

# Aérodynamique et Mécanique du Vol



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le mythe d'Icare :
  - Dédale construisit un labyrinthe pour le roi Minos (Crête) qui l'y enferma avec son fils Icare.
  - Pour s'échapper ils fabriquèrent des ailes en plumes collées à la cire.
  - Icare, grisé par le vol s'approcha trop près du soleil, la cire fondit et il tomba.



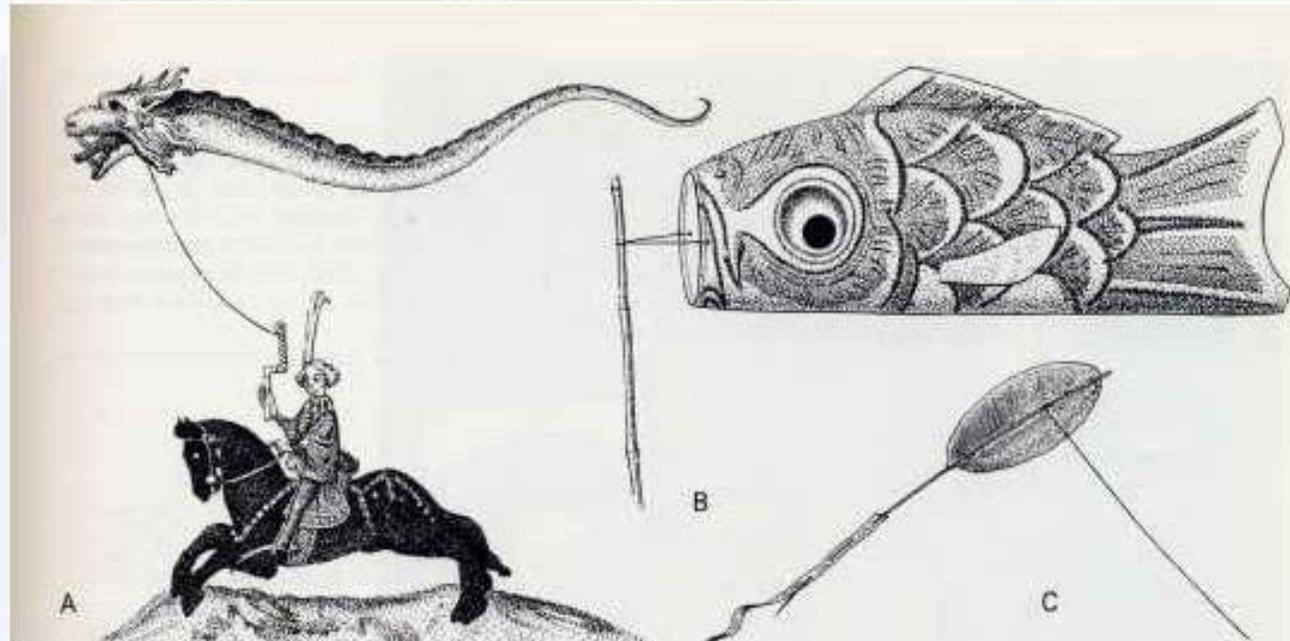
# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le cerf-volant, premier aéronef :
  - Apparu en chine il y a plus de 2000 ans
  - Amené en Europe au XV<sup>ème</sup> siècle par des marchands anglais, hollandais et portugais.
  - Utilisation de loisir essentiellement

A- cerf-volant européen du moyen-âge, connu grâce à des manuscrits allemands datant de 1405

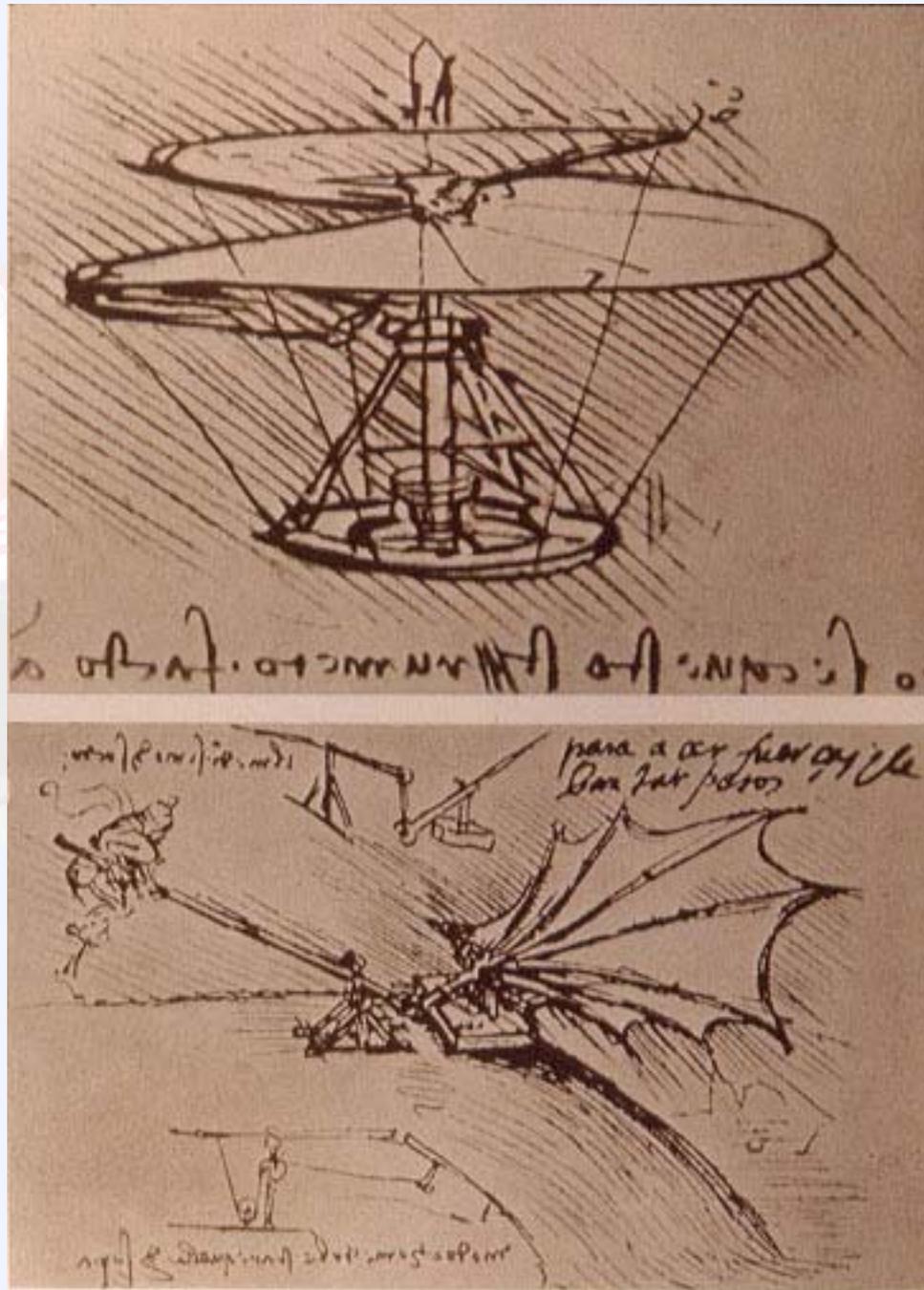
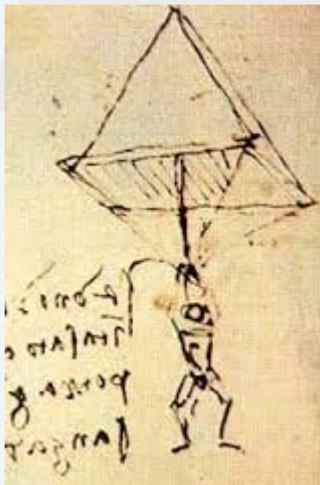
B- cerf-volant japonais

C- cerf-volant des îles de Micronésie, où le pilotage de cerf-volant se développa



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- La Renaissance : période de développement intellectuel, scientifique et technique. Léonard de Vinci étudie des machines volantes :
  - en s'inspirant du vol des oiseaux.
  - En imaginant l'hélicoptère
  - En dessinant le parachute



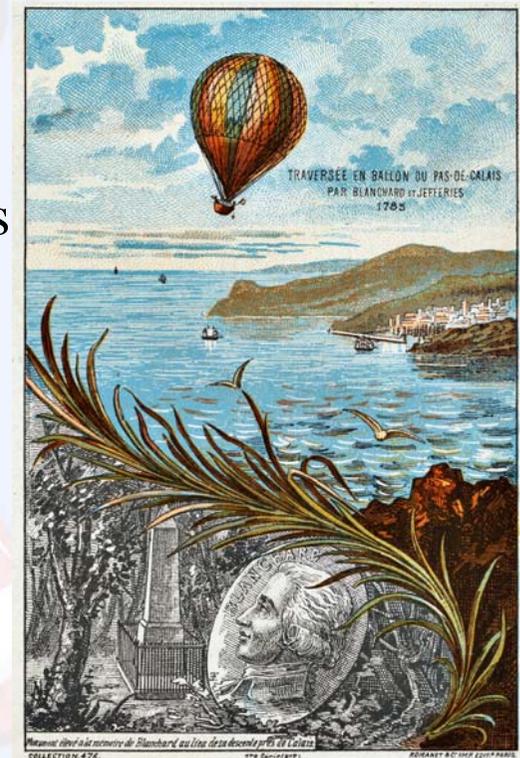
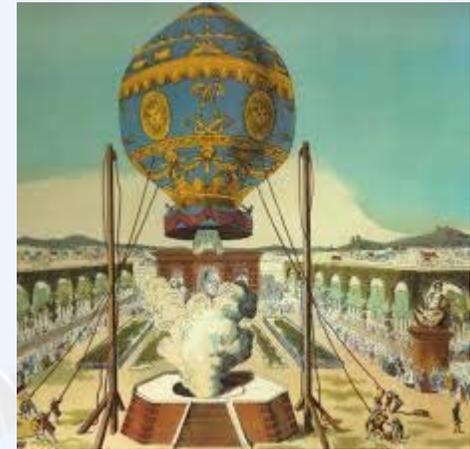
# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le ballon à air chaud :
  - Inventé par les frères Montgolfier.
  - 19 septembre 1783 à Versailles : le premier vol fut réalisé par un mouton, un coq et un canard, emportés sur trois kilomètres par un ballon à air chaud des frères Montgolfier. Le roi de France ayant interdit qu'un homme participât à cette première expérience. On croyait alors que la couche d'air suivait le relief, avec environ 10 m d'épaisseur.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le ballon à air chaud :
  - Pour l'Histoire les premiers humains à quitter le sol furent les français, François Pilâtre de Rozier et le marquis d'Arlandes le **21 novembre 1783**, entre le château de la Muette et la Butte-aux-Cailles. 25 minutes plus tard, ils avaient franchi 10 kilomètres et étaient montés à plus de 1.000 mètres.
  - 1785 : Première traversée de la Manche, Douvres-Calais par Blanchard et Jeffries, en ballon libre non dirigé. La colonne Blanchard à Guînes en porte le témoignage.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

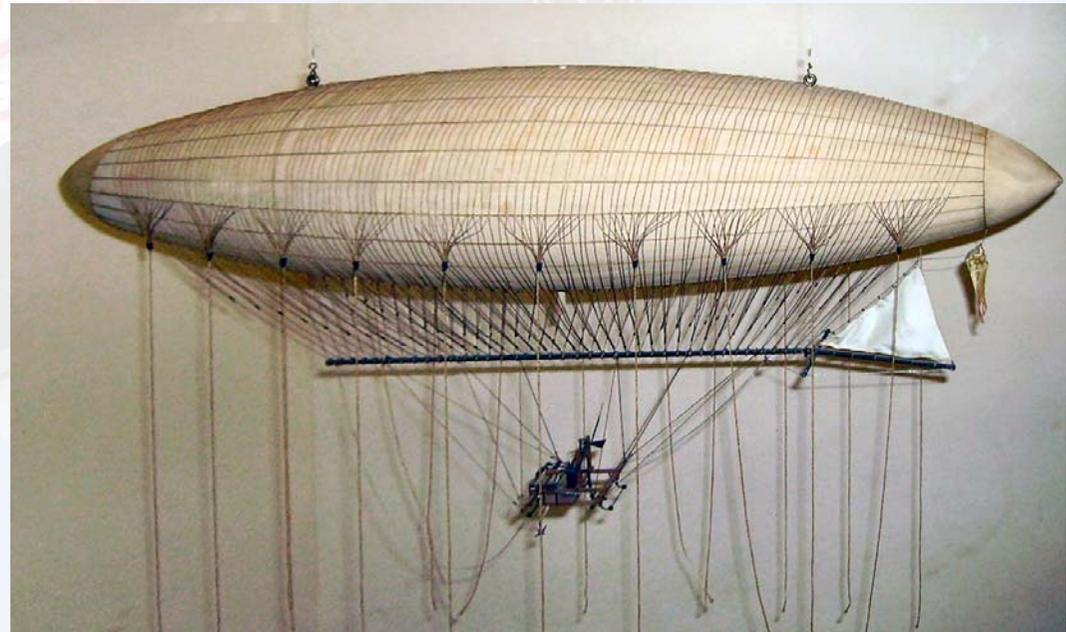
- Le ballon à gaz :
  - Inventé en 1783 par Jacques Charles (gonflé au dihydrogène)
  - **1797** Premier saut en parachute par le Français Jacques Garnerin qui saute d'un ballon, à 1000m d'altitude.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

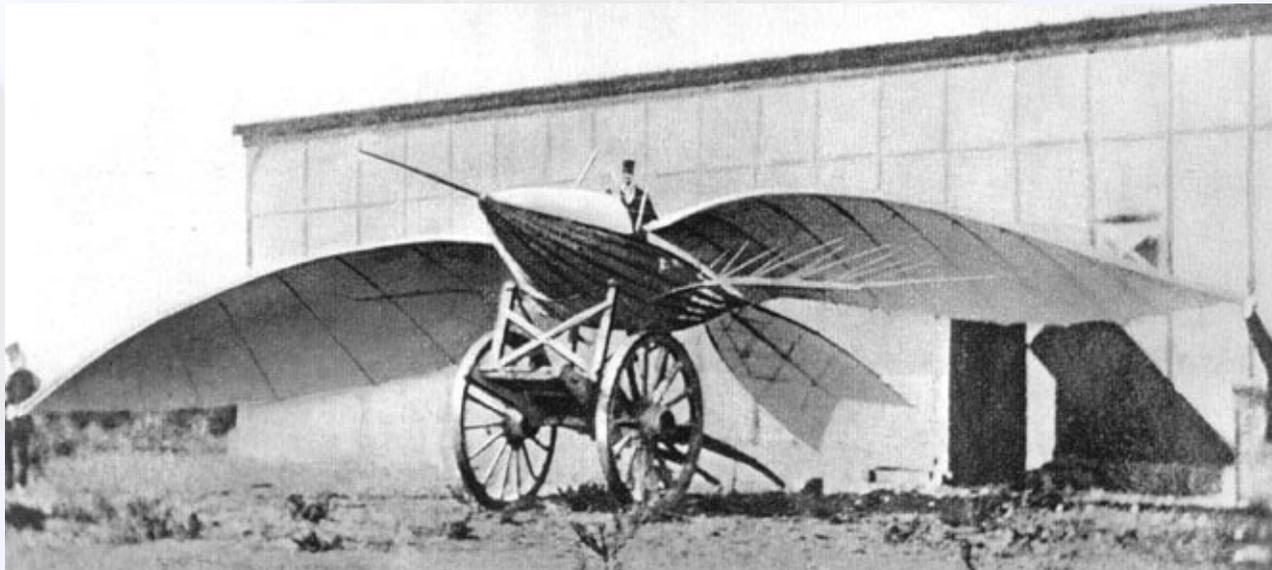
- Le dirigeable d'Henri GIFFARD, 1852 :
  - Ingénieur et aéronaute français (1825-1882 ).  
En 1852, Henri Giffard pilota le premier dirigeable propulsé par une hélice mue par un moteur à vapeur, parcourant près de 27 km de Paris à Trappes en 3 heures environ.

- Alberto SANTOS DUMONT fait le tour de la tour Eiffel
- en 1901



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le premier vol plané :
  - effectué par Jean-Marie Le Bris.
  - Tiré par un cheval face au vent il parcourt entre 100 et 200 m à bord de son « oiseau artificiel ».
  - Il avait remarqué que même mort l'albatros tend à s'élever si on expose sa dépouille ailes étendues face au vent selon une certaine inclinaison.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- 1890 : Le premier avion de clément ADER
  - 50m à 20cm de haut
  - 1897 Avion III (300m à 50cm)
  - Écrit une doctrine complète de l'utilisation militaire de l'avion



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- **1891- 1896** planeurs monoplans et biplans cellulaires d'Otto Lilienthal, premier pilote photographié en vol. Sa devise : « il faut voler et tomber jusqu'à ce que nous puissions voler sans tomber ».



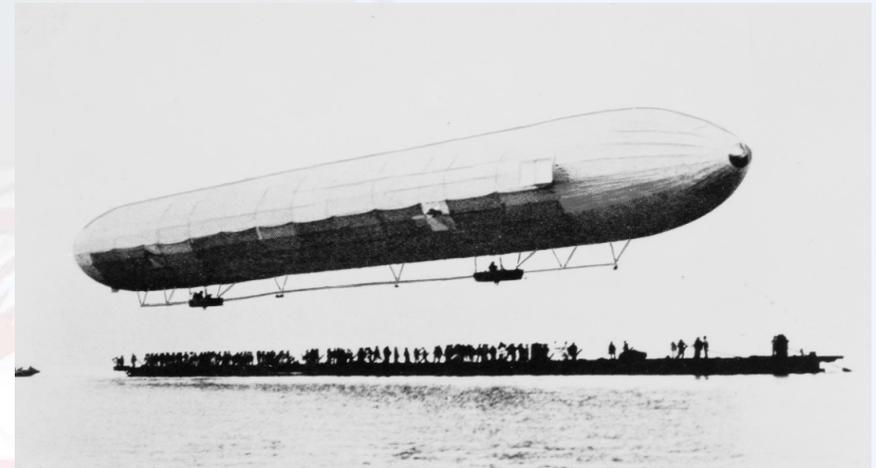
- **1893** Cerf-volant cellulaire de Lawrence Hargrave.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Les premiers théoriciens du vol :
  - Sir Georges CAYLEY décrit les forces aérodynamiques (portance et traînée) en 1853
  - Otto LILIENTHAL a étudié scientifiquement les ailes de ses planeurs
  - Octave CHANUTE a poursuivi ses études, inspirant les frères WRIGHT

- **1900** Le général allemand à la retraite Ferdinand Von Zeppelin, s'envole à bord d'un ballon dirigeable de son invention au dessus du lac de Constance en Allemagne. L'aérostat de 128 mètres de long a parcouru 6 kilomètres en 18 minutes à 400 mètres d'altitude.



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Les Frères Orville et Wilbur WRIGHT:
  - 1901 : construisent une soufflerie
  - 17 décembre 1903 premiers vols
  - Début 1904 premier vol en circuit fermé



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- L'avion progresse et s'organise :
  - 1905 création de la Fédération Aéronautique Internationale
  - 1907 Paul CORNU décolle son hélicoptère à 1,5m du sol



- 1907 Robert ESNAULT PELTERIE invente le « manche à balai »
- 1908 Henry Farman boucle le premier kilomètre en circuit fermé

# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- L'Angleterre n'est plus une île :
  - Louis BLERIOT traverse la manche le 25 juillet 1909
  - 37min et une arrivée difficile

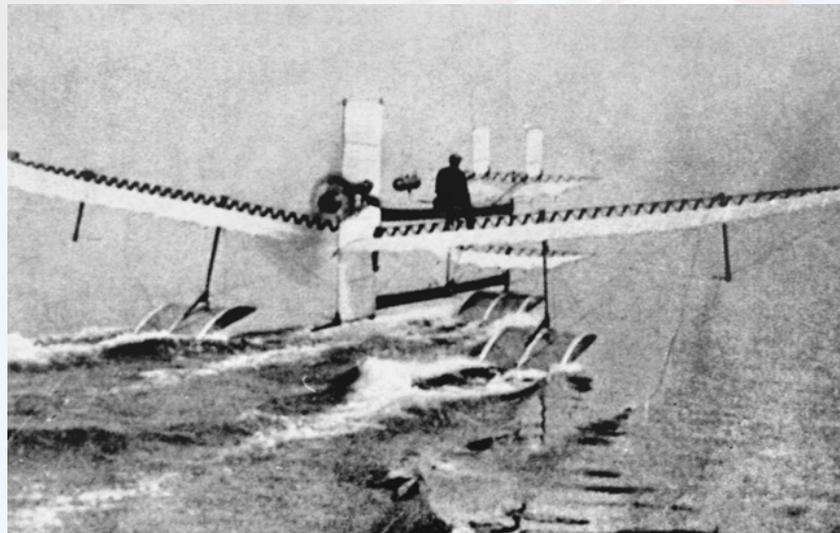


# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- La traversée des Alpes par Jorge CHAVEZ le 23 Octobre 1910



- La naissance de l'hydravion le 28 mars 1910 à Martigues par Henri FABRE:



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

- Le domaine de vol des avions s'ouvre :
  - 21 septembre 1913 à Buc
  - Adolphe PEGOUD réalise la première boucle



# Voler : un rêve vieux comme l'humanité

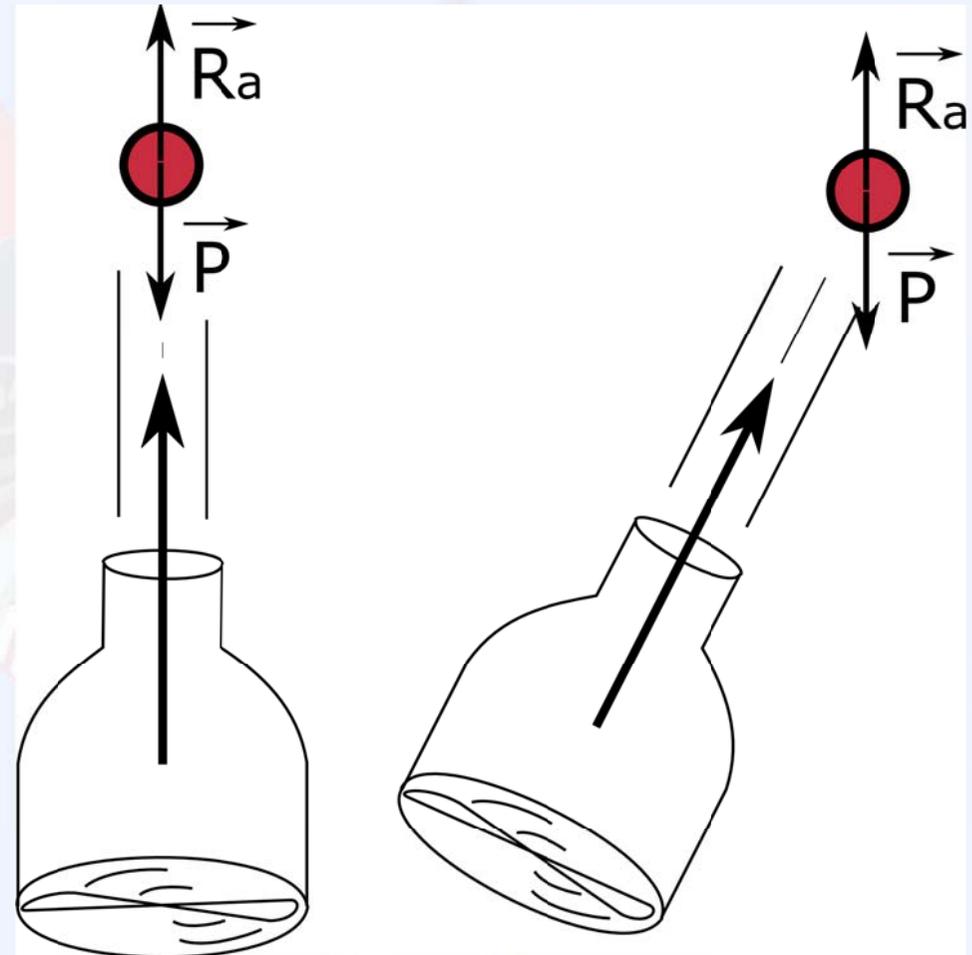
- Après la Manche, la Méditerranée:
  - Roland Garros
  - 23 septembre 1913
  - Sur Morane Type H



# I La résultante des forces aérodynamiques

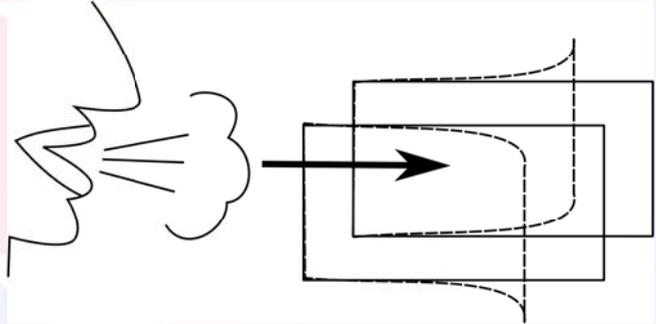
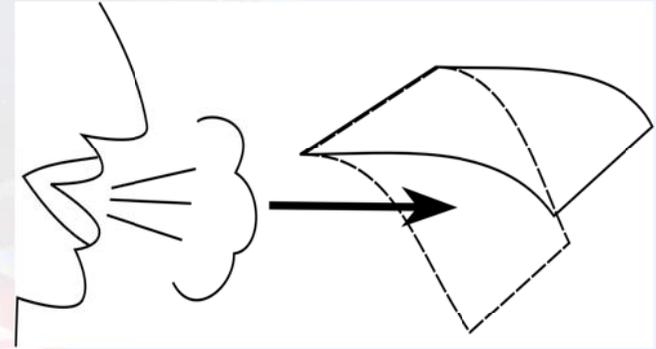
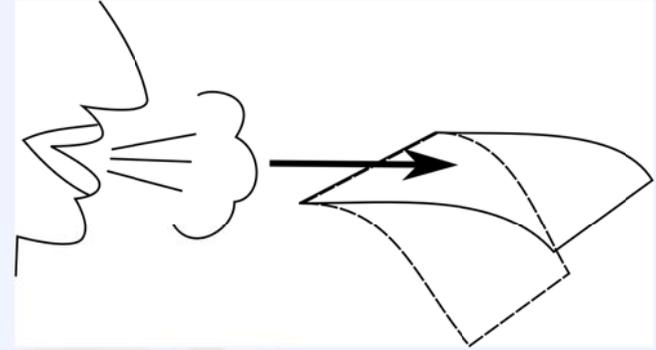
## I.1 Mise en évidence des forces aérodynamiques :

- L'air en mouvement crée des forces sur un objet.
- Il se produit la même chose sur un objet en mouvement dans l'air.
- Lorsque l'air "appuie" sur l'objet, il a tendance à le repousser en créant une force parallèle à l'écoulement et de sens opposé.
- L'air crée également une force perpendiculaire à l'écoulement.



