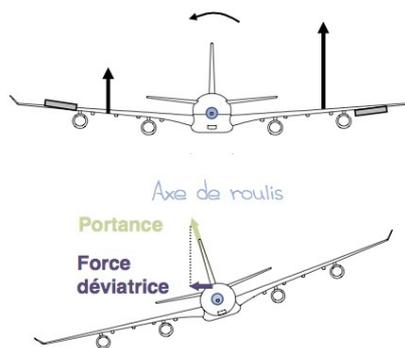


# Aérodynamique et Mécanique du vol

Laetitia Souteyrat

Cours BIA Lycée Chevalier de Saint Georges session 2023



BIA\_CSG

# Table des matières

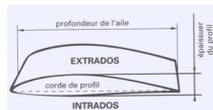
I - COMMENT LES AVIONS VOLENT-T-ILS ?	3
1. Caractéristiques de l'aile :.....	3
2. L'angle d'incidence.....	3
3. Les forces aérodynamiques.....	3
II - LE DECROCHAGE - LA POLAIRE - LA FINESSE	5
1. La polaire :.....	5
2. La finesse :.....	6
III - BILAN DES FORCES	7
IV - GOUVERNES PRINCIPALES	9
1. Contrôle du tangage ⇒ Montée / Descente .....	9
2. Contrôle du roulis ⇒ Virage .....	9
3. Contrôle lacet ⇒ Symétrie du vol.....	10
V - GOUVERNES SECONDAIRES WINGLETS	11
1. Aérofreins / Spoilers.....	11
2. Winglets – Réduction des tourbillons marginaux :.....	12
VI - LE FACTEUR DE CHARGE	13
1. Facteur de charge et vitesse de décrochage .....	13
2. Facteur de charge en palier .....	13
3. Facteur de charge en montée / descente .....	13
4. Facteur de charge en virage.....	14
5. Facteur de charge en ressource .....	14
VII - LE DÉCOLLAGE ET L'ATERRISSAGE	15
1. Le décollage.....	15
2. L'atterrissage .....	16

# COMMENT LES AVIONS VOLENT-T-ILS ?

...grâce à leurs ailes !



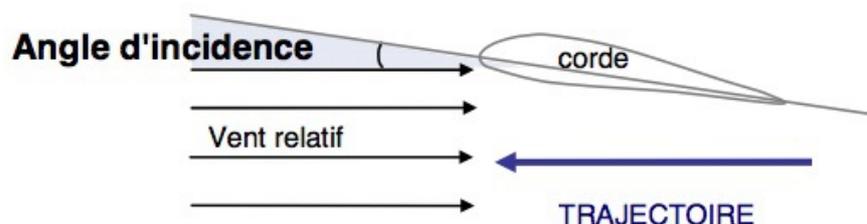
## 1. Caractéristiques de l'aile :



Profil :	Coupe verticale de l'aile
Corde de profil :	Ligne joignant le bord d'attaque au bord de fuite
Profondeur :	Longueur de la corde de profil
Épaisseur :	Distance maximum entre l'extrados et l'intrados
Envergure :	Distance entre les extrémités des deux ailes
Allongement =	
Surface alaire :	Surface totale de la voilure, y compris celle qui traverse le fuselage

## 2. L'angle d'incidence

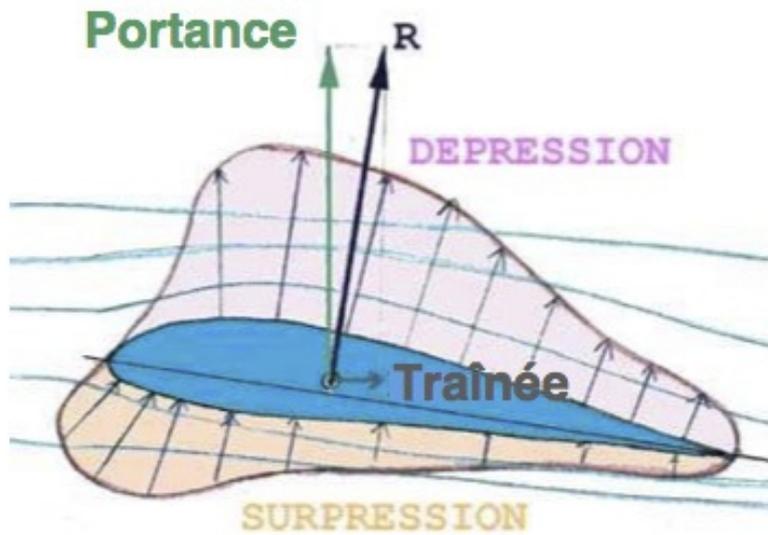
C'est l'angle compris entre la corde de profil de l'aile et la trajectoire.



