

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

# BIA

## Brevet d'Initiation Aéronautique

# Aérodynamique, aérostatique et principes du vol



Cours sous [licence Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) – Utilisation commerciale interdite !

Je partage, mais je veille !



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## **Aérodynamique, aérostatique et principes du vol..... 5**

<b>1.1. Le vol d'avion.....</b>	<b>5</b>
1.1.1 Aérodynamique d'une aile .....	5
1.1.1.a La structure d'une aile .....	5
1.1.1.b Les angles à connaître.....	6
1.1.1.b.i Assiette .....	7
1.1.1.b.ii Incidence ou angle d'attaque.....	7
1.1.1.b.iii Pente .....	7
1.1.1.b.iv Relations.....	7
1.1.1.c L'aérodynamique .....	8
1.1.1.c.i Introduction.....	8
1.1.1.c.ii Les souffleries .....	9
• Objectifs.....	9
• Mesures .....	9
• Types de souffleries .....	9
1.1.1.c.iii Le théorème de Bernoulli .....	10
1.1.1.c.iv Expérimentations .....	10
1.1.1.c.v Simulations numériques.....	11
1.1.1.c.vi Conclusions sur l'écoulement autour d'une aile .....	12
1.1.1.c.vii Lien entre pression et forces aérodynamiques .....	13
1.1.1.c.viii La portance & et la traînée de profil .....	14
1.1.1.c.ix Les coefficients de portance et traînée .....	15
• Différents profils .....	15
• Influence de l'incidence.....	16
1.1.1.c.x La polaire d'une aile .....	18
• Définition et points caractéristiques.....	18
• Influence du nombre de Mach .....	19
1.1.1.c.xi Le décrochage .....	20
1.1.1.c.xii Les dispositifs hypersustentateurs : Volets (Flaps) .....	23
1.1.1.c.xiii Les aérofreins & spoilers.....	25
1.1.1.c.xiv La traînée induite .....	26
1.1.2 Pilotage d'un avion .....	28
1.1.2.a Axe de tangage : assiette .....	29
1.1.2.b Axe de roulis : inclinaison .....	29
1.1.2.c Axe de lacet .....	29
1.1.3 Equilibre du vol.....	30
1.1.3.a Stabilité longitudinale – Axe de tangage .....	30
1.1.3.a.i Actions mécaniques.....	30
• Forces .....	30
• Moments .....	31
1.1.3.a.ii Bilan des forces influentes .....	33
1.1.3.a.iii Définition du foyer .....	33
1.1.3.a.iv CDG derrière foyer .....	35
1.1.3.a.v CDG devant foyer.....	36
1.1.3.a.vi Centrage .....	37
1.1.3.b Roulis.....	38
1.1.3.b.i Stabilité en roulis – Stabilité latérale.....	38
• Ralentissement du mouvement.....	38



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

• Retour en position d'équilibre .....	39
• Conclusion .....	39
• Remarque .....	39
1.1.3.b.ii Effets secondaires - Le roulis induit.....	40
• En virage .....	40
• Par action en lacet.....	40
1.1.3.c Lacet .....	41
1.1.3.c.i Stabilité en lacet – Stabilité de route.....	41
• Effet « Girouette » .....	41
• Flèche .....	41
• Conclusion .....	41
• Remarques.....	41
1.1.3.c.ii Effets secondaires - Lacet inverse.....	42
• Mise en virage – Taux de roulis non nul.....	42
• En virage stabilisé – Taux de roulis nul .....	43
1.1.4 Le vol d'avion motorisé .....	44
1.1.4.a Bilan des forces.....	44
1.1.4.b Mouvement rectiligne uniforme .....	44
1.1.4.c Les différentes phases du vol .....	45
1.1.4.c.i Vol en palier.....	45
1.1.4.c.ii Vol en montée .....	46
1.1.4.c.iii Vol en descente.....	49
1.1.4.c.iv Vol en virage .....	51
1.1.4.d Décollage et atterrissage .....	52
1.1.4.d.i Masse volumique et pression .....	52
1.1.4.d.ii Effets du vent .....	54
• Un exemple pour comprendre .....	54
• Le gradient de vent et ses effets.....	54
• Les rafales .....	55
• Performances.....	56
1.1.4.e Les effets moteur.....	57
1.1.4.e.i Couple de renversement .....	57
1.1.4.e.ii Souffle hélicoïdal .....	57
1.1.4.e.iii Effet gyroscopique .....	58
1.1.4.e.iv Traction dissymétrique .....	60
1.1.4.e.v Couple cabreur/piqueur.....	61
• Effet sur la profondeur .....	61
• Effet par rapport au CDG .....	61
1.1.4.e.vi Remarques.....	61
1.1.5 Le vol plané.....	62
1.1.5.a Notion de finesse.....	62
1.1.5.b Incidence de finesse maximale .....	63
1.1.5.c Vitesse de finesse maximale.....	64
1.1.5.c.i Introduction.....	64
1.1.5.c.ii Influence du poids.....	64
1.1.5.c.iii Polaire des vitesses .....	65
1.1.5.d Classification des finesesses.....	65
1.1.6 Le facteur de charge .....	66



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

1.1.6.a Définition.....	66
1.1.6.b Effets .....	66
1.1.6.b.i Sur la structure .....	66
1.1.6.b.ii Sur les humains .....	66
1.1.6.b.iii Sur le décrochage .....	67
1.1.6.c Les situations rencontrées .....	68
1.1.6.c.i Vol en palier ligne droite .....	68
1.1.6.c.ii Vol dos .....	68
1.1.6.c.iii Ressource.....	68
1.1.6.c.iv Vol en palier - Virage .....	69
<b>1.II. Le vol d'aérostat .....</b>	<b>70</b>
1.II.1 La poussée d'Archimède .....	70
1.II.1.a Principe .....	70
1.II.1.b Quelques explications.....	71
1.II.2 La force aérostatique .....	72
1.II.2.a Définition.....	72
1.II.2.b Influence de la température .....	73
1.II.3 L'équilibre du vol .....	74
1.II.3.a La situation d'équilibre .....	74
1.II.3.b La charge transportable – Ballon à air .....	74
1.II.4 Le principe du vol.....	75
1.II.4.a Déplacement vertical .....	75
1.II.4.b Déplacement horizontal .....	75
<b>1.III. Le vol des satellites .....</b>	<b>76</b>
1.III.1 La force centrifuge .....	76
1.III.2 La force de pesanteur .....	77
1.III.3 L'équilibre du vol .....	78
1.III.4 Le principe du vol.....	78
1.III.4.a Les orbites .....	78
1.III.4.a.i Les orbites non circulaires.....	78
1.III.4.a.ii Les orbites circulaires.....	79
• Orbite géostationnaire terrestre .....	79
• Orbites héliosynchrones terrestres : satellites défilants .....	80
1.III.4.b La mise en orbite .....	80
1.III.4.b.i Lieu d'envol .....	80
1.III.4.b.ii Phases du vol.....	81
• Phase propulsée.....	81
• Phase balistique .....	81
• Injection.....	81
1.III.4.c Changement d'orbite .....	82
1.III.4.d Le maintien en orbite.....	82
1.III.4.e Le voyage interstellaire .....	82



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

# Aérodynamique, aérostatique et principes du vol

Nous allons aborder dans ce chapitre les principes de sustentation dans l'air de différents aéronefs :

- Avions / planeurs
- Aérostats
- Satellites

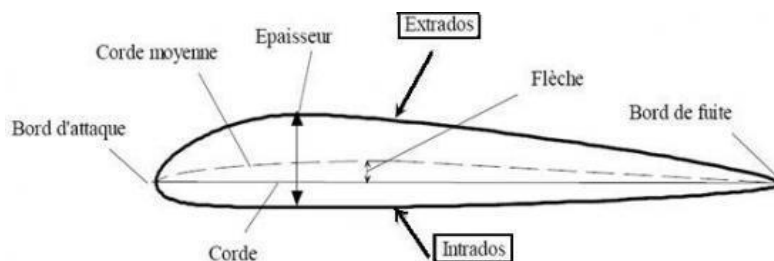
Je tiens à remercier mon collègue Vincent BUGEAT (professeur de physique à l'INSPE (ESPE) de Créteil) pour avoir relu et apporté des corrections à mon poly.

## 1.I. Le vol d'avion

### 1.I.1 Aérodynamique d'une aile

#### 1.I.1.a La structure d'une aile

Soit le schéma suivant d'une aile d'avion :



On définit :

- Extradors : partie supérieure de l'aile
- Intrados : partie inférieure de l'aile
- Bord d'attaque : partie avant de l'aile, entrant en collision avec les particules d'air
- Bord de fuite : partie arrière
- Corde : segment liant bord d'attaque et bord de fuite
- Corde moyenne : ligne moyenne de l'épaisseur de l'aile
- Surface alaire : Surface des ailes avec une partie du fuselage comprise (cf image ci-dessous)
- Envergure : distance entre les deux bouts d'aile
- Dièdre : angle entre le plan des ailes et l'horizontale
- Flèche : angle définissant la ligne du bord d'attaque par rapport à l'axe transversal de l'avion
- Saumon : le bout d'aile

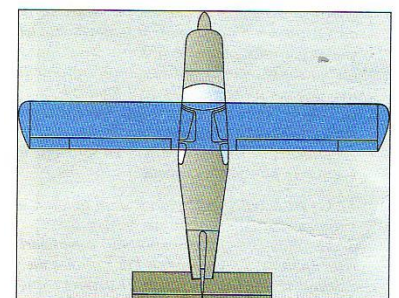
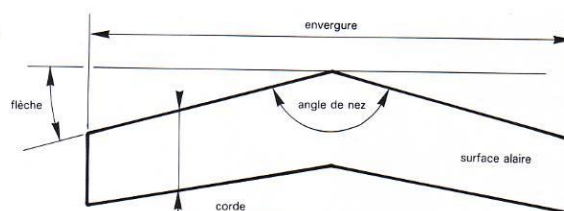
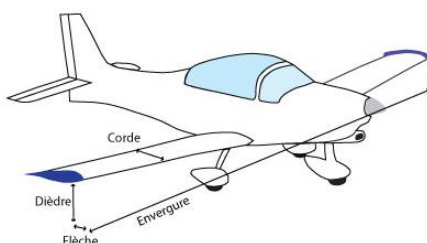
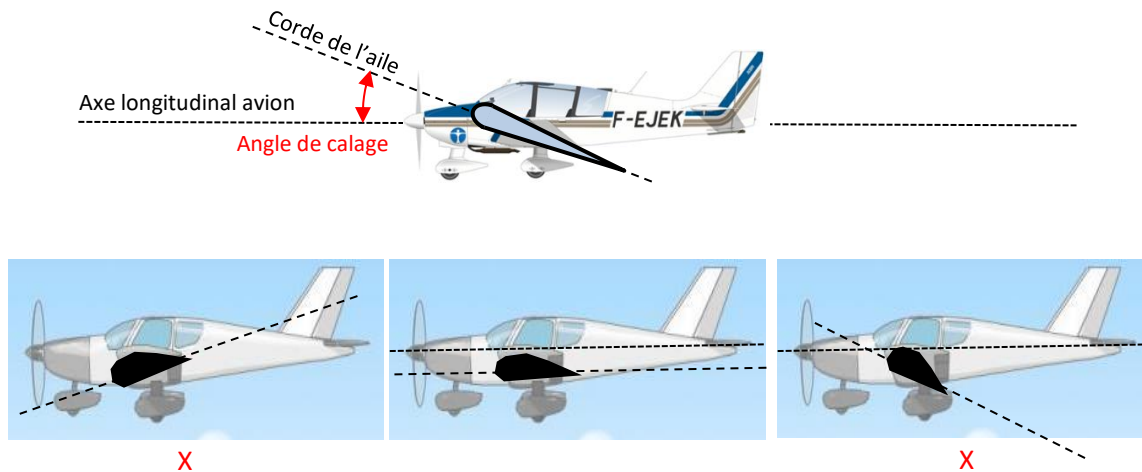


Fig.10 : La surface alaire comprend aussi une partie du fuselage.

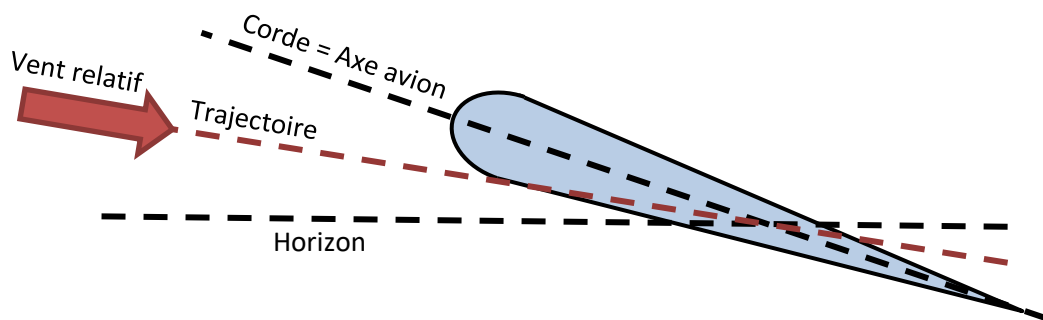
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.b Les angles à connaître

Dans un premier temps, et pour simplifier les explications qui vont suivre, nous allons supposer que la corde de l'aile est parallèle à l'axe longitudinal de l'avion, c'est-à-dire que l'angle de calage est nul :



Soit le schéma d'une aile se déplaçant dans l'air :

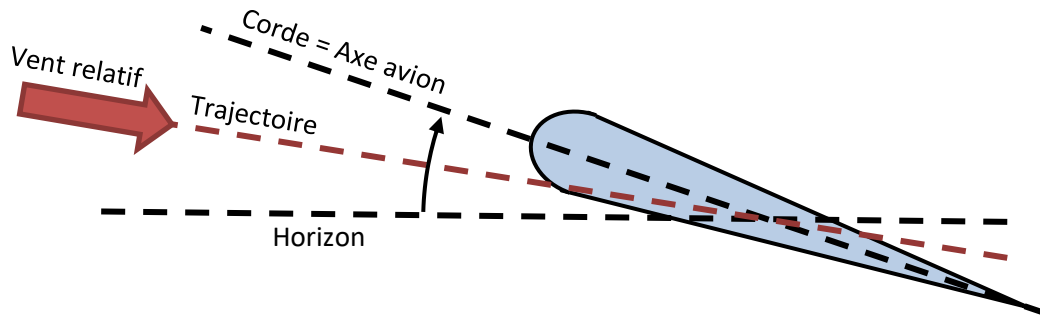


Du fait de la trajectoire de l'avion dans l'air, le vent relatif vient sur l'aile parallèlement à cette trajectoire, en sens opposé au déplacement de l'avion.

Nous allons ainsi définir 3 angles entre ces différentes directions.

### 1.1.1.b.i Assiette

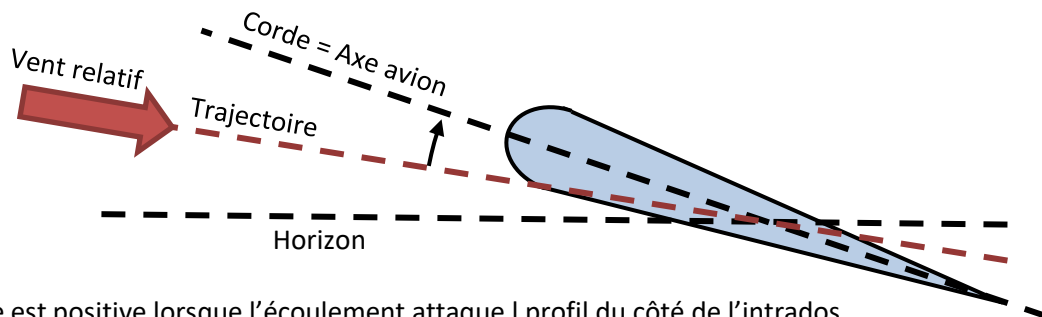
L'assiette est l'angle entre la corde de l'aile et l'horizon :



L'assiette est l'angle vue par le pilote lorsqu'il fait évoluer la hauteur du nez de l'avion. C'est l'angle qui lui donne l'impression de monter ou descendre.

### 1.1.1.b.ii Incidence ou angle d'attaque

L'incidence ou angle d'attaque est l'angle que fait la corde de l'aile avec la direction du vent relatif :

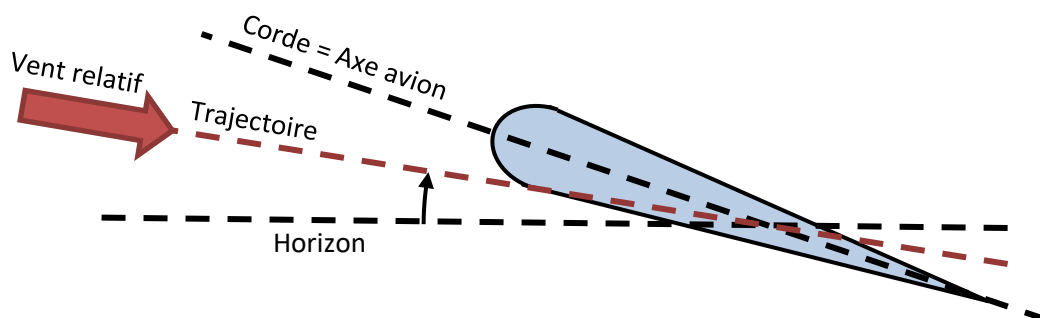


Elle est positive lorsque l'écoulement attaque le profil du côté de l'intrados.

