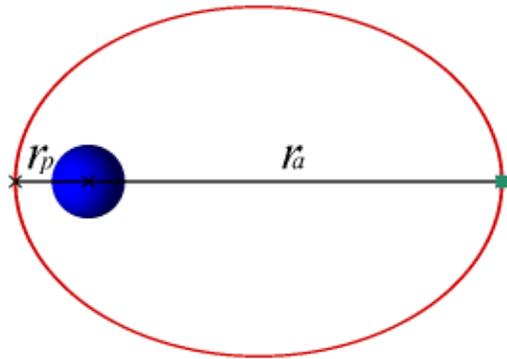
- Approche interrompue par le pilote ou le contrôleur : **RDG Remise De Gaz go around**
- Option** : « toutes les options restent ouvertes », atterrissage ou RDG (pour exercice, par ex)
- Atterrissage suivi d'un redécollage : **touché touch and go TAG** (ex: succession de TAG en entraînement tours de piste)
- Sur l'eau : **amerrir to ditch**

Performances

- Face au vent, becs et volets sortis (idem déco)
- DA < Landing Distance Available (+ sécurité)**
(LDA=Longueur de Piste – **tiroir**, si SDE)
SDE = Seuil décalé Displaced Threshold DTHR



Mécanique spatiale

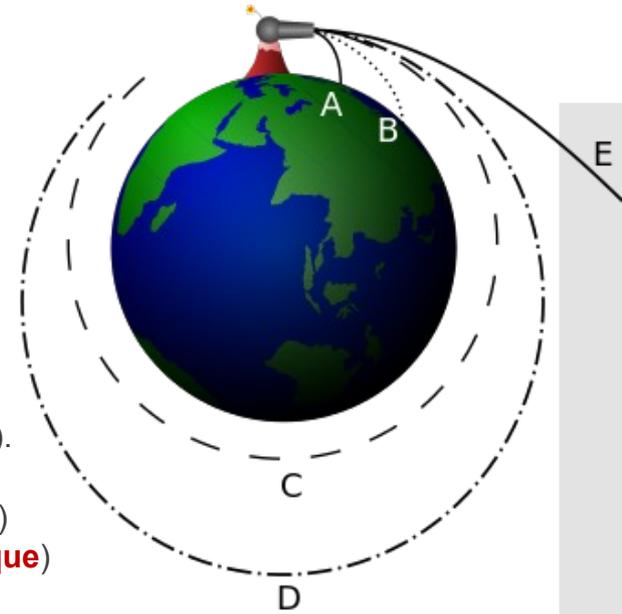


35

- **Définition de la mécanique spatiale**
 - **Mécanique spatiale** *spatial mechanics* ou **astrodynamique**
 - Étude des trajectoires des objets spatiaux

□ Expérience du canon de Newton

- Expérience imaginaire de Newton : en haut d'une montagne, on lance un boulet de plus en plus fort (vitesse croissante)
 - ✓ A : le boulet retombe (**trajectoire parabolique**).
 - ✓ B : le boulet tombe de plus en plus loin...
 - ✓ C : le boulet ne retombe pas (**orbite circulaire**)
 - ✓ D : le boulet s'éloigne et revient (**orbite elliptique**) (satellisation $\approx 7,9$ km/s)
 - ✓ E : $V > 11$ km/s (**vitesse de libération**), il s'en va dans l'espace



□ Caractéristiques des orbites elliptiques

- **Apogée** : point de l'ellipse le plus éloigné de la Terre (vitesse minimale de l'objet sur l'ellipse)
- **Périgée** : point le plus rapproché (vitesse maximale).
- Pour leur éviter de retomber sur Terre, sur les orbites basses, la **vitesse orbitale** des engins est très grande, pour que la **force centrifuge équilibre le poids**
- Carburant des satellites (petits recalages) = **ergols**
- **Assistance gravitationnelle** : utilisation de l'attraction des astres pour accélérer



P

Mise en orbite terrestre



□ Base de lancement

- Depuis une base **proche de l'équateur** (vitesse tangentielle maximale de la Terre)
- **Vers l'est**, pour profiter de la vitesse d'entraînement due à la rotation de la Terre
- Exemples : **Cap Canaveral** en Floride (USA), **Kourou** en Guyane française (France)...

□ Lancement et mise en orbite

- Le lancement se déroule en deux phases :
 1. **Phase propulsée** par les **moteurs** de la fusée
 - ✓ Dans l'atmosphère puis dans l'espace
 - ✓ Guidage initial grâce aux **gyroscopes**, à la **centrale aérodynamique** (calculateur de bord alimenté par différents capteurs) et aux **ailerons**
 2. **Phase balistique** sur l'élan de la fusée
 - ✓ La fusée peut fonctionner en **plusieurs étages successifs** retombant sur Terre
 - ✓ Le satellite est placé par la fusée sur une **orbite circulaire** ou bien sur une **orbite d'injection** avec une vitesse et un angle donné.