## 3. Les forces aérodynamiques

Lorsque l'aéronef se déplace, l'air s'accumule sous les ailes et provoque une pression qui va **pousser les ailes vers le haut**. Par ailleurs, un "manque d'air" (dépression) va se produire sur le dessus des ailes. Cette dépression va **aspérer l'aile vers le haut**.

La force ainsi générée par l'écoulement de l'air autour du profil d'aile s'appelle la **résultante aérodynamique (R)**



La résultante aérodynamique pousse l'aile vers le haut et vers l'arrière en même temps. On peut donc la décomposer en 2 forces :

la **portance**,  
qui "porte" l'avion vers le haut

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

la **traînée**,  
qui s'oppose au déplacement de l'avion

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

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $S$  la surface alaire,  $V$  la vitesse de l'aéronef,  $C_z$  et  $C_x$  des coefficients caractéristiques du profil.

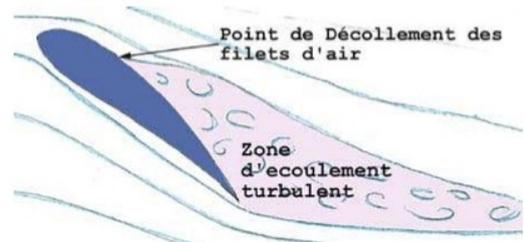
# LE DECROCHAGE - LA POLAIRE - LA FINESSE



## Le décrochage :

Si l'on incline l'aile au-delà d'un certain angle (**incidence** d'environ  $18^\circ$ ), l'écoulement de l'air devient tourbillonnaire sur l'extrados car les filets n'ont plus suffisamment d'énergie pour coller au profil de l'aile.

Il en résulte une diminution rapide et importante de portance.

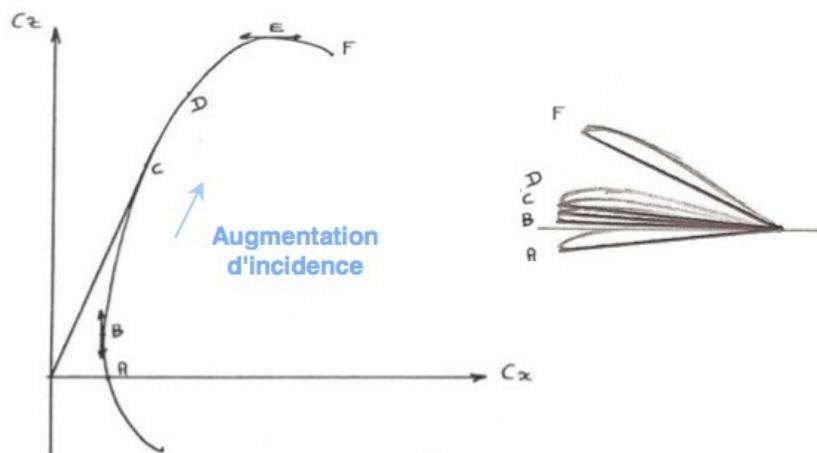


C'est le **décrochage**, qui se traduit par un enfoncement de l'avion, ou un basculement de l'avion vers l'avant et éventuellement sur le côté si une aile décroche en premier.



## 1. La polaire :

Elle représente l'évolution des coefficients **Cx** et **Cz** avec l'**angle d'incidence**.



A :	portance nulle
B :	traînée minimale
C :	finesse maxi
D :	vitesse de chute minimale
E :	portance maximale
F :	décrochage

## 2. La finesse :

La finesse rend compte de la "**capacité à planer**" d'un aéronef.

**Finesse = Distance horizontale parcourue en vol plané / Perte de hauteur**

La finesse représente donc "combien de fois" un aéronef peut parcourir sa hauteur.