L'incidence est l'angle qui va entrer en compte dans la génération des forces aérodynamiques qui font voler l'avion.

### 1.1.1.b.iii Pente

La pente est l'angle entre la trajectoire et l'horizon :



La pente représente la trajectoire de l'avion par rapport à l'horizontale.

### 1.1.1.b.iv Relations

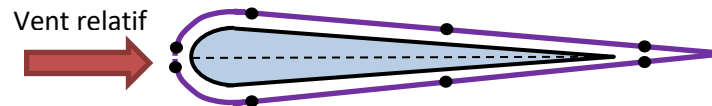
$$\text{Assiette} = \text{Pente} + \text{Incidence}$$

## 1.1.1.c L'aérodynamique

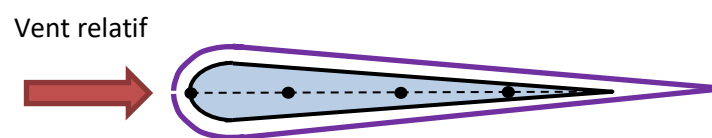
### 1.1.1.c.i Introduction

Fut un temps, on abordait les explications du « Pourquoi l'aile d'avion vole » d'une manière que l'on sait maintenant fautive. Voici ce que l'on disait.

Prenons pour cet exemple un profil d'aile symétrique que l'on place dans un flux d'air à incidence nulle (corde de l'aile parallèle au vent relatif). Les particules d'air arrivent au niveau du bord d'attaque, et partent soit vers le haut, soit vers le bas.

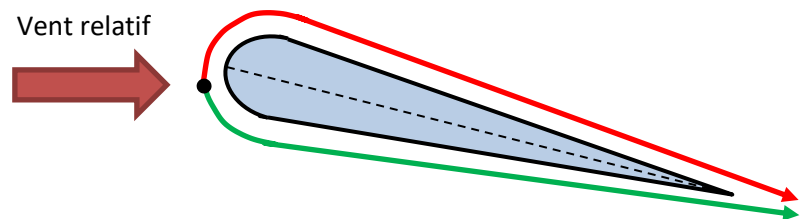


Dans cette situation, ces deux particules ensemble au bord d'attaque, se retrouvent au bord de fuite. On remarque que le chemin à parcourir dans la situation ci-dessus est le même en haut et en bas de l'aile, et qu'il est plus grand que le chemin à parcourir en ligne droite illustré ci-contre.



Il n'est toutefois pas évident de pouvoir prétendre quoi que ce soit sur leurs vitesses lors de leur parcours le long du profil. On disait pourtant que les 3 particules (celle qui passe au-dessus, celle qui passe en dessous, et celle qui traverserait l'aile par le milieu) se rejoignent en même temps au bord de fuite. Cela justifiait alors une accélération des particules de chaque côté de l'aile. Si ce résultat est vrai, il ne peut se justifier comme cela, et les particules ne se rejoignent pas !

En prenant maintenant cette même aile à incidence positive :



On montrait que la particule passant au-dessus de l'aile devait obligatoirement accélérer pour parcourir plus de trajet que la particule en dessous, justifiant alors l'apparition d'une portance.



Si de manière générale, il est vrai que les particules sont accélérées lors de leurs parcours autour du profil, et qu'à incidence positive, elles accélèrent plus sur l'extrados que l'intrados, il n'est pas vrai de dire qu'elles se rejoignent derrière. Certains n'y croiront pas, [lire cela](#). Bon, alors, comment fait-on ?

L'approche théorique étant très difficile (équations locales, passage du local au global par intégrales et conditions aux limites), deux autres approches nous permettent de comprendre ce qu'il se passe :

- Approche expérimentale : on regarde ce qu'il se passe en soufflerie
- Approche numérique : on implémente les équations de Navier-Stokes dans un code de simulation, puis on observe des résultats numériques obtenus sur ordinateur

$$\rho \underbrace{\left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right)}_a = - \underbrace{\nabla p}_{F_{\text{pression}}} + \underbrace{\mu \nabla^2 v}_{F_{\text{visqueuse}}}$$

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.ii Les souffleries

#### • Objectifs

L'objectif d'une soufflerie est de caractériser les effets aérodynamiques (obtenir la polaire) d'une maquette d'aéronef, qu'elle soit miniature ou en taille réelle (facteur d'échelle). Pour cela, on place la maquette dans un flux d'air maîtrisé afin de mesurer la portance et la traînée pour différentes incidences.



Il faut parfaitement maîtriser différents paramètres, comme la composition de l'air, la répartition homogène du flux, ses propriétés (température, pression, humidité...) et sa vitesse.



#### • Mesures

On mesure principalement deux choses :

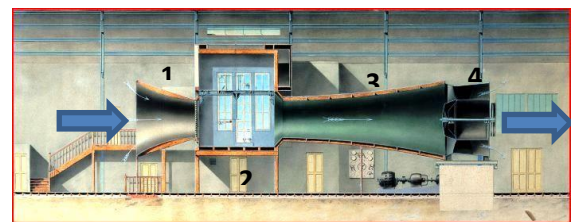
- Des forces avec des capteurs très précis pour obtenir la portance et la traînée
- Des pressions :
  - o Statiques mesurées perpendiculairement à l'écoulement
  - o Totales (et donc dynamiques) mesurées parallèlement à l'écoulement

#### • Types de souffleries

On trouve principalement deux types de souffleries, de type Eiffel et Prandtl.

##### Soufflerie Eiffel

Gustave Eiffel fait construire une soufflerie en 1905 au champ de mars. C'est une soufflerie ouverte, l'air entre d'un côté et sort de l'autre.

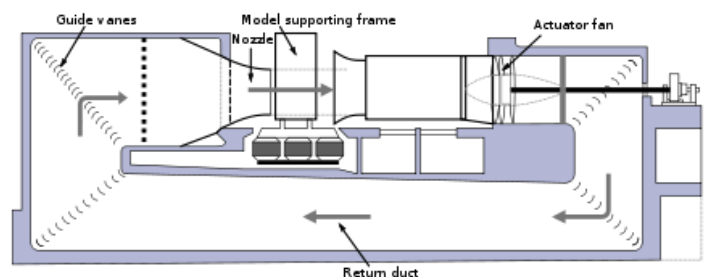


L'air suit un trajet en 4 phases :

- 1 : Collecteur
- 2 : Veine d'essai dans laquelle la maquette est installée
- 3 : Diffuseur
- 4 : Ventilateur

##### Soufflerie Prandtl

En 1909, Ludwig Prandtl (physicien allemand au centre de recherche aérodynamique de Göttingen), propose un nouveau type de soufflerie avec un circuit fermé. Cela permet d'augmenter l'efficacité du moteur et d'obtenir une plus grande homogénéité de l'écoulement dans la veine d'essai.



<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.iii *Le théorème de Bernoulli*

Le théorème de Bernoulli dit la chose suivante : Soit une particule d'air le long de l'aile. Lors de son mouvement, elle conserve son énergie (somme de ses énergies de pression, potentielle et cinétique) :

$$P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$$

Avec :

- $P$  la pression de l'air
- $\rho$  sa masse volumique
- $g$  l'accélération de la pesanteur
- $z$  l'altitude de la particule
- $V$  la vitesse du fluide

Les ailes étant de relativement faible épaisseur, le terme  $\rho gz$  peut être négligé lors du passage de l'aile. On a alors :

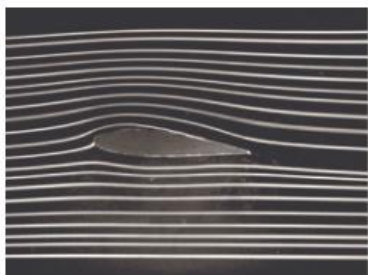
$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 = c \quad \Leftrightarrow P = c - \frac{1}{2}\rho V^2$$

Cette équation est très intéressante, car elle montre que **si la vitesse  $V$  de l'écoulement autour de l'aile augmente, la pression  $P$  de l'air diminue.**

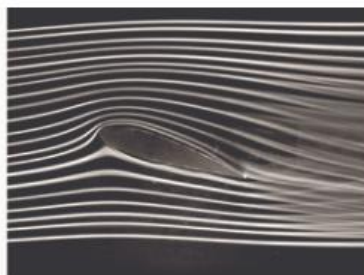
### 1.1.1.c.iv *Expérimentations*

Allez tout d'abord consulter cette vidéo : [LIEN](#)

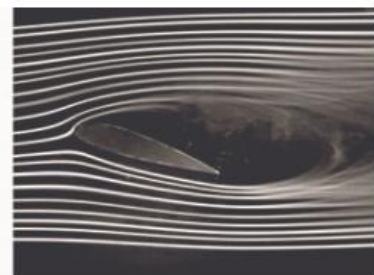
Observons le flux d'air autour d'un profil d'aile en fonction de son incidence en soufflerie :



(a) low angle of attack



(b) high angle of attack



(c) stalled flow

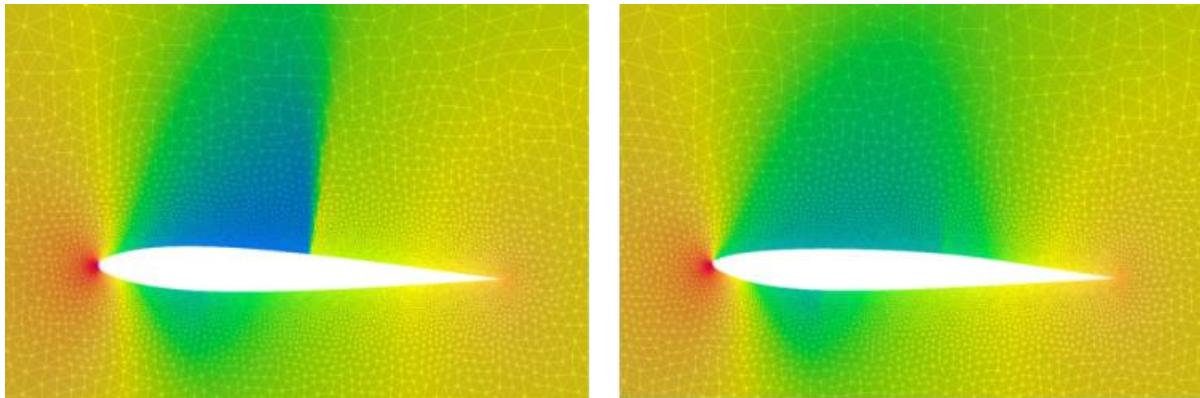
Tant que l'incidence n'est pas trop élevée, on met en évidence une **circulation de l'air plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados.**

Ainsi, d'après le théorème de Bernoulli, **la pression de l'air est plus faible sur l'extrados que sur l'intrados.**

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

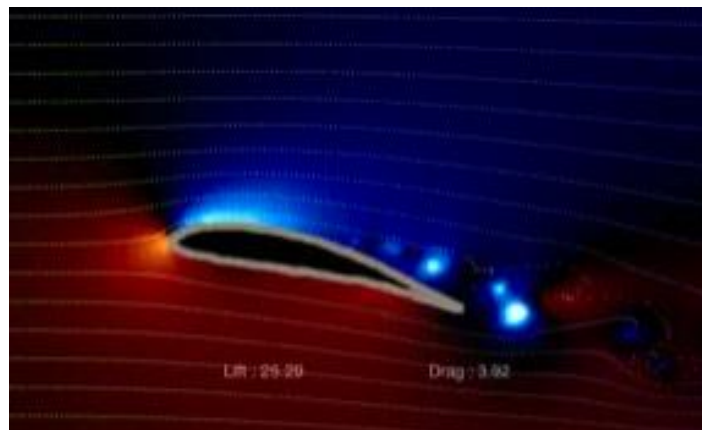
### 1.1.1.c.v Simulations numériques

A partir des équations de Navier-Stokes, et en utilisant des méthodes numériques, il est possible de simuler l'écoulement autour d'un profil, comme le montrent les images ci-dessous trouvées sur internet.

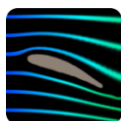


En plus des vitesses de l'écoulement, la simulation numérique donne accès à la mesure de la pression en tout point du fluide. Sur les images ci-dessus, un point rouge indique une pression plus élevée qu'un point bleu. On remarque sur ce profil, que la pression diminue de chaque côté de l'aile, mais qu'elle diminue plus sur l'extrados que sur l'intrados.

Il existe une magnifique application gratuite sur l'« App store » et le « Google Play », appelée « Wind Tunnel », créée par « Algorizk » et disponible ici : [LIEN](#). Elle résout les équations de Navier-Stokes sur n'importe quel profil dessiné à la main, et permet de visualiser les vitesses et pressions de l'écoulement le long de l'intrados et de l'extrados.



#### Wind Tunnel



Wind Tunnel turns your smartphone or tablet into a **wind tunnel simulator**.

Wind Tunnel for iOS comes in two versions 'Wind Tunnel for iPad' (hybrid app for smartphones and tablets) and 'Wind Tunnel for iPhone' (for smartphone only).

Wind Tunnel for Android comes in a single version, equivalent to the 'Wind Tunnel for iPhone' iOS app.



### 1.1.1.c.vi Conclusions sur l'écoulement autour d'une aile

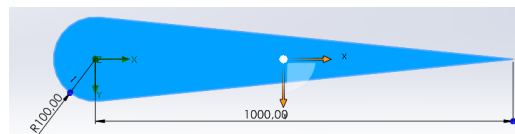
Lorsque l'on utilise une aile d'avion pour voler (profil adéquat, incidence positive) :

**L'air va plus vite sur l'extrados que sur l'intrados**  
**La pression sur l'extrados est plus faible que la pression sur l'intrados**

On dit parfois qu'il y a une dépression sur l'extrados, et une surpression sur l'intrados, mais je n'aime pas bien ces affirmations, car :

- Il peut y avoir dépression sur chacun par rapport à la pression atmosphérique, avec une plus grande dépression sur l'extrados que sur l'intrados
- Cela peut être une question de point de vue en parlant relativement à une pression qui n'est pas la pression atmosphérique et qui complique les explications
- La situation dépend du profil et de l'incidence de l'aile

Pour illustrer mes propos, j'ai fait quelques simulations avec le module « Flow Simulation » de Solidworks sur un profil d'aile symétrique fait à la main (dimensions en mm) d'envergure de 2m.



Les simulations permettent d'avoir les pressions autour du profil pour une pression atmosphérique standard de 1013 hPa ainsi que les forces de trainée (sur x) et de portance (sur -y) à la vitesse de 40 m/s pour 3 incidences différentes :

		Résultats				
<b>1013</b>	0°		Paramètre intégral	Valeur	Composante X	Composante Y
			Force [N]	53.658	53.655	-0.494
	5°		Paramètre intégral	Valeur	Composante X	Composante Y
			Force [N]	367.509	69.096	-360.955
10°		Paramètre intégral	Valeur	Composante X	Composante Y	
		Force [N]	837.350	137.216	-826.030	
15°		Paramètre intégral	Valeur	Composante X	Composante Y	
		Force [N]	1365.820	256.645	-1341.490	

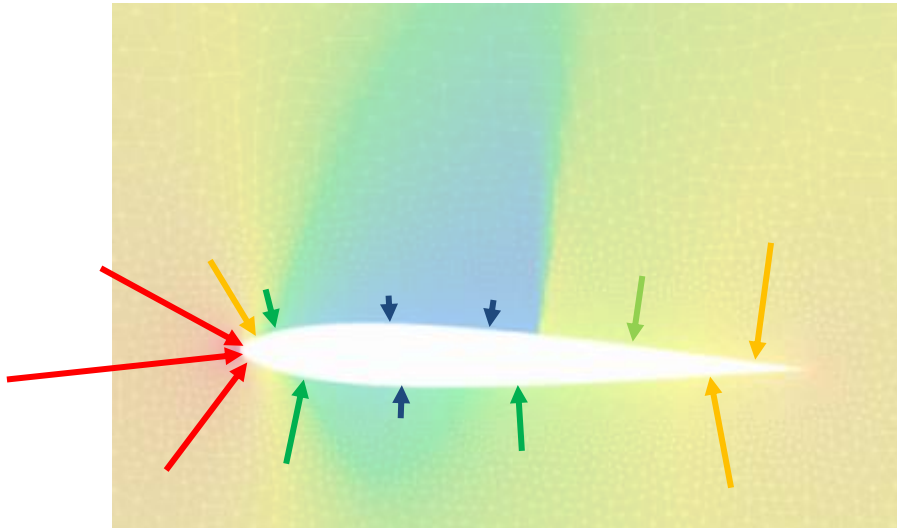
Remarque : la portance non nulle dans le cas 0° est due à de petites erreurs de calculs

### 1.1.1.c.vii Lien entre pression et forces aérodynamiques

Rappelons qu'une pression sur une surface génère une force, la relation est la suivante :

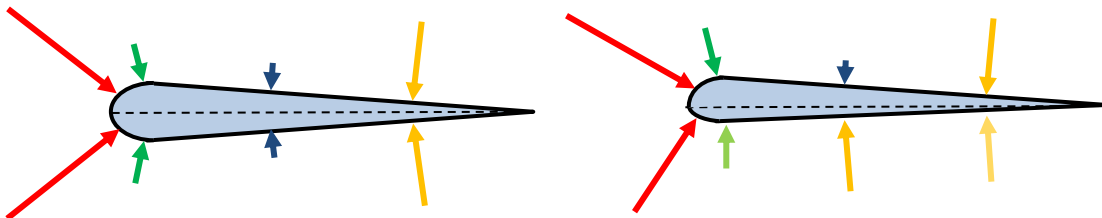
$$F = PS \quad ; \quad \text{Force} = \text{Pression} * \text{Surface}$$

Reprenons un résultat de simulation. Au niveau local sont générées de petites forces qui sont de direction orthogonale à la surface de l'aile et proportionnelles à la pression locale le long du profil. Si ce sont des dépressions, elles aspirent l'aile vers l'extérieur, et si ce sont des surpressions, elles poussent l'aile vers l'intérieur.