# I La résultante des forces aérodynamiques

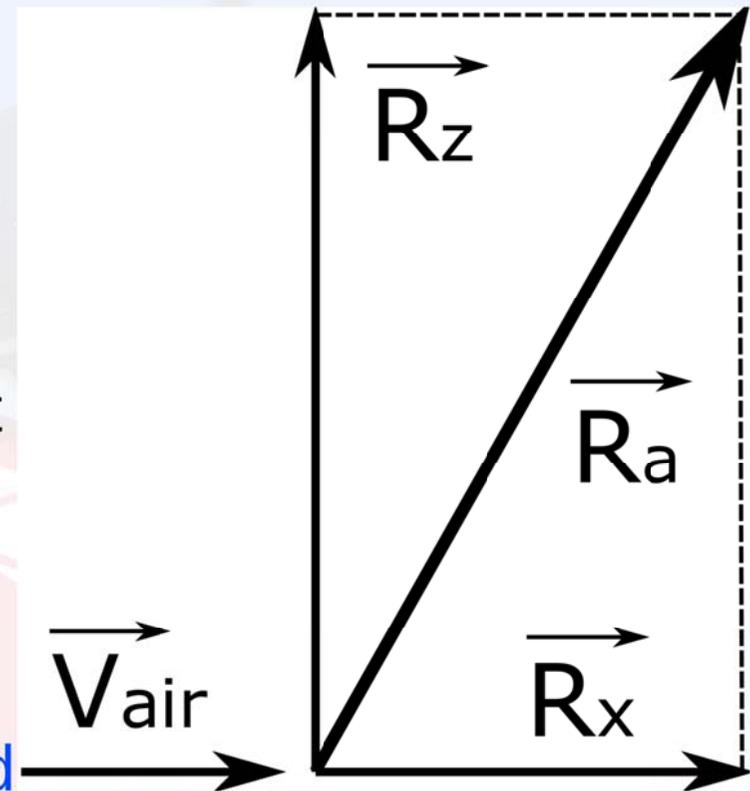
- Lorsque la vitesse de l'air augmente, sa pression diminue.
- L'air qui circule au dessus est accéléré et sa pression diminue alors que celui qui circule en dessous est ralenti et sa pression augmente.
- Dans les 2 expériences ci-contre la conséquence est que la feuille se soulève en raison de la différence de pression entre les 2 faces.
- Dans la 3ème expérience les feuilles de rapprochent pour la même raison.
- **Les forces aérodynamiques sont dues à des différences de pression dans l'air en écoulement.**



# I La résultante des forces aérodynamiques

La **résultante des forces aérodynamiques**,  $R_a$ , se décompose en :

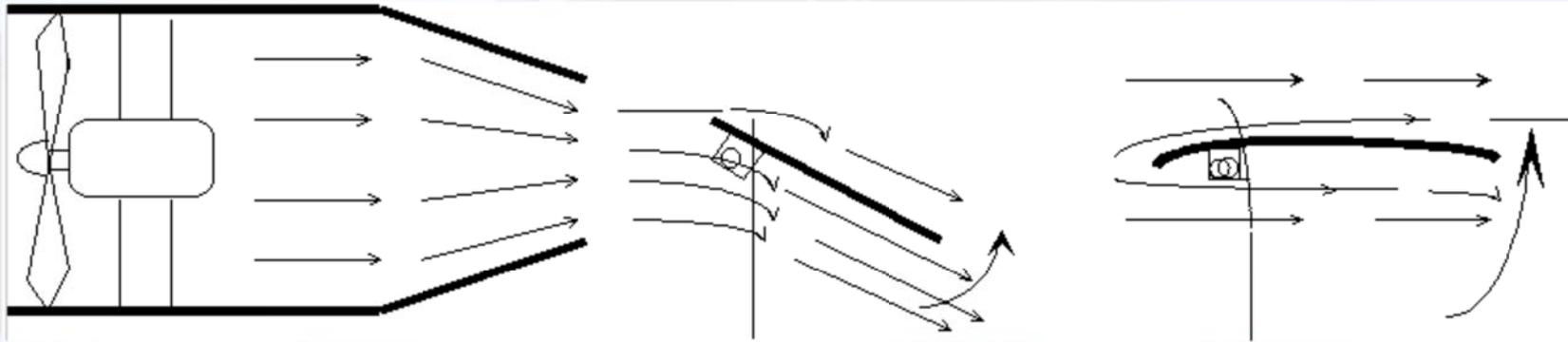
- **La portance**,  $R_z$ , perpendiculaire à la vitesse de l'air qui est responsable du vol des avions.
- **La traînée**,  $R_x$ , parallèle à l'écoulement et de sens opposé qui s'oppose à l'avancement.
- The aerodynamic forces are composed of the Lift (perpendicular to the air speed) and the Drag (parallel to the air speed in the opposite way)



# I La résultante des forces aérodynamiques

## I.2 Étude de la portance :

- Le premier facteur important est la forme de l'aile en coupe parallèlement à l'écoulement : **la forme du profil. ( the shape of the profil)**
- Une étude en soufflerie permet de comparer l'efficacité de différents profils

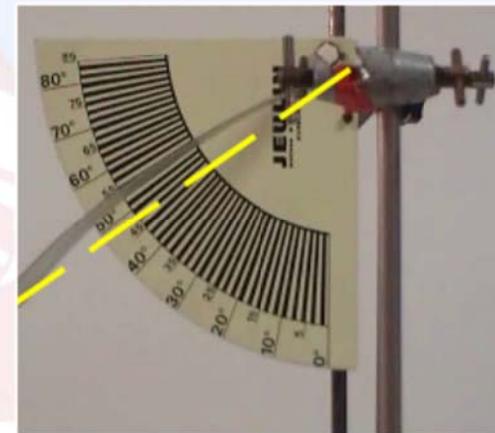
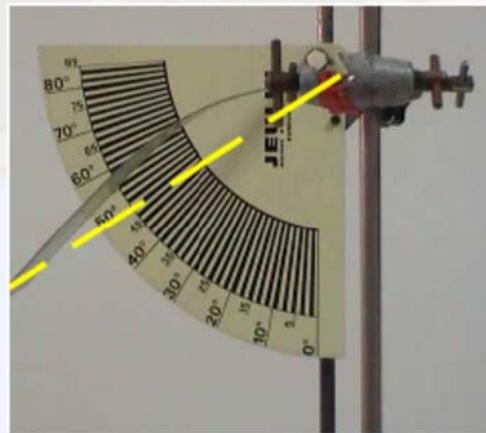
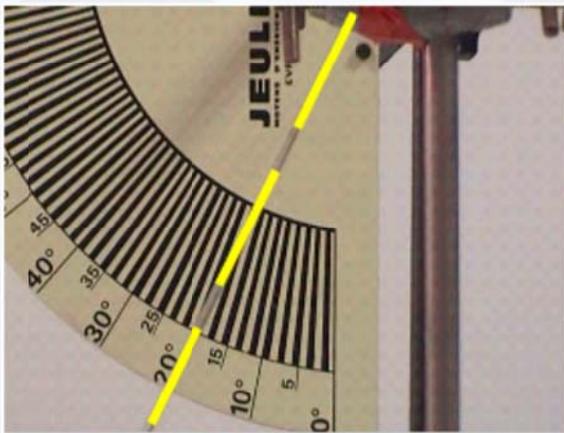


# I La résultante des forces aérodynamiques

Historiquement, les premières ailes étaient planes, puis elles ont été cambrées et enfin, en elles ont pris de l'épaisseur avec des faces de cambrures différentes.

Pour une même vitesse d'écoulement,

- le profil plan est peu efficace
- les profils cambrés sont plus efficaces (dans une certaine limite de cambrure)
- les profils épais sont encore plus efficaces (nous en verrons les caractéristiques plus tard)

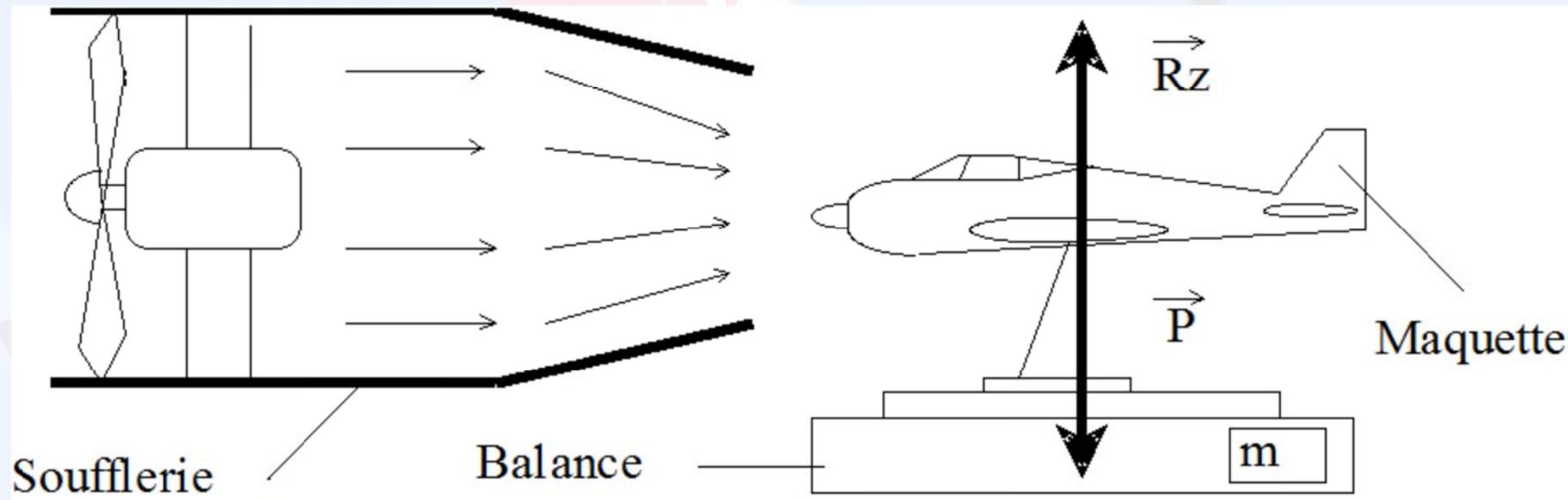


Le profil est caractérisé par un **coefficient de portance  $C_z$**

# I La résultante des forces aérodynamiques

Le second facteur important est la vitesse. En effet, un avion ne peut pas voler sans vitesse !

Pour étudier son influence, il suffit de placer une maquette en soufflerie et de mesurer son poids apparent :

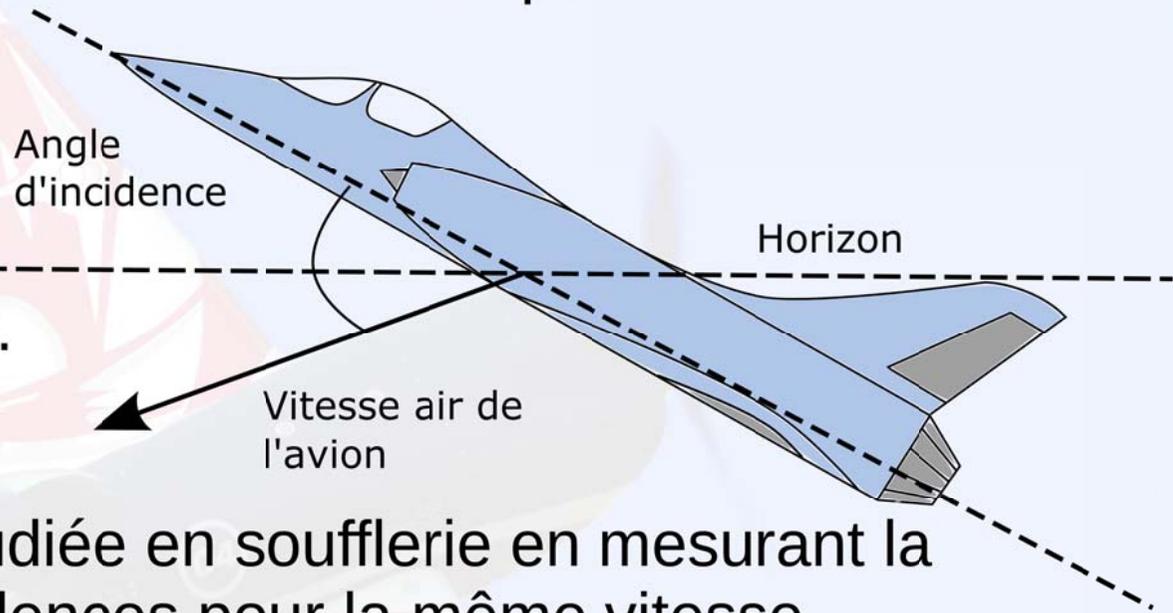


Le poids apparent ( $m.g$ ) permet de calculer la portance :  $R_z = -m.g$ .  
**Les expériences montrent que la portance augmente avec la vitesse.** *The lift increases with the air speed (or air velocity).*

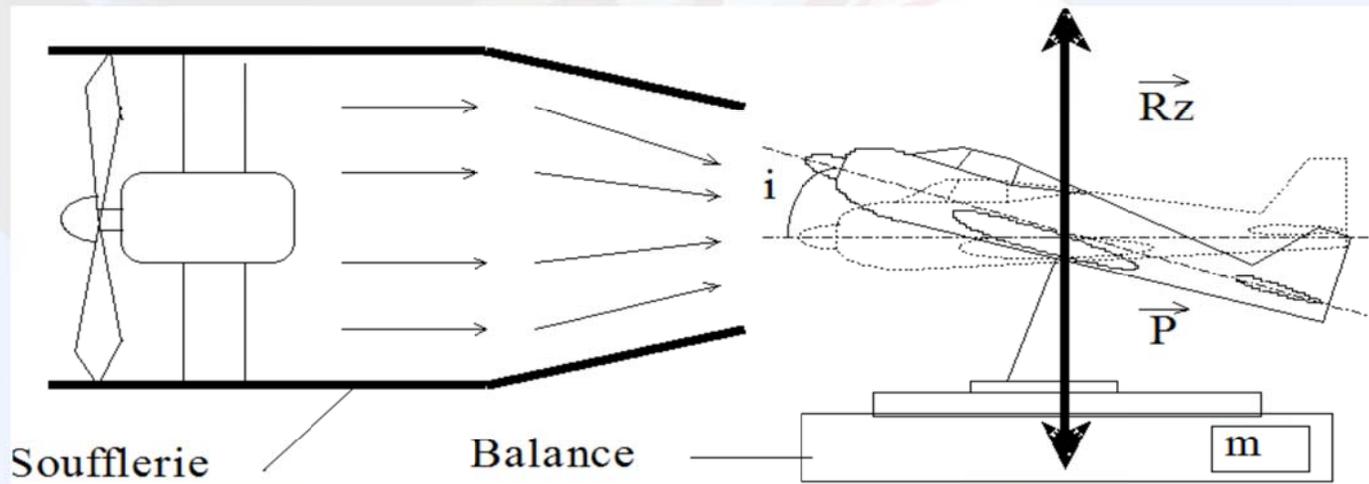
# I La résultante des forces aérodynamiques

Le troisième facteur est l'incidence du profil :

- Incidence = angle entre la ligne de foi de l'avion (axe longitudinal) et la vitesse de l'avion dans l'air.



- Son influence peut être étudiée en soufflerie en mesurant la portance à différentes incidences pour la même vitesse d'écoulement.



# I La résultante des forces aérodynamiques

Les expériences montrent que :

- La portance augmente avec l'incidence jusqu'à une certaine limite.
- Au delà de cette incidence limite apparaît le phénomène de décrochage : la portance chute brutalement et l'aile ne vole plus.
- Aux incidences négatives la portance peut être négative.

Le coefficient de portance,  $C_z$ , de l'aile dépend de la forme du profil mais aussi de l'incidence :

- $C_z$  augmente jusqu'à l'incidence de décrochage
- Au delà de l'incidence de décrochage, il diminue fortement.

# I La résultante des forces aérodynamiques

## Expression de la portance :

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

- $\rho$  = masse volumique de l'air (en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $S$  = surface alaire de l'avion (surface des ailes, y compris la partie traversant le fuselage, exprimée en  $\text{m}^2$ )
- $v$  = vitesse dans l'air de l'avion (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $C_z$  = coefficient de portance du profil à l'incidence de vol considérée (sans unité)

# I La résultante des forces aérodynamiques

## I.3 Étude de la traînée :

- La traînée est de même nature que la portance => elle est influencée par les mêmes facteurs :
  - La forme du profil
  - La vitesse de l'écoulement
  - L'incidence
- Toutefois, les interactions entre l'aile et le fuselage et entre les 2 faces de l'aile au niveau du saumon d'aile entraînent des particularités.

# I La résultante des forces aérodynamiques

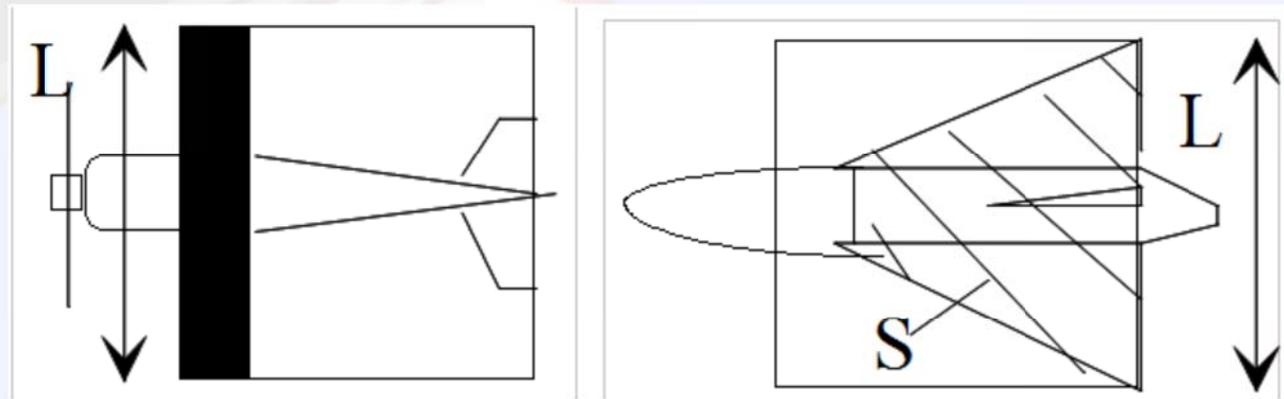
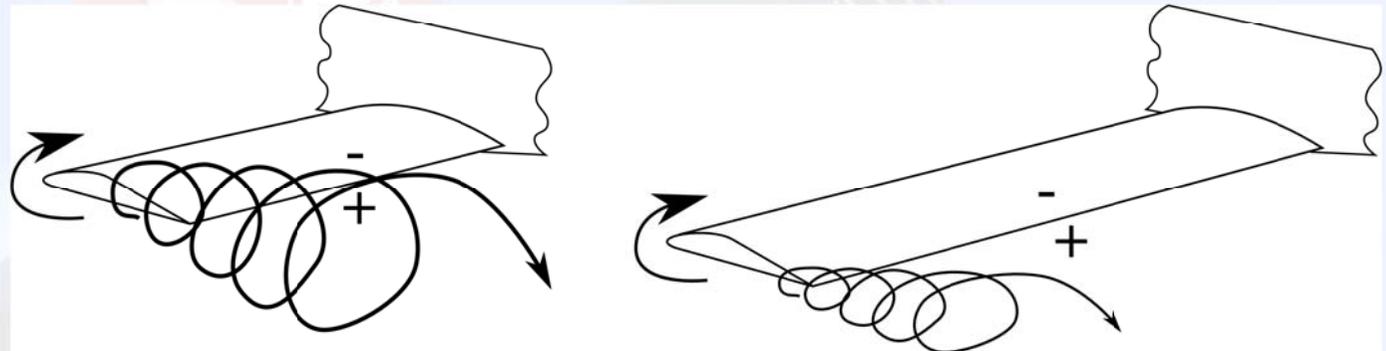
La traînée peut se décomposer en trois parties :

- Traînée de forme :  
Elle est due à la forme du profil qui influe sur sa résistance à la pénétration dans l'air.
- Traînée de sillage :  
Elle est due au décrochement des filets d'air à l'arrière du profil. Elle augmente avec la vitesse et l'incidence de vol.
- Traînée induite :  
Elle est due à la différence de pression entre l'intrados et l'extrados de l'aile.

# I La résultante des forces aérodynamiques

- En bout d'aile, l'air de l'intrados (en surpression) remonte vers l'extrados (en dépression) et crée ainsi un tourbillon = **tourbillon marginal**.
- L'importance de ce tourbillon est lié à l'**allongement** (**Aspect ratio**) de l'aile :

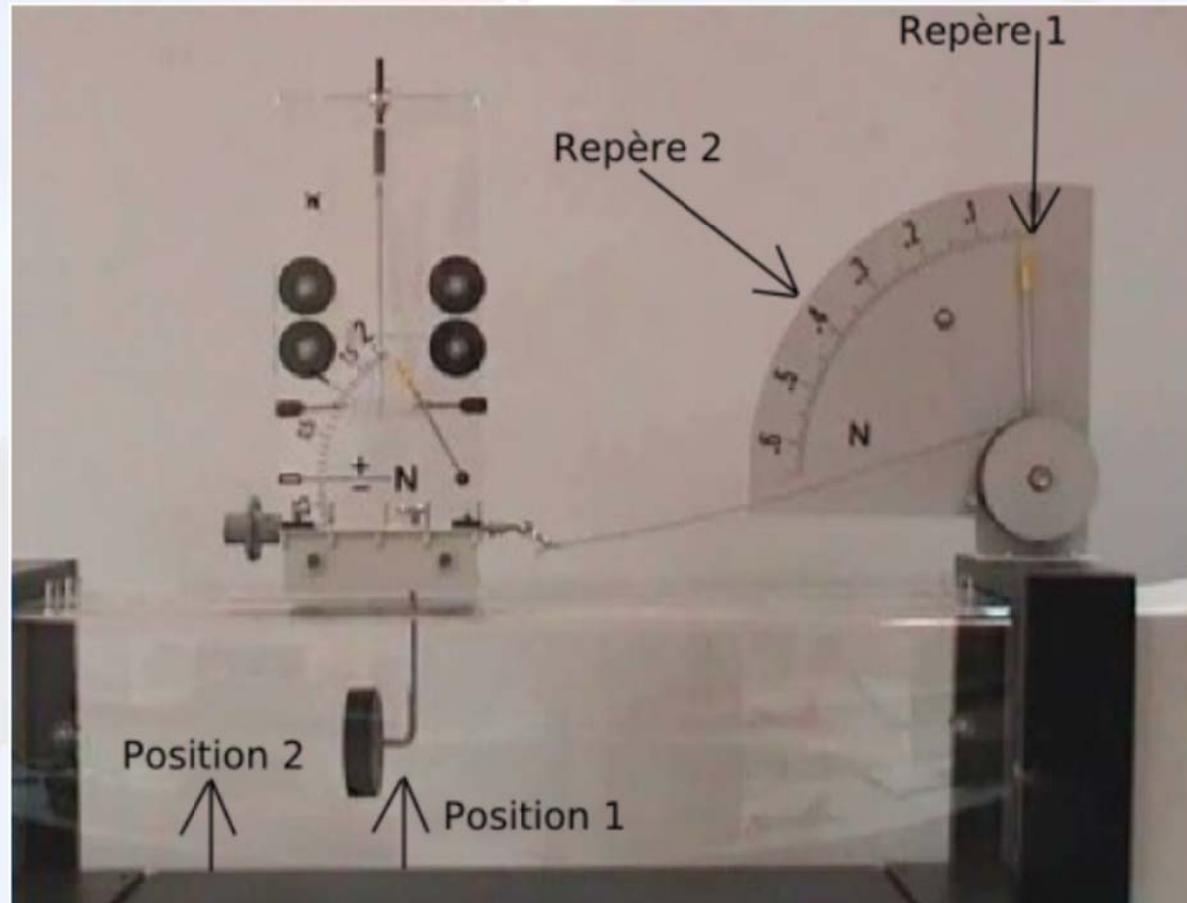
$$\lambda = \frac{L^2}{S}$$



- En raison de ces tourbillons (**vortex**) il faut espacer les décollages et les atterrissages entre 2 avions successifs.