Orbites terrestres

Orbites circulaires

Polaires ou équatoriales

Haute géostationnaire Geostationary Orbit

- ✓ À environ **36 000 km**, le satellite tourne à la même vitesse **3 km/s** (env. 10 000 km/h) que la Terre ; aussi, sa position semble fixe
- ✓ Satellite de télécommunication, diffusion TV, météo (Météosat)
- ✓ Peu de satellites au-delà de cette orbite

Orbites moyennes *Medium Earth Orbit*

- ✓ De 2 000 à 36 000 km
- ✓ Principalement satellites de navigation : Glonass russe, GPS américain et Galiléo européen, à env. 20 000 km

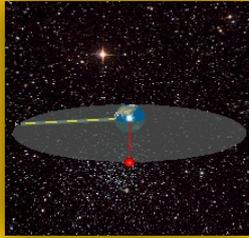
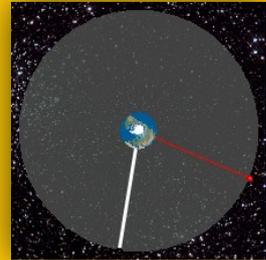
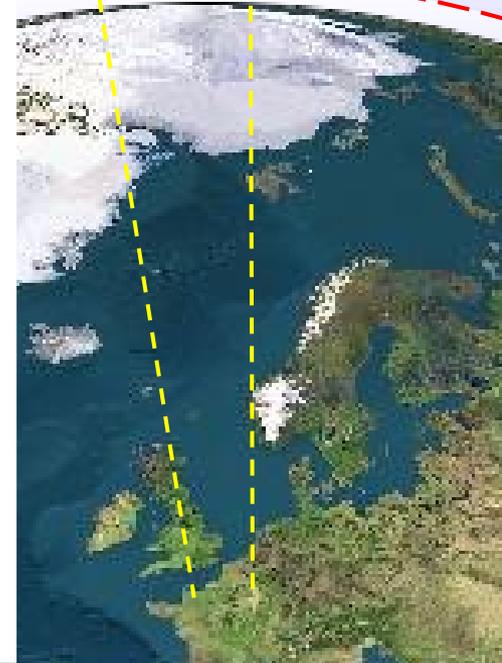
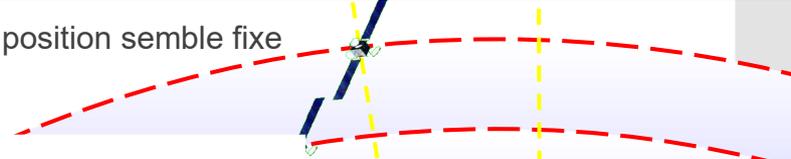
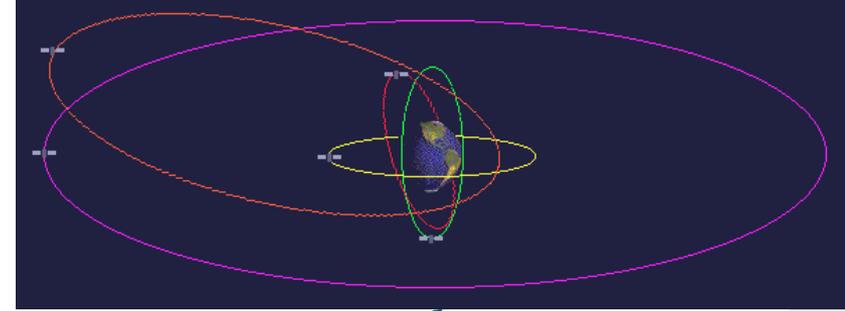
Orbites basses *Low Earth Orbit*

- ✓ Jusqu'à 2 000 km (orbital ou équatorial...)
- ✓ Télédétection (d'imagerie terrestre comme Spot, satellites météo à défilement...), télécommunications...
- ✓ Télescope spatial Hubble (600 km)
- ✓ Stations orbitales (MIR, **ISS à 340 km et 7 km/s...**)

Orbites non circulaires

de **libération** (hyperbolique) : trajectoire se libérant de l'attraction terrestre (sondes...)

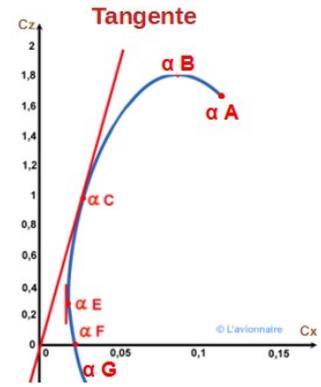
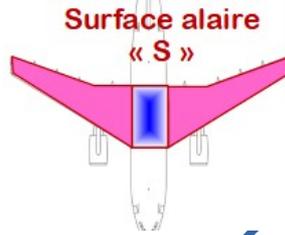
- de **transfert** (elliptique) : trajectoire provisoire d'injection (ex : transfert géostationnaire à l'apogée)



$$\text{Charge alaire} = \frac{\text{Poids Total}}{\text{Surface Alaire}}$$

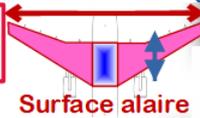
$$\text{portance } R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z$$

Surface alaire S
 S = surface demi-aile x 2
 + surface entre ailes



$$\text{Masse Maxi du Ballon} = (\text{MasseVolExt} - \text{MasseVolBallon}) \times \text{VolumeBallon}$$

$$\text{Allongement } \lambda = \frac{\text{Envergure}}{\text{Profondeur}} = \frac{\text{Envergure}^2}{\text{Surface Alaire}}$$



$$\text{Épaisseur relative, } e = \frac{h, \text{ épaisseur max}}{l, \text{ profondeur}}$$