### *Exemple*

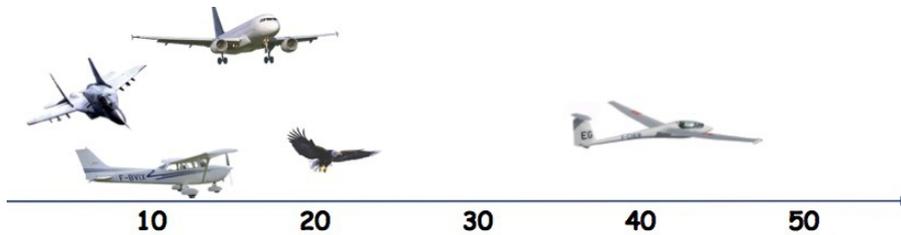
Ex : un planeur de finesse 40 peut parcourir 40 km en perdant 1 km (1000 m) d'altitude.

$$\text{Finesse} = \frac{\text{distance horizontale}}{\text{distance verticale}} = \frac{\text{vitesse horizontale}}{\text{vitesse verticale}} = \frac{\text{portance}}{\text{traînée}} = \frac{C_z}{C_x}$$

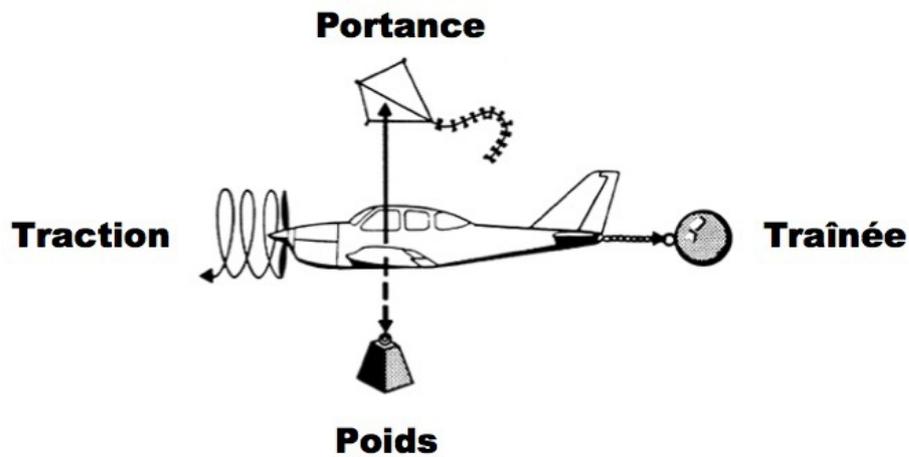
Pour chaque aéronef, il existe une seule vitesse pour laquelle la finesse est maximum.

Choisir la **vitesse de finesse maximale** permet de parcourir la **plus grande distance** possible.

**Comparaison des finesesses en vol plané :**



# BILAN DES FORCES

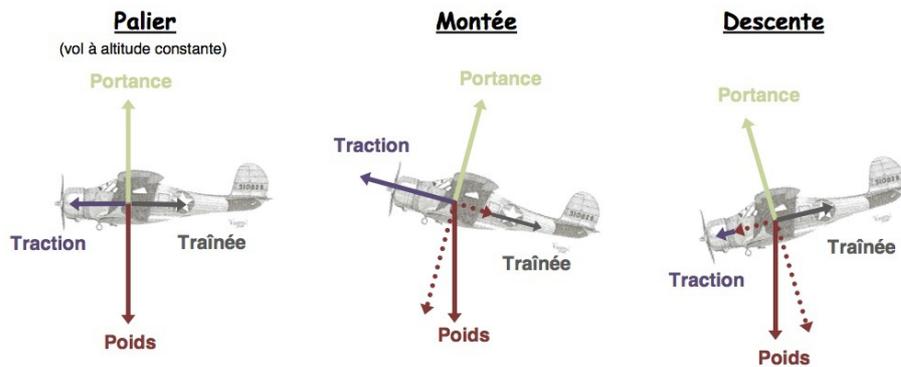


Le vol d'un aéronef est soumis à 4 forces :

- la **traction** (avions à hélice) ou **poussée** (avions à réaction), grâce à laquelle l'avion progresse dans l'air. La manette des gaz permet d'agir sur l'intensité de cette force.
- la traînée
- le **poids** de l'aéronef, force verticale orientée vers le bas, appliquée au centre de gravité.
- la **portance**, force perpendiculaire à la trajectoire, appliquée au centre de poussée.

## Définition

Le point d'application des variations de portance se nomme le **foyer**. Sa position pour un profil donné est fixe et se situe généralement au quart de la corde à partir du bord d'attaque.



### En palier :

La portance équilibre le poids.

La traction équilibre la traînée.

### En montée :

La portance équilibre la grande composante du poids.

La traction équilibre la traînée + la petite composante du poids.

La traction doit donc être plus importante qu'en palier.

**En descente :**

La portance équilibre la grande composante du poids

La traction + la petite composante du poids équilibrent la traînée.