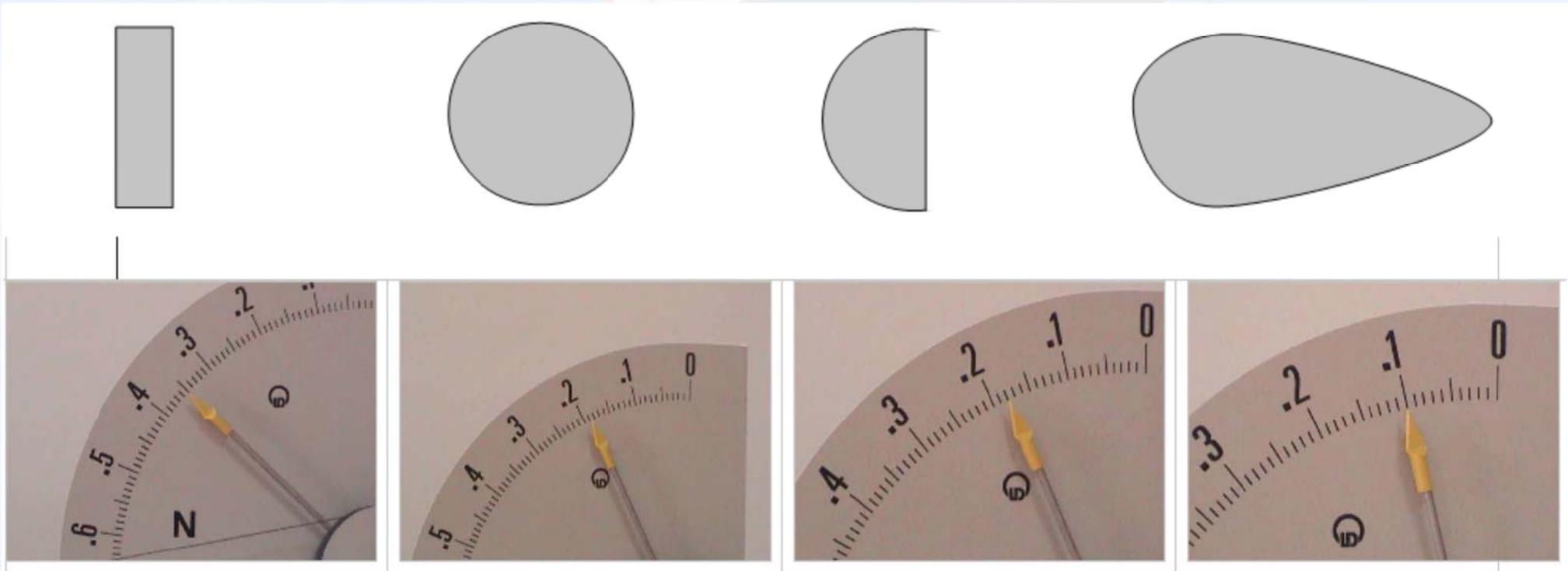
# I La résultante des forces aérodynamiques

L'étude de l'influence de la forme se fait en plaçant en soufflerie des profils ayant la même surface en projection perpendiculairement à l'écoulement (maître couple) mais ayant des formes différentes dans la direction de l'écoulement.



# I La résultante des forces aérodynamiques

- Les résultats montrent que pour optimiser la traînée de forme il faut optimiser l'écoulement depuis le bord d'attaque jusqu'au bord de fuite.
- De nombreux profils ont été testés et mesurés pour obtenir des formes intéressantes.
- **Le profil est caractérisé par un coefficient de traînée :  $C_x$ .**



# I La résultante des forces aérodynamiques

## Étude de l'influence de la vitesse :

- Cette étude se fait en soufflerie selon le même principe que pour la portance mais on mesure la force dans le sens de l'écoulement.
- Les résultats montrent que **la traînée augmente avec la vitesse.**

## Étude de l'influence de l'incidence :

- Cette étude se fait en soufflerie selon le même principe que pour la portance mais on mesure la force dans le sens de l'écoulement.
- Les résultats montrent que **la traînée augmente avec l'incidence (Cx augmente). Cx = Coefficient Of Lift.**
- **Contrairement à la portance, au delà de l'incidence de décrochage, la traînée augmente encore.**

# I La résultante des forces aérodynamiques

## Expression de la traînée :

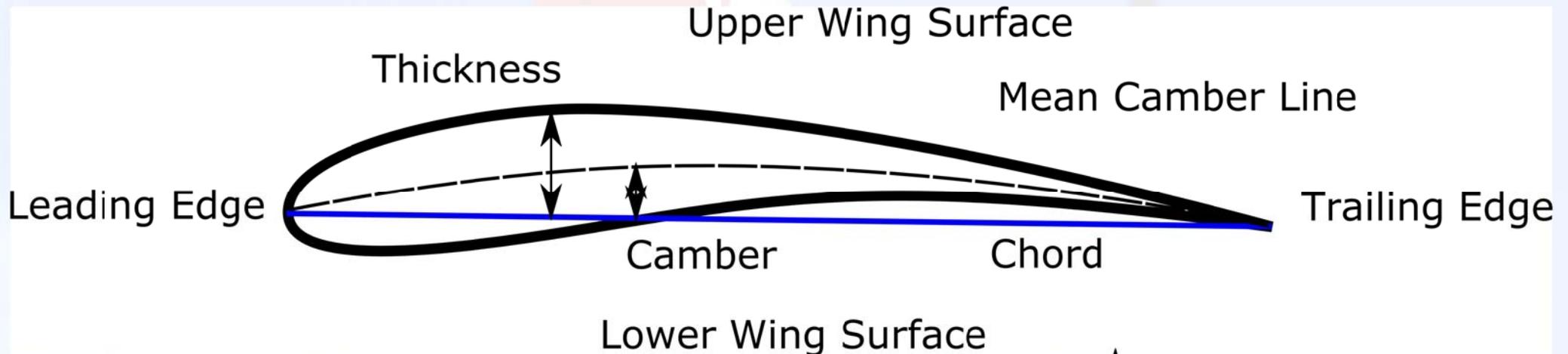
$$R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_x$$

- $\rho$  = masse volumique de l'air (en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $S$  = surface alaire de l'avion (surface des ailes, y compris la partie traversant le fuselage, exprimée en  $\text{m}^2$ )
- $v$  = vitesse dans l'air de l'avion (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $C_x$  = coefficient de traînée du profil à l'incidence de vol considérée (sans unité)

# II Caractéristiques et performances des profils

## II.1 Caractéristiques des profils aérodynamiques :

Le schéma ci-dessous donne les caractéristiques d'un profil ... en anglais (il ne reste qu'à traduire!).

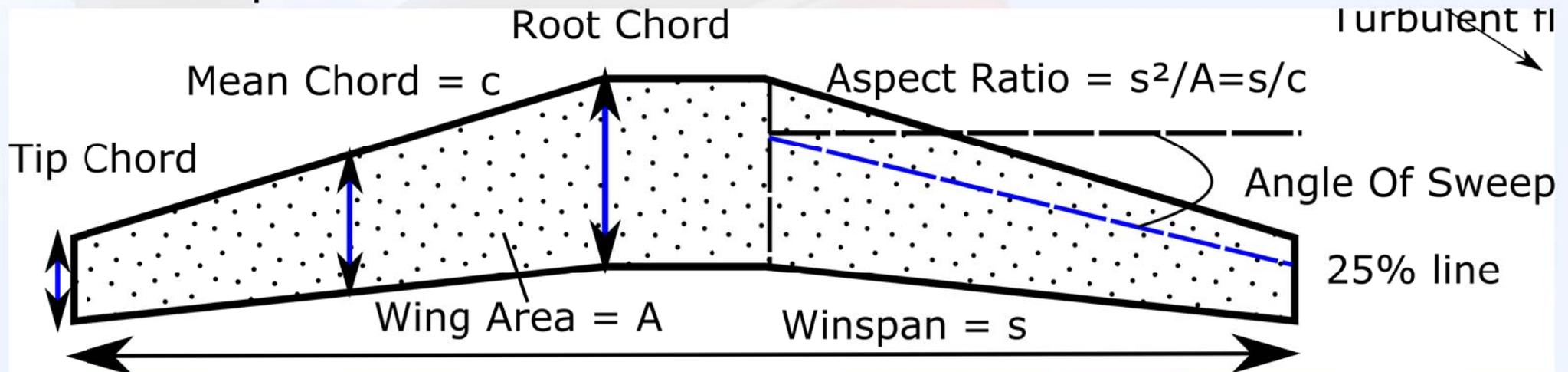


- L'air abordant le profil est dévié soit sur l'**extrados**, soit sur l'**intrados**. L'extrados l'accélère plus. Il se crée donc une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados (relatives).
- L'air est stoppé ou fortement ralenti au **bord d'attaque**. Il y a donc une surpression en avant du profil par rapport à l'arrière.

## II Caractéristiques et performances des profils

Autres caractéristiques d'un profil :

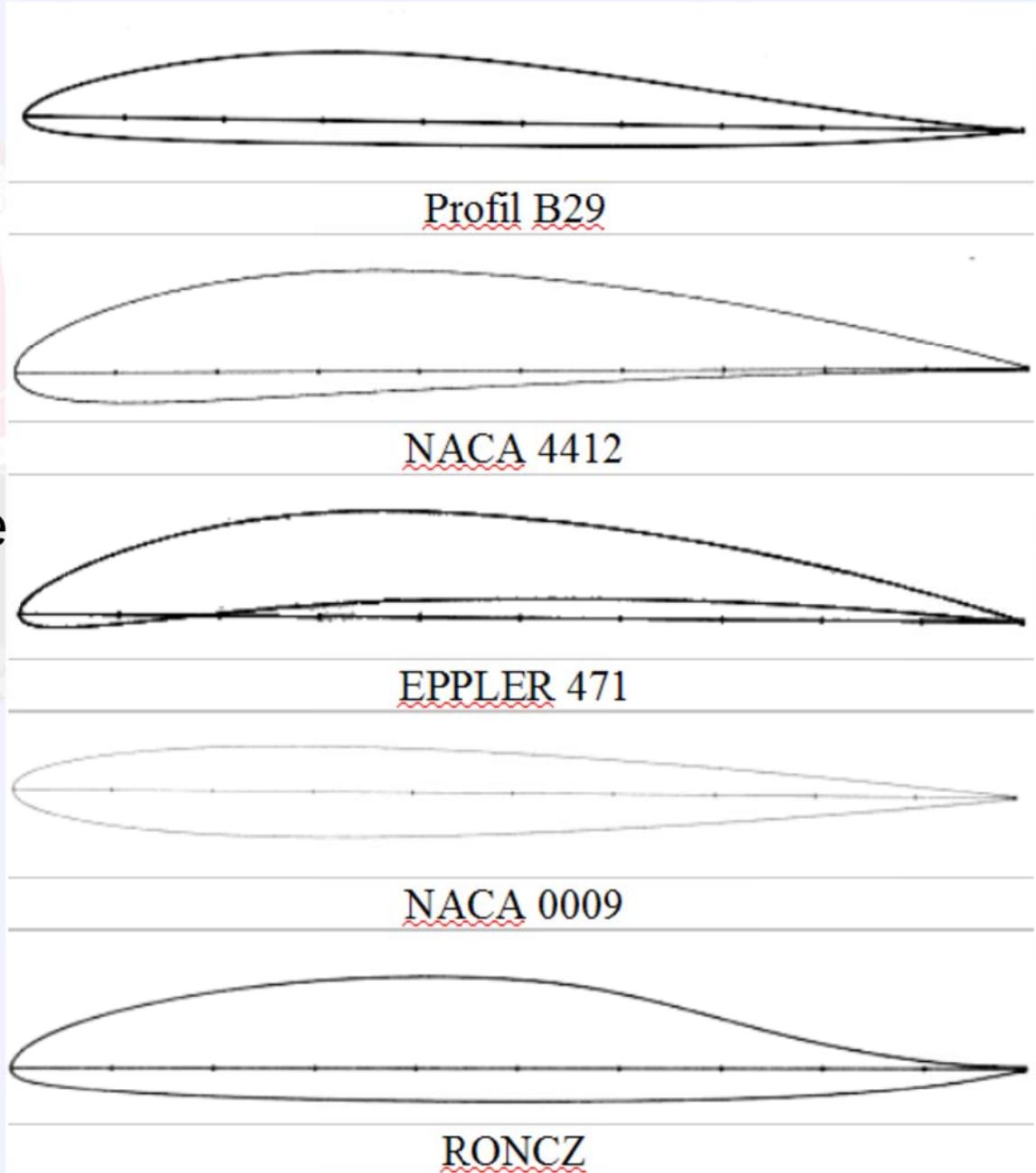
- La **corde** joint le **bord d'attaque** au **bord de fuite** en ligne droite.
- La **corde moyenne** le fait à égale distance de l'**intrados** et de l'**extrados**.
- L'**épaisseur** du profil est prise entre l'intrados et l'extrados, perpendiculairement à la corde. L'**épaisseur relative** est le rapport entre l'épaisseur maximale et la longueur de la corde.
- La **cambrure** représente la distance maximale entre la corde et la corde moyenne.
- L'**envergure** du profil et la **surface alaire** ont aussi leur importance dans les performances.



# II Caractéristiques et performances des profils

## II.2 Exemples de profils :

- Plan-convexe : bonne portance et faible instabilité
- Biconvexe : bonne portance et grande stabilité (aviation générale)
- Cambré (ou creux) : très bonne portance mais assez instable (avions de ligne)
- Symétrique : gouvernes et voltige
- Double courbure (autostable) : grande stabilité mais portance moyenne et forte traînée.



# II Caractéristiques et performances des profils

## II.3 Polaire d'un profil :

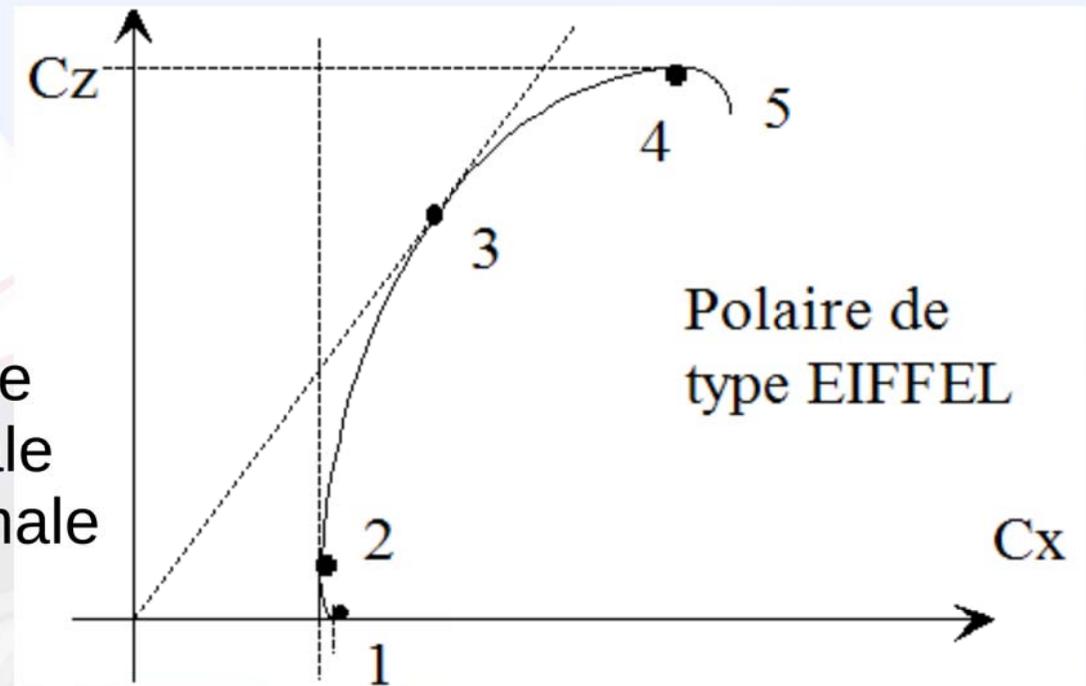
Pour déterminer les performances d'un profil on peut tracer 2 courbes :

- La polaire de type EIFFEL :
  - $C_z = f(C_x)$
  - Elle est obtenue à partir des mesures de portance et de traînée d'un profil à différentes incidences en soufflerie
  - Chaque point correspond à une incidence particulière
  - Son étude permet de dimensionner l'aile et de prévoir les vitesses caractéristiques de l'avion
- La polaire des vitesses :
  - $V_z = f(V_x)$
  - Elle est surtout utile à l'étude du vol plané car chaque point correspond alors à une incidence et donc un régime de vol.

## II Caractéristiques et performances des profils

Polaire de type EIFFEL :

- L'allure est toujours similaire.
- Les points caractéristiques sont :
  - 1 : incidence de portance nulle
  - 2 : incidence de traînée minimale
  - 3 : incidence de finesse maximale
  - 4 : incidence de portance maximale
  - 5 : incidence de décrochage



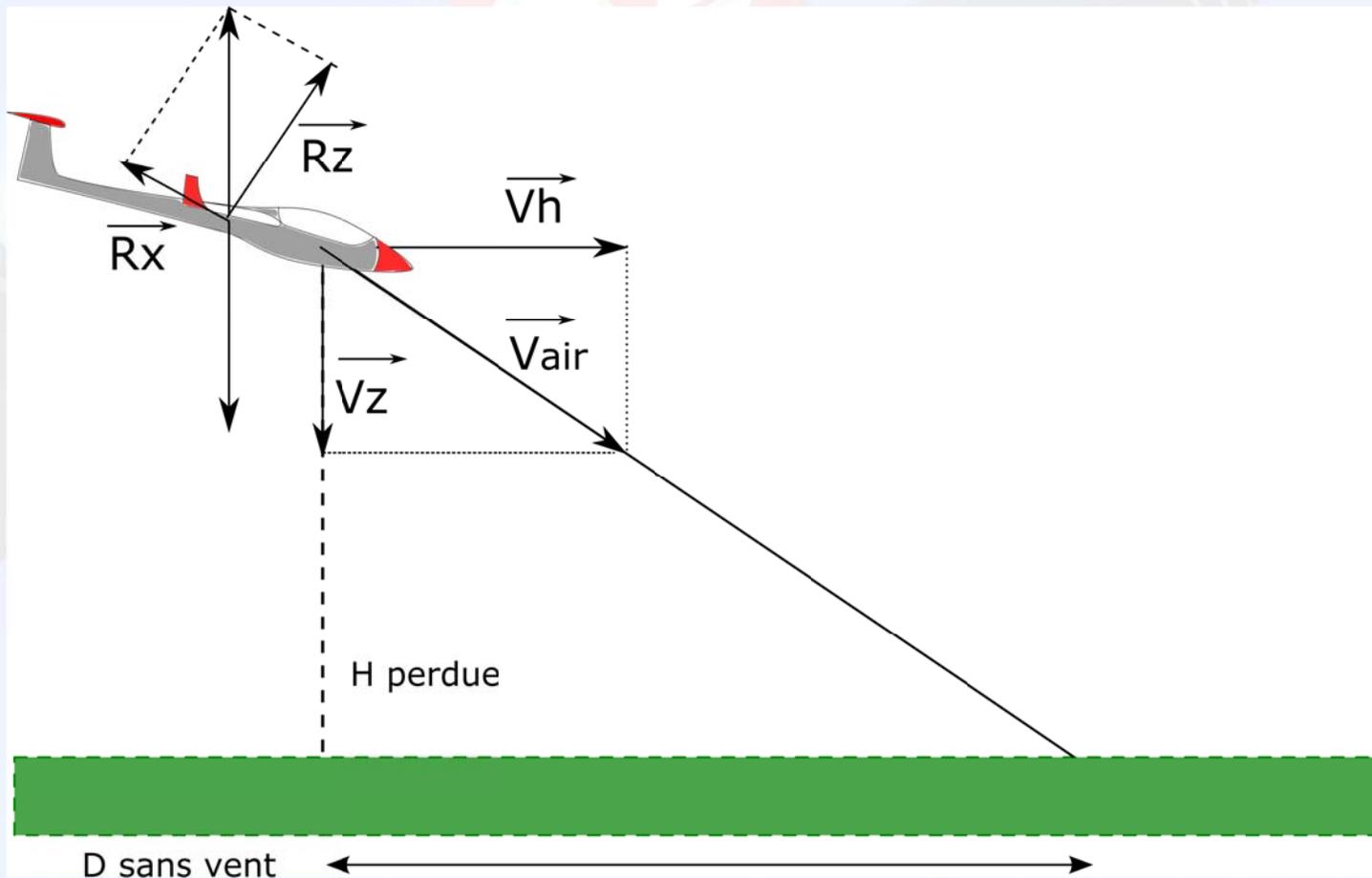
# II Caractéristiques et performances des profils

Incidence de finesse maximale :

- La finesse est définie par  
(Lift / Drag Ratio or Fineness)

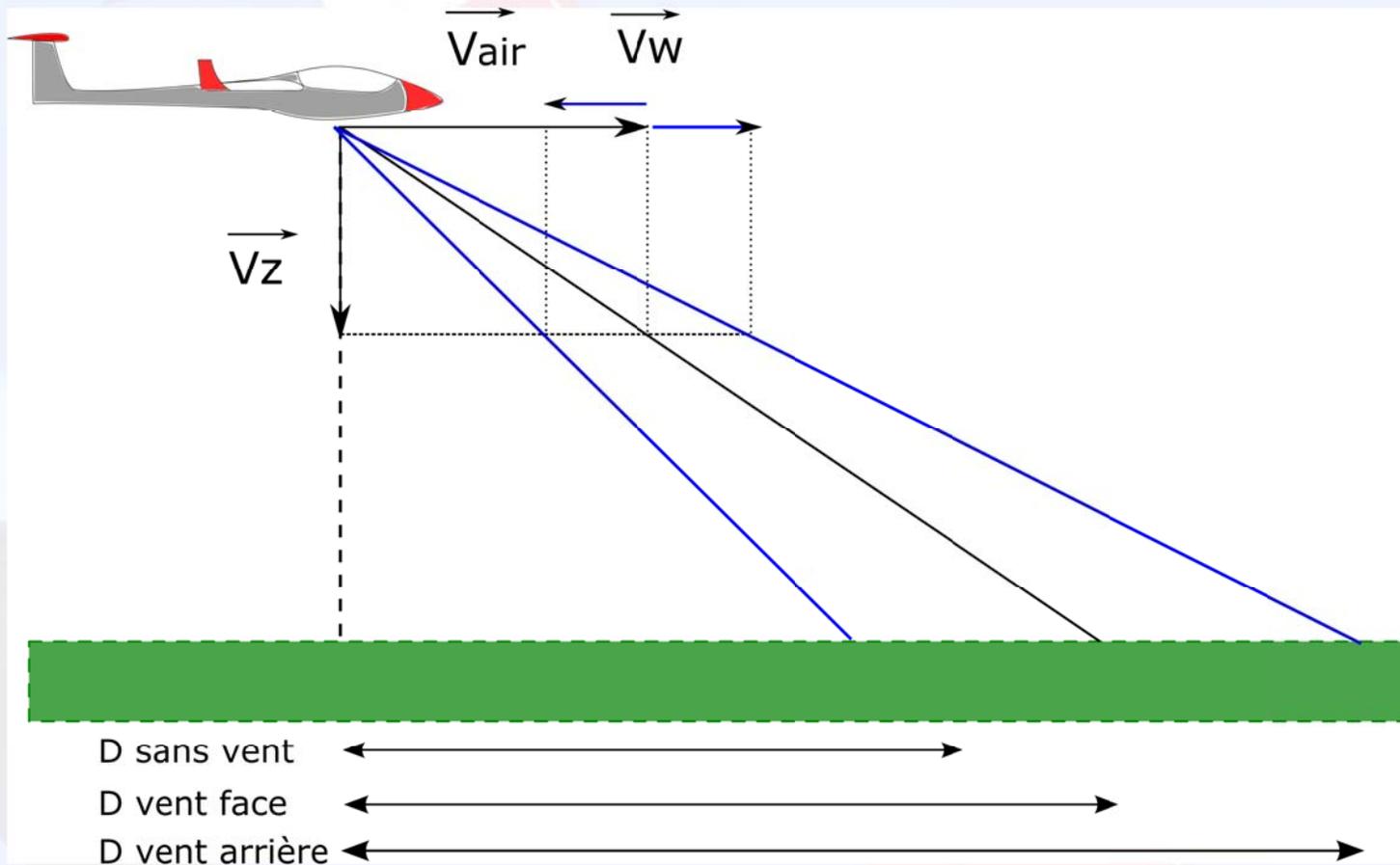
$$f = \frac{D_{\text{parcourue}}}{H_{\text{perdue}}} = \frac{V_h}{V_z} = \frac{R_z}{R_x} = \frac{C_z}{C_x}$$

- Elle est particulièrement importante en vol plané



## II Caractéristiques et performances des profils

- La finesse par rapport à l'air ne dépend que de l'incidence mais la finesse par rapport au sol prend également en compte le vent :

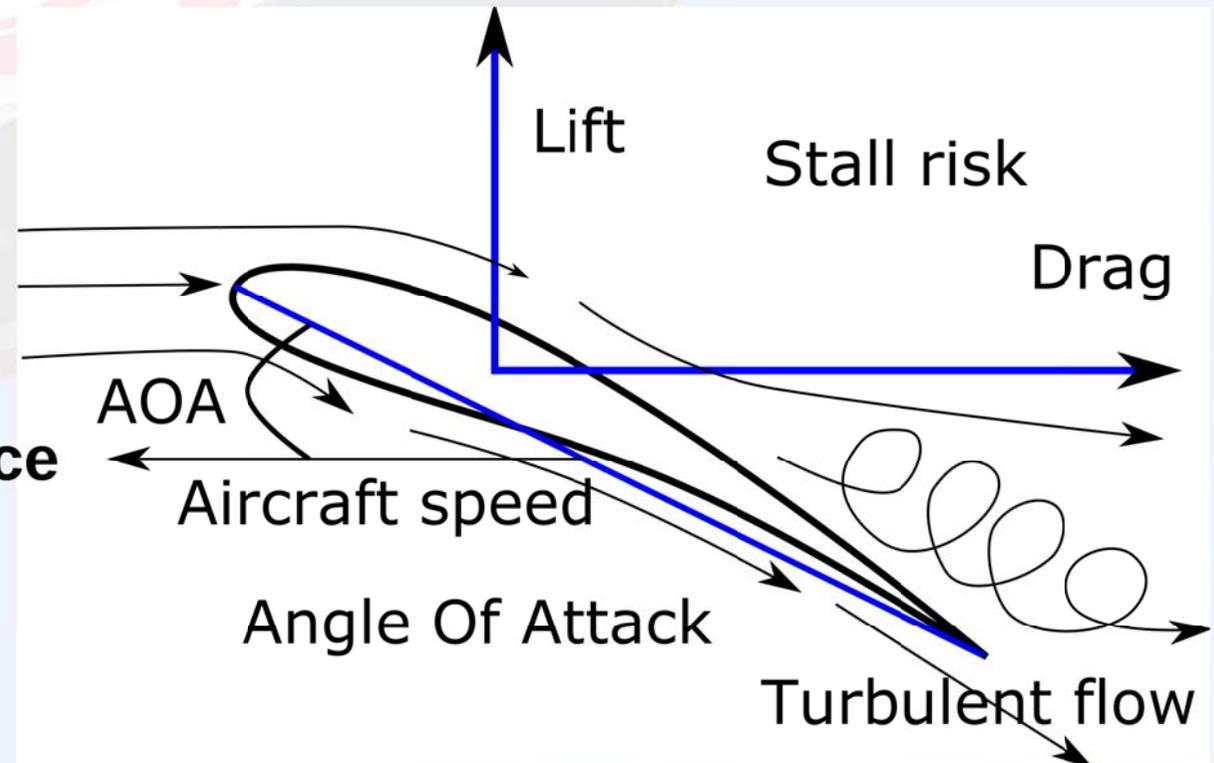


- La finesse maximale d'un planeur se situe entre 15 et 20 pour les planeurs de début, 25 et 35 pour les planeurs classiques et peut monter à 60 – 70 pour les meilleurs.