La somme de toutes ces petites forces est la **résultante aérodynamique**.

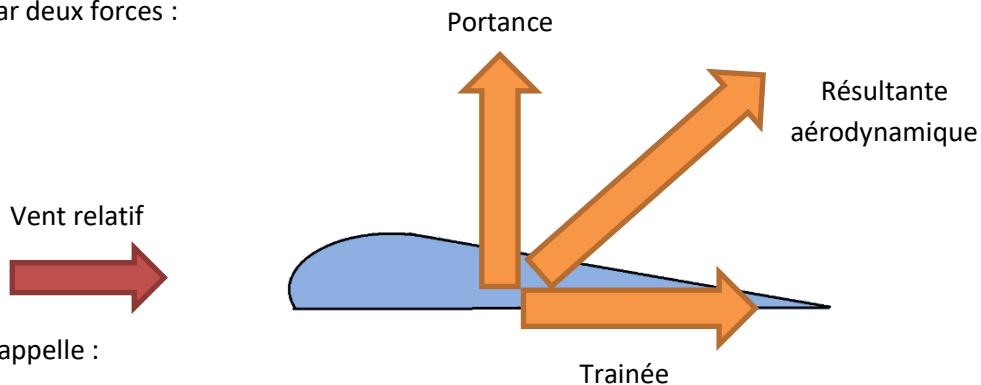
Remarque : Si un profil symétrique à incidence nulle fait apparaître exactement les mêmes pressions de chaque côté de l'aile, et donc une somme des forces verticales nulles, l'utilisation d'un profil non symétrique permet de générer une force totale vers le haut même à incidence nulle.



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.viii La portance & et la trainée de profil

Lorsque l'on fait le bilan complet de toutes ces petites forces, on peut résumer l'action de l'air sur l'aile par deux forces :



On les appelle :

- Portance : Cette force, perpendiculaire au vent relatif, permet de soulever l'aile, c'est la force portante, qui permet le vol de l'avion
- Trainée : Cette force, parallèle au vent relatif, s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. Elle est due principalement au fait que l'aile fait « obstacle » à l'air (trainée de forme) et aux frottements de l'air visqueux sur les surfaces (trainée de frottements)

Attention aux sens de ces forces par rapport au vent relatif :



On définit la résultante aérodynamique comme la somme des forces de portance et de trainée.

$$\text{Résultante aérodynamique} = \text{Portance} + \text{Trainée}$$

Ces forces dépendent de la forme de l'aile et de l'incidence :

$$T = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x(\alpha) \quad ; \quad P = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z(\alpha)$$

Avec :

- $\rho$  sa volumique de l'air
- $V$  vitesse de l'avion
- $S$  surface de référence de l'aile (nous ne rentrerons pas dans les détails de son calcul)
- $C_x$  et  $C_z$  des coefficients relatifs au profil, dépendant de l'incidence  $\alpha$  et déterminés en soufflerie

Remarques :

- Plus il fait chaud et/ou moins la pression est élevée, et plus la masse volumique de l'air est faible. Cela induit une diminution de la portance. Ainsi, plus il fait chaud et moins il y a de pression, plus les distances de décollages seront élevées.
- Lorsque la vitesse est doublée, la portance et la trainée sont quadruplées


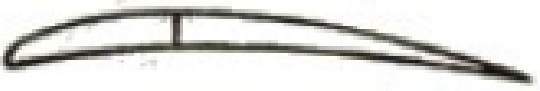

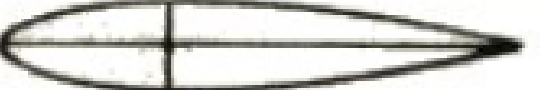
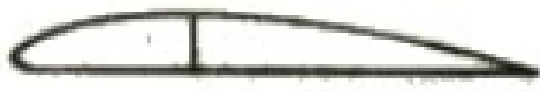
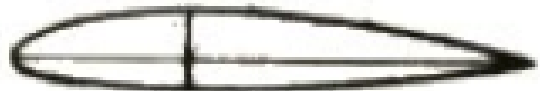
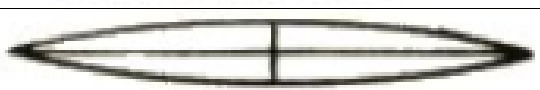
### 1.1.1.c.ix Les coefficients de portance et traînée

Les coefficients  $C_x$  et  $C_z$  sont comme nous venons de le dire dépendants :

- Du profil de l'aile
- De l'angle d'incidence

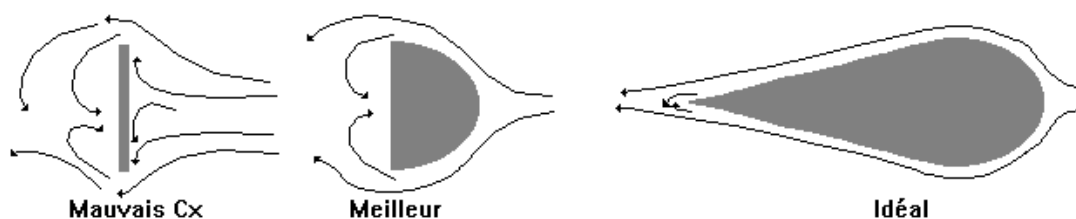
#### • Différents profils

Selon les profils, la portance et la traînée de profil ne seront pas les mêmes. Voici des exemples de profils différents ayant chacun leurs particularités :

Profils minces	A double courbure	
	Creux	
	Symétrique	
Profils épais	Symétrique	
	Plan-Convexe	
	Biconvexe dissymétrique	
	Laminaire	

Remarque : les premiers avions possédaient des profils minces, c'est-à-dire une simple toile ! On est rapidement passés à des profils épais permettant de bien meilleures performances.

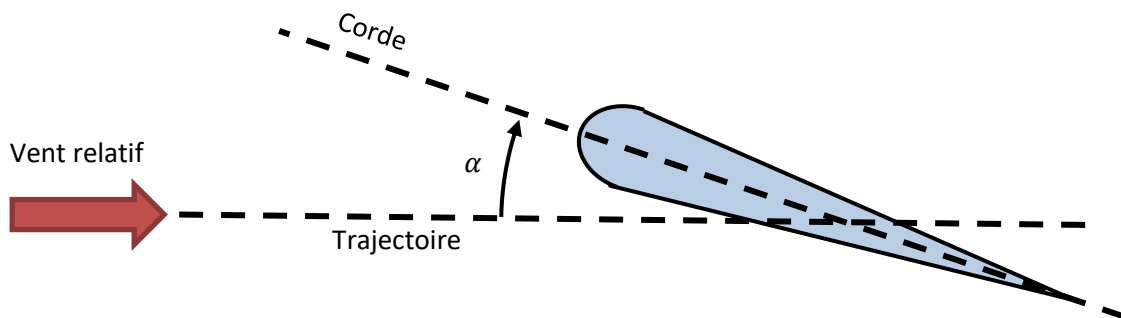
Par ailleurs, la traînée dépend fortement de la forme des objets. Voici une image qui illustre bien ce phénomène, à portance générée nulle (symétrie du profil par rapport au vent relatif) :



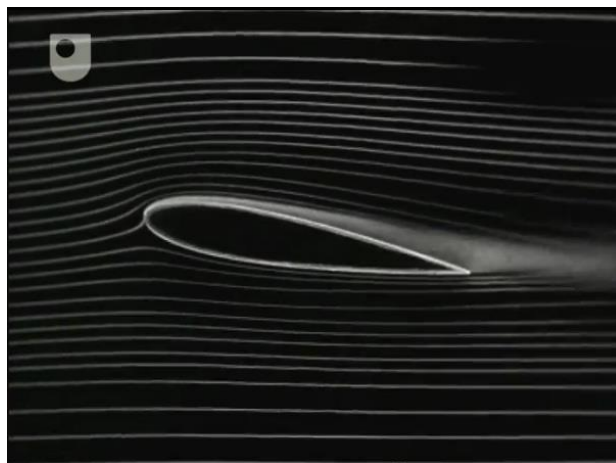
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### • Influence de l'incidence

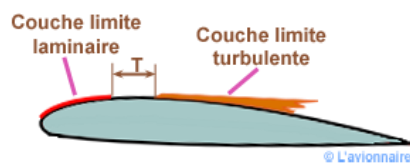
Fixons maintenant un profil, et voyons ce qu'il se passe lorsque l'incidence de l'aile est modifiée.



On place l'aile dans une soufflerie :



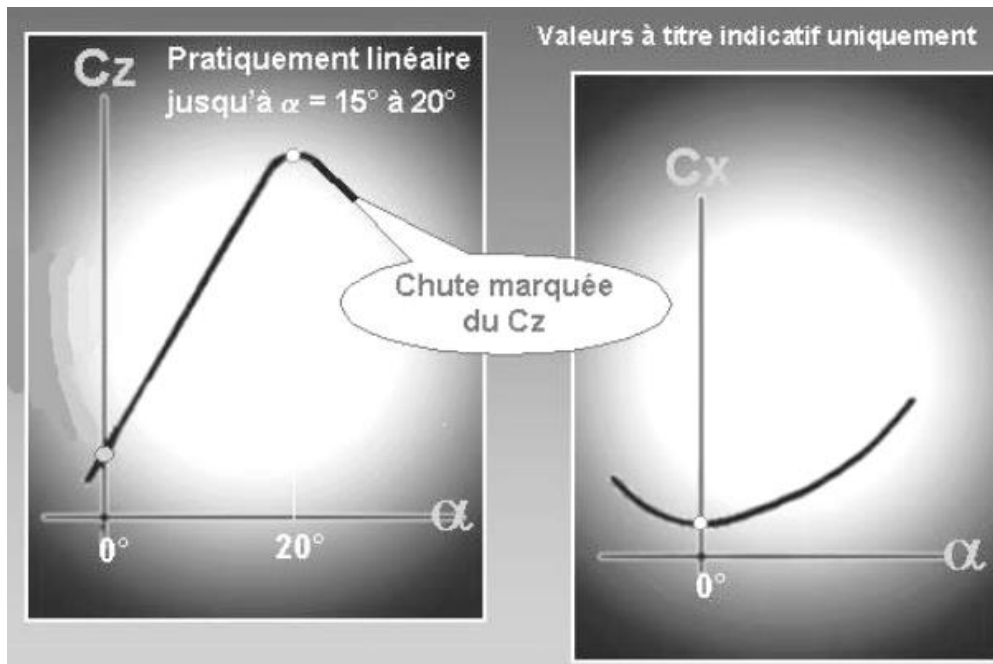
On voit globalement un écoulement propre, on parle d'écoulement « **laminaire** ». C'est-à-dire que les particules sont animées des mêmes vitesses et suivent des trajectoires rectilignes et parallèles entre elles. Toutefois, si on zoom sur le profil dans la couche que l'on voit assez diffuse (couche limite), on peut remarquer qu'il se forme une zone turbulente à partir d'une certaine distance derrière le bord d'attaque :



On a donc une couche limite **laminaire** au départ, puis une zone de transition, puis une couche limite **turbulente**.

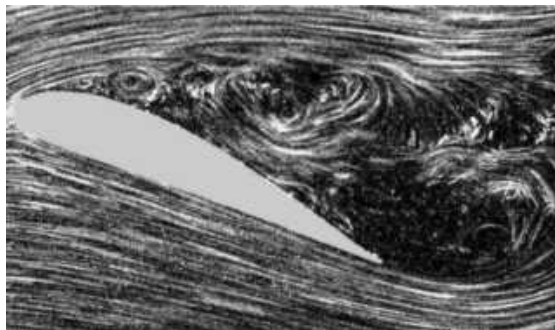
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

On mesure alors les forces de portance et de trainée pour une vitesse d'air constante et différents angles d'incidence. On trace alors l'évolution des deux coefficients  $C_x$  et  $C_z$  en fonction de  $\alpha$  et on obtient ceci :



On remarque que :

- Le coefficient de trainée augmente avec l'incidence
- Le coefficient de portance augmente avec l'incidence jusqu'à une incidence limite après laquelle il diminue
- Après une incidence limite, les coefficients s'effondrent. On met alors en évidence un phénomène appelé le décrochage (stall en anglais). Ci-dessous, la visualisation des lignes de courant lors du décrochage grâce à de la fumée. On remarque le décollement des filets d'air de l'extrados :



On voit un écoulement chaotique, on parle d'écoulement « turbulent ». A l'approche du décrochage, l'écoulement est laminaire sur les deux premiers tiers de l'aile et turbulent proche du bord de fuite. L'image ci-dessus ne respecte pas exactement ces ordres de grandeurs, mais on pourra les généraliser quand même.

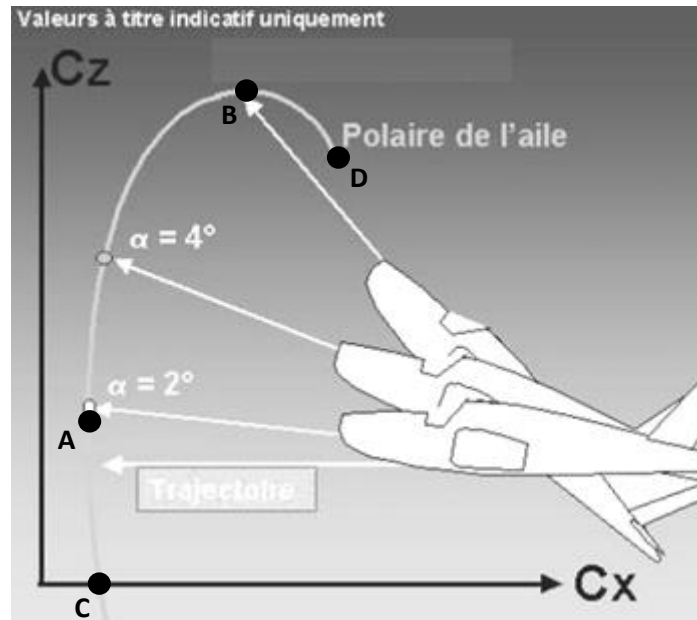
[Vidéo montrant le décollement des filets d'air lors du décrochage](#)

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.x La polaire d'une aile

#### • Définition et points caractéristiques

Lorsque l'on trace la courbe  $C_z = f(C_x)$ , on obtient ce que l'on appelle la polaire de l'aile :



On a :

- A : Point de traînée minimale
- B : Point de portance maximale
- C : Portance nulle
- D : Point de décrochage

Nous définirons dans le paragraphe sur le vol plané un dernier point très intéressant : le point de finesse maximale

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### • Influence du nombre de Mach

Sans trop rentrer dans les détails, le programme du BIA citant le nombre de Mach, je me dois d'en parler un peu. La vitesse du son ( $c$  pour célérité) dans l'air (supposons un gaz parfait) s'exprime avec la formule suivante :

$$c \approx 20,05\sqrt{T}$$

Avec  $T$  en K. Ainsi, à 20°C, on a environ  $c \approx 20,05\sqrt{293,15} \approx 340\text{m/s} \approx 1220\text{ km/h}$

On définit alors le nombre de mach à une vitesse propre  $V_p$  donnée comme le rapport :  $M_a = \frac{V_p}{c}$

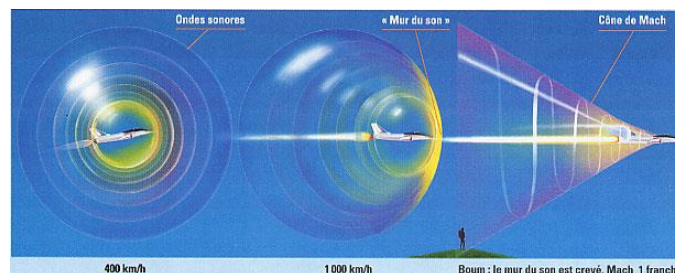
Se déplacer à « Mach 1 » veut donc dire aller à la vitesse du son...

On parle de vol subsonique si  $M_a < 1$  et de supersonique ou transsonique si  $M_a > 1$ .