La traction doit donc être moins importante qu'en palier.

La petite composante du poids peut même remplacer la traction (**vol plané**).

# GOUVERNES PRINCIPALES

# IV

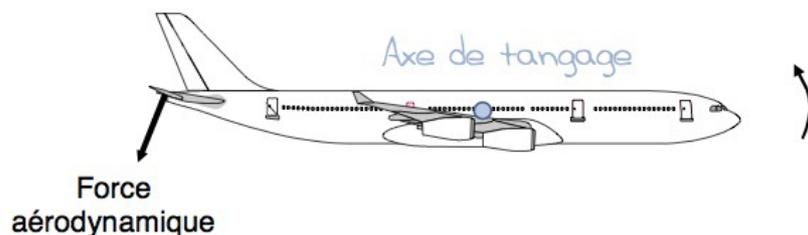
Pour diriger l'avion dans l'espace, on utilise des efforts aérodynamiques créés sur de petites surfaces que l'on appelle **gouvernes** afin de provoquer des rotations sur les 3 axes de l'avion.

## 1. Contrôle du tangage $\Rightarrow$ Montée / Descente

Il s'effectue en déplaçant le **manche longitudinalement (avant-arrière)**.

Le **braquage du manche vers l'avant** commande le mouvement de la **gouverne de profondeur** vers le bas. Ceci entraîne une modification de l'assiette à piquer.

Le **braquage du manche vers l'arrière** commande le mouvement de la gouverne de profondeur vers le haut. Ceci entraîne une **modification de l'assiette à cabrer**.



*Assiette : angle compris entre l'horizontale et l'axe longitudinal de l'avion*

## 2. Contrôle du roulis $\Rightarrow$ Virage

Il s'effectue en déplaçant le **manche latéralement (droite-gauche)**.

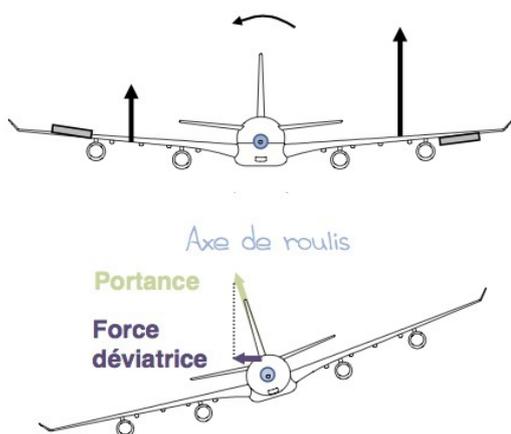
Le **braquage du manche à gauche** commande le mouvement de l'aileron gauche vers le haut et de l'aileron droit vers le bas.

La portance de l'aile gauche diminue et la portance de l'aile droite augmente, ce qui provoque une **inclinaison** de l'avion **vers la gauche**.

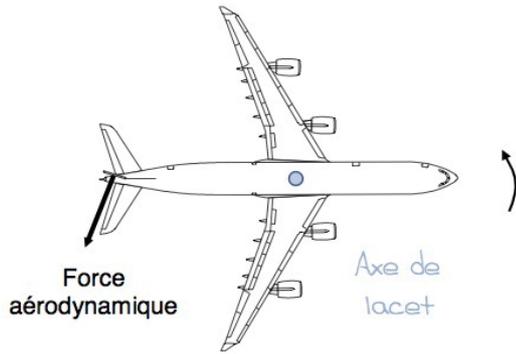
Cette inclinaison entraîne un effet secondaire :

l'aile droite qui voit sa portance augmenter voit également sa traînée augmenter. Il se produit alors une rotation autour de l'axe de lacet. Le nez part à droite. Une inclinaison sur la gauche engendre donc du lacet à droite. On parle de **lacet inverse**.

Raisonnement inverse pour le **braquage du manche à droite**.



### 3. Contrôle lacet ⇒ Symétrie du vol



Il s'effectue en manœuvrant les **palonniers** (pédales).

Le **braquage du palonnier vers la gauche** commande le mouvement de la **gouverne de direction** vers la gauche. Ceci entraîne une rotation à gauche autour l'axe de lacet

# GOUVERNES SECONDAIRES

## WINGLETS

V

### Becs et volets



Becs (bord d'attaque)



Volets (bord de fuite)

Ils permettent de voler à basse vitesse pour les besoins de l'atterrissage et du décollage.