# II Caractéristiques et performances des profils

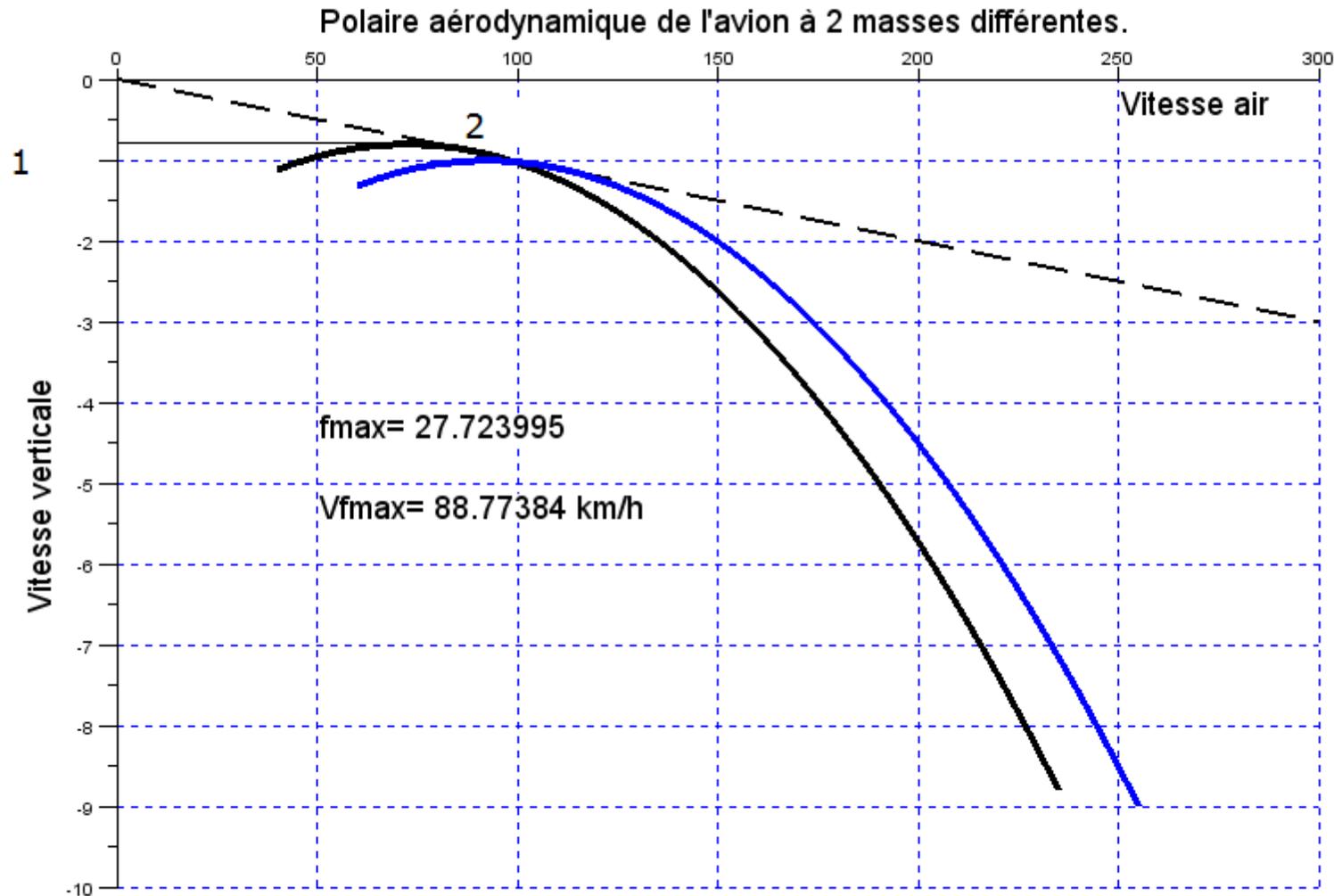
## Incidence de décrochage (Stall) :

- Lorsque l'incidence augmente, le flux d'air se décroche progressivement en créant une turbulence de sillage. L'arrière du profil ne porte plus.
- A l'incidence de décrochage, le flux se décroche brutalement sur une zone trop importante.
- La portance chute et l'aile décroche.
- **Le décrochage se produit toujours à la même incidence quelle que soit la vitesse et le facteur de charge.**



# II Caractéristiques et performances des profils

Polaire des vitesses :

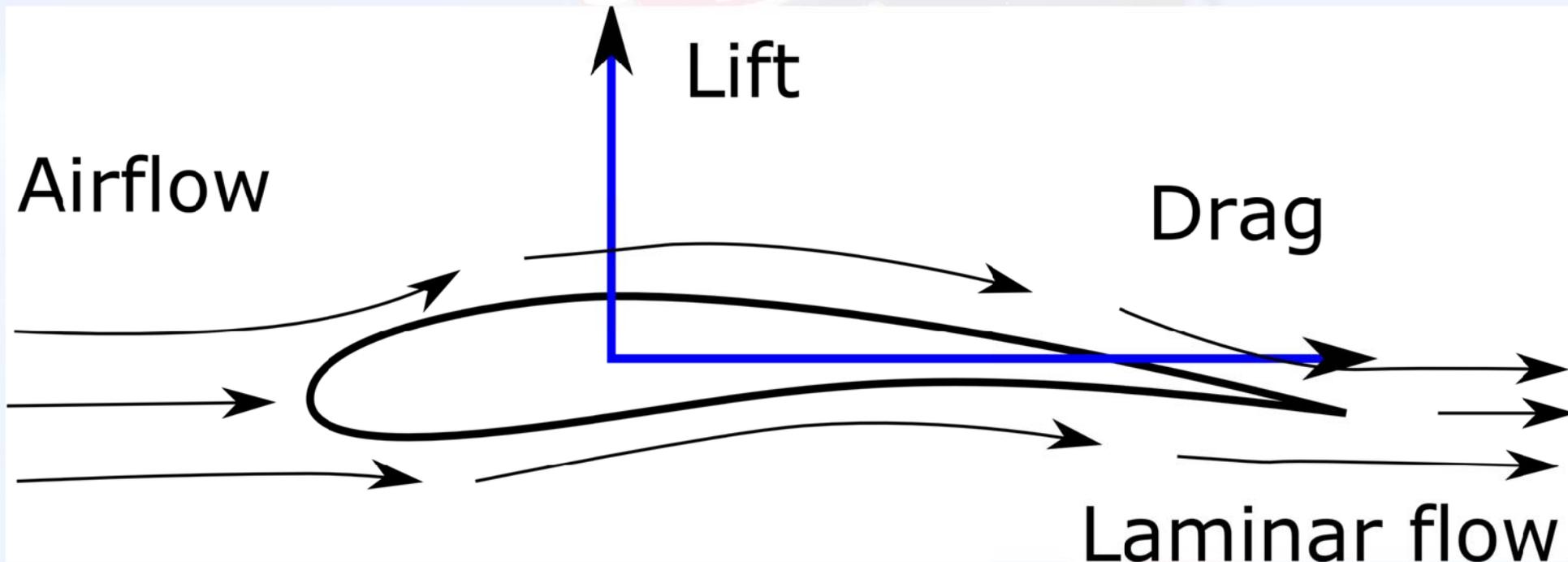


- Le point 1 représente le vol à taux de chute ( $V_z$ ) minimum.
- Le point 2 représente le vol à la finesse maximale.
- Si la masse de l'aéronef augmente, la polaire se décale le long de la pente de finesse maximale.

# II Caractéristiques et performances des profils

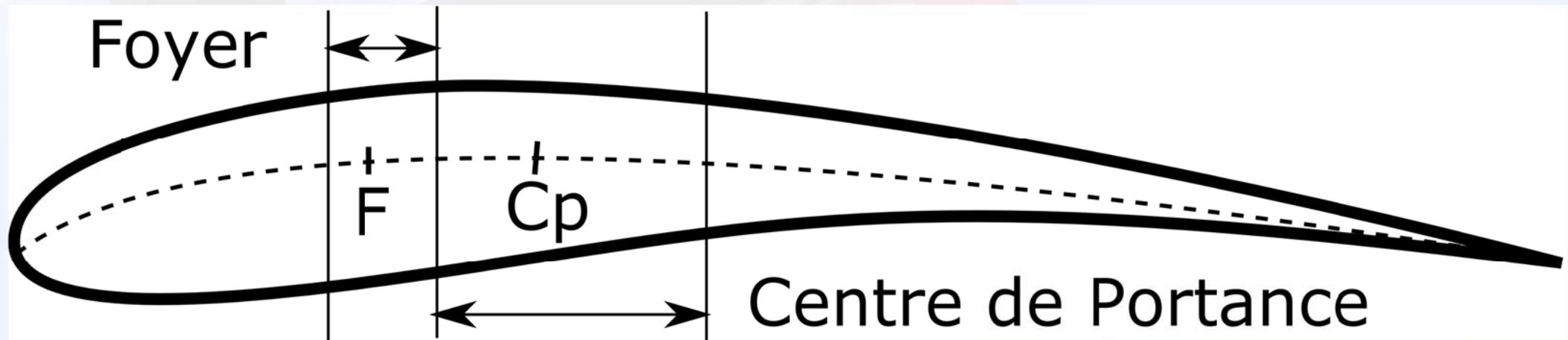
## II.4 Répartition de la portance sur le profil :

- Chaque section du profil apporte un petit élément de portance.
- L'ensemble de ces éléments peut être regroupé au centre de portance ( $C_p$ ).



## II Caractéristiques et performances des profils

- Le centre de portance :
  - Se situe entre 30 % et 50 % de la corde
  - Avance lorsque l'incidence augmente (jusqu'à l'incidence de  $C_{zmax}$ ) puis recule
- Le foyer :
  - Point d'application des variations de portance
  - En théorie à 25 % de la corde
  - En pratique 20 à 30 %



# II Caractéristiques et performances des profils

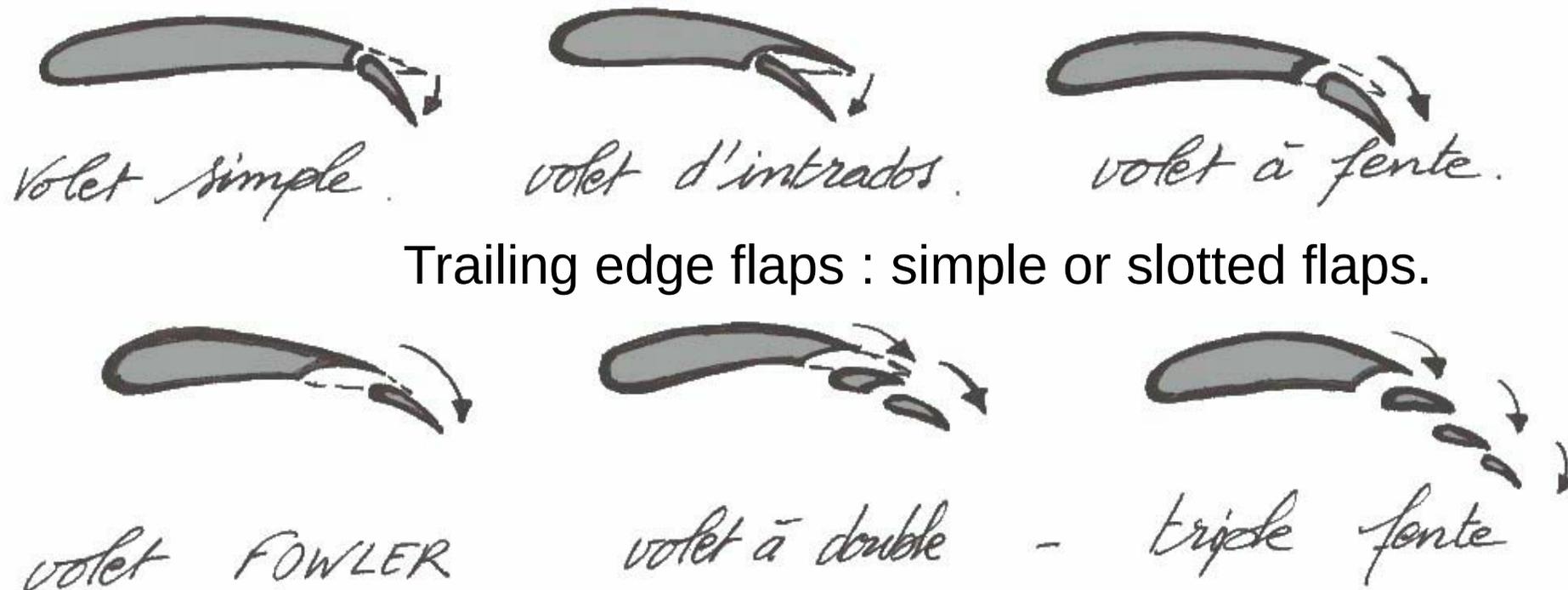
## II.5 Améliorer les performances d'un profil:

- En vol : diminution de la traînée induite par des winglets augmentant l'allongement de l'aile.



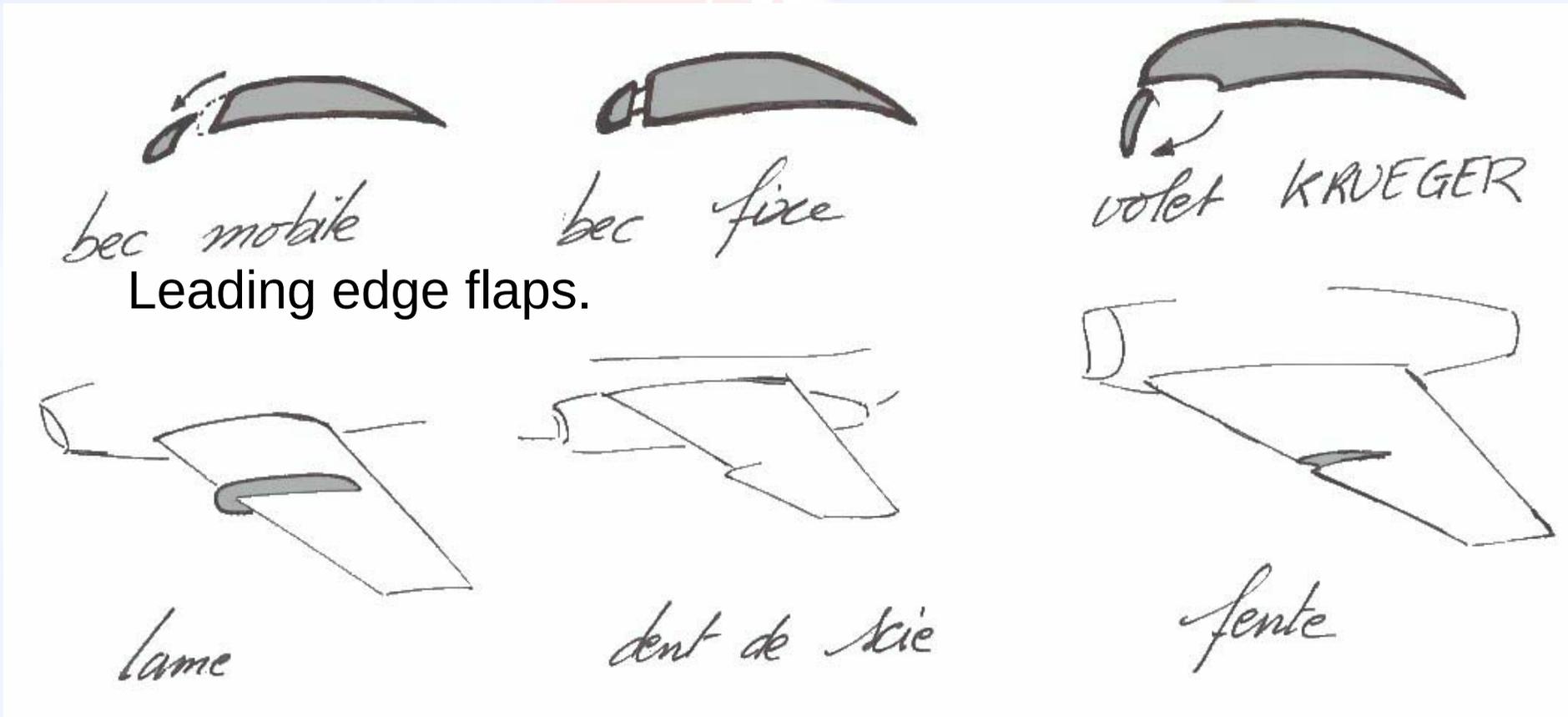
## II Caractéristiques et performances des profils

- Améliorer les performances d'un profil au décollage et à l'atterrissage: les dispositifs hypersustentateurs
  - Augmentent la portance (mais aussi la traînée) en modifiant le profil (augmentation de la cambrure et de l'incidence par rapport à l'écoulement)
  - Permettent de diminuer la vitesse de décrochage
  - Sont disposés au bord de fuite et/ou au bord d'attaque du profil



## II Caractéristiques et performances des profils

- Utilisation des dispositifs hypersustentateurs :
  - Au décollage : volets partiellement déployés et parfois les becs aussi
  - A l'atterrissage : pleins volets et pleins becs en général



# II Caractéristiques et performances des profils

- Quelques exemples:
  - Voilet double fente d'un EMB 145
  - Becs d'un Mirage 2000
  - Voilet simple d'un DR400



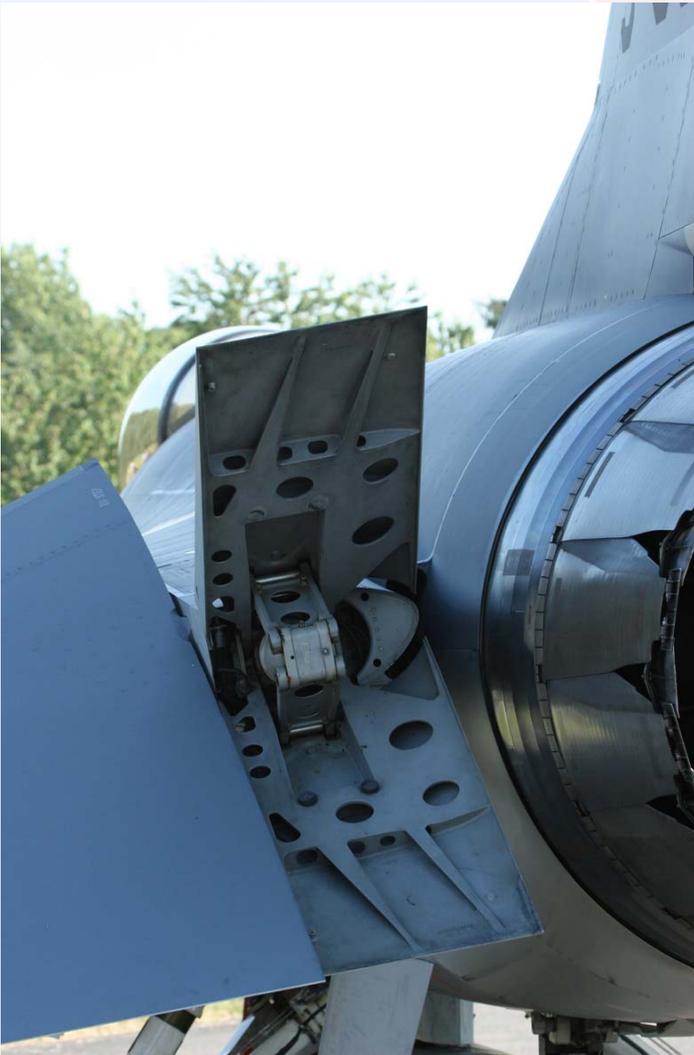
## II Caractéristiques et performances des profils

- Quelques exemples de dispositifs :
  - Volets d'A380
  - Volets et becs d'A380 partiellement sortis



## II Caractéristiques et performances des profils

- Freinage aérodynamique : aérofreins et spoilers (**airbrakes**)
  - Aérofreins : permettent de diminuer la vitesse par freinage
  - Spoilers : permettent de diminuer la portance et augmenter la traînée d'une aile (freinage et contrôle en roulis)

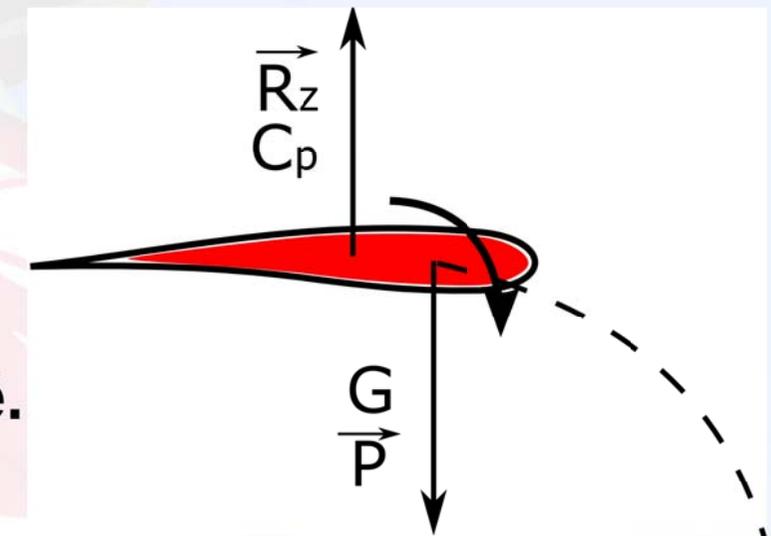
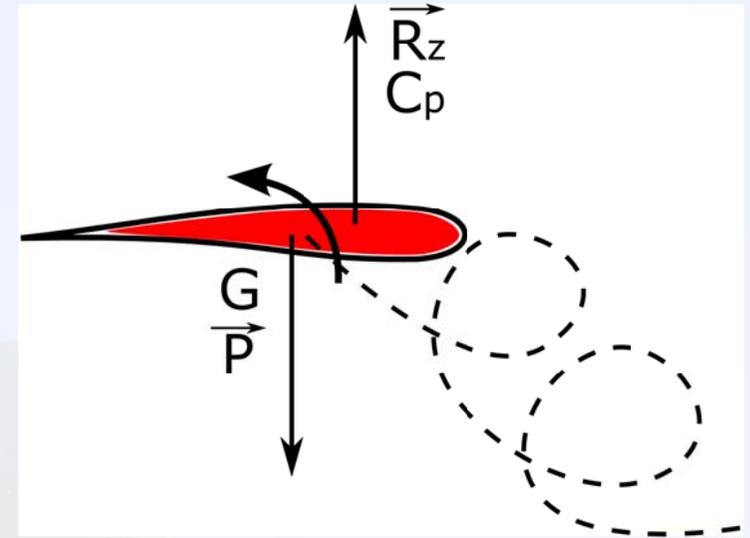


# III Stabilité d'un aéronef

## III.1 Stabilité statique longitudinale :

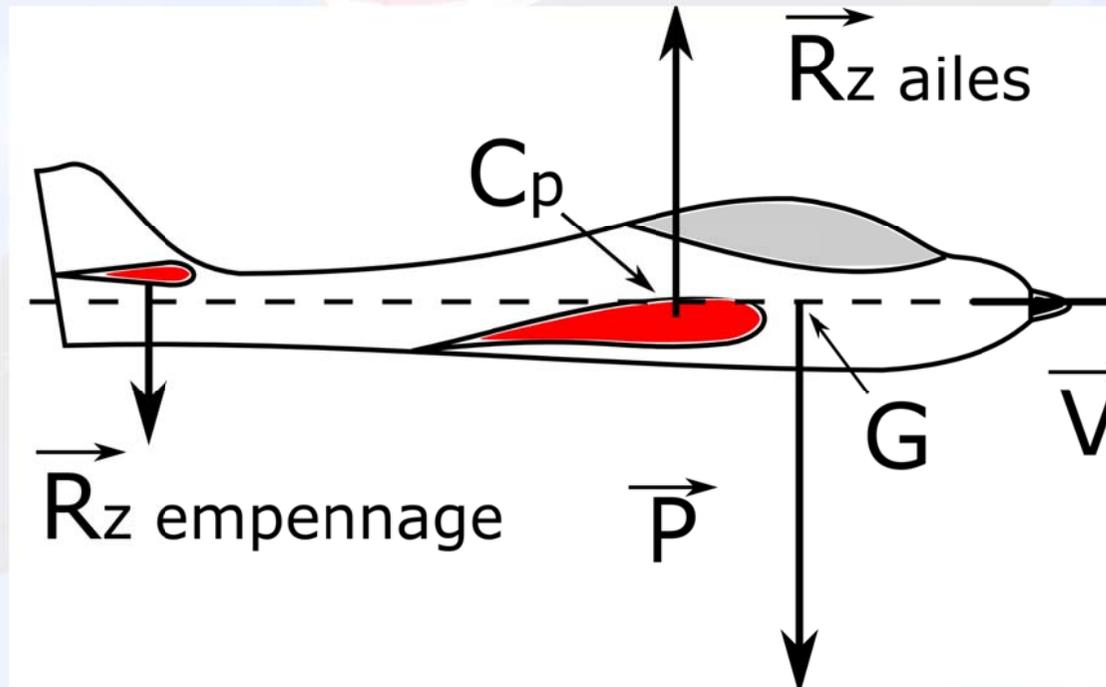
- Si le centre de gravité,  $G$ , est en arrière du centre de portance,  $C_p$ , l'avion se cabre et décroche. **Il est instable.**
- Si le centre de gravité,  $G$ , est en avant du centre de portance,  $C_p$ , l'avion diminue son incidence, et suit une trajectoire régulière. **Il est stable.**

**Un avion est stable si le centre de portance est en arrière du centre de gravité.  
Plus un avion est centré avant, plus il est stable et moins il est maniable.**



# III Stabilité d'un aéronef

- Sur une formule classique, l'empennage horizontal est calé pour être "déporteur". Cela crée un couple qui contre la tendance à piquer due à la portance.
- La distance entre le  $C_p$  et  $G$  est appelée **marge statique**.