Le passage du « mur du son » est une réelle transition dans le comportement de l'air. Par exemple, lorsque de l'air circule dans une soufflerie :

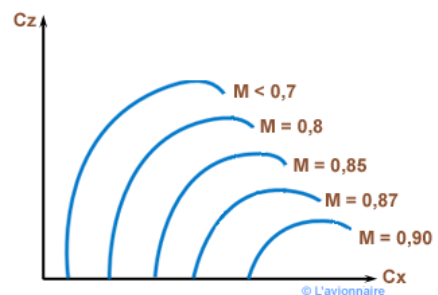
- En subsonique, l'air accélère lorsque la section du conduit diminue (cela nous paraît logique)
- En supersonique, c'est l'inverse... L'air accélère quand la section augmente...

Et lorsqu'un avion vole en supersonique, il se produit une onde de choc appelée « Bang supersonique ». En effet, l'avion génère une onde sonore qui se déplace à 340 m/s dans l'air. S'il se déplace à la même vitesse, il va cumuler toutes les ondes au même endroit puisqu'il continue à en créer à tout instant. Cela génère une onde de choc !



[Lien vidéo](#)

Nous pouvons donc maintenant en venir au fait important pour la polaire... Le nombre de Mach a une influence sur la polaire...



Rassurons-nous quand même, pour les petits avions volant à 100 kt (Mach 0,15), cette influence est faible. !

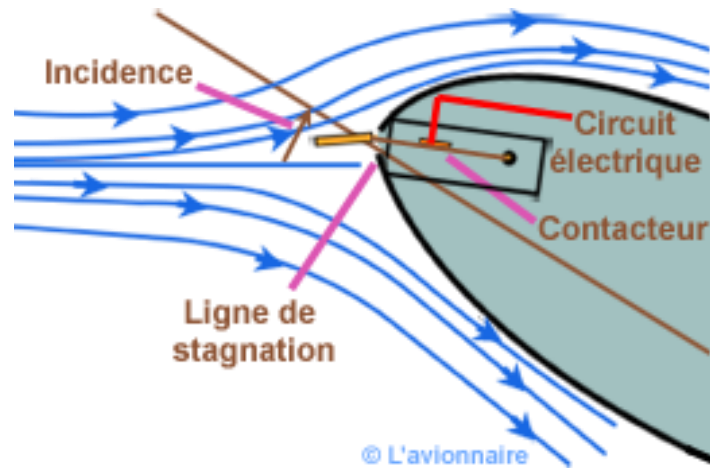
Les performances d'un avion dépendent directement du nombre de Mach. Ainsi, si vous avez l'occasion d'aller voir les pilotes d'avions de ligne, vous verrez que leur vitesse s'exprime en nombre de mach en croisière (par exemple Mach 0.82)

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.xi *Le décrochage*

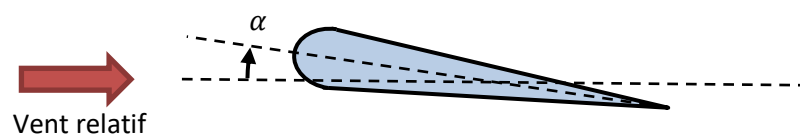
A bien retenir : **le décrochage se produit toujours à la même incidence.**

Dans les avions, il existe toujours un petit capteur qui est placé sur le bord d'attaque de l'aile, orienté avec un angle précis, et tel que dès que l'incidence approche l'incidence de décrochage, il se déplace et émet un bip dans la cabine. On l'entend généralement lors de l'atterrissage.

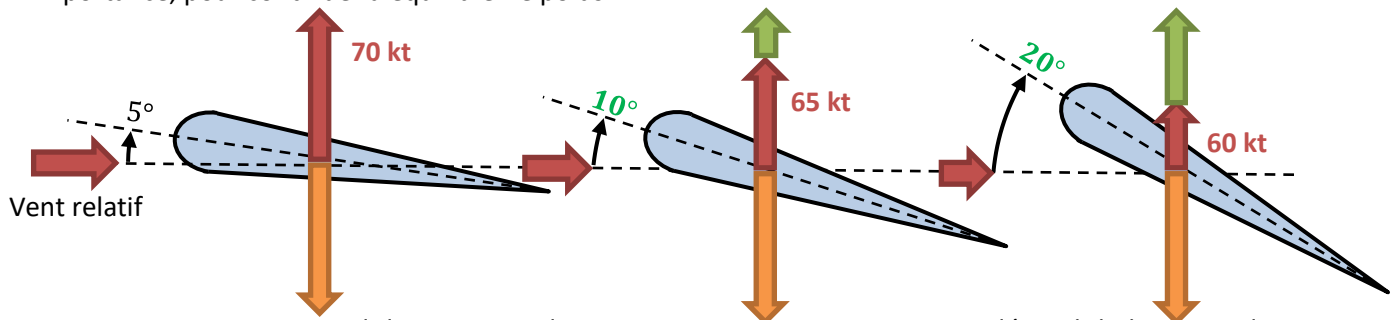


En vol, nous ne connaissons pas notre incidence. Il est toutefois possible de relier directement l'incidence de décrochage à une vitesse, dans des conditions de vol sans facteur de charge (voir paragraphe « facteur de charge » lors des ressources et des virages).

Soit une situation d'un vol rectiligne à altitude constante (sans facteur de charge), il faut une incidence telle que la portance équilibre le poids :

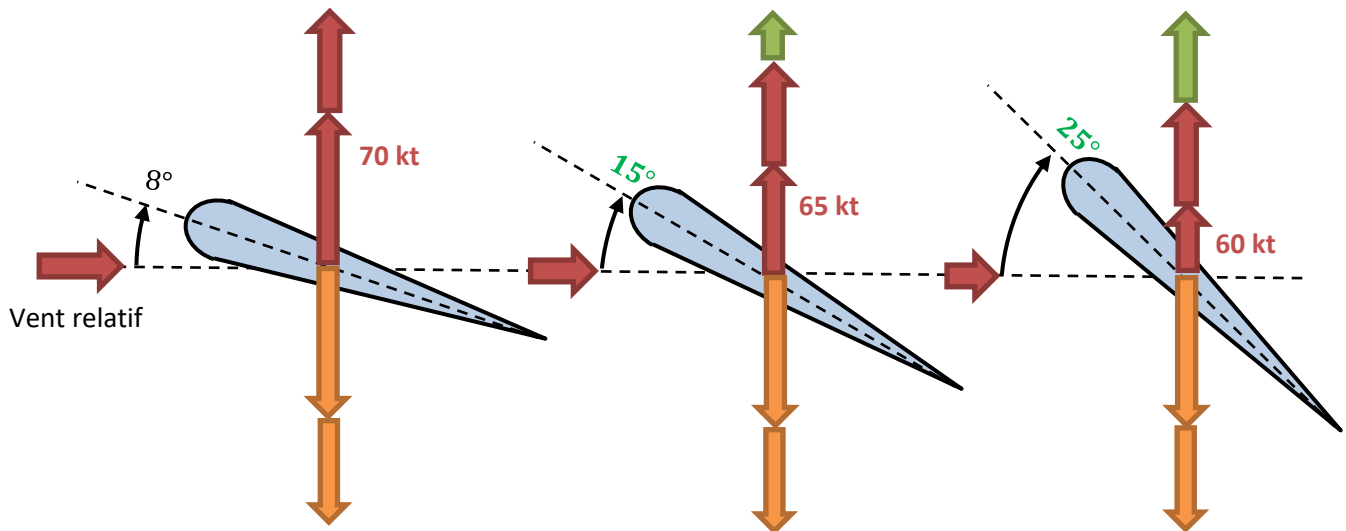


Si maintenant on diminue la vitesse, il est nécessaire d'augmenter l'incidence pour augmenter la portance, pour continuer à équilibrer le poids :



A une vitesse correspond donc une incidence, et une seule. Et cette vitesse dépend de la masse de l'avion. En effet, dans l'exemple ci-dessus par exemple, à 100 kt, il faut une incidence qui contre le poids de l'avion.

Si l'avion est plus lourd, il faut de base une incidence plus importante pour avoir une trajectoire rectiligne... Partant d'une incidence plus grande, on est plus proche de l'incidence de décrochage.

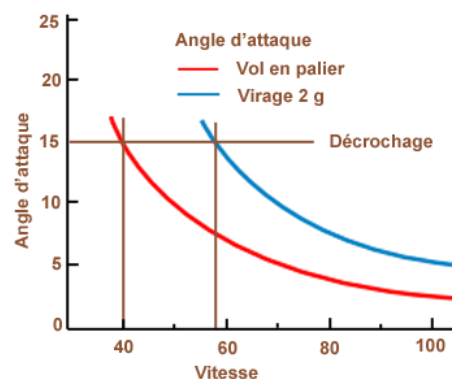


La figure ci-contre nous montre l'évolution de l'incidence pour maintenir un vol en palier en fonction de la vitesse à charge normale et pour une charge double (cf paragraphe facteur de charge).

On voit bien qu'à une vitesse donnée qui dépend de la charge, on atteint l'incidence de décrochage.

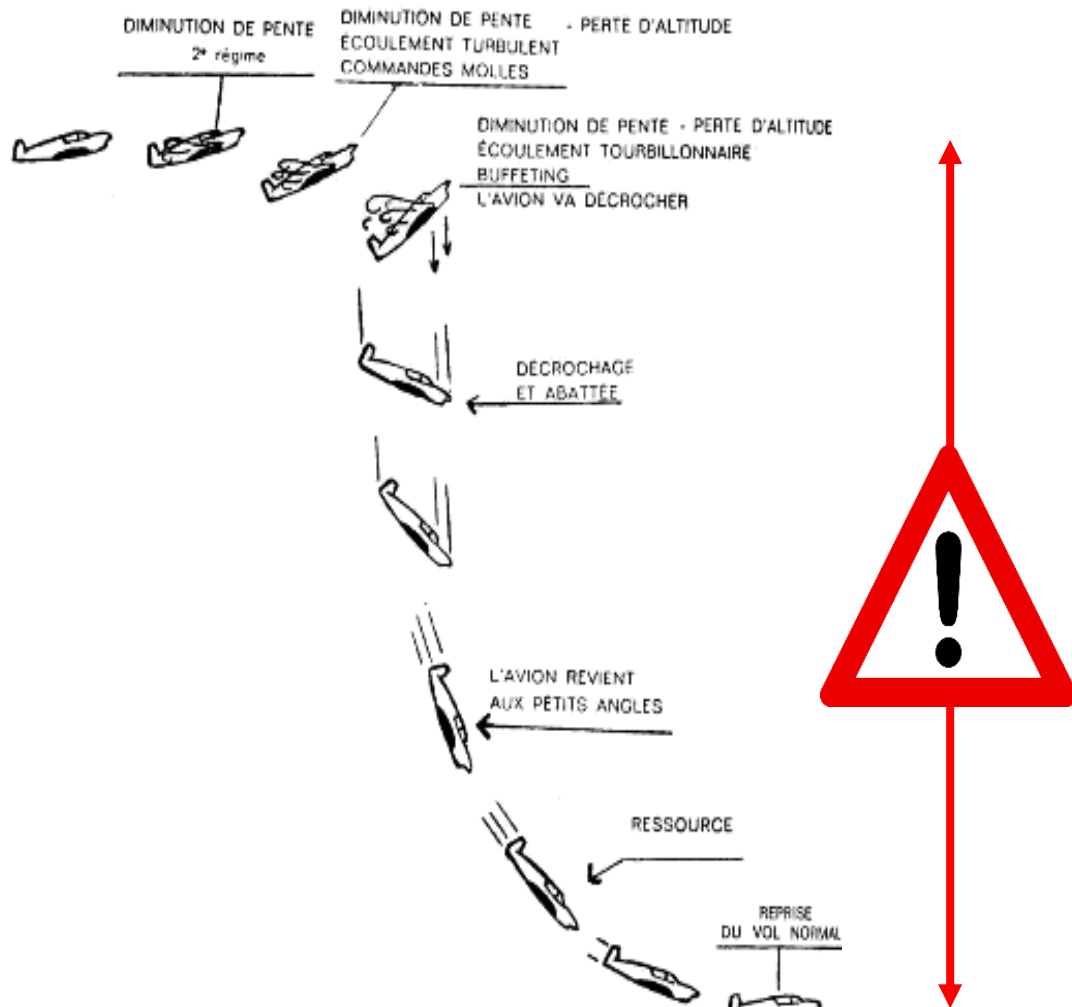
Finalement, en vol sans facteur de charge (accélération) :

- À une incidence et à une masse correspond une vitesse
- L'incidence de décrochage correspond à une vitesse précise, connue pour chaque avion, et augmentant avec la masse



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

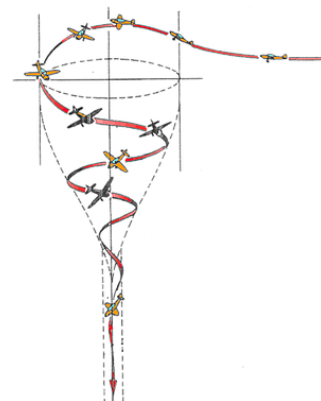
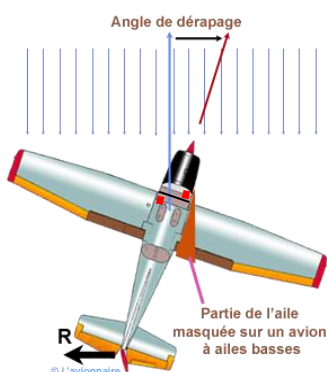
Le décrochage est réalisé en exercice à une altitude suffisante pour pouvoir être rattrapé. Il impressionne la première fois mais ce n'est pas dangereux en soi.



Le décrochage basse hauteur est mortel.

Le décrochage dissymétrique (dérapage) induit un départ en vrille (une aile décroche avant l'autre car le nez masque en partie cette aile du vent). La vrille est très dangereuse car :

- Tous les avions n'en sortent pas simplement
- Les pilotes ne la connaissent pas toujours, et les procédures de sortie changent d'un avion à l'autre
- Les avions ne sont pas forcément conçus pour y résister structurellement

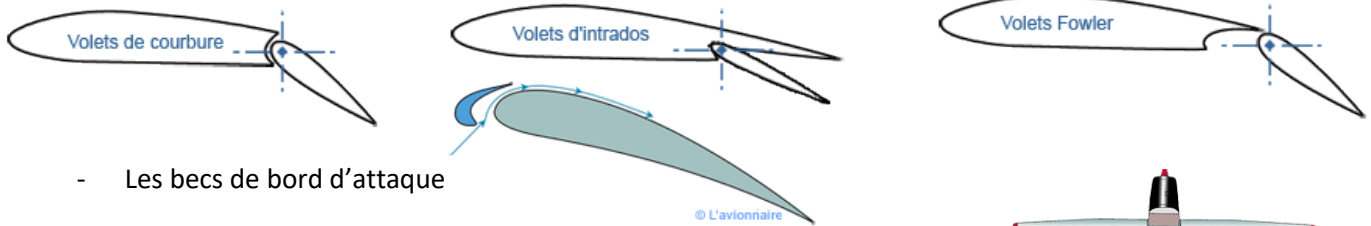


<a href="http://www.cpge-sii.com">www.cpge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.xii Les dispositifs hypersustentateurs : Volets (Flaps)

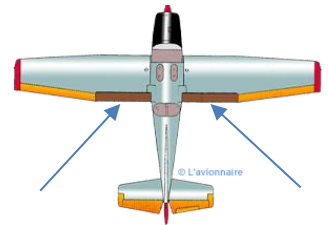
On trouve souvent deux types de dispositifs sur les ailes qui augmentent portance (mais aussi traînée de profil) des ailes :

- Les volets de courbure, d'intrados ou Fowler



- Les becs de bord d'attaque

Ils sont souvent situés proche du fuselage pour laisser la place aux ailerons au plus loin du fuselage (effet plus important pour tourner) et ils bougent de manière symétrique (descendent ou remontent en même temps de chaque côté).



Ils permettent de **conserver la portance à vitesse réduite**, et donc de **voler plus lentement**. Ils **diminuent donc la vitesse de décrochage**.

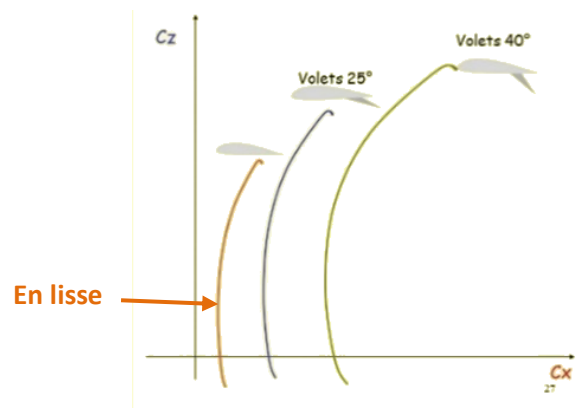
Ils sont **utilisés au décollage et à l'atterrissage pour réduire les distances parcourues au sol**.

- Au décollage, ils sont généralement utilisés sur leur premier cran, afin de ne pas générer trop de traînée (en position plein sortis, ils pourraient avoir l'effet inverse sur les distances)
- A l'atterrissage, ils sont généralement utilisés en position plein sortis. Les distances d'atterrissage augmentent d'au moins 30% sans volets comparés avec l'utilisation des volets en position atterrissage. En plus de permettre de se poser plus court, ils génèrent une forte traînée qui aide à freiner l'avion.

L'ordre de grandeur de l'évolution de la distance d'atterrissage est une augmentation de 5% par nœud de plus...