Pour maintenir la portance constante, la diminution de vitesse est compensée par une augmentation de la **surface alaire** et/ou une augmentation de la courbure (modification de **Cx** et **Cz**).

## 1. Aérofreins / Spoilers

### Aérofreins



Aérofreins

Les **aérofreins** sont des panneaux encastrés dans la voilure ou le fuselage dont la sortie dans l'écoulement de l'air permet d'augmenter la traînée.

En vol, ils permettent de diminuer la vitesse et d'augmenter le taux de chute.

Au sol, ils contribuent au freinage afin de diminuer la longueur de roulement.

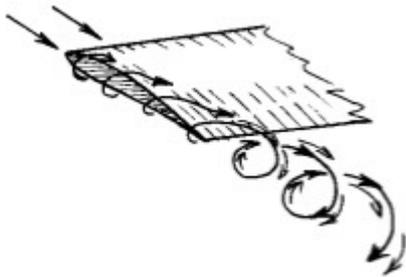


Spoilers

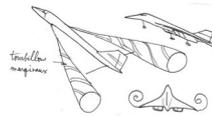
Les **spoilers** sont des panneaux d'extrados dont le braquage peut être symétrique en fonction aérofrein ou dissymétrique en fonction gauchissement (réduction de la portance sur l'aile intérieure au virage).

## 2. Winglets – Réduction des tourbillons marginaux :

La **surpression d'intrados** et la **dépression d'extrados** engendrent en bouts d'ailer un mouvement de l'air de l'intrados vers l'extrados.



Cet enroulement intrados/extrados de l'air forme alors les **tourbillons marginaux**, qui génèrent une "traînée induite", ainsi qu'une **turbulence de sillage**.



Pour réduire les tourbillons marginaux, on installe en bouts d'ailer des pièces appelées **winglet**.



# LE FACTEUR DE CHARGE

# VI

## Définition

C'est une grandeur qui traduit l'**effort** appliqué à la **structure** de l'aéronef.

Le **facteur de charge** est le rapport entre la charge totale supportée par la structure d'un appareil et le poids réel de cet appareil.

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{Poids apparent (gravité + forces d'inertie)}}{\text{Poids réel (gravité)}} = \frac{\text{Portance}}{\text{Poids}}$$

Le nombre obtenu est sans unité mais il s'exprime parfois en « g ».

Un avion subit un facteur de charge **positif** quand la portance est orientée dans le sens habituel, vers le « toit » de l'avion, et **néglatif** dans le sens contraire.

**En vol rectiligne stabilisé sur le dos, par exemple, le facteur de charge vaut -1.**

*Exemple*

La plupart des avions légers peuvent supporter des facteurs de charge de +4 à -2.

Les avions de **voltage** sont certifiés pour des facteurs de charge de +6 à -4.

Ces valeurs sont des limites, qui figurent dans le manuel de vol de chaque avion, et au-delà desquelles risquent d'apparaître des déformations permanentes sur la structure de l'avion, voire une rupture de pièces essentielles telles que le longeron.



Le pilote et ses passagers subissent le même facteur de charge que l'avion lors d'une évolution.

- facteur de charge **supérieur à 1** : sensation de **tassement**
- facteur de charge **proche de 0** : sensation d'**apesanteur**
- facteur de charge **néglatif** : sensation d'être **projeté vers le haut**

## 1. Facteur de charge et vitesse de décrochage

La vitesse de décrochage évolue selon la racine carrée du facteur de charge.

*Exemple*

Par exemple, un avion qui décroche à 100 km/h sous 1g, décrochera vers 200 km/h sous 4g.

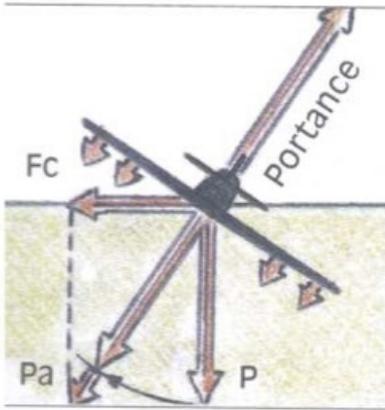
## 2. Facteur de charge en palier

La portance est égale au poids : le facteur de charge est de 1.

## 3. Facteur de charge en montée / descente

La portance est inférieure au poids : le facteur de charge est < 1

## 4. Facteur de charge en virage



La portance doit augmenter pour maintenir le vol en palier.