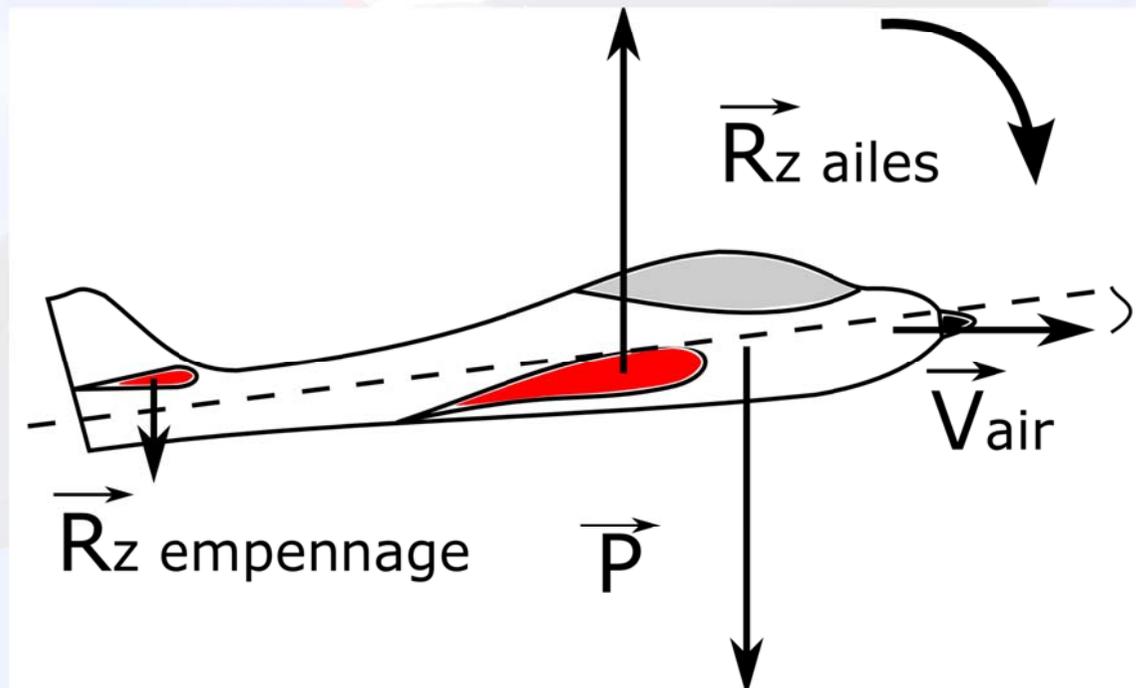


# III Stabilité d'un aéronef

Si l'incidence augmente :

- La portance  $R_z$  des ailes augmente
- La portance  $R_z$  de l'empennage diminue

=> un couple à piquer apparaît. L'incidence diminue

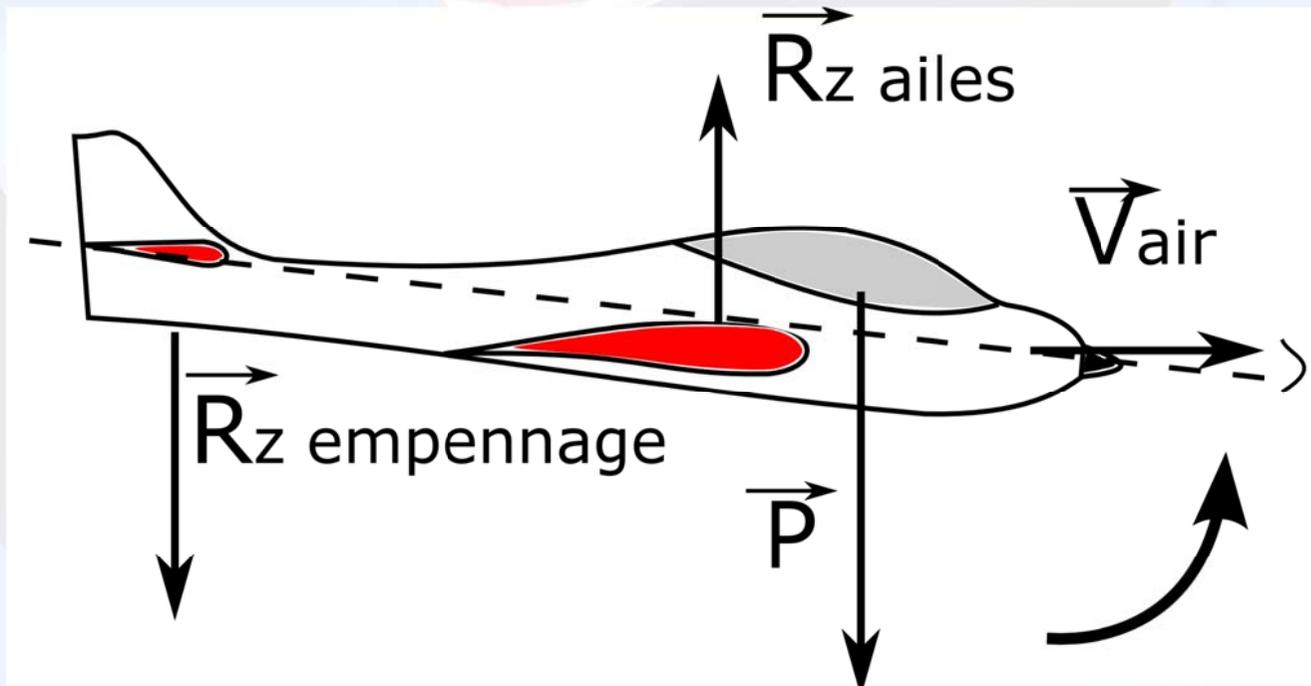


# III Stabilité d'un aéronef

Si l'incidence diminue :

- La portance  $R_z$  des ailes diminue
- La portance  $R_z$  de l'empennage augmente

=> un couple à cabrer apparaît. L'incidence augmente.

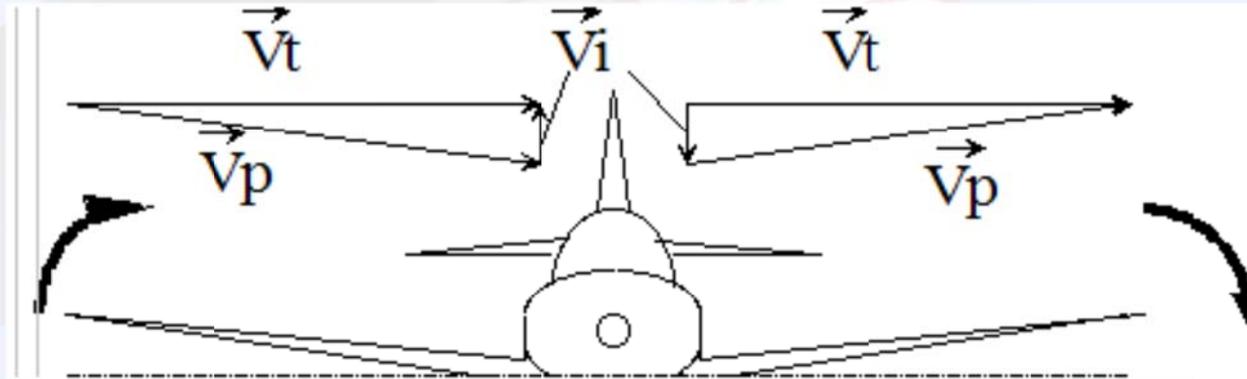


# III Stabilité d'un aéronef

## III.2 Stabilité latérale :

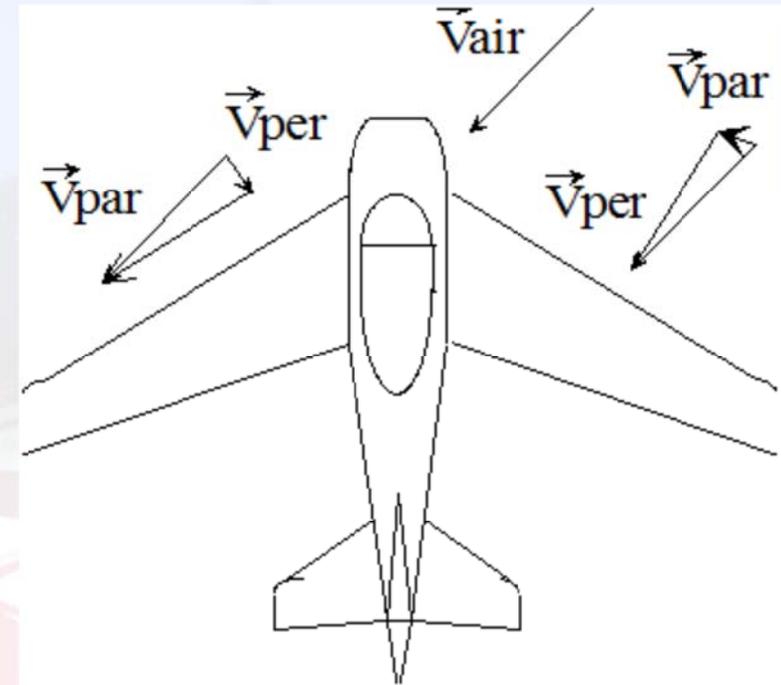
- Effet de dièdre :
  - En cas de dérapage, le dièdre donne une incidence différente sur chaque aile.
  - Cela induit du roulis dont le sens dépend du sens du dièdre.

**Dans le cas général, un dièdre positif augmente la stabilité latérale et un dièdre positif augmente la stabilité.**



# III Stabilité d'un aéronef

- Effet de flèche :
  - Lorsque l'avion dérape, la décomposition de la vitesse de l'air sur chaque aile montre une composante perpendiculaire au profil différente selon les ailes.
  - Cela engendre une différence de portance entre les ailes et donc du roulis.
  - Le sens du roulis dépend du sens de la flèche.



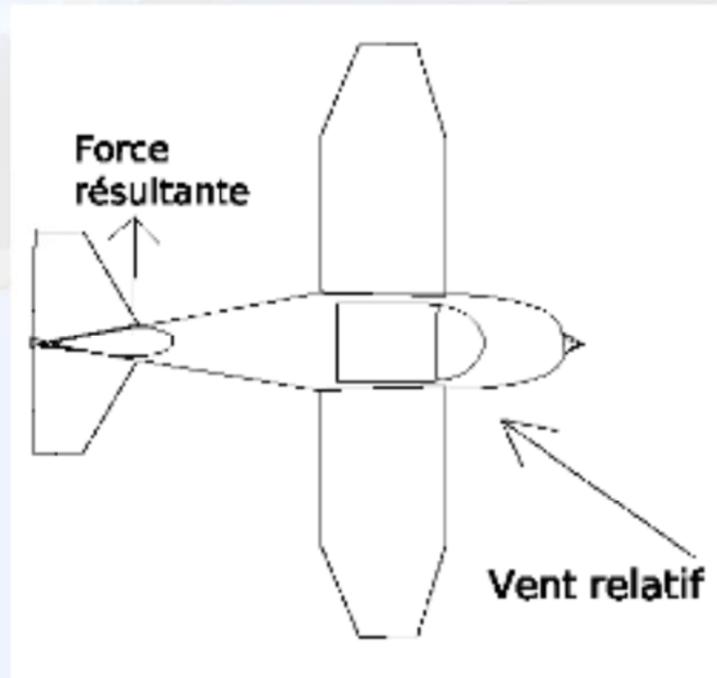
# III Stabilité d'un aéronef

- Influence de la position de l'aile :
  - En cas de dérapage, le fuselage masque une aile et crée une surpression.
  - Il en résulte un roulis dont le sens dépend de la position de l'aile par rapport au fuselage.



# III Stabilité d'un aéronef

- Effet de dérive :
  - Un dérapage entraîne une "portance" horizontale sur la dérive.
  - L'effet de cette force est de réduire le dérapage.
  - Un effet de roulis s'ajoute avec une importance dépendant de la taille de la dérive.



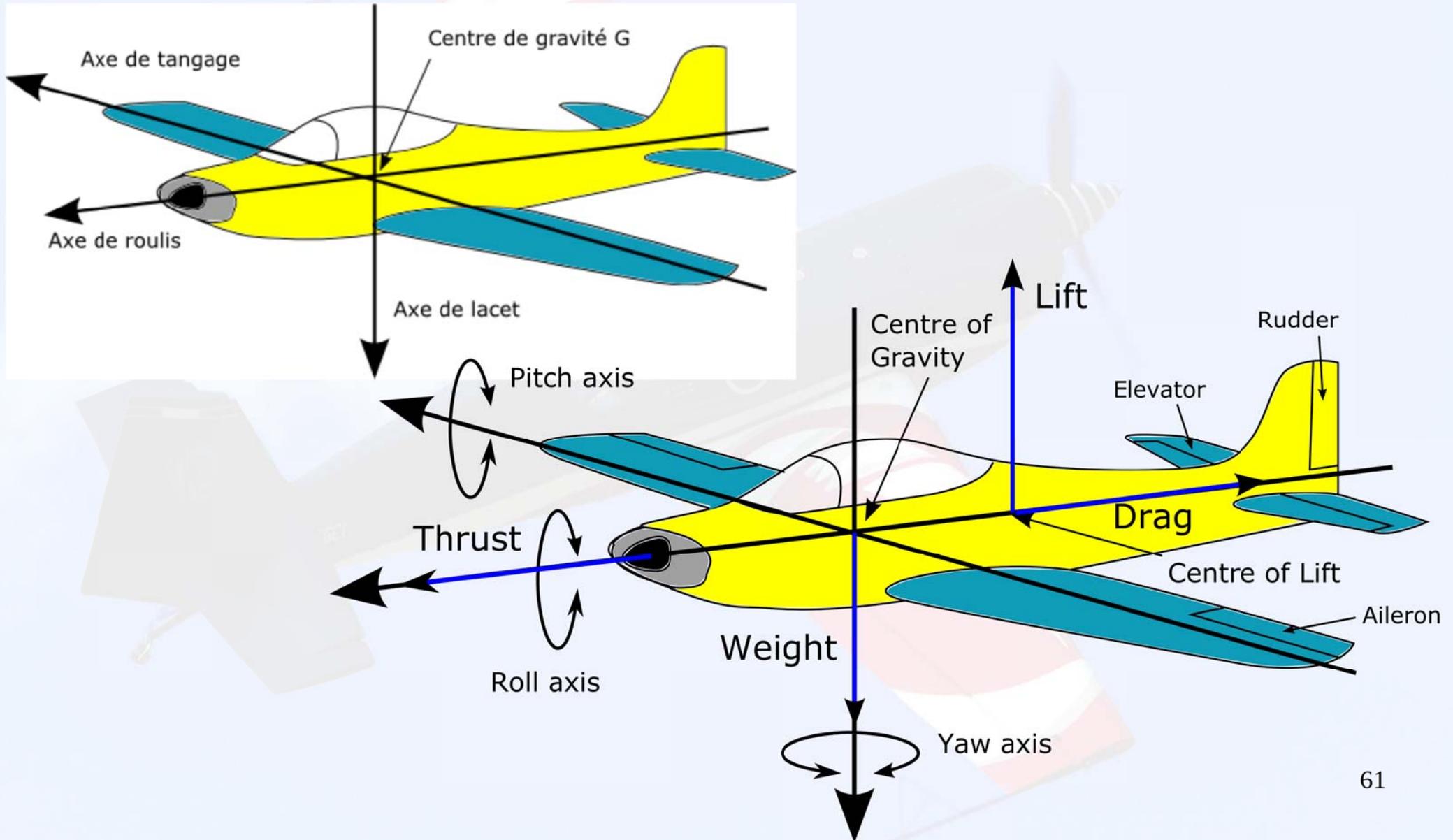
# III Stabilité d'un aéronef

- Tous ces effets interagissent et pour assurer la stabilité latérale d'un avion, il faut faire des études complexes de stabilité en soufflerie.
- En général on associe la forme, la position et le dièdre de la manière suivante :

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

# IV Contrôle de la trajectoire

## IV.1 Les axes de la mécanique du vol :

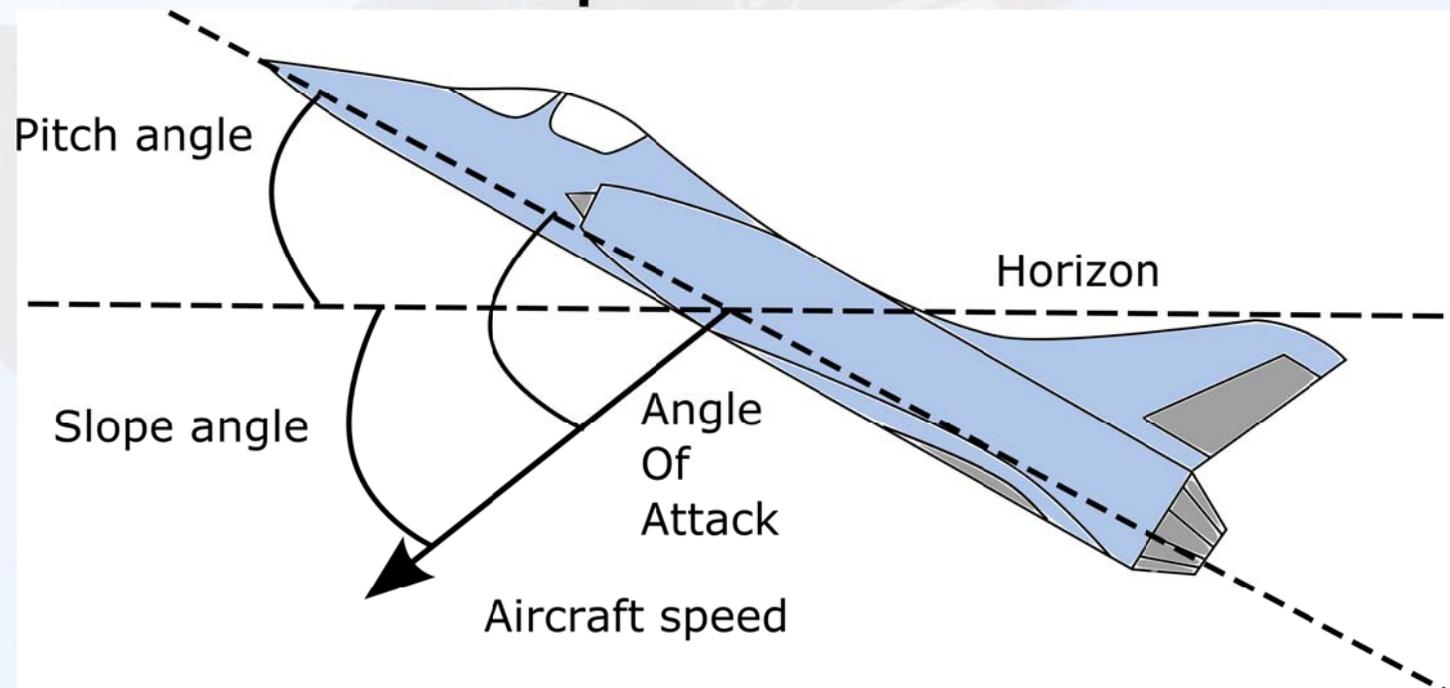


# IV Contrôle de la trajectoire

## IV.2 Les angles de la mécanique du vol :

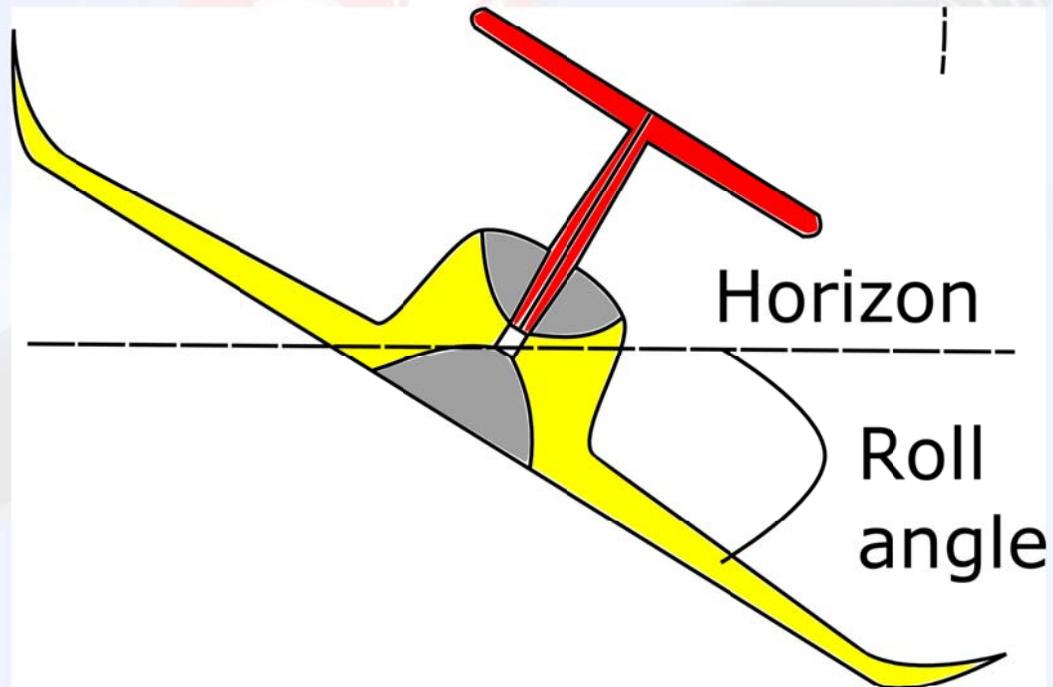
- Selon l'axe de tangage, on distingue :
  - **L'assiette** : entre l'horizon et la ligne de foi (indiquée par l'horizon artificiel).  $>0$  à cabrer et  $<0$  à piquer.
  - **La pente** : entre l'horizon et la vitesse.  $>0$  en montée et  $<0$  en descente.
  - **L'incidence** : entre l'aligne de foi et la vitesse.  $>0$  si le nez est au dessus de la vitesse et  $<0$  si le nez est sous la vitesse.