Voici un exemple de l'effet de volets sur la polaire d'une aile :

Pour une même incidence, la portance et la traînée augmentent. On notera que la portance augmente de manière moins importante que la traînée...



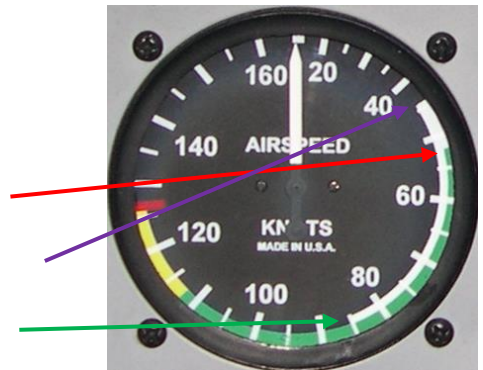
Rappelons les formules de la portance et de la traînée :  $P = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z(\alpha)$  ;  $T = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x(\alpha)$

Comme  $C_z$  augmente, pour la même portance, on a la vitesse  $V$  qui peut diminuer. Cependant, la traînée augmente aussi, et il faudra donc plus de moteur pour garder la même vitesse. C'est pour cela que l'on n'utilise pas les volets tout au long du vol puisque l'on augmenterait fortement les consommations d'essence.

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Remarques :

- Les volets ont une vitesse limite d'utilisation VFE (Velocity Flaps Extended), on parle de limite haute de l'arc blanc. Ci-contre, un exemple d'anémomètre sur lequel on voit que :
  - o Sans volets, le décrochage intervient à une vitesse VS1 (Velocity Stall 1) d'environ 53 kt
  - o Avec volets plein sortis, il intervient vers une vitesse VS0 de 45 kt (limite basse arc blanc)
  - o Les volets ne doivent pas dépasser la vitesse VFE (Velocity Flaps Extended) de 85 kt (limite haute)
- Sur les planeurs, on peut parfois avoir un braquage négatif des volets pour accélérer et transiter rapidement entre deux ascendances



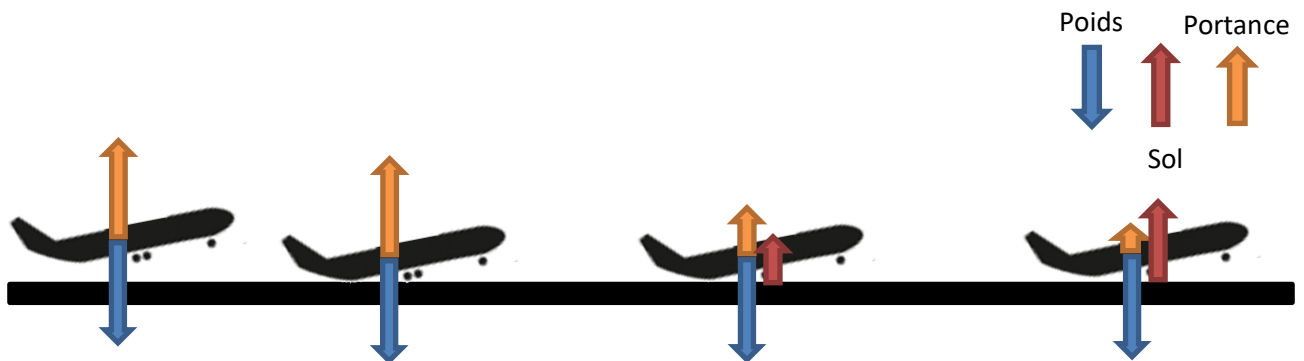
<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.xiii Les aérofreins & spoilers

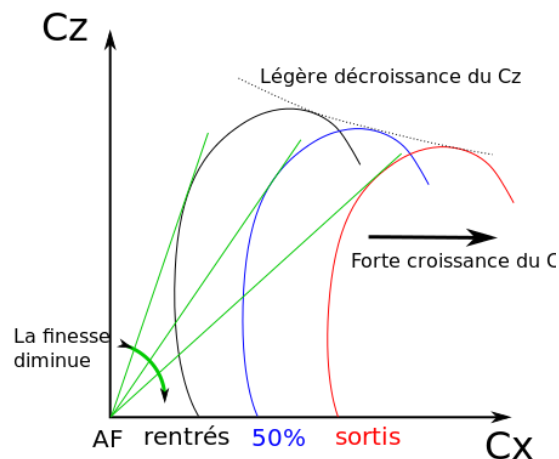


Certains avions sont équipés d'aérofreins dont le but est de :

- Permettre de descendre (planeurs)
- Freiner par l'augmentation de la traînée
- Casser la portance (flèches orange) pour rendre des freins de roues plus efficaces en augmentant le poids transisant dans le contact roue/sol (flèches rouges). Imaginez une gomme posée sur un bureau. Plus vous l'appuyez sur le bureau, plus elle « adhère ». Et les freins mécaniques sont plus efficaces que le freinage aérodynamique. Sur le schéma ci-dessous, à tout moment, le poids est contré par la somme Portance + Réaction du sol. Plus la portance est faible, plus l'action de contact est grande.



Voici l'effet des aérofreins sur la polaire :

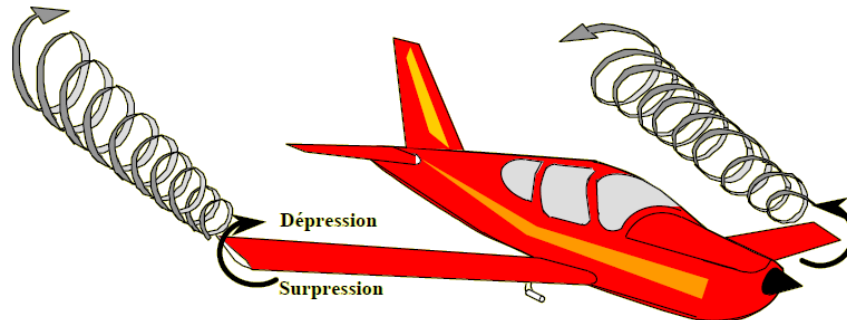


On remarque une légère diminution de la portance, mais par contre une forte augmentation de la traînée.

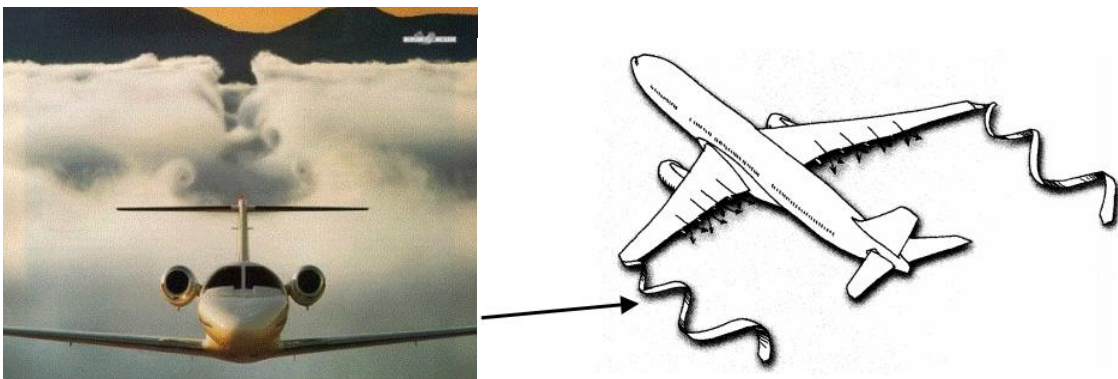
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.1.c.xiv La trainée induite

La différence de pression entre intrados et extrados génère une circulation de l'air de la haute vers la basse pression en bout d'aile :



Ce phénomène est générateur de **tourbillons de Prandtl**, ou **vortex**, générant une trainée appelée « trainée induite » (surconsommation d'essence) et de la **turbulence de sillage** (tourbillons dangereux pour les avions suivants) :



Ces tourbillons sont d'autant plus forts que l'avion est lourd, l'avion vole lentement, les dimensions de l'aile sont petites et l'allongement est faible (à tous autres paramètres fixés).

Ils peuvent conduire au crash d'un petit avion qui décollerait derrière un avion lourd ([Vidéo accident DR400](#)) ! Des temps de séparation sont donc respectés lorsqu'il y a mélange d'avions à masses très différentes :

Aéronef générateur	Aéronef suiveur			
	Très gros porteur	Gros porteur	Moyen tonnage	Faible tonnage
> Très gros porteur	-	▶ à l'arrivée: - ▶ au départ: 2 min	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 3 min/ 4 min*	▶ à l'arrivée: 4 min ▶ au départ: 3 min/ 4 min*
> Gros porteur	-	-	▶ à l'arrivée: 2 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*
> Moyen tonnage	-	-	-	▶ à l'arrivée: 3 min ▶ au départ: 2 min/ 3 min*
> Faible tonnage	-	-	-	-

Voici un lien vers une note d'information technique sur la turbulence de sillage de la DGAC ([LIEN](#)) et le lien vers mon cours à ce propos en aéroclub ([LIEN](#)).

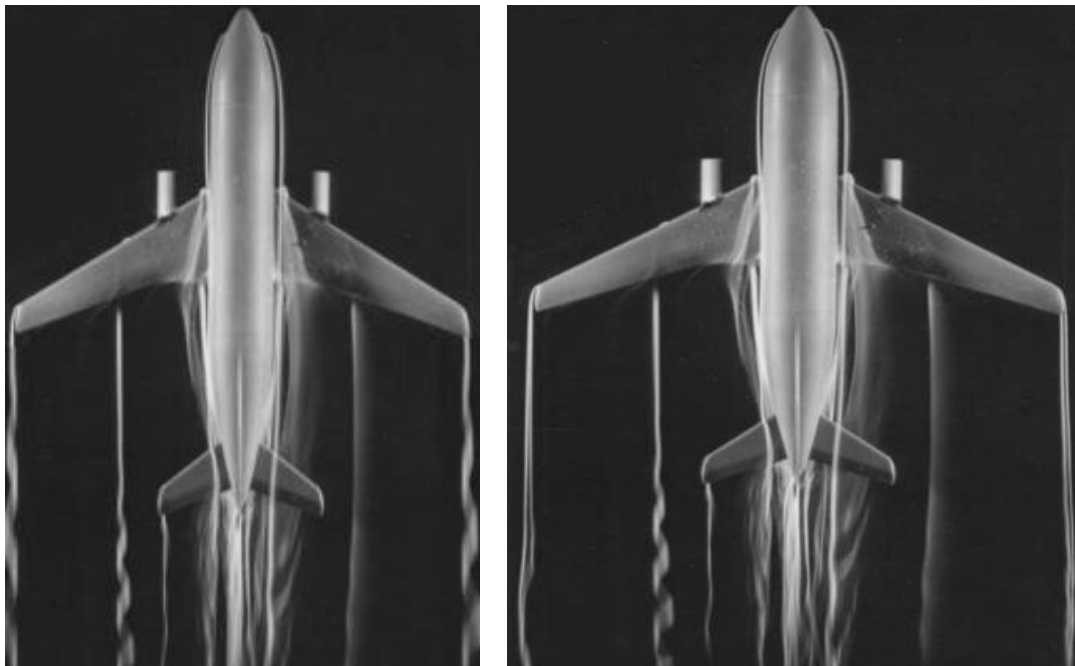
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Pour limiter la traînée induite, on a ajouté en bouts d'ailes des surfaces verticales qui « cassent » les tourbillons, appelés « Winglets » :



Remarque : les Winglets diminuent la consommation en croisière, mais peuvent générer plus de traînée dans certaines situations du vol. Ils n'ont donc pas forcément un rôle de diminution des turbulences de sillage au décollage et à l'atterrissage !

On peut voir sur la photo ci-dessous la diminution des tourbillons comparée à l'image précédente :



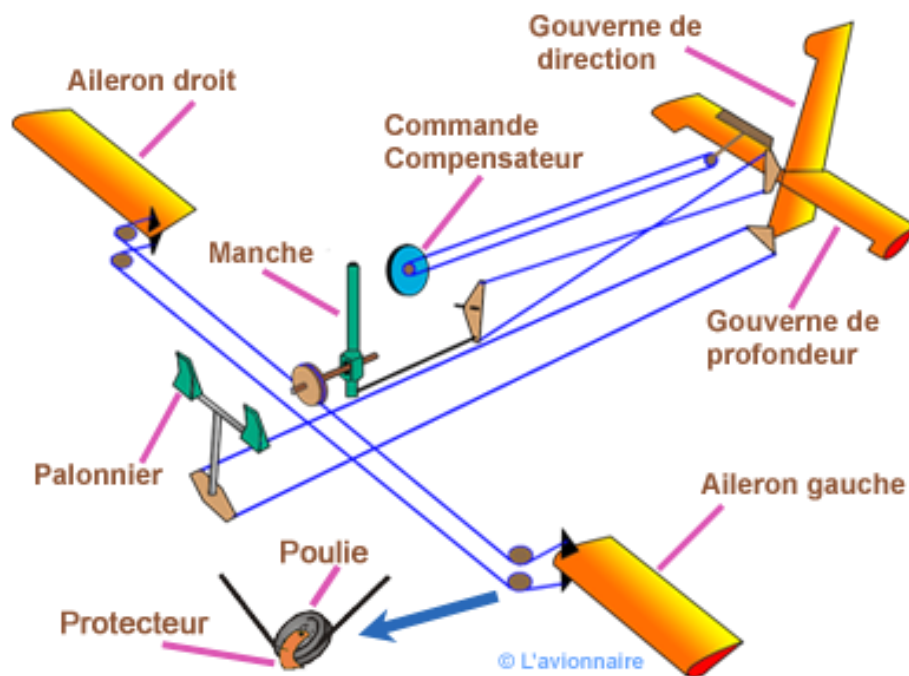
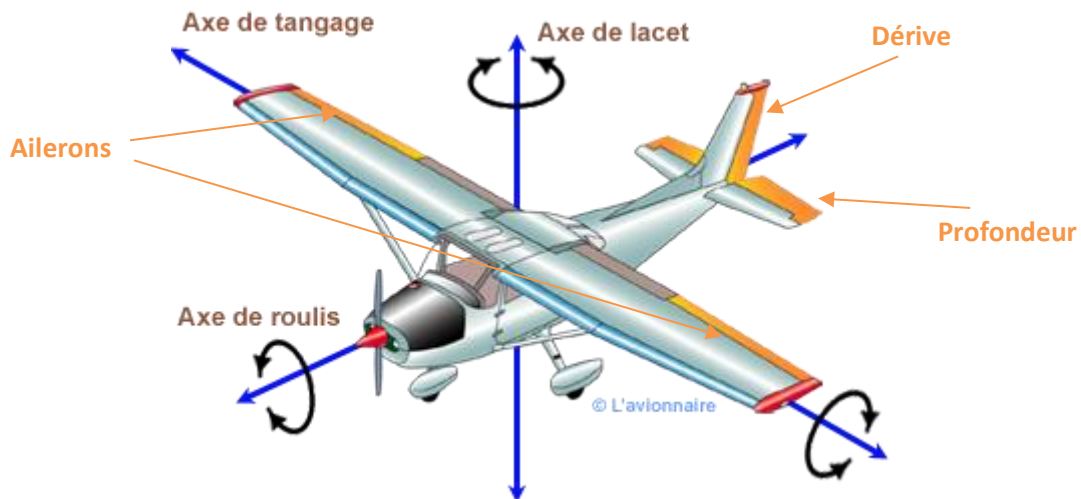
Finalement :

**Trainée avion = Trainée de profil + Trainée induite**

<a href="http://www.cpga-sii.com">www.cpga-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.I.2 Pilotage d'un avion

Un avion possède 3 types de gouvernes générant 3 mouvements de rotation autour de 3 axes



Remarque : certains aéronefs (le plus souvent en modélisme) ne possèdent pas d'ailerons. Ils tournent grâce à la seule commande en lacet en utilisant le principe du roulis induit, abordé un peu plus tard dans ce cours.

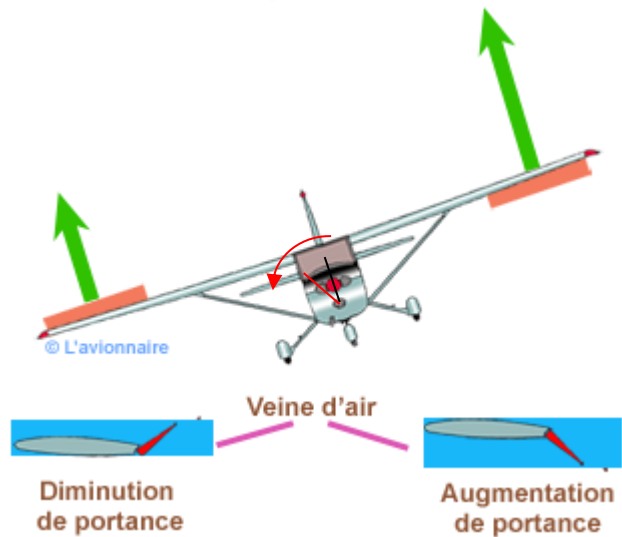
### 1.1.2.a Axe de tangage : assiette

La gouverne de profondeur (empennage horizontal) génère une action en rotation sur l'axe de tangage, permettant une mise à cabrer (relever le nez) ou à piquer (descendre le nez) de l'avion.