Le facteur de charge en virage **augmente avec l'inclinaison.**

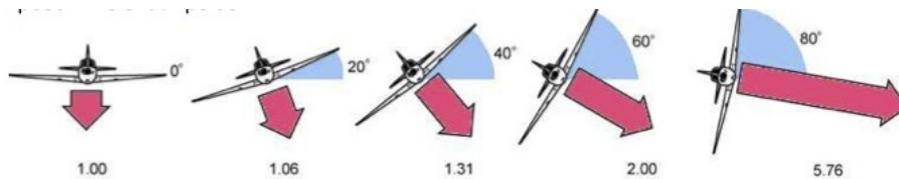
Fc : force centrifuge

Pa : poids apparent

Il est égal à  $\frac{1}{\cos(\text{inclinaison})} > 1.$

### Exemple

Ex : Lors d'un virage à 60° d'inclinaison, le facteur de charge est égal à 2 : la structure de l'appareil doit supporter deux fois le poids de l'avion, et les occupants ont la sensation de peser 2 fois leur poids.



## 5. Facteur de charge en ressource

Dans le cas d'un changement rapide de trajectoire dans le plan vertical, le facteur de charge est d'autant plus important que la **vitesse de l'avion** est grande et que le **rayon de courbure** de la trajectoire est petit.

## 1. Le décollage

Pendant la phase de **roulement**, l'avion **accélère** sur la piste afin d'atteindre une vitesse lui permettant d'assurer sa sustentation par une portance suffisante.

Lorsque la **vitesse de décollage** est atteinte, le pilote effectue la **rotation** pour placer l'avion à l'assiette de montée. Cela augmente la portance par augmentation d'incidence.

L'avion quitte le sol et continue à accélérer vers sa vitesse de montée tout en prenant de l'altitude.

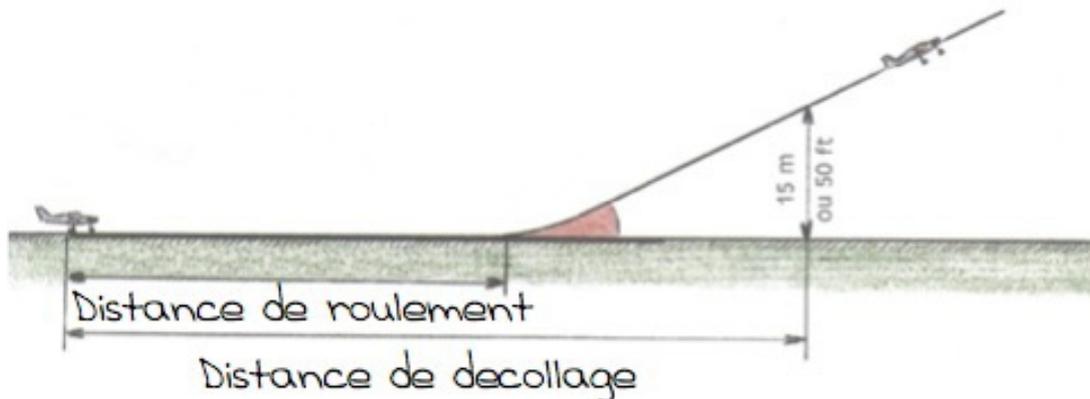
Le décollage se termine au **passage à la hauteur de 15 m** par rapport au sol.



Décollage de l'A340 à La Paz  
(4000 m de hauteur)

le décollage d'un avion se fait **face au vent** pour décoller sur une distance plus courte. L'utilisation des **volets** permet de diminuer la vitesse nécessaire au décollage.

La longueur de roulement nécessaire au décollage augmente avec l'**altitude** et la **température**.



## 2. L'atterrissage



Atterrissage de l'A380 à Geneve

L'avion descend sur une pente **finale** stabilisée à la **vitesse d'atterrissage**.

Près du sol le pilote « **arrondit** » c'est-à-dire qu'il cabre l'avion pour réduire la pente de descente afin de venir tangenter le sol.

En même temps, il réduit complètement la puissance des moteurs. La vitesse décroît, ce qui réduit doucement la portance.

Le pilote relève le nez de l'avion pour que le **train d'atterrissage principal** prenne contact avec le sol en premier.

Suit la phase de **décélération** qui permet de réduire la vitesse sur la piste avant de dégager vers le parking.

L'atterrissage d'un avion se fait **face au vent** pour atterrir sur une distance plus courte. L'utilisation des pleins **volets** (et si installés les becs) permet de réduire la vitesse d'approche.

La distance d'atterrissage augmente avec l'**altitude** et la **température**.