**Assiette = pente + incidence**



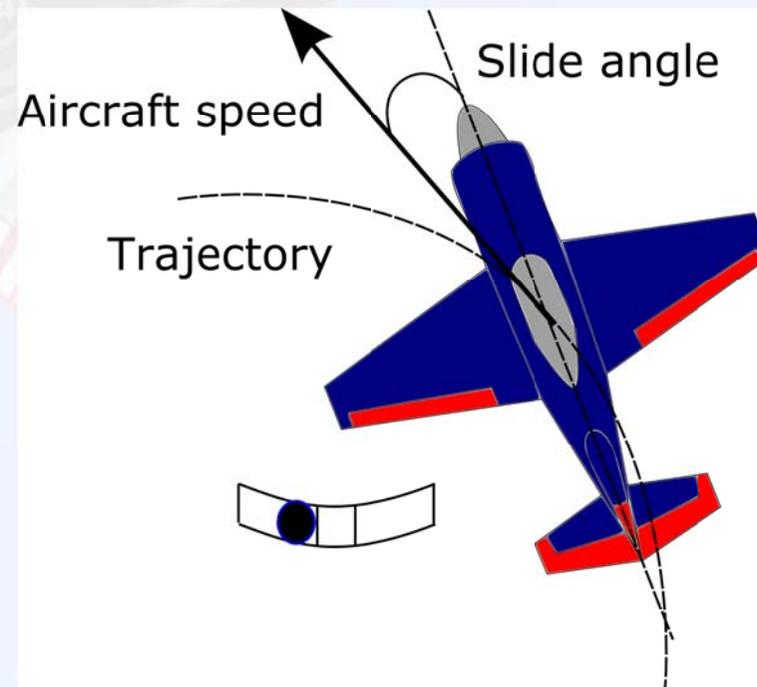
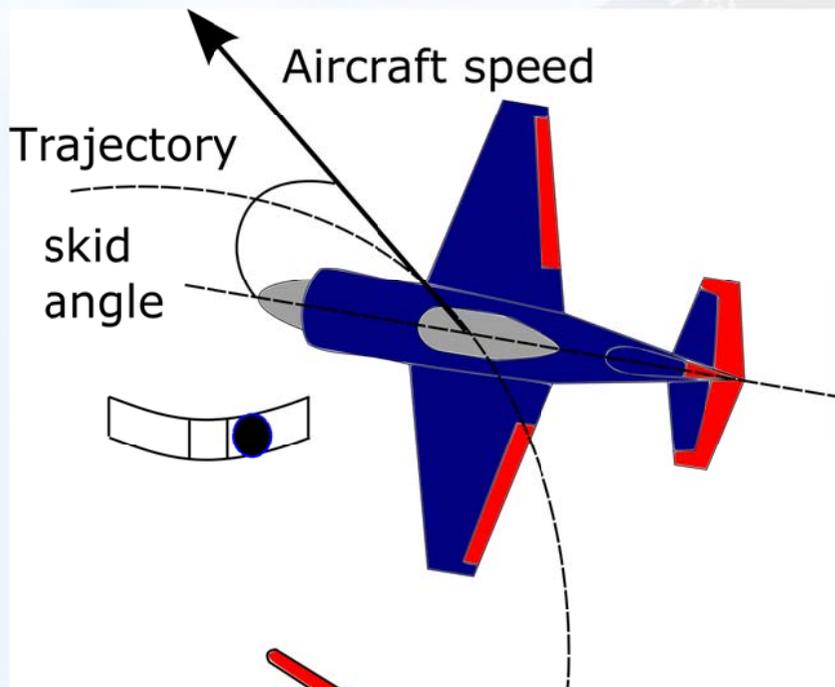
## IV Contrôle de la trajectoire

- Selon l'axe de roulis :  
l'angle entre l'horizon et le plan des ailes est appelé **angle de roulis ou inclinaison**.



# IV Contrôle de la trajectoire

- Selon l'axe de lacet :
  - L'angle entre la ligne de foi de l'avion et la vitesse est appelé **angle de dérapage**.
  - $>0$  si le nez est à gauche de la trajectoire et  $<0$  si le nez est à droite.
  - En virage, lorsque le nez est à l'intérieur de la trajectoire on parle de **dérapage** et lorsqu'il est à l'extérieur on parle de **glissade**.

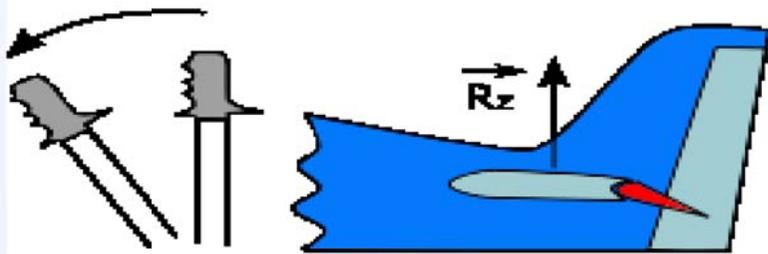


# IV Contrôle de la trajectoire

## IV.3 Le contrôle en tangage :

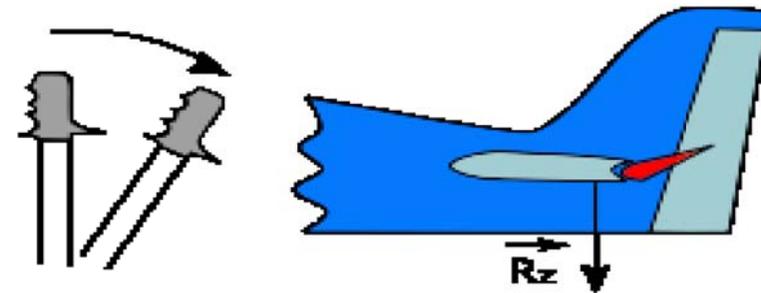
- Se fait à l'aide de la **commande de profondeur** (manche).
- Les gouvernes correspondantes sont les **élévateurs** (empennage horizontal). **Ils sont actionnés de façon symétrique.**
- Une poussée sur le manche entraîne un braquage vers le bas des élévateurs et augmente la portance de l'empennage. La queue de l'avion monte => le nez descend et l'avion aussi.
- Un braquage vers le haut entraîne l'effet inverse.

pushing the stick



The elevators go down and the nose goes up.

pulling the stick



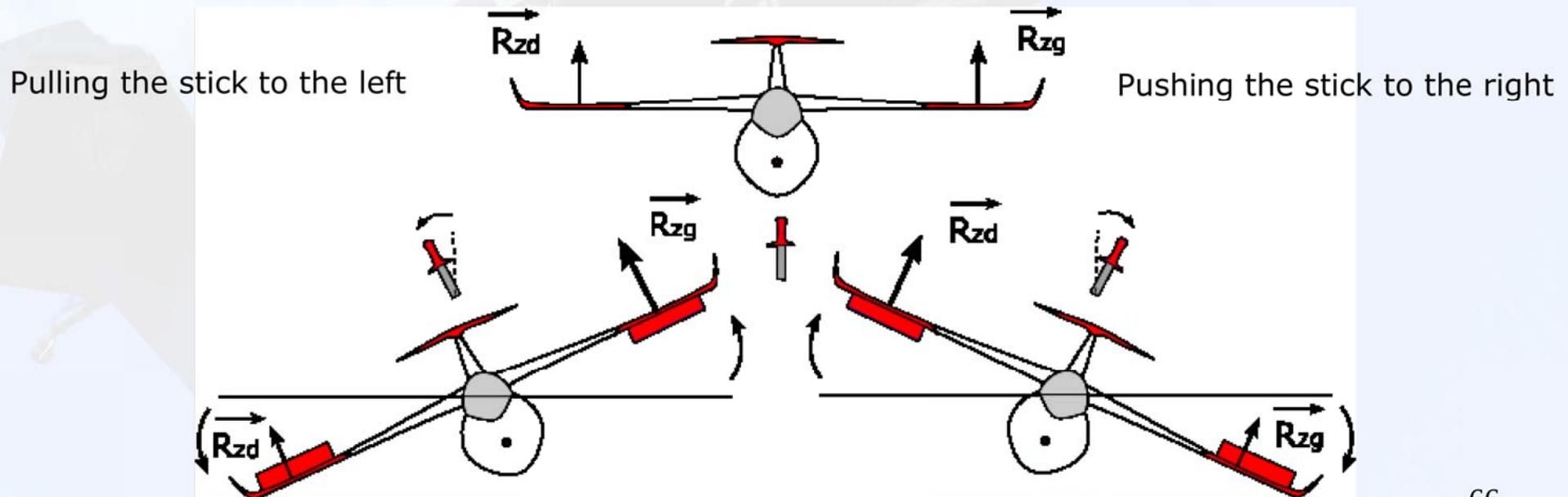
The elevators go down and the nose goes up.

# IV Contrôle de la trajectoire

## IV.4 Le contrôle en roulis :

- Il se fait à l'aide de la commande de **gauchissement** (manche).
- Les gouvernes sont les **ailerons**. Ils sont actionnés de manière **opposée**.
- Un braquage du manche vers la gauche entraîne la montée de l'aileron gauche et la descente de l'aileron droit. La portance de l'aile gauche diminue et celle de l'aile droite augmente. L'avion s'incline à gauche.

Roll movement control



The right aileron goes up and the left aileron goes down. The plane rolls to the right.  
The left aileron goes up and the right aileron goes down. The plane rolls to the left.

## IV Contrôle de la trajectoire

- Lorsque l'on donne du roulis dans un sens, l'avion part en virage dans ce sens.
- L'aile extérieure est accélérée par rapport à l'aile intérieure :
  - Sa portance augmente => l'inclinaison a tendance à augmenter seule
  - Sa traînée augmente => l'avion part en lacet dans le sens opposé au roulis.
- L'aileron baissé sur l'aile extérieure au virage génère plus de traînée que l'aileron levé sur l'aile intérieure et amplifie le lacet inverse.

**L'effet inverse du roulis est le lacet inverse.**

# IV Contrôle de la trajectoire

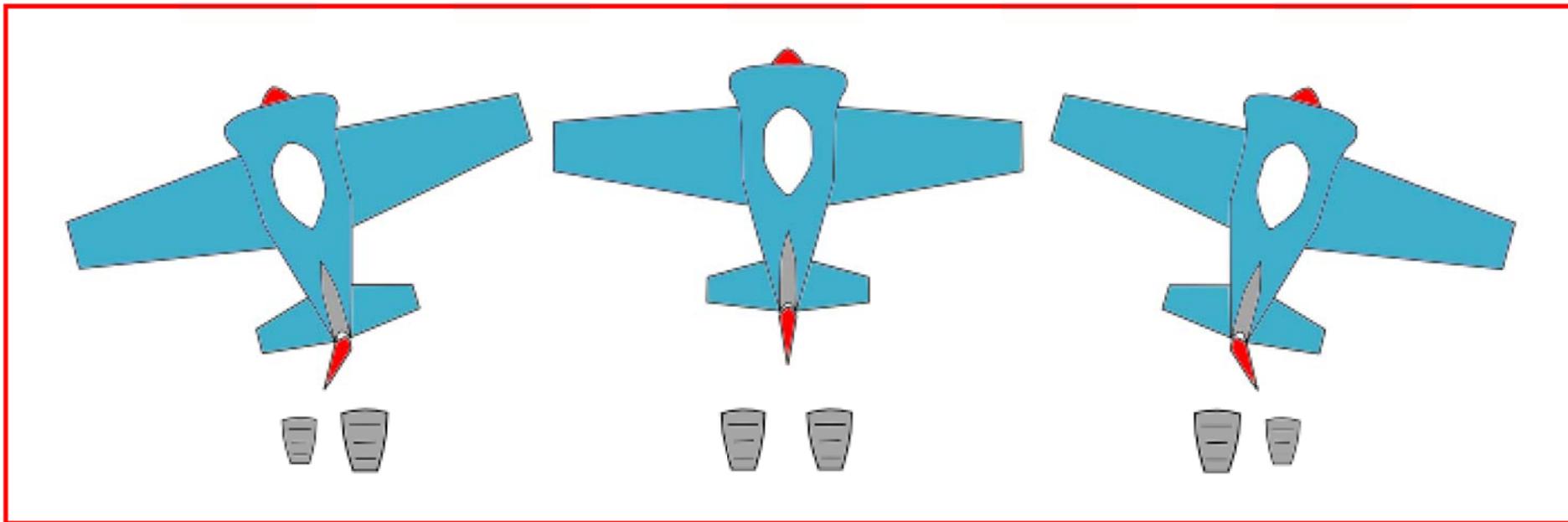
## IV.5 Le contrôle en lacet :

- Il se fait à l'aide du **palonnier**.
- La surface de contrôle correspondante est la **gouverne de direction**.
- Une poussée sur la pédale de gauche entraîne le braquage de la gouverne de direction vers la gauche. La force aérodynamique induite entraîne la rotation du nez vers la gauche.
- Une poussée dans le sens contraire entraîne l'effet inverse.

### Yaw movement control

Pushing the rudder pedal to the right

Pushing the rudder pedal to the left



The rudder moves to the left.

The rudder moves to the right.

## IV Contrôle de la trajectoire

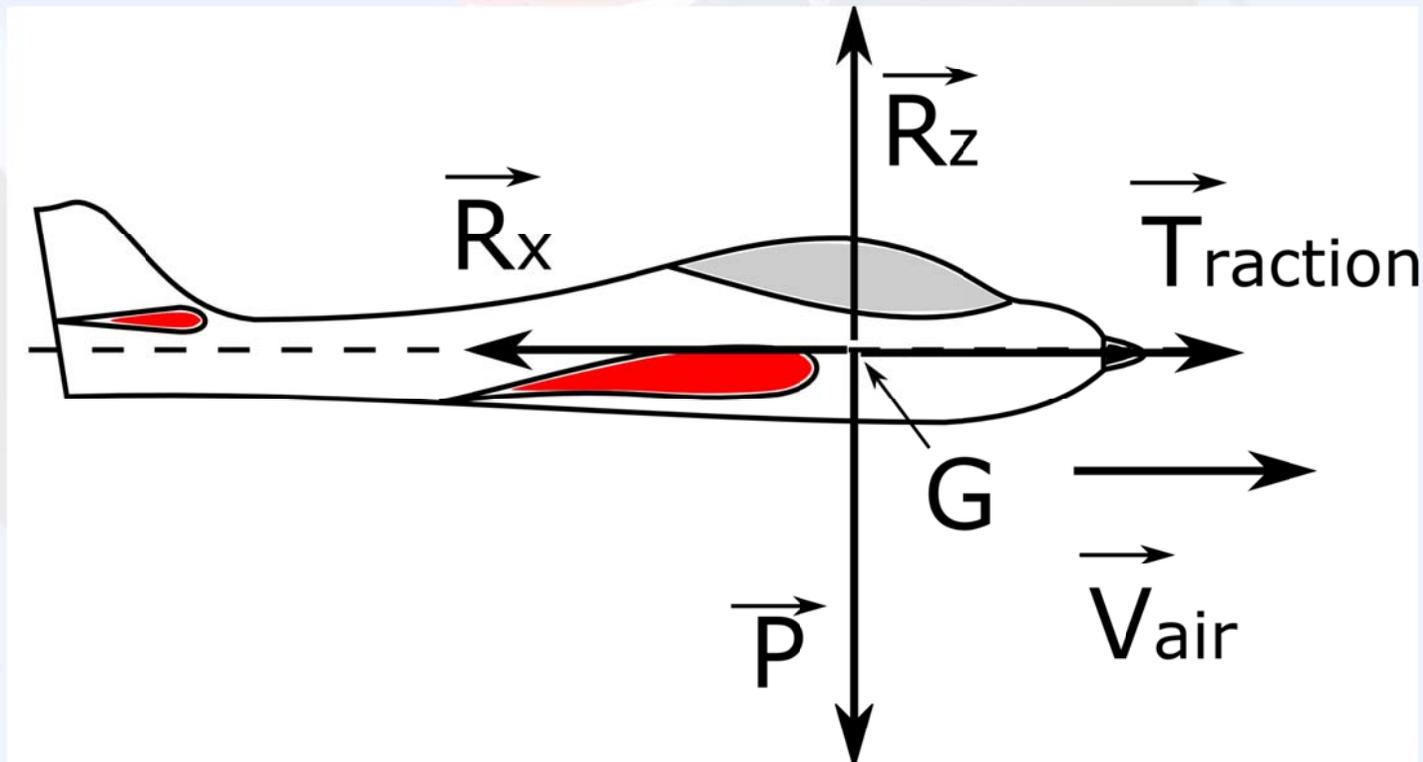
- Lorsque l'avion part en lacet, l'aile extérieure accélère
- Sa portance augmente => l'avion part en roulis dans le même sens que le lacet.

**L'effet secondaire du lacet est le roulis induit.**

# V Étude de différentes phases de vol

## V.1 Les forces de la mécanique du vol :

- Les 4 forces principales sont :
  - La portance  $R_z$  (perpendiculaire  $V$  air)
  - La traînée  $R_x$  (opposée  $V_{air}$ )
  - La traction  $T$  (ou la poussée)
  - Le poids  $P$  (vertical vers le bas)



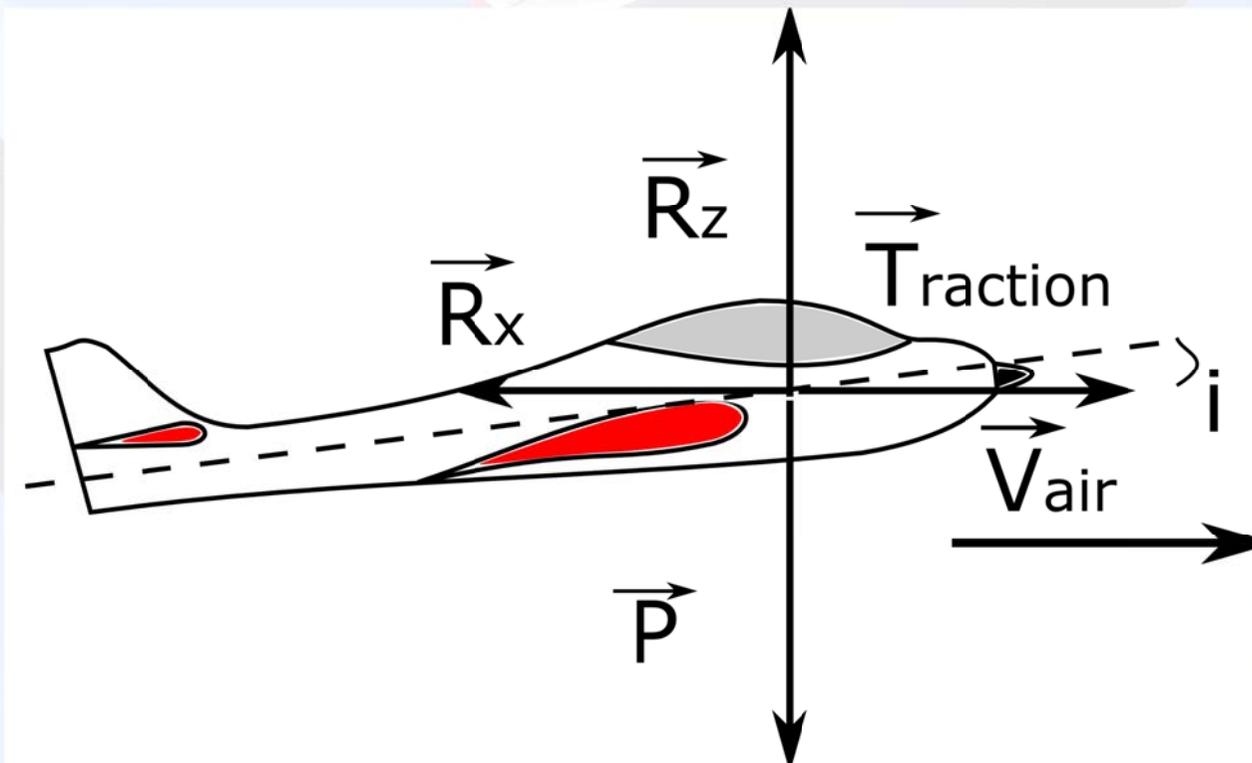
# V Étude de différentes phases de vol

## V.2 Le vol rectiligne en palier :

- Pour un vol rectiligne en palier à vitesse constante il faut que :

- La portance équilibre le poids :  $R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_z = m \cdot g$

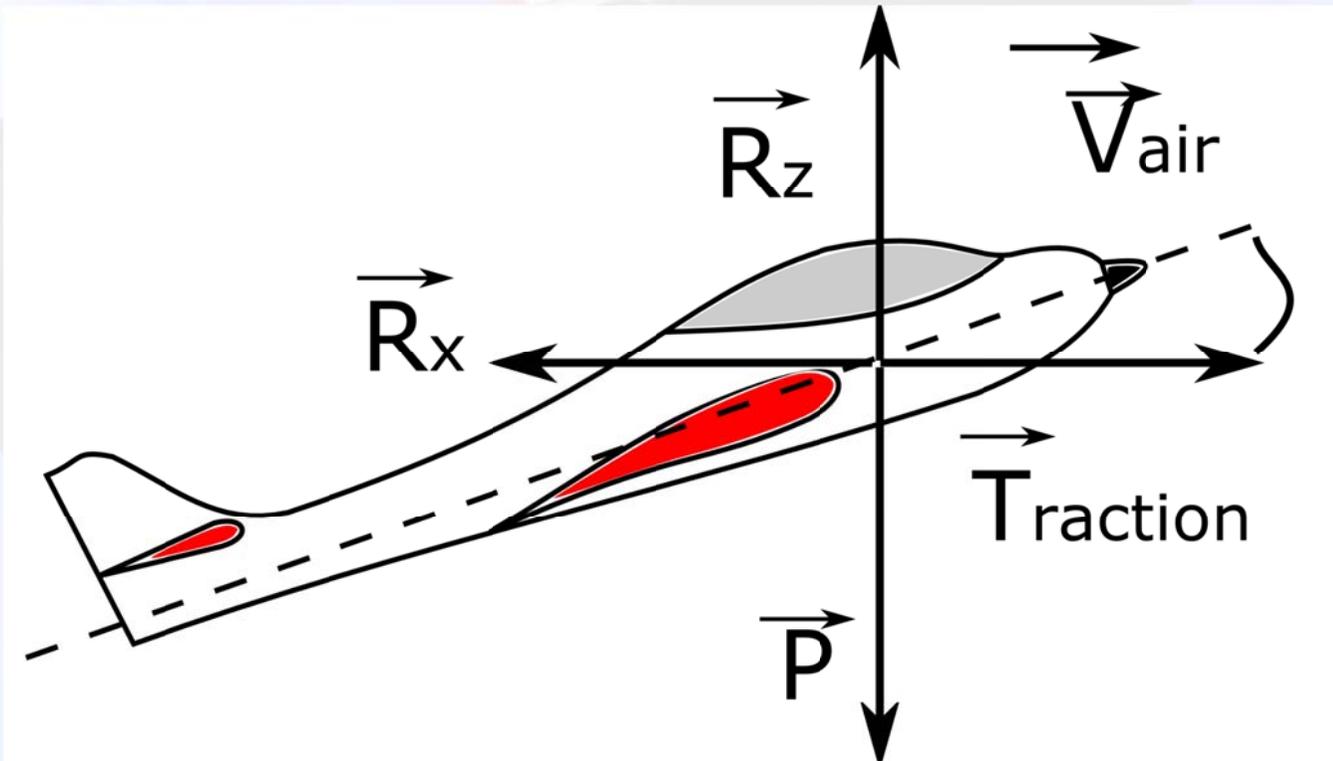
- La traction équilibre la traînée :  $R_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_x = T$



# V Étude de différentes phases de vol

- Pour une traction donnée il existe 2 régimes de vol en palier :
  - À faible incidence et grande vitesse.
  - A forte incidence et faible vitesse (schéma).

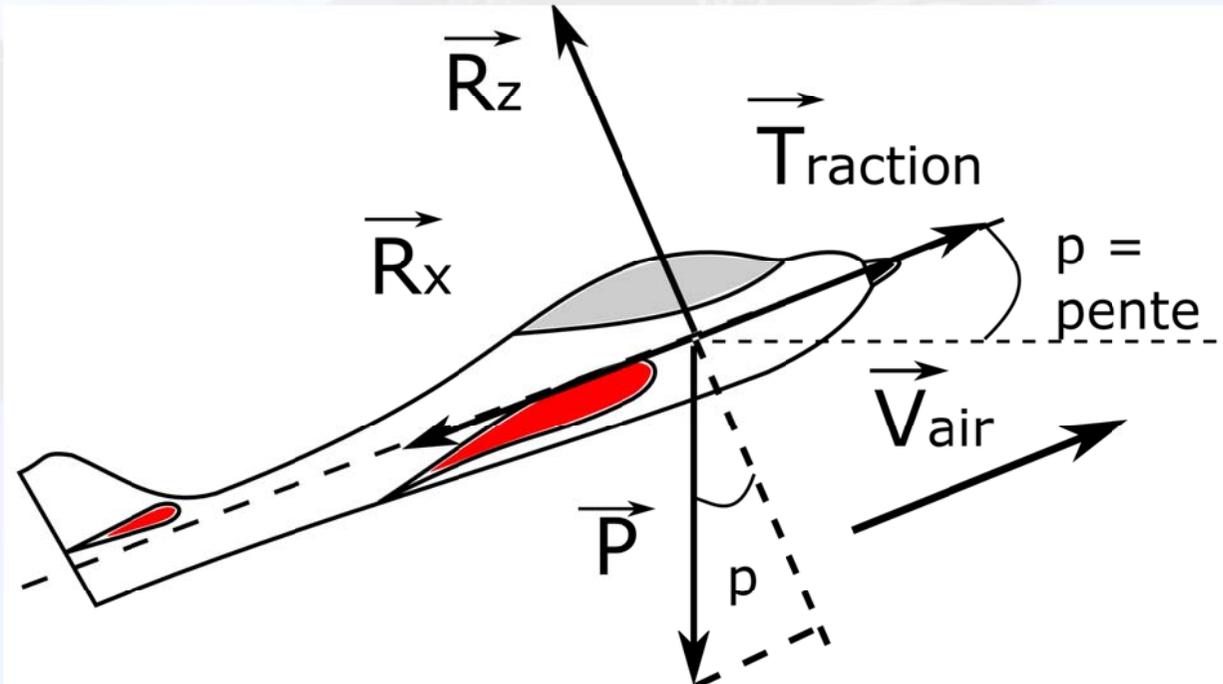
Ce deuxième régime est très dangereux, surtout au décollage, car très près du décrochage.