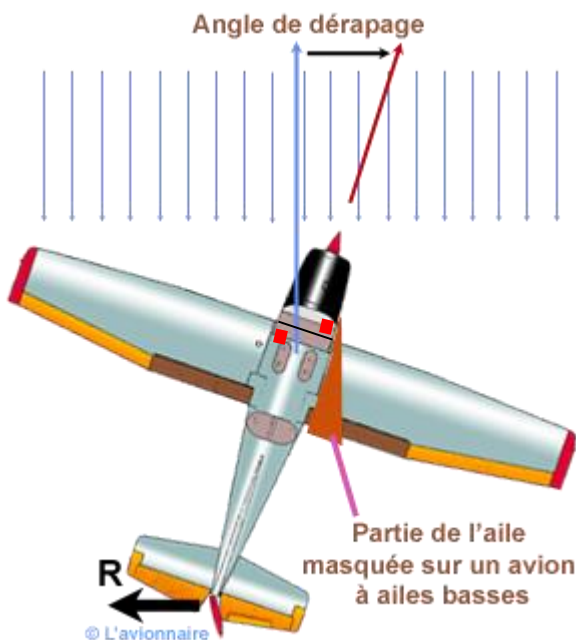
Vol en montée Action à cabrer Tirer sur le manche	Vol horizontal	Vol en descente Action à piquer Pousser sur le manche
		

### 1.1.2.b Axe de roulis : inclinaison

Les ailerons en bouts d'ailes permettent de faire tourner l'avion à droite ou à gauche en générant une rotation autour de l'axe longitudinal de l'avion, axe de roulis.



### 1.1.2.c Axe de lacet



La gouverne de direction (dérive, empennage vertical) permet de contrôler le dérapage du vol en jouant sur l'orientation du nez de l'avion par rapport aux filets d'air.

Le dérapage nuit aux performances aérodynamiques (une aile reçoit moins d'air) et génère de la traînée.

<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3 Equilibre du vol

Un avion à l'équilibre est un avion dont la trajectoire et la vitesse n'évoluent pas.

Du fait de leur conception, les avions sont « stables » en vol. Par stable, on entend la définition suivante :

- Un équilibre est stable si, écarté de sa position d'équilibre par une cause extérieure, il y revient par lui-même
- Un équilibre est instable s'il s'éloigne de sa position d'équilibre
- On dit que l'équilibre est indifférent s'il reste à cette nouvelle position

Il est évident qu'il est nécessaire de fabriquer des avions stables afin que la conduite du vol soit sûre.

#### 1.1.3.a Stabilité longitudinale – Axe de tangage

##### 1.1.3.a.i Actions mécaniques

Une action mécanique est la donnée de deux éléments :

- Une force
- Un moment

Elle s'applique sur un corps, que ce soit sur son volume  $V$ , sa surface  $S$ , une ligne ou en un point.

##### • Forces

Une action mécanique est composée d'une force représentée par un vecteur (direction, sens, longueur) exprimée en Newton ( $N$ ). Par exemple, notre poids s'exprime ainsi :

$$\vec{P} = -mg\vec{z}$$

Où :

- $P$  poids en N
- $m$  masse en kg
- $g$  accélération de la pesanteur :  $g \approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  sur Terre
- $\vec{z}$  vecteur vertical vers le haut

On définit une force par son effet. Une force est le phénomène capable de modifier la trajectoire ou la vitesse d'un corps dans son mouvement par rapport à un référentiel Galiléen, c'est-à-dire en translation rectiligne et uniforme.

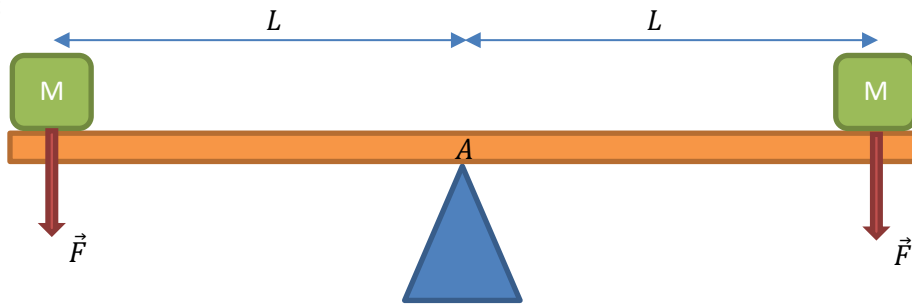
<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### • Moments

Lorsqu'une force s'applique sur un solide, le point d'application de cette force induit un effet différent sur la pièce sollicitée, un effet qui est proportionnel à une distance, qui tend à « faire tourner » la pièce sollicitée et qui dépend du lieu où s'applique cette force et de sa direction. On parle souvent d'« effet levier ». La grandeur qui caractérise cet effet est le « moment ».

Un moment est une grandeur exprimée en  $N.m$ . C'est le produit d'une force par une distance.

Prenons l'exemple d'une pièce en équilibre sous l'action de deux masses égales à une même distance du centre  $A$  :

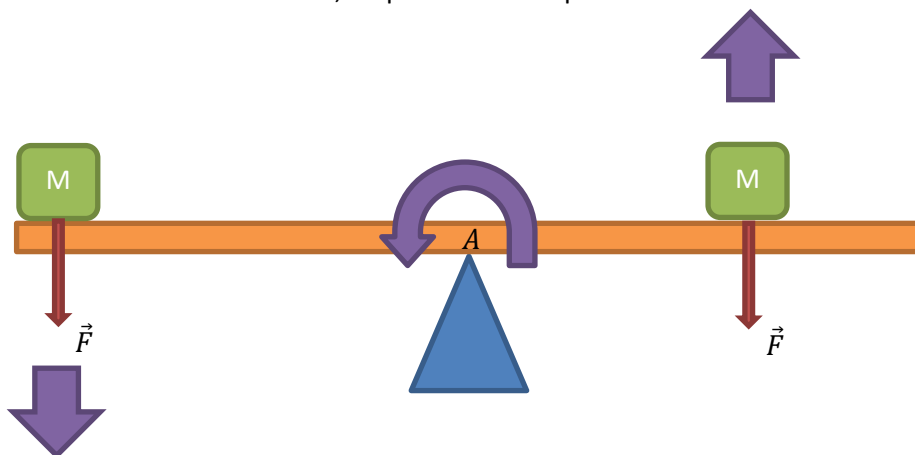


La force qui s'applique sur chaque masse vaut  $\vec{F} = -Mg\vec{z}$  où  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

On devine aisément que l'action au contact en  $A$  est opposée aux poids des deux masses et vaut :

$$\vec{F}_A = 2Mg\vec{z}$$

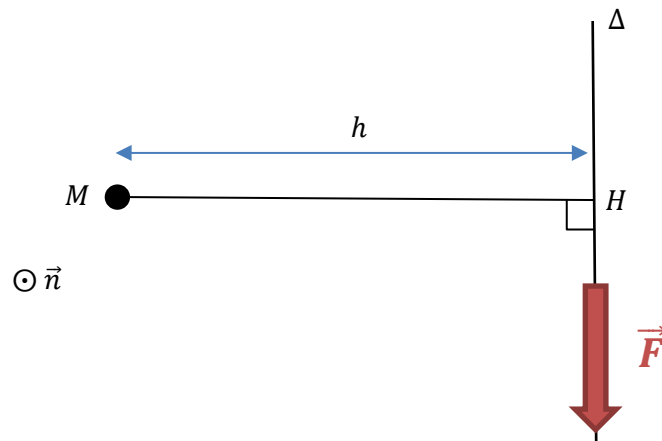
Les deux masses étant identiques, et les distances (**bras de levier**) aussi, la situation d'équilibre existe. Si l'on rapproche l'une des masses de  $A$ , l'équilibre va être perdu :



L'origine du basculement est une différence de moment des deux forces  $F$ . L'action en  $A$  s'oppose toujours au poids des deux forces et ne change pas de valeur ( $\vec{F}_A = 2Mg\vec{z}$ ), mais il existe une « force en rotation », appelée moment, qui tend à faire basculer l'ensemble vers la gauche.

<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Soit une force  $\vec{F}$  de support la droite  $\Delta$  et un point  $M$  quelconque de l'espace :



Le bras de levier de la force  $\vec{F}$  au point  $M$  est la distance de  $M$  à la droite  $\Delta$ , c'est-à-dire la distance  $MH = h$  où  $H$  est la projection orthogonale de  $M$  sur  $\Delta$ .

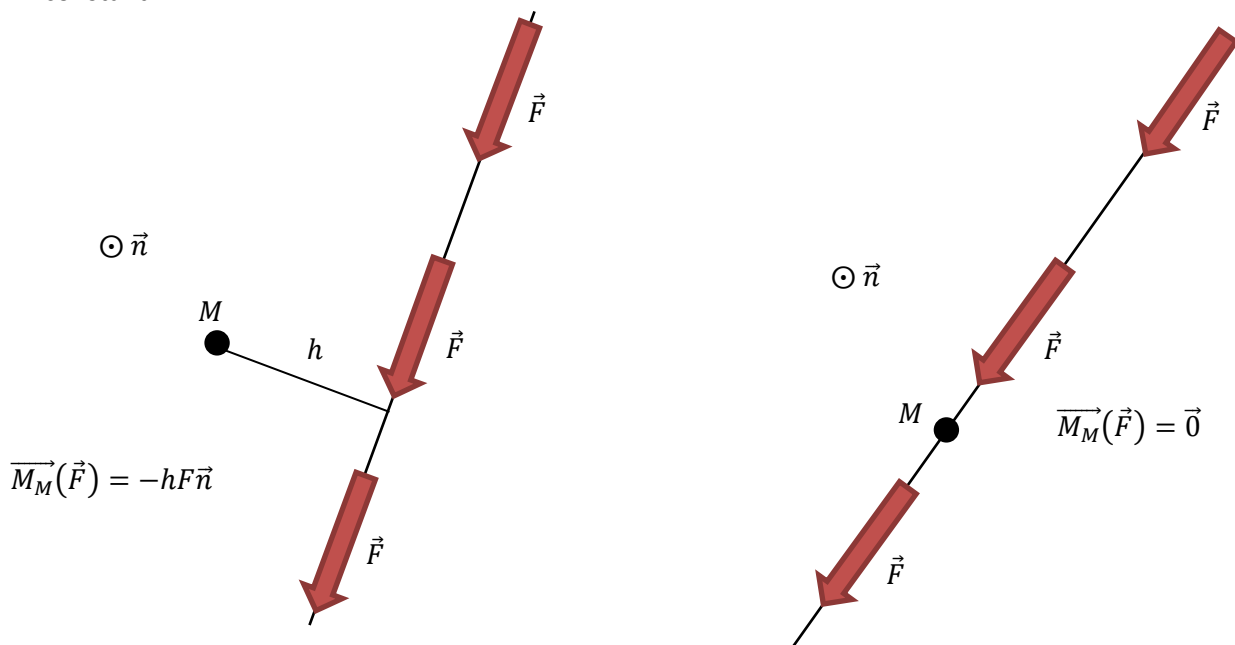
Soit  $\vec{n}$  le vecteur orthogonal au plan contenant  $\Delta$  passant par  $M$  et orienté comme présenté sur la figure ci-dessus.

Le moment de  $\vec{F}$  en  $M$  est un vecteur noté  $\overrightarrow{M_M}(\vec{F})$  tel que :

- Sa norme est égale à la norme de la force  $F$  multipliée par le bras de levier  $h$  de cette force au point considéré
- Sa direction est orthogonale au plan contenant la direction de la force et le point  $M$
- Son sens suivant  $\vec{n}$  est
  - o Positif si la force « tend à faire tourner » dans le sens direct autour de  $\vec{n}$
  - o Négatif si la force « tend à faire tourner » dans le sens indirect autour de  $\vec{n}$

$$\overrightarrow{M_M}(\vec{F}) = \pm hF\vec{n}$$

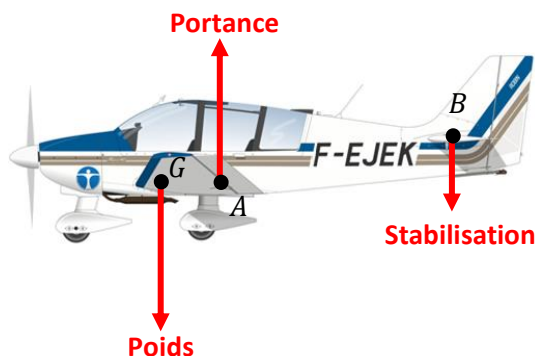
Remarque : Le moment en un même point de toutes forces égales appliquées sur la même droite est constant :



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.a.ii Bilan des forces influentes

En vol stabilisé, on peut représenter les forces sur l'avion ainsi :



- Le poids de l'avion s'applique en son centre de gravité G, vers le bas
- La portance, définie en A, permet à l'avion de voler en contrant son poids
- L'empennage de profondeur permet d'équilibrer l'avion sur l'axe de tangage. En effet, sans lui et la force stabilisatrice qu'il crée (portance de la gouverne, vers le bas), l'avion basculerait sur l'axe de tangage, vers l'avant dans l'exemple ci-dessus.

Remarque : lorsque l'on souhaite réaliser une montée, on braque la gouverne de manière à augmenter cette portance de l'empennage vers le bas. Lorsque l'on veut descendre, on fait diminuer cette portance. Certains auraient cru que l'on créait une portance vers le haut...

### 1.1.3.a.iii Définition du foyer

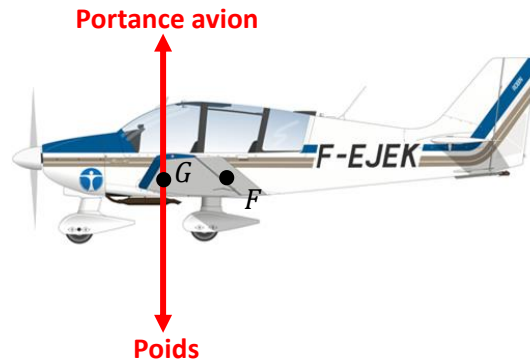
Les difficultés de l'étude de stabilité sur l'axe de tangage sont liées à différents phénomènes :

- Le centre de gravité G évolue en fonction de la répartition des masses dans l'avion, et de la consommation de l'essence à bord !
- Le point A où s'applique la portance évolue avec l'incidence (il se déplace vers l'avant de l'avion lorsque l'incidence augmente).
- La force de stabilisation évolue aussi avec l'incidence, et son point d'application B aussi, à braquage de gouverne constant.

On va donc utiliser un point intermédiaire appelé « Foyer » qui va grandement simplifier l'approche de la stabilité longitudinale du vol.

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

On peut représenter la position stable de la page précédente comme ceci, en regroupant l'effet des actions de portance de l'aile et de la stabilisation de la gouverne de profondeur au centre de gravité (l'avion étant en équilibre, la somme des forces qui s'appliquent dessus est nulle) :



On définit alors un point, nommé « foyer avion » ( $F$  sur la figure), correspondant au point d'application des variations de la portance.

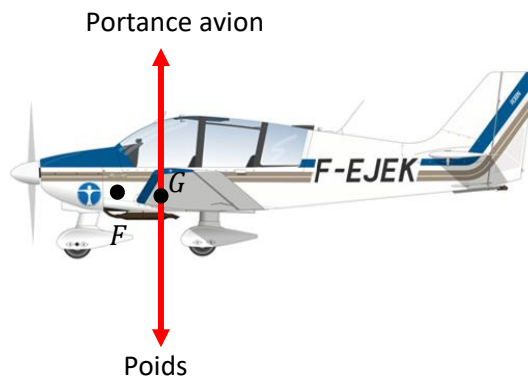
La position de ce point dépend de l'aile et du stabilisateur et est fixe sur l'avion 😊. Toute évolution de l'avion autour de cette situation d'équilibre va se traduire par l'ajout d'une force en  $F$  correspondant à la variation de la portance.



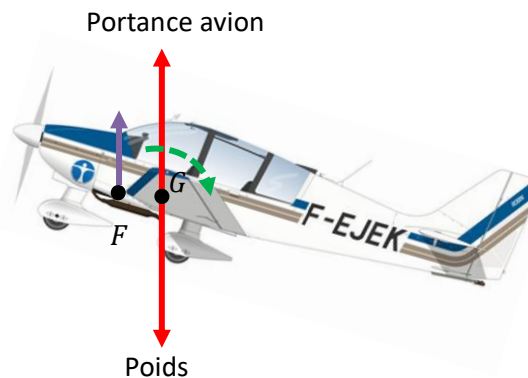
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.a.iv CDG derrière foyer

Supposons que le poids est en arrière du foyer :



Soit une variation d'assiette à cabrer :



On a apparition d'une variation de portance au foyer, qui génère un moment qui tend à continuer le mouvement à cabrer en faisant tourner l'avion autour de son centre de gravité.

Le vol est instable et très dangereux.

#### Activité

Lancer un avion en papier avec une pièce de 10c scotchée à l'arrière

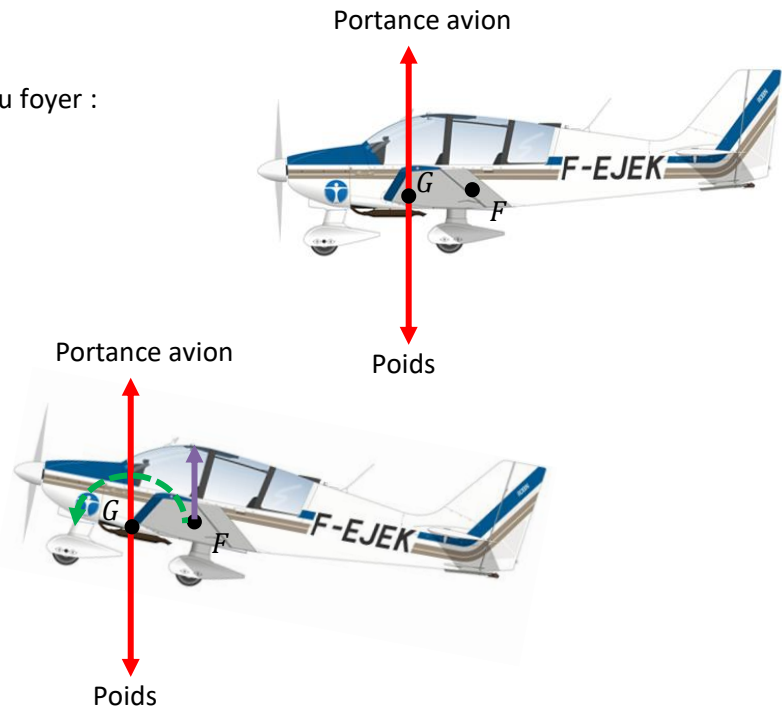


<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.a.v CDG devant foyer

Supposons que le poids est en avant du foyer :

Soit une variation d'assiette à cabrer :

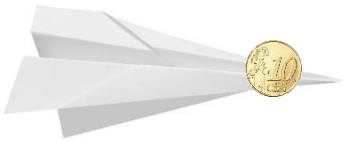


On a apparition d'une variation de portance au foyer, qui génère un moment qui tend à ramener l'avion à l'horizontale en faisant tourner l'avion autour de son centre de gravité.

Le vol est stable.

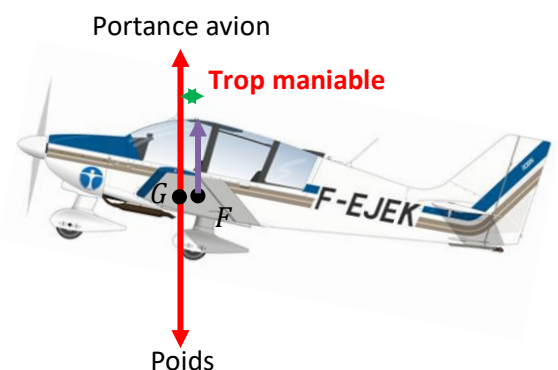
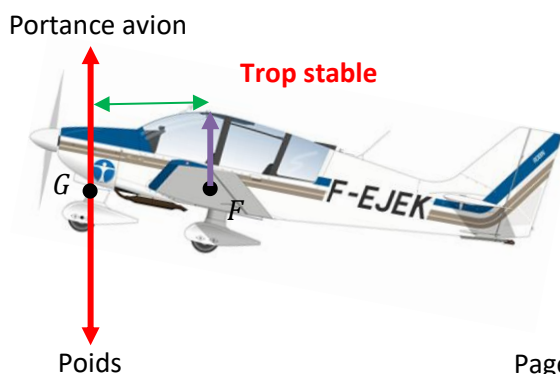
**Activité**

Lancer un avion en papier avec une pièce de 10c scotchée à l'avant



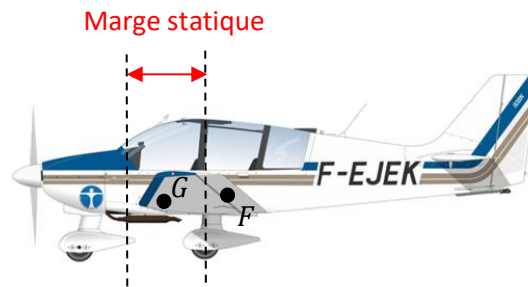
On peut remarquer que plus G sera en avant, plus l'avion aura tendance à revenir à l'horizontale rapidement. On dit donc que :

- Si G est très en avant du foyer, l'avion est très stable
- Si G est proche du foyer (en restant devant), plus l'avion est maniable (et moins stable)



### 1.1.3.a.vi Centrage

Compte tenu de cette étude, le centre de gravité d'un avion doit toujours être en avant du foyer.



Il existe une zone dans laquelle doit se trouver le centre de gravité, en avant du foyer :

- Plus  $G$  est en avant (centrage avant), plus l'avion est stable
- Plus  $G$  est en arrière, plus l'avion est maniable

On pourra retenir ce qui suit : pour se souvenir du fait que le centre de gravité doit rester devant le foyer, et que plus il en est proche, plus c'est instable, on pourra penser à la chaise à 4 pieds sur laquelle on se balance. A partir du moment où notre centre de gravité est trop en arrière, on tombe 😊 Le foyer, c'est la position des pieds arrière...



Avant un vol, le pilote a obligation de vérifier son « centrage ». Et celui-ci évolue avec la consommation de carburant... Evidemment !

**Activité**  
Etudier le centrage des  
DR400 sur Skydemon

Remarques :

- Un avion centré trop en avant rend difficile l'atterrissage, faute de pouvoir arrondir, manche en butée arrière
- Un avion centré trop arrière, mais s'il n'est pas encore instable, rend le décollage dangereux. En effet, il peut décoller très facilement en « second régime », l'avion étant très sensible aux actions à cabrer lors de la rotation. Mais ne vous inquiétez pas, le second régime n'est pas au programme BIA ! Pour dire les choses simplement, il existe deux incidences générant la même portance (cf polaire). En décollage normal, l'incidence la plus faible est atteinte. En second régime, l'incidence la plus forte est atteinte, et donc la trainée la plus forte aussi...

RAPPORT DE PESEE		Appareil type : Cessna 441 Q1	Date : 18/02/2018																															
		Immatriation : F-BUDB	Lieu : Indre																															
		Masse à vide : 432 kg Via côté 0 arrière alla référence Face avant obéon pare feu																																
Distance du C.G. Aux roues principales $D1 = (P2-D1)M =$ A la référence $X = d + D1 =$		Masse à vide (kg) <table border="1"> <tr><th>Masse</th><th>Tare</th><th>Masse nette</th></tr> <tr><td>Roue G.</td><td>307</td><td><math>D2 = (P1+D2)M = (95 + 1,463)522 = 0,288 \text{ m}</math></td></tr> <tr><td>Roue D.</td><td>320</td><td>A la référence</td></tr> <tr><td>Roue AV</td><td>95</td><td><math>X = d - D2 = 1,188 - 0,296 = 0,922 \text{ m}</math></td></tr> <tr><td>Masse à vide mesurée</td><td>M(kg)</td><td>432</td></tr> </table>		Masse	Tare	Masse nette	Roue G.	307	$D2 = (P1+D2)M = (95 + 1,463)522 = 0,288 \text{ m}$	Roue D.	320	A la référence	Roue AV	95	$X = d - D2 = 1,188 - 0,296 = 0,922 \text{ m}$	Masse à vide mesurée	M(kg)	432																
Masse	Tare	Masse nette																																
Roue G.	307	$D2 = (P1+D2)M = (95 + 1,463)522 = 0,288 \text{ m}$																																
Roue D.	320	A la référence																																
Roue AV	95	$X = d - D2 = 1,188 - 0,296 = 0,922 \text{ m}$																																
Masse à vide mesurée	M(kg)	432																																
Masse (kg) : 522 Bras de levier (m) : 0,922 Moments (par rapport référence) (m x kg) : 481,28		Commentaires : Note : *Huile incluse dans la masse à vide Coefficient non consommable inclus dans la masse à vide																																
Résultats corrigés : Masse à vide : 522 kg Dist C.G à vide : 0,922 m Moments : 481,28		Exemple de chargement : <table border="1"> <tr><th>Masse (kg)</th><th>Bras levier (m)</th><th>Moment (m x kg)</th></tr> <tr><td>Avion vide</td><td>522</td><td>0,922</td><td>481,28</td></tr> <tr><td>Equipage : 2 x 77</td><td>154</td><td>1,000</td><td>154,00</td></tr> <tr><td>Passagers</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Bagages</td><td>5</td><td>1,030</td><td>5,15</td></tr> <tr><td>Essence (63 l)</td><td>45</td><td>1,000</td><td>45,00</td></tr> <tr><td>Huile</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Total</td><td>726</td><td>0,948</td><td>688,43</td></tr> </table> Masse à vide : 520 kg Date : 08/02/2013		Masse (kg)	Bras levier (m)	Moment (m x kg)	Avion vide	522	0,922	481,28	Equipage : 2 x 77	154	1,000	154,00	Passagers				Bagages	5	1,030	5,15	Essence (63 l)	45	1,000	45,00	Huile				Total	726	0,948	688,43
Masse (kg)	Bras levier (m)	Moment (m x kg)																																
Avion vide	522	0,922	481,28																															
Equipage : 2 x 77	154	1,000	154,00																															
Passagers																																		
Bagages	5	1,030	5,15																															
Essence (63 l)	45	1,000	45,00																															
Huile																																		
Total	726	0,948	688,43																															
Limites de centrage : 																																		

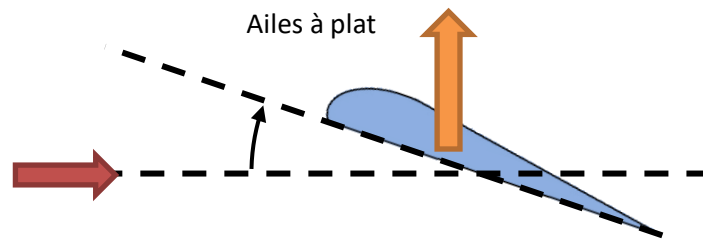
<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.b Roulis

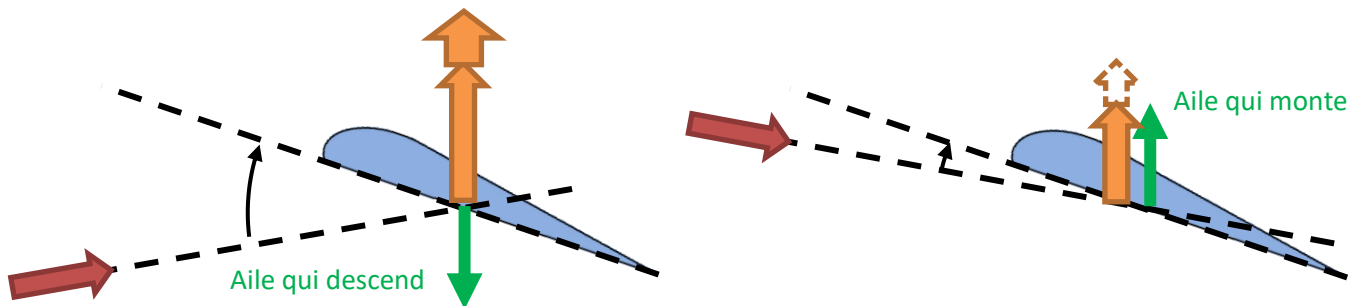
#### 1.1.3.b.i Stabilité en roulis – Stabilité latérale

##### • Ralentissement du mouvement

Du fait de sa symétrie par rapport au plan vertical passant par l'axe de tangage et de lacet de l'avion, l'équilibre en roulis semble indifférent.



En présence d'un mouvement de roulis, l'aile qui descend voit son incidence relative à l'air local augmenter, et l'aile qui monte la voit diminuer.

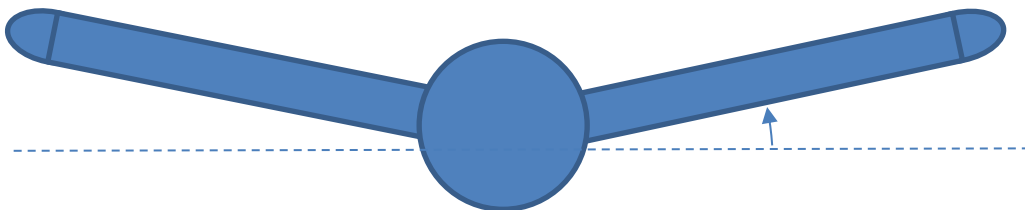


Il en résulte un effet amortisseur du mouvement, qui s'estompe dès que le mouvement s'arrête. Cela ne permet toutefois pas de revenir en position horizontale.

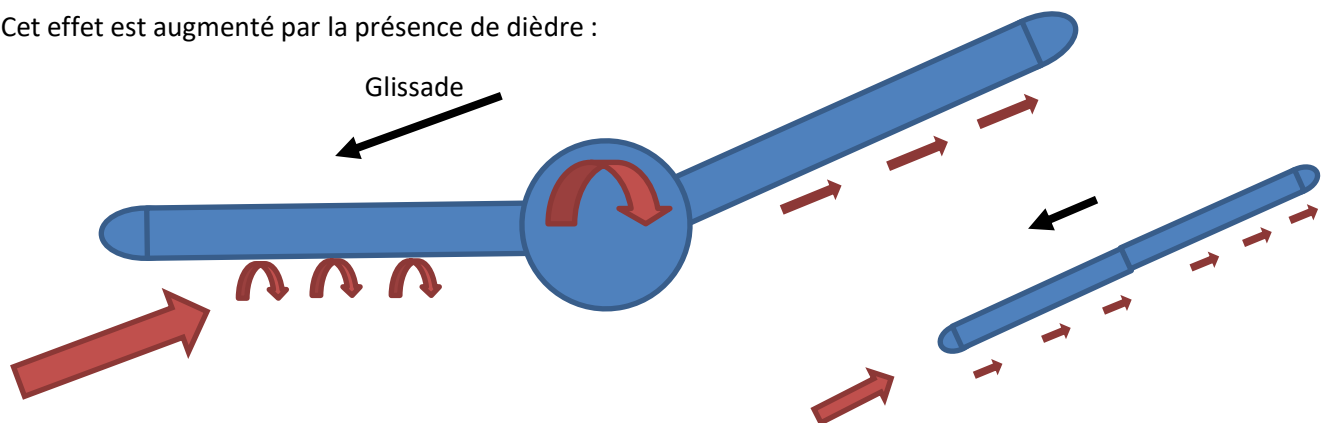
<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

- **Retour en position d'équilibre**

L'avion étant incliné, le poids possède une composante dans le plan des ailes, ce qui génère une **glissade**. L'aile du côté de la glissade reçoit plus de vent que l'aile de l'autre côté, ce qui génère un couple qui tend à redresser l'avion.



Cet effet est augmenté par la présence de dièdre :



- **Conclusion**

On a donc stabilité latérale, améliorée par un dièdre positif.

- **Remarque**

Les effets de roulis induisent un effet en lacet qui participe aussi à la stabilité latérale. La présence d'une glissade induit une rotation en lacet (effet girouette sur la dérive qui tend à faire tourner l'avion pour l'orienter du côté du vent issu de la glissade). Cela tend à faire tourner l'avion pour le remettre face au vent et limiter la glissade 😊

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.b.ii Effets secondaires - Le roulis induit

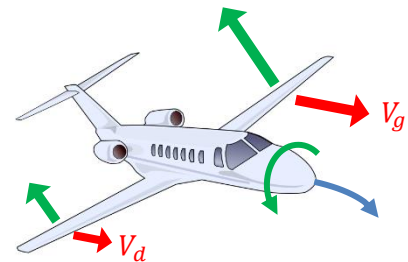
Lorsque l'on parle de roulis induit, on aborde deux phénomènes distincts qui mènent à un mouvement de roulis :

- Le roulis induit en virage qui tend à amplifier l'inclinaison de l'avion
- Le roulis induit par une dissymétrie du vol permettant à certains aéronefs sans ailerons de s'incliner

#### • En virage

En virage, l'aile à l'extérieur du virage parcourt plus de distance que l'aile à l'intérieur en un même temps. L'aile extérieure va donc plus vite que l'aile intérieure, ce qui génère une différence de portance :

- Portance supérieure sur l'aile extérieure qui va plus vite
- Portance inférieure sur l'aile à l'intérieur qui va moins vite



Ce phénomène conduit l'avion à augmenter son inclinaison, c'est un mouvement de roulis induit par le virage...

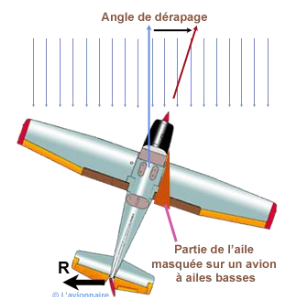
En virage à inclinaison constante, la portance de l'aile à l'extérieur du virage est réduite instinctivement par le pilote par une légère action du manche dans le côté opposé à l'inclinaison (le manche n'est pas maintenu en position ailerons symétriques).

#### • Par action en lacet

Sur certains ULM dits 2 axes, et quelques modèles réduits, il n'y a pas d'ailerons. Ces aéronefs utilisent le principe du roulis induit pour générer une inclinaison via la dérive (action en lacet).