# V Étude de différentes phases de vol

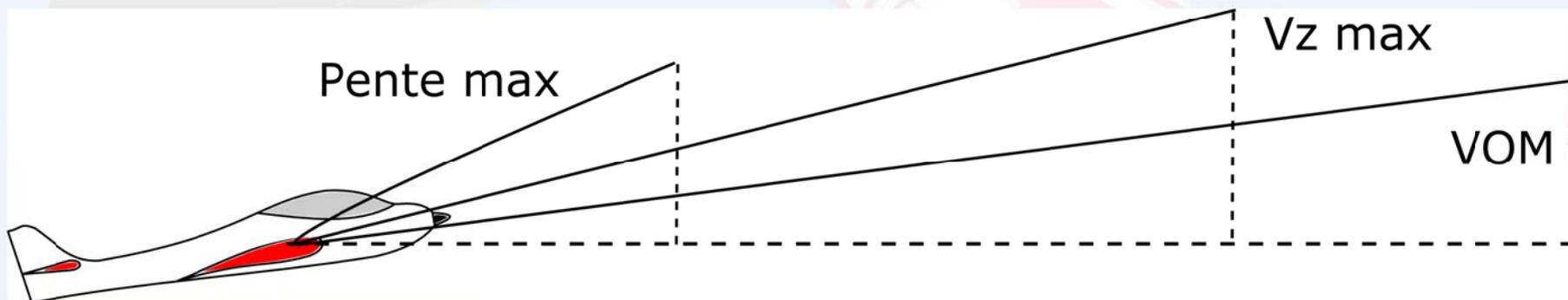
## V.3 Le vol rectiligne en montée :

- Pour un vol rectiligne en montée à vitesse constante il faut que :
  - La portance équilibre la projection du poids dans la direction de la portance :
$$R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_z = m \cdot g \cdot \cos(p)$$
  - La traction équilibre la traînée et la projection du poids dans la direction de la traînée:  $R_x + m \cdot g \cdot \sin(p) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_x + m \cdot g \cdot \sin(p) = T$



# V Étude de différentes phases de vol

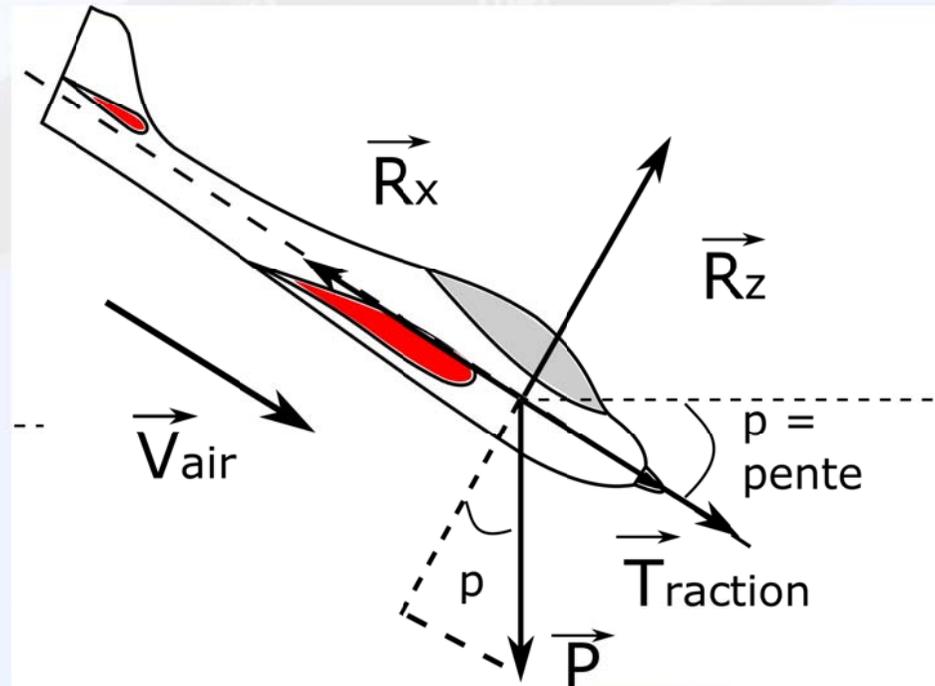
- Les différentes montées :  
Pendant un temps donné,
  - La montée à **pente max** permet de monter avec une forte pente (gain important d'altitude sur une petite distance horizontale).
  - La montée à **Vz max** permet de gagner un maximum d'altitude.
  - La montée à la **Vitesse Optimale de Montée** offre le meilleur compromis entre le gain d'altitude et la distance parcourue.



# V Étude de différentes phases de vol

## V.3 Le vol rectiligne en descente :

- Pour un vol rectiligne en descente à vitesse constante il faut que :
  - La portance équilibre la projection du poids dans la direction de la portance :
$$R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_z = m \cdot g \cdot \cos(p)$$
  - La traction et la projection du poids dans la direction de la traînée équilibrent la traînée :
$$R_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_x = T + m \cdot g \cdot \sin(p)$$



# V Étude de différentes phases de vol

## V.4 Le virage stabilisé en palier :

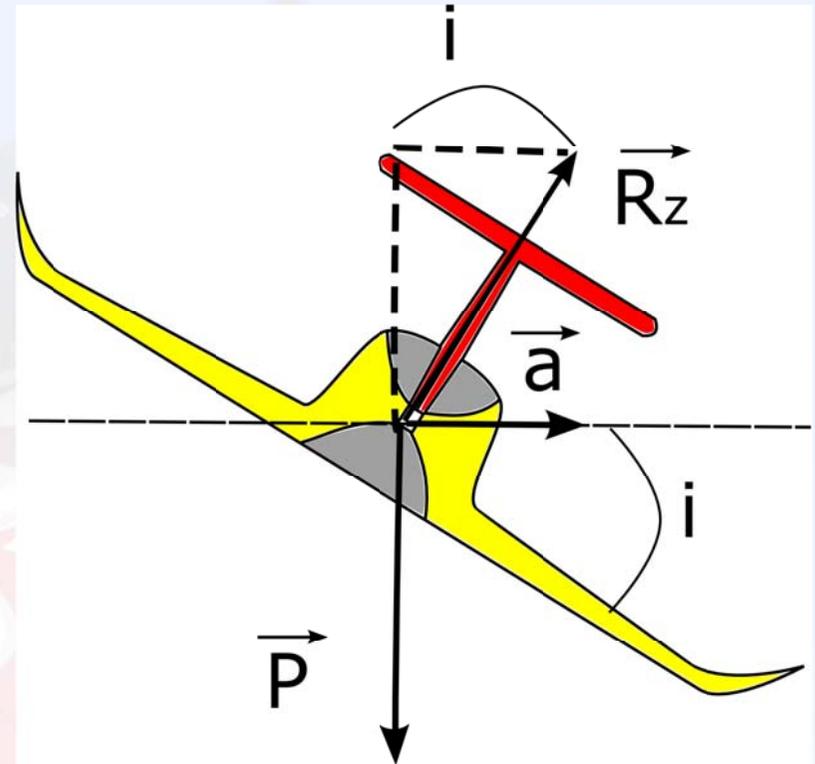
- Sur l'axe horizontal, la traction équilibre la traînée :

$$T = R_x$$

- Sur l'axe vertical, la projection de la portance, équilibre le poids :

$$R_z \cdot \cos(i) = P$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_z \cdot \cos(i) = m \cdot g$$



# V Étude de différentes phases de vol

- En virage il faut une portance supérieure :  $R_z = \frac{m \cdot g}{\cos(i)}$
- On définit le facteur de charge comme :  $n = \frac{R_z}{m \cdot g} = \frac{1}{\cos(i)}$
- Exemples de facteurs de charge :  
 $i = 30^\circ \Rightarrow n = 1,15$      $i = 45^\circ \Rightarrow n = 1,4$      $i = 60^\circ \Rightarrow n = 2$
- La portance nécessaire est donc  $R_z = n \cdot m \cdot g$ , la vitesse de décrochage en virage s'en trouve augmentée :

- En palier :  $R_z = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v^2 \cdot S \cdot C_z = m \cdot g \Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{mg}{\rho S C_z}}$

- En virage :  $R_z = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v^2 \cdot S \cdot C_z = n \cdot m \cdot g \Rightarrow v = \sqrt{n} \sqrt{2 \frac{mg}{\rho S C_z}}$

**Donc, en virage la vitesse de décrochage est multipliée par  $\sqrt{n}$**

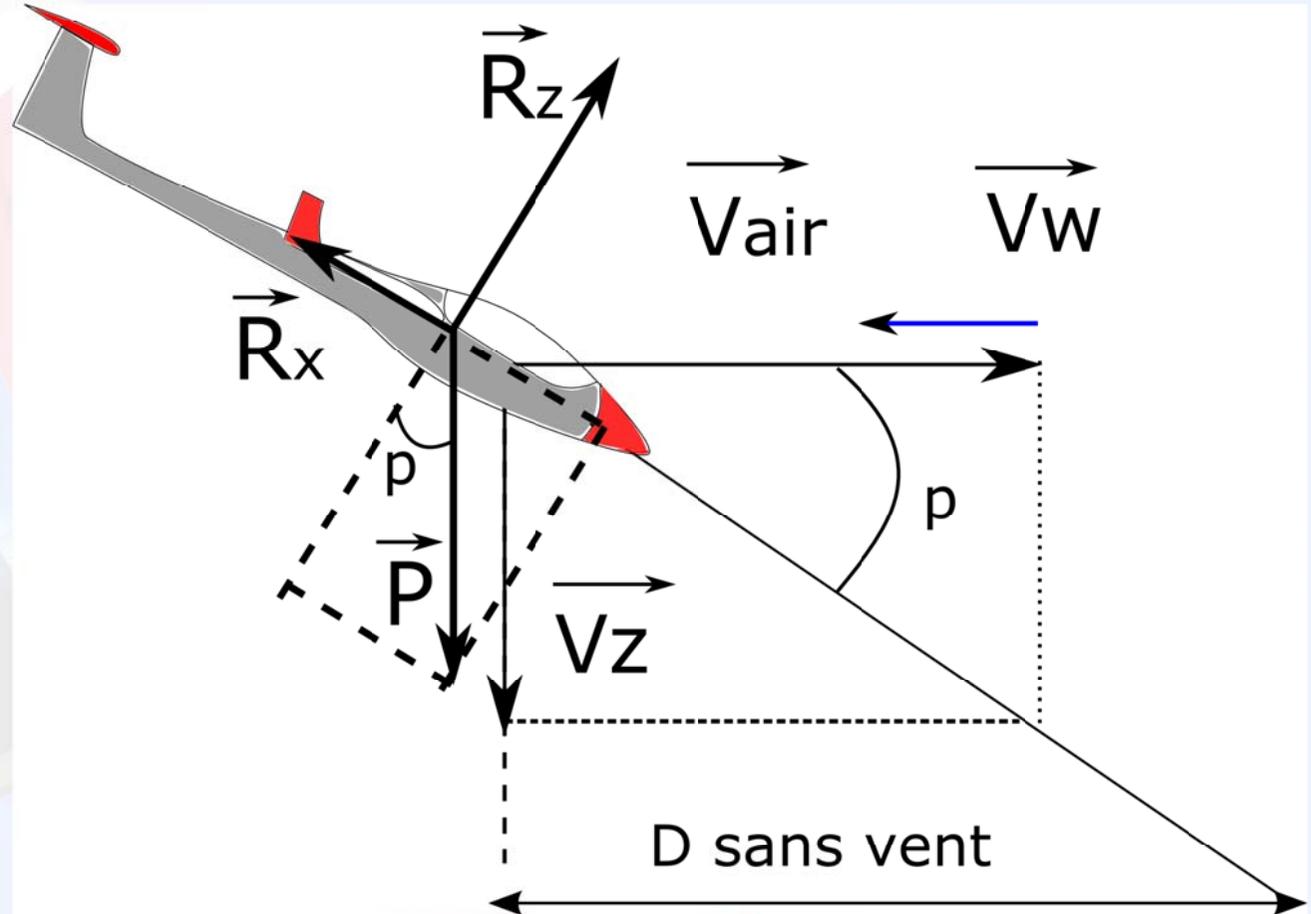
# V Étude de différentes phases de vol

## V.5 Le vol plané :

• En vol stabilisé :

- $R_z = P \cdot \cos(p)$
- $R_x = P \cdot \sin(p)$

Le vol est caractérisé par sa finesse (cf. diapos 23 et 24)



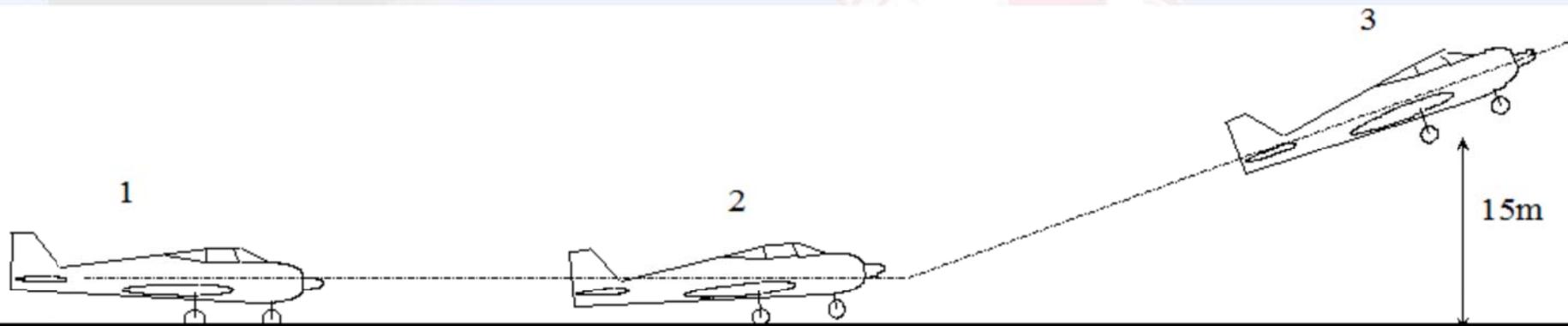
# V Étude de différentes phases de vol

## V.6 Le décollage :

- le roulement (1) : l'avion accélère afin d'atteindre la vitesse de rotation. Les volets diminuent la vitesse de décollage mais diminuent l'accélération . En général on utilise un seul cran de volet.

- la rotation (2) : on effectue la rotation pour placer l'avion à l'assiette de montée. Cela augmente la portance par augmentation d'incidence. Il faut s'assurer d'avoir une vitesse suffisante.

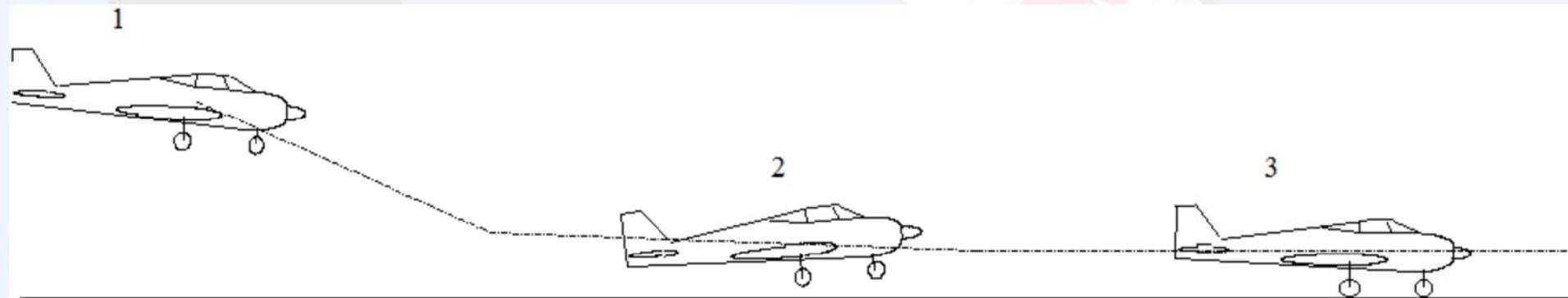
- l'envol (3) : l'avion quitte le sol mais il faut continuer à accélérer pour assurer la prise d'altitude. Le décollage se termine au passage à la hauteur de 15 m par rapport au sol.



# V Étude de différentes phases de vol

## V.7 L'atterrissage :

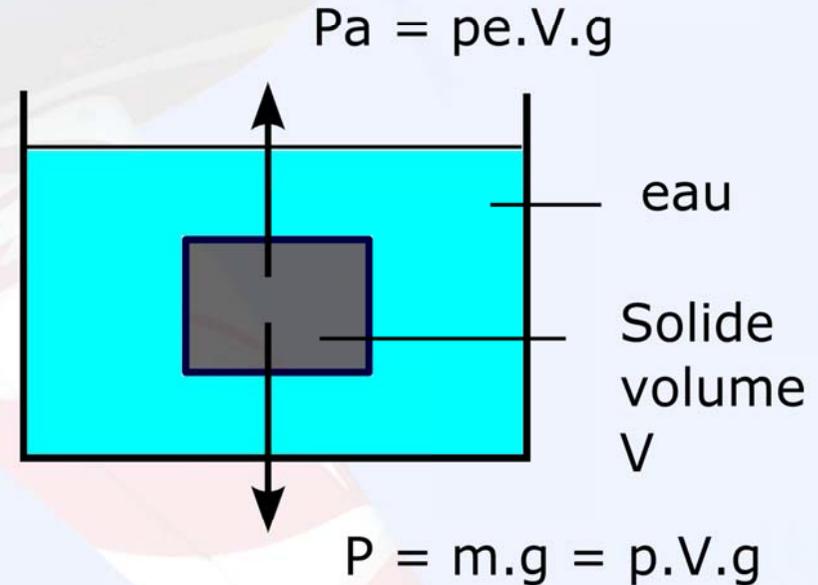
- la finale (1) : descente sur une pente stabilisée avec une vitesse constante. Par vent faible ou nul, le pilote sort les pleins volets et les becs afin de réduire la vitesse d'approche.
- l'arrondi (2) : près du sol le pilote réduit la pente afin de tangenter le sol.
- la décélération (3) : il faut perdre sa vitesse sur la piste. Il faut rester vigilant pendant toute la décélération. Un freinage mal dosé peut entraîner un cheval de bois, un pylône ou une sortie de piste.



# VI L'Aérostation

## VI.1 La poussée d'Archimède:

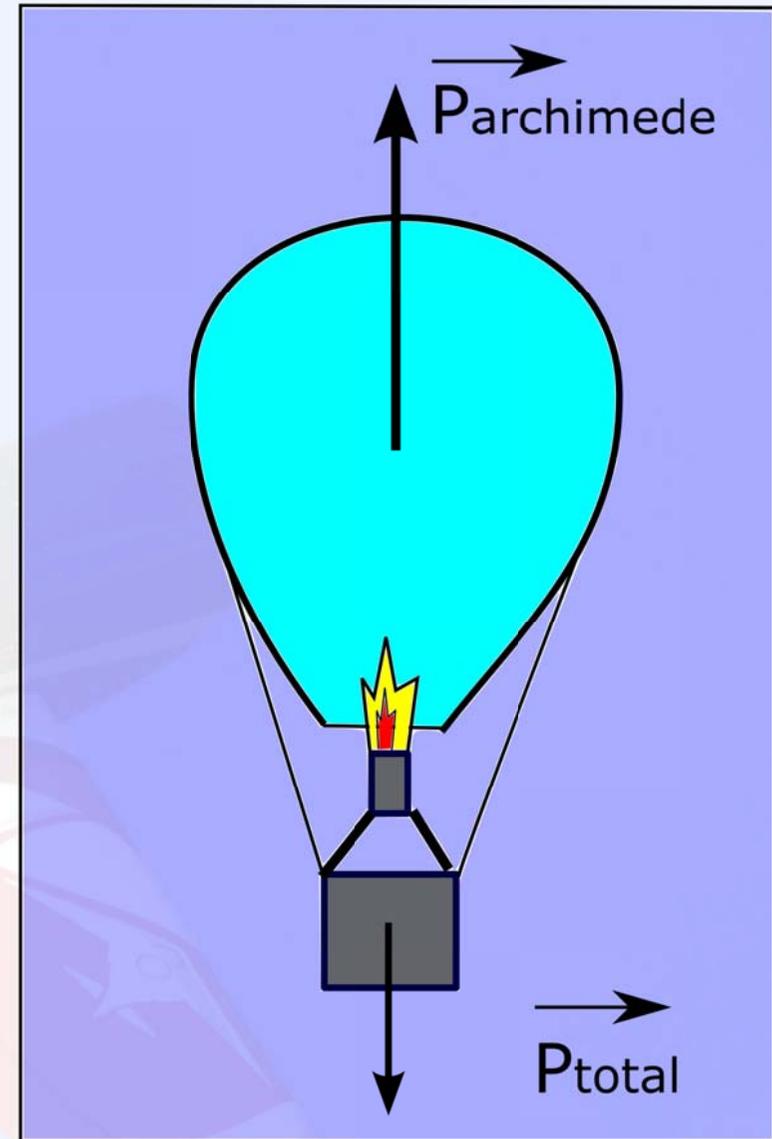
- Force due à la pression exercée sur un corps par le fluide (liquide ou gaz) dans lequel il est plongé.
- La poussée d'Archimède est égale à l'opposé du poids du fluide déplacé.
- La résultante vectorielle est  $P + P_a$ .
- Si le solide est moins dense que le fluide, il flotte.



# VI L'Aérostation

## VI.2 La sustentation d'une montgolfière : (Hot air balloon flight)

- La poussée d'Archimède s'applique aussi dans l'air.
- La montgolfière est gonflée à l'air chaud.
- L'air chaud est moins dense que l'air froid.
- Si la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe est suffisante, la poussée d'Archimède est supérieure au poids total de l'aéronef et il s'élève.
- La température est contrôlée par des brûleurs
- Une soupape et du lest permettent d'avoir un meilleur contrôle.



# VI L'Aérostation

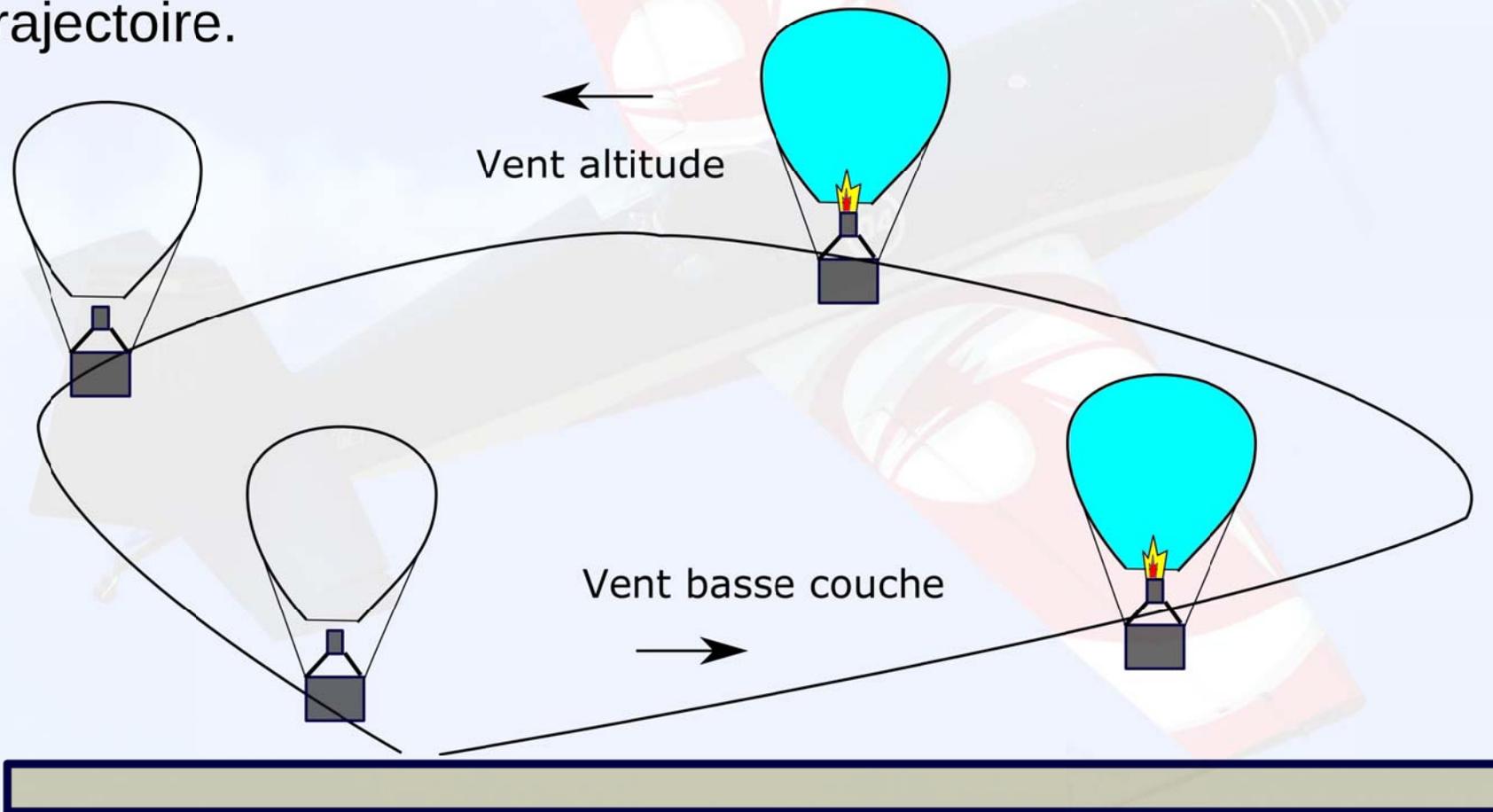
## VI.3 La sustentation d'un ballon à gaz:

- Certains ballons sont gonflés avec un gaz (dihydrogène et maintenant hélium) moins dense que l'air.
- La différence de masse volumique permet à la poussée d'Archimède de sustenter l'aéronef.
- Son enveloppe est étanche et le contrôle de la sustentation se fait à l'aide d'une soupape et de lest.
- D'autres aéronefs combinent un ballon à gaz inclus dans une enveloppe gonflée à l'air chaud. Ce sont des Rozières.

# VI L'Aérostation

## VI.4 Comment gérer la trajectoire d'une montgolfière:

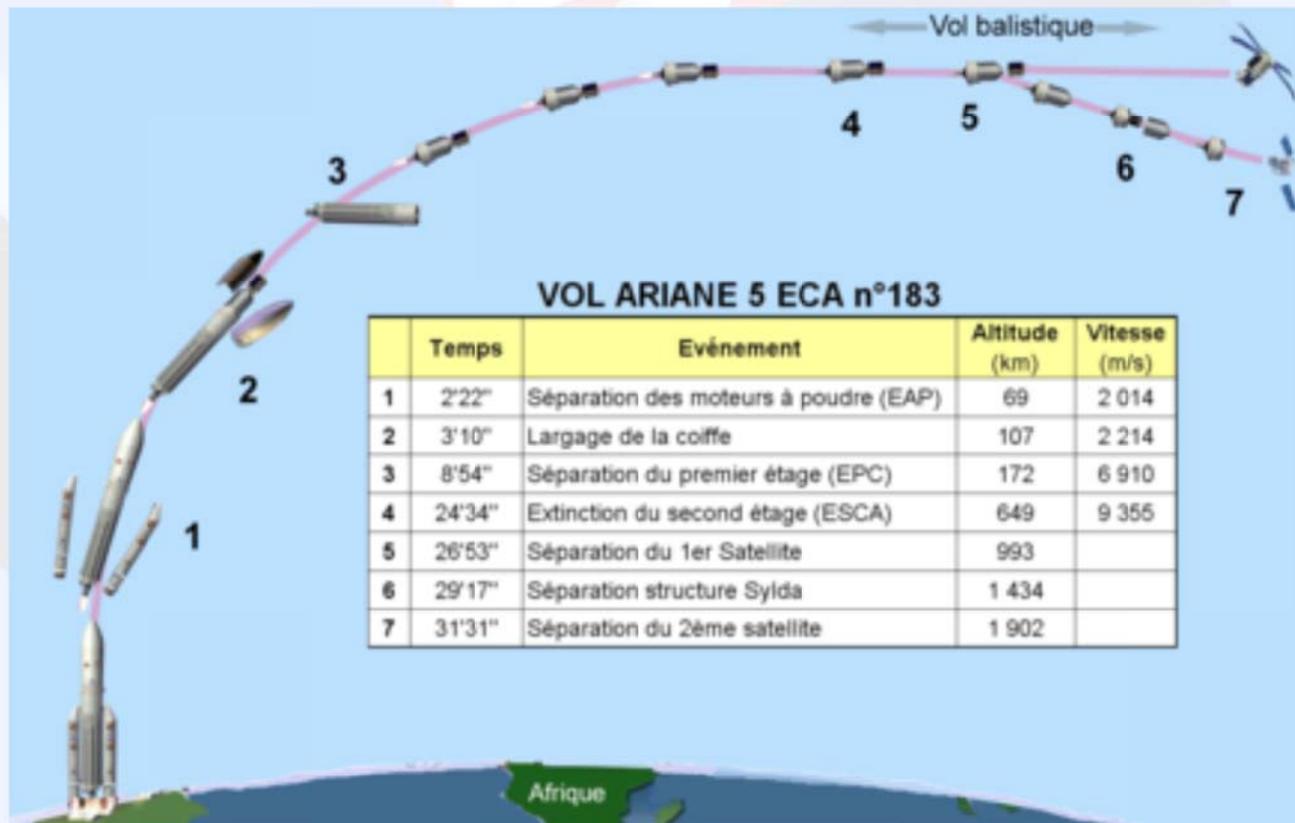
- Le contrôle du mouvement vertical se fait avec les brûleurs, le lest et la soupape.
- Le mouvement horizontal se fait au gré des vents. La différence de vent à différentes altitudes permet un certain contrôle de la trajectoire.



# VII Le vol spatial

## VII.1 La phase de lancement:

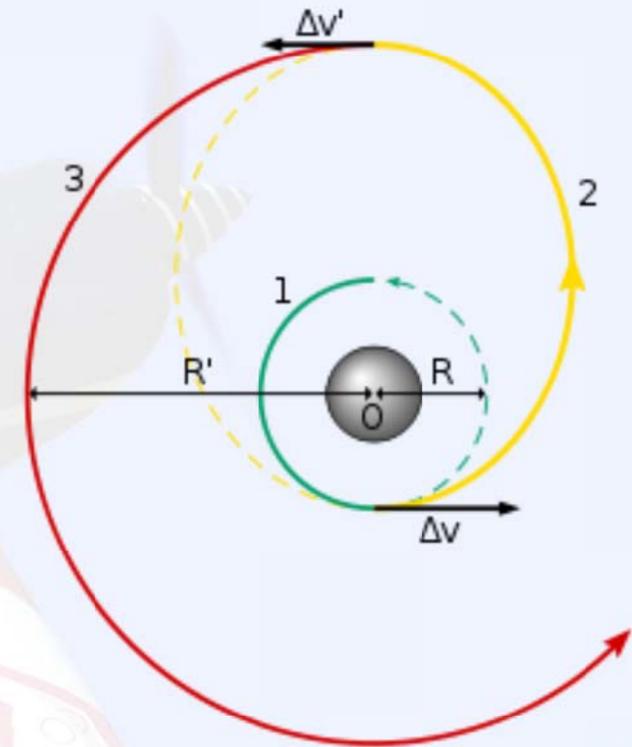
- L'impulsion et l'accélération sont obtenues avec un lanceur dont la très grande partie de la masse est constituée par le carburant.
- La partie haute du lanceur est placée sur une trajectoire balistique.
- Le ou les satellites se séparent et leur moteur est mis en marche pour les placer sur leur première orbite.



# VII Le vol spatial

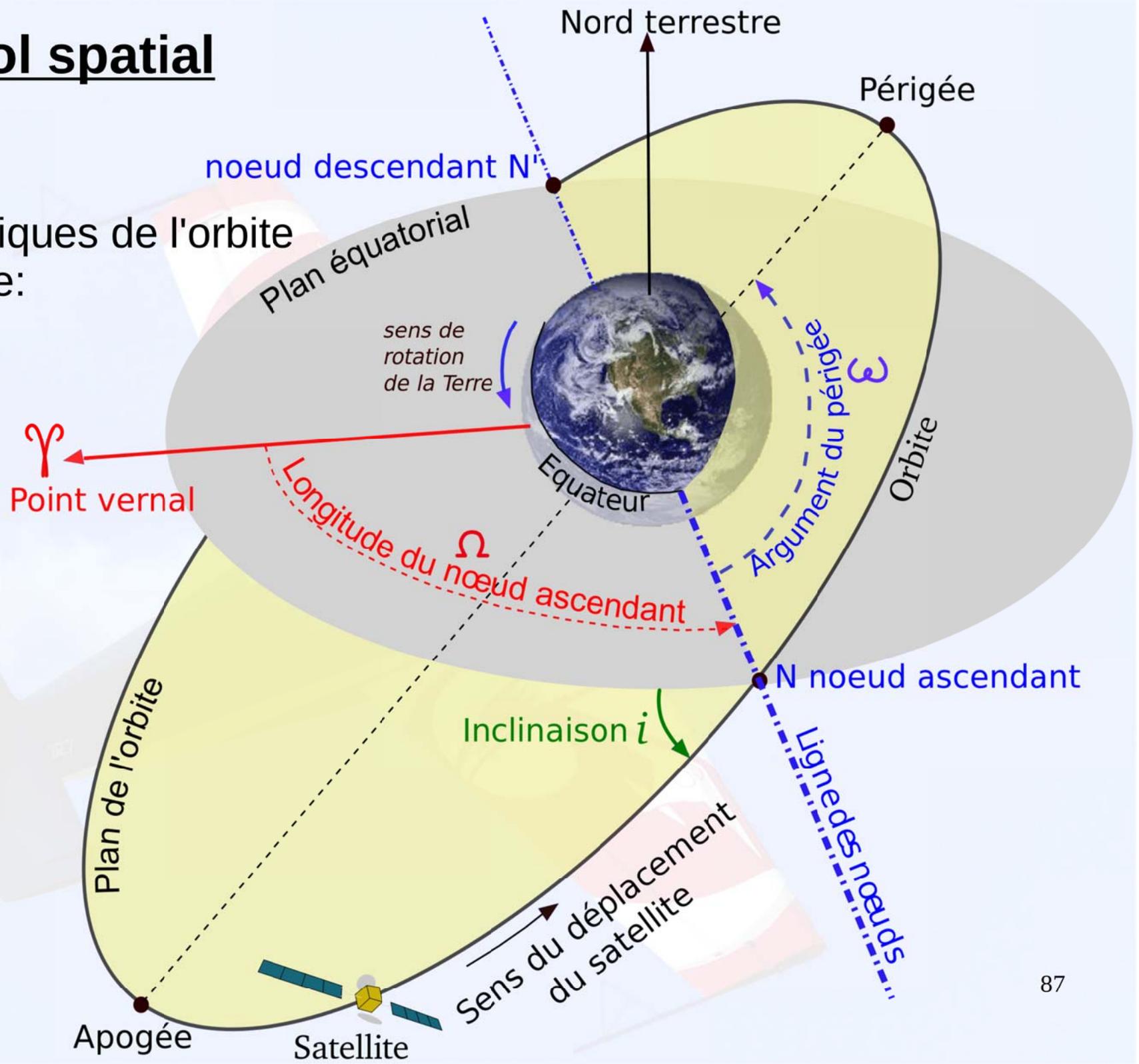
## VII.2 La mise en orbite d'un satellite:

- L'impulsion initiale permet en général d'obtenir une orbite de transfert circulaire basse.
- Une seconde impulsion au périgée permet de placer le satellite sur une orbite elliptique.
- Pour un satellite géostationnaire le transfert se fait en 2 temps avec une 1ère orbite de transfert circulaire et une 2ème elliptique. La trajectoire finale est circulaire, dans le plan de l'équateur et le satellite tourne avec la même période que la terre. Il est toujours à la verticale du même point de l'équateur, à une distance d'environ 36 000 km.



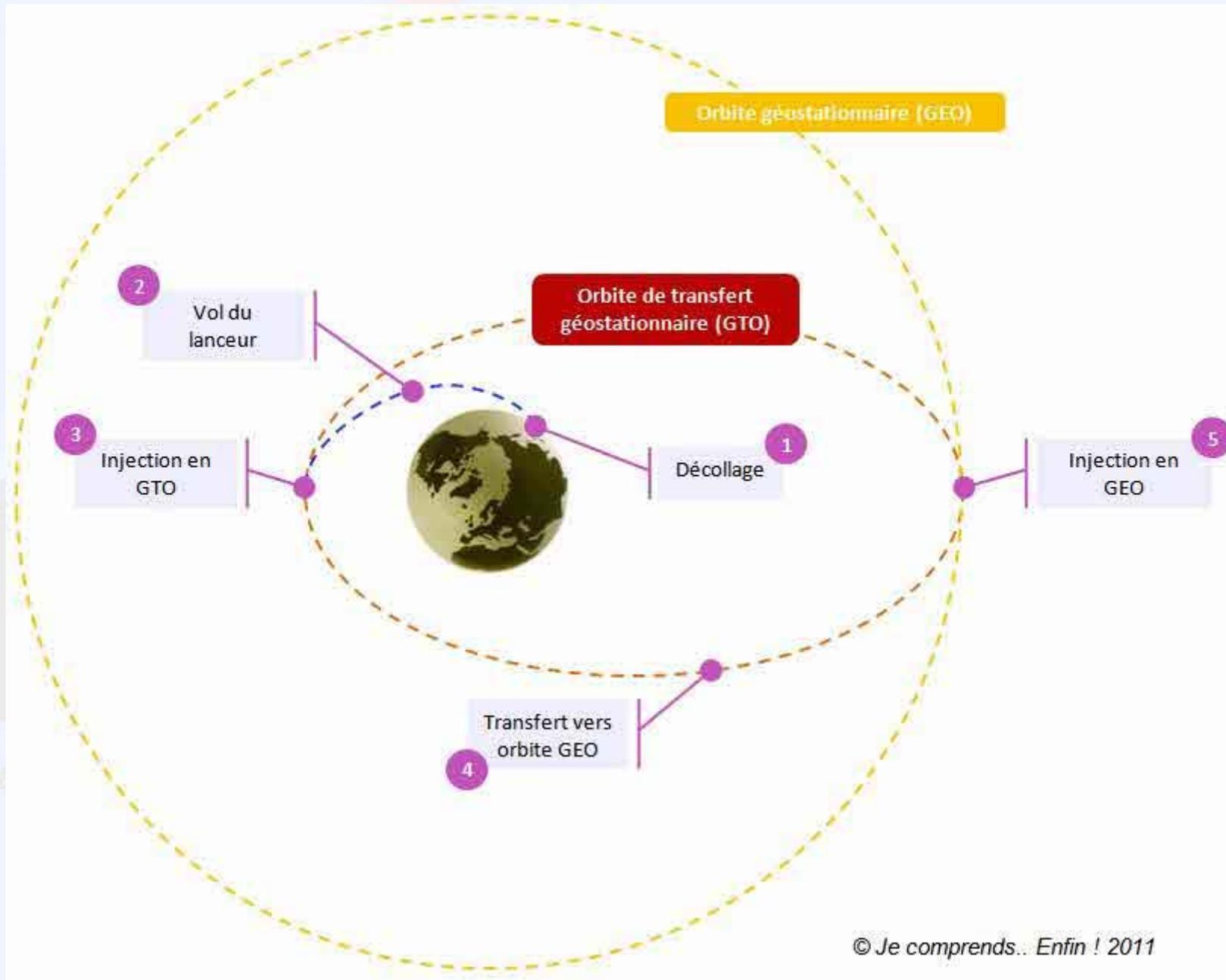
# VII Le vol spatial

- Caractéristiques de l'orbite d'un satellite:



# VII Le vol spatial

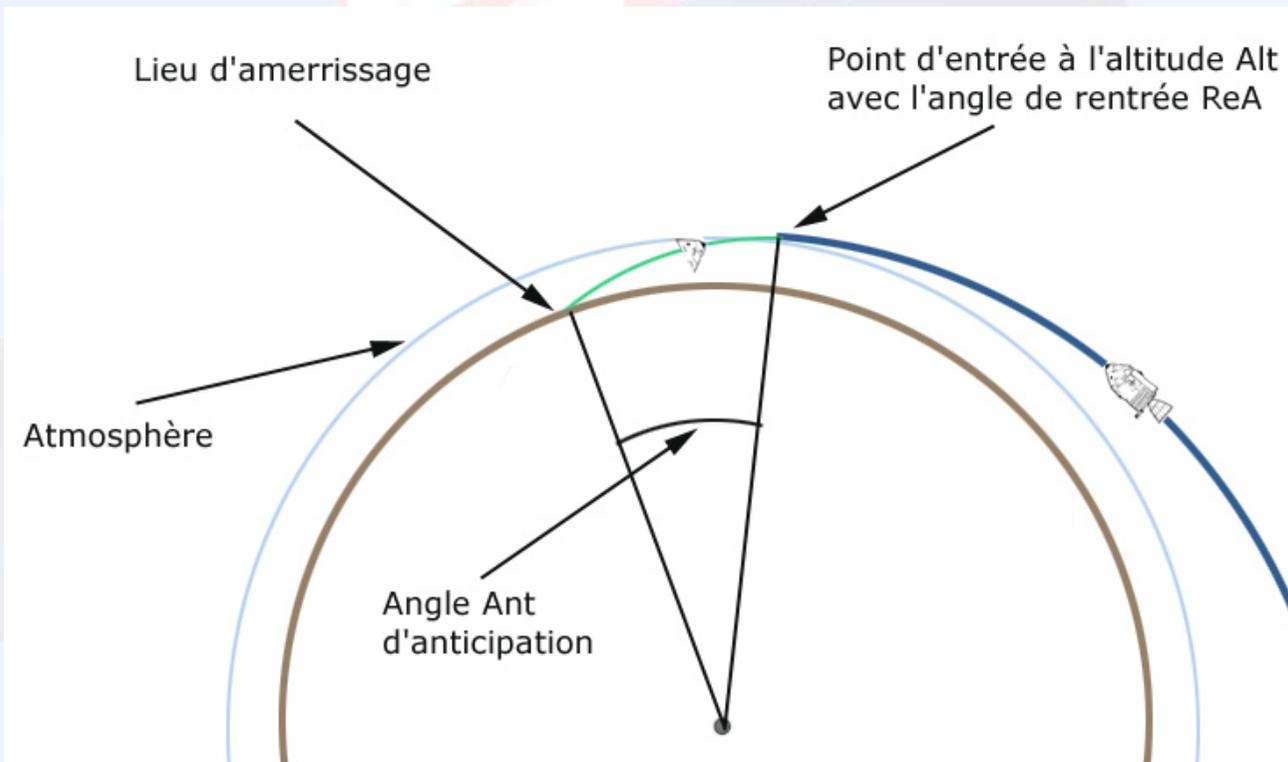
- La mise en orbite d'un satellite géostationnaire:



# VII Le vol spatial

## VII.3 La Rentrée atmosphérique:

- Le véhicule doit être freiné d'environ 7500 m/s à 100 m/s.
- La rentrée doit se faire sous un angle précis au 1/100<sup>ème</sup> de degré.
  - Angle de 6,6° pour les capsules Apollo
  - Si plus, échauffement trop important et explosion
  - Si moins, la capsule rebondit sur l'atmosphère et se perd dans l'espace.

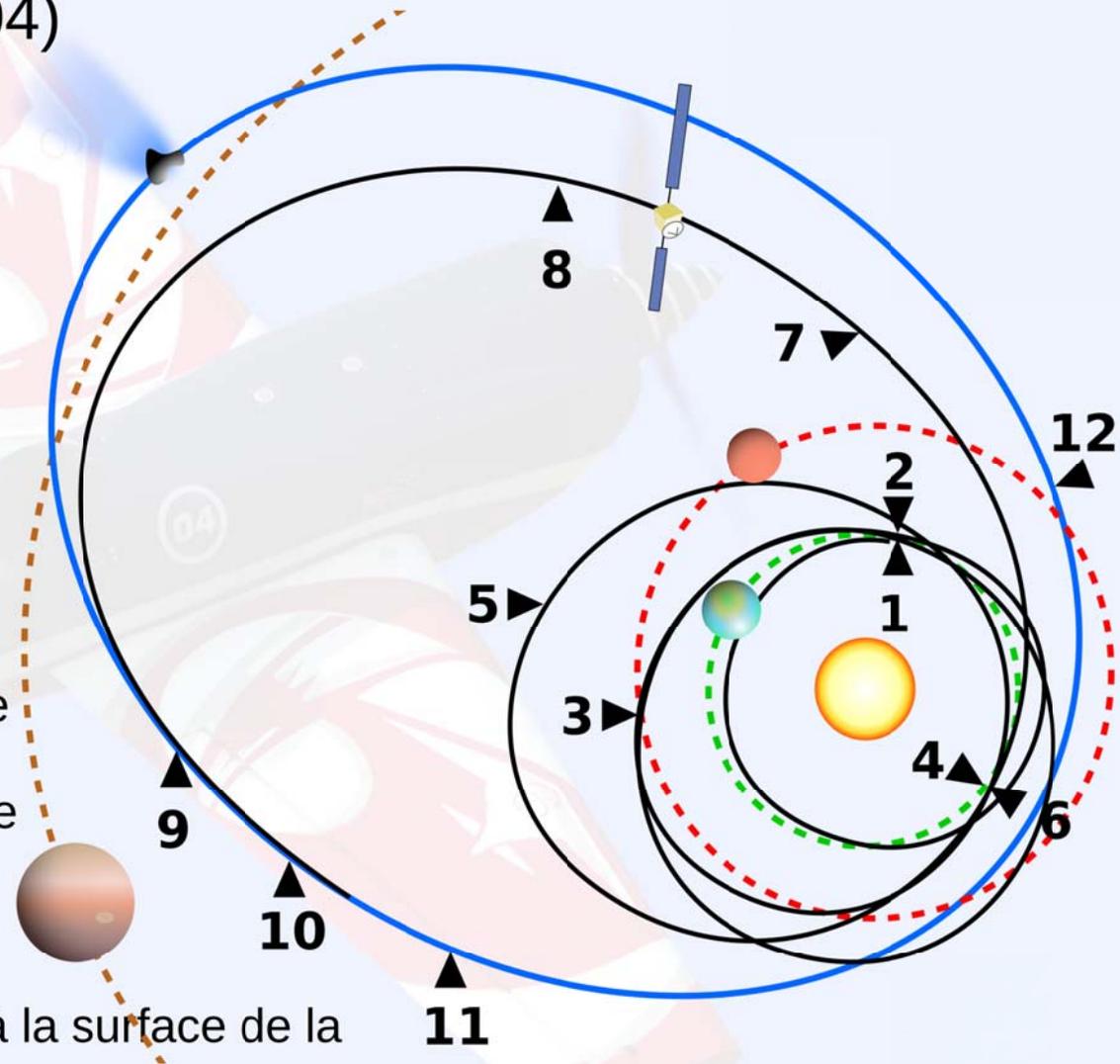


# VII Le vol spatial

## VII.4 Les trajectoires des sondes spatiales:

### Trajectoire de la sonde spatiale Rosetta (lancement mars 2004)

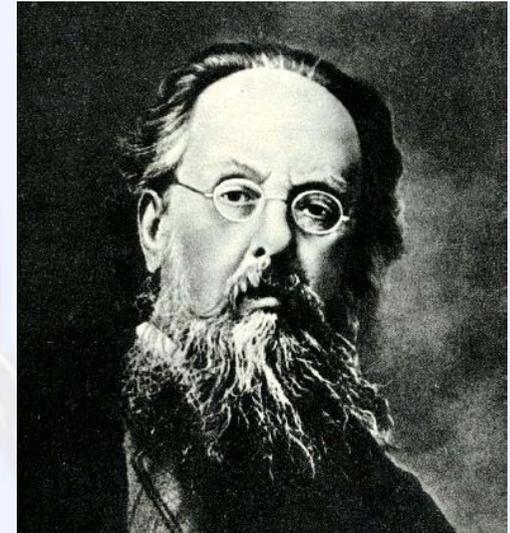
mars 2004 : lancement de Rosetta  
mars 2005 : 1ère assistance gravitationnelle de la Terre  
février 2007 : assistance gravitationnelle de Mars  
novembre 2007 : deuxième assistance de la Terre  
septembre 2008 : survol de l'astéroïde Steins  
novembre 2009 : 3ème et dernière assistance gravitationnelle de la Terre  
juillet 2010 : rendez vous avec l'astéroïde 21 Lutèce  
juillet 2011 : mise en sommeil de la sonde  
janvier 2014 : réactivation de la sonde  
août 2014 : mise en orbite autour de la comète  
12 novembre 2014 : atterrissage Philae à la surface de la comète (Agilkia)  
août 2015 : fin de la mission



# VII Le vol spatial

## VII.4 Les trajectoires des sondes spatiales:

- La première phase de lancement peut se faire comme pour les satellites avec une orbite circulaire intermédiaire ou un tir direct pour donner l'impulsion d'une orbite solaire.
- La sonde utilise ensuite l'attraction gravitationnelle des planètes rencontrées dans sa trajectoire pour accélérer et changer d'orbite.
- Des accélérations peuvent aussi être données par ses moteurs afin de modifier ou corriger la trajectoire.
- La mise en orbite ou la désorbitation autour de l'objectif de la sonde se font avec les moteurs de celle-ci.



# Sources documentaires

- La mécanique du vol de l'avion léger, Serge BONNET et Jacques VERRIERES, éditions Cépaduès
- Mécanique du Vol , A.C, KERMODE, éditions Modulo
- Manuel du pilote d'avion Vol à vue , SFACT, éditions Cépaduès
- Manuel du pilote vol à voile, collectif, éditions Cépaduès

Les illustrations ont été réalisées par l'auteur ou ont été trouvées sur divers sites internet avec une recherche mentionnant une réutilisation autorisée sans but commercial.

Ce document a été réalisé par Monsieur Frédéric WILLOT avec l'aide de Messieurs Marc COPPIN, Laurent BUISSYNE et Olivier SEYS. Tous enseignent le Brevet d'Initiation Aéronautique dans l'Académie de LILLE.

Il peut être utilisé librement par quiconque le souhaite, modifié ou non, sous condition que l'utilisation soit faite à des fins pédagogiques et non lucratives.