Le principe est le suivant :

- Par une action en lacet (à droite dans l'exemple ci-contre), il y a génération d'un dérapage
- Le dérapage diminue la quantité d'air reçue par l'une des deux ailes, et donc la portance associée
- Il y a génération d'un mouvement de roulis du côté de l'aile sous le vent du nez de l'avion, donc du côté de l'action en lacet : c'est le « roulis induit »



Cela permet donc finalement de générer une inclinaison en roulis dans le sens souhaité par une action en lacet.

Notons toutefois que le dérapage est synonyme de départ en vrille à basse vitesse, c'est pourquoi il est recommandé d'avoir des ailerons...

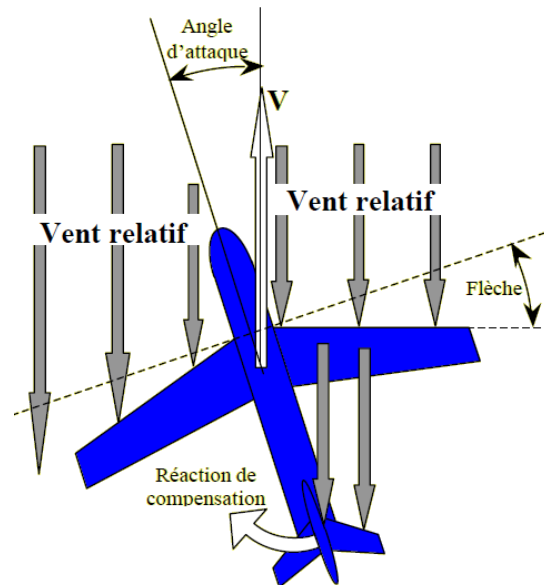
<a href="http://www.cpge-sii.com">www.cpge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.c Lacet

#### 1.1.3.c.i Stabilité en lacet – Stabilité de route

La stabilité de route est issue de deux phénomènes :

- Effet « girouette »
- Influence de la flèche de l'aile



#### • Effet « Girouette »

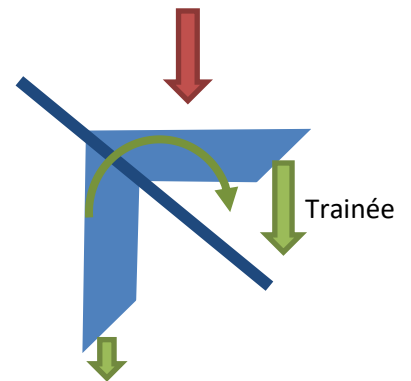


Les surfaces verticales (fuselage, dérive) sont soumises à des forces tendant à remettre l'avion dans le sens du vent (comme une girouette).

#### • Flèche

La présence d'une flèche positive (cf schéma ci-dessus et ci-contre), l'aile « au vent » reçoit le vent relatif de front alors que l'autre le reçoit de profil. L'aile au vent reçoit plus d'air et est donc soumise à une traînée plus importante, ce qui tend à la faire reculer < et à remettre l'avion face au vent.

Un autre exemple pour mieux comprendre : si la flèche valait  $90^\circ$ , en cas de dérapage à  $45^\circ$  vers la gauche, l'aile gauche ne recevrait plus du tout d'air... L'aile droite ayant de la traînée ramènerait donc l'avion de face.



#### • Conclusion

On a donc stabilité de route, améliorée par une flèche positive.

#### • Remarques

La flèche participe légèrement à la stabilité en roulis, comme le dièdre. En effet, La portance du côté de la glissade est plus importante, ce qui tend à ramener l'aile horizontale.

Cette stabilité de route est à l'origine de la bonne orientation d'un avion en virage. Sans cette stabilité, un avion qui tourne verrait son axe rester dans sa direction initiale, seule sa trajectoire s'orienterait dans le sens du virage, ce qui ne permettrait donc pas de tourner...

Les effets de lacet induisent un effet en roulis qui participe aussi à la stabilité de route. La présence d'un dérapage induit une rotation en roulis (cf paragraphe précédent « roulis induit ») qui tend à faire tourner l'avion pour le remettre face au vent.



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.3.c.ii Effets secondaires - Lacet inverse

#### • Mise en virage - Taux de roulis non nul

Lorsque l'on utilise les ailerons pour incliner l'avion (on parle de taux de roulis non nul), la portance :

- Augmente du côté de l'aileron baissé (extérieur au virage souhaité)
- Diminue du côté de l'aileron levé (intérieur au virage souhaité)

Les variations de portances s'accompagnent d'une variation des trainées associées. Ainsi, la trainée :

- Augmente du côté de l'aileron baissé (extérieur au virage souhaité)
- Diminue du côté de l'aileron levé (intérieur au virage souhaité)

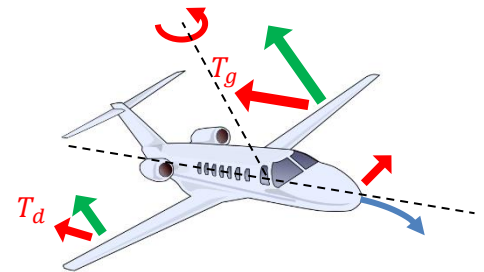
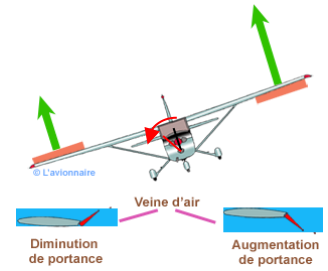
Il en résulte un déséquilibre selon l'axe de lacet qui conduit l'avion à

s'orienter du côté opposé à l'inclinaison voulue ☹ C'est très visible sur les appareils ayant des ailerons au bout de très longues ailes, les planeurs par exemple...

Notons que ce phénomène **n'apparaît que lorsque les ailerons sont braqués**, soit à la mise en virage et à la sortie du virage...

Le phénomène de lacet inverse est plus ou moins marqué selon les avions. Dans tous les cas, la formation au pilotage des avions a pour but de faire prendre les bons réflexes au pilote : à toute action en roulis, on associe une action en lacet dans le même sens (conjugaison) afin de contrer les effets du lacet inverse.

Une solution permettant de réduire le lacet inverse consiste à réaliser un « **braquage différentiel des ailerons** ». Le principe consiste à augmenter la trainée de l'aile intérieure, là où l'aileron se lève. On fait donc en sorte de braquer un peu plus l'aileron dans le virage (vers le haut), ce qui certes diminue encore plus la portance et la trainée, mais en modifiant le profile, change les coefficients  $C_x$  et  $C_z$  (la polaire) et permet finalement d'avoir une trainée plus importante que sans braquage différentiel sur l'aile à l'intérieur du virage.



<a href="http://www.cpge-sii.com">www.cpge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

- **En virage stabilisé – Taux de roulis nul**

Lorsque l'aéronef a atteint l'inclinaison souhaitée par le pilote, celui-ci remet les ailerons « au neutre ». L'avion reste alors incliné dans le sens du virage, et tourne progressivement.

L'aile extérieure au virage va plus vite que l'aile intérieure, ce qui induit la présence, sur l'aile extérieure, d'une plus grande :

- Portance : l'avion a tendance à augmenter son inclinaison (cf. roulis induit vu précédemment)
- Traînée : l'avion subit un léger effet de lacet inverse

Il est donc nécessaire de veiller à maintenir :

- L'inclinaison constante via une légère action en roulis dans le sens opposé au virage pour rééquilibrer la portance
- La symétrie avec les palonniers (difficile toutefois de prévoir les choses, la portance étant légèrement diminuée sur l'aile extérieure par l'action de rééquilibrage, la traînée l'est aussi...)

Ces effets sont peu marqués à faible inclinaison.

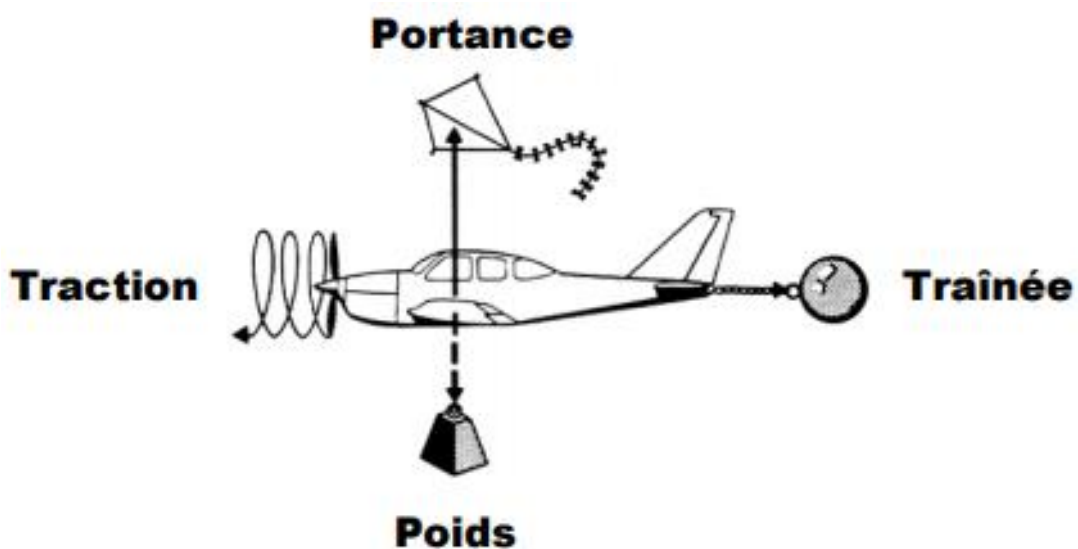
<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.I.4 Le vol d'avion motorisé

### 1.I.4.a Bilan des forces

Les 4 forces qui s'appliquent sur un avion en vol sont :

- La résultante aérodynamique que l'on décompose en deux forces :
  - o La portance
  - o La traînée
- Le poids
- La traction (pas pour les planeurs)



### 1.I.4.b Mouvement rectiligne uniforme

Dans un référentiel Galiléen, un objet en mouvement rectiligne (en ligne droite) uniforme (vitesse constante), est soumis à un ensemble de forces qui se compensent (somme nulle).

Pour les différentes phases du vol que nous allons étudier (palier, montée, descente), nous partirons de ce principe pour étudier les forces en présence et trajectoires associées.

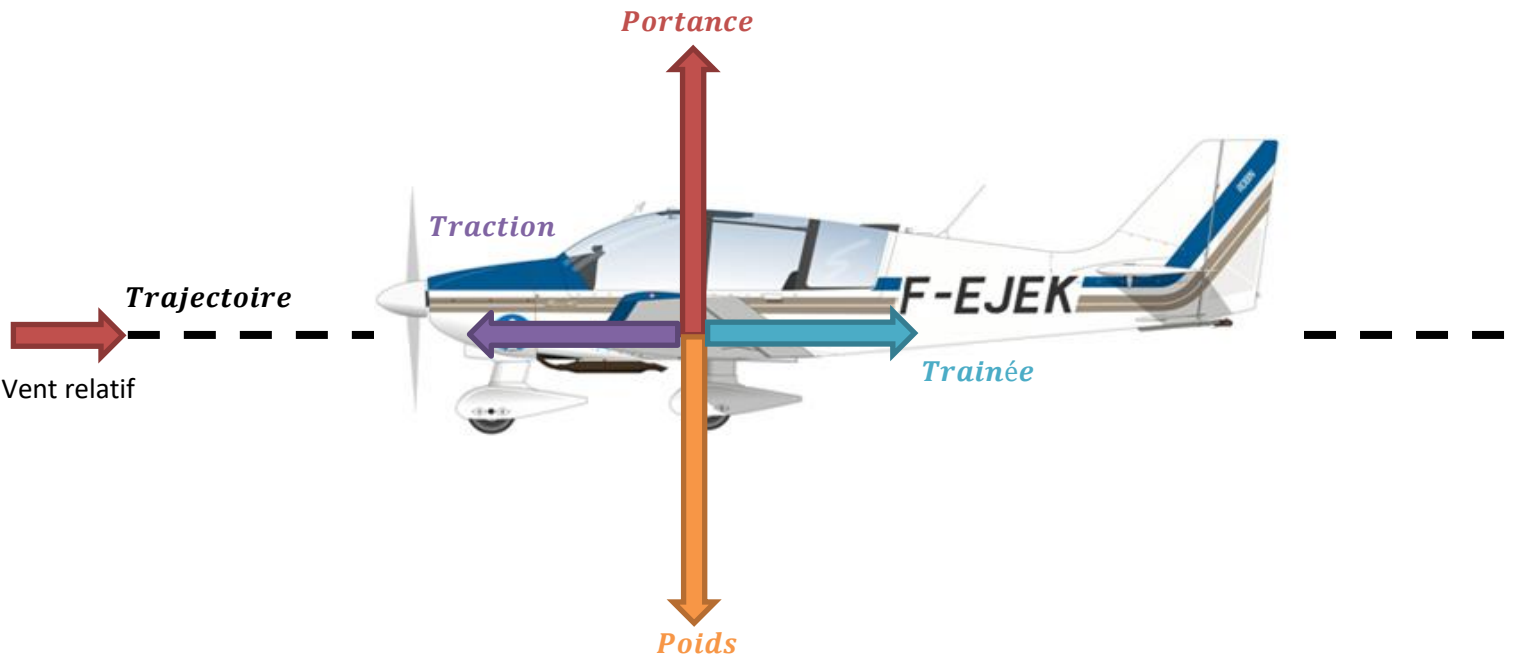
Pour le virage, le mouvement n'est pas rectiligne, la somme des forces n'est donc pas nulle.

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.c Les différentes phases du vol

#### 1.1.4.c.i Vol en palier

Le vol en palier se définit comme un vol à altitude constante et à vitesse constante.



L'avion ayant une trajectoire rectiligne uniforme, la somme des forces qui s'appliquent sur lui est nulle.

De ce fait :

- La portance équilibre le poids
- La traction équilibre la trainée

On remarquera donc que plus la trainée est faible, plus la traction est faible, et donc moins l'avion consommera d'essence !

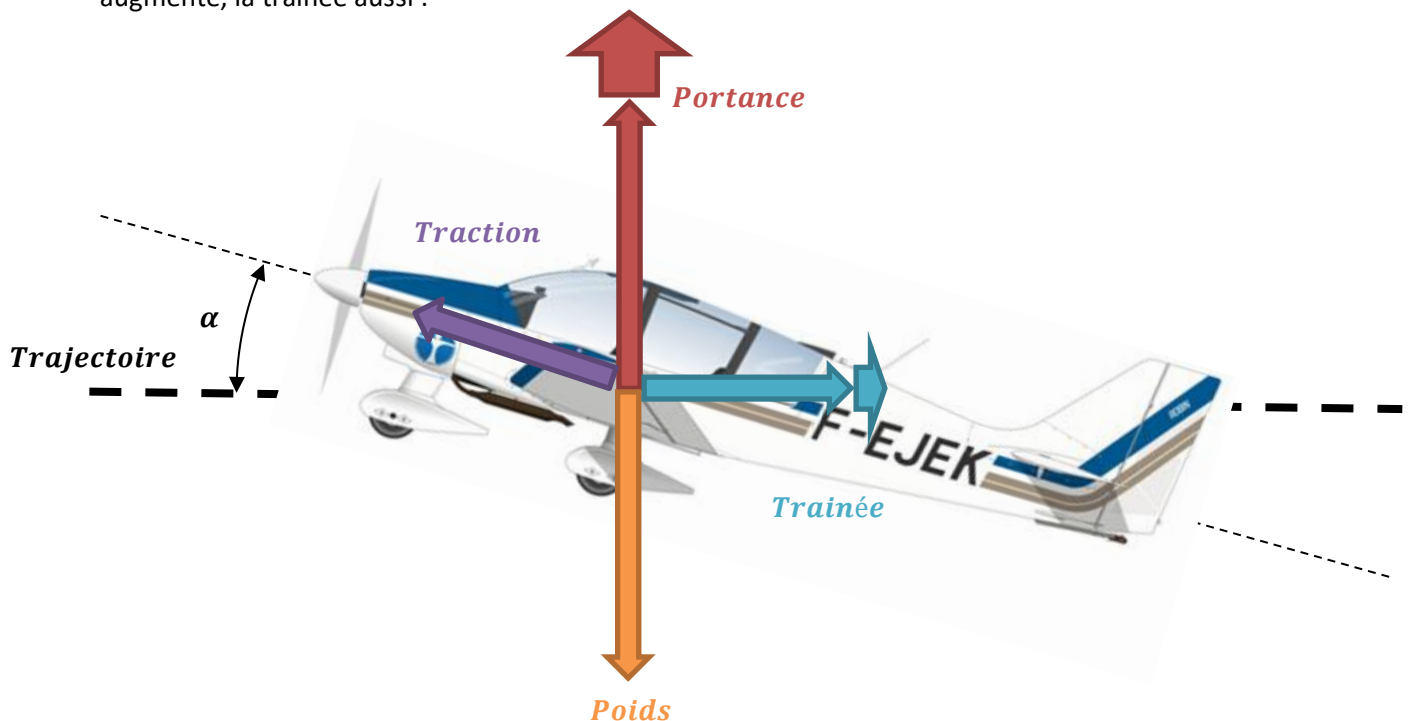
<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.c.ii *Vol en montée*

A partir d'un vol en palier, la mise en montée est réalisée par une variation de l'assiette à cabrer (tirer sur le manche).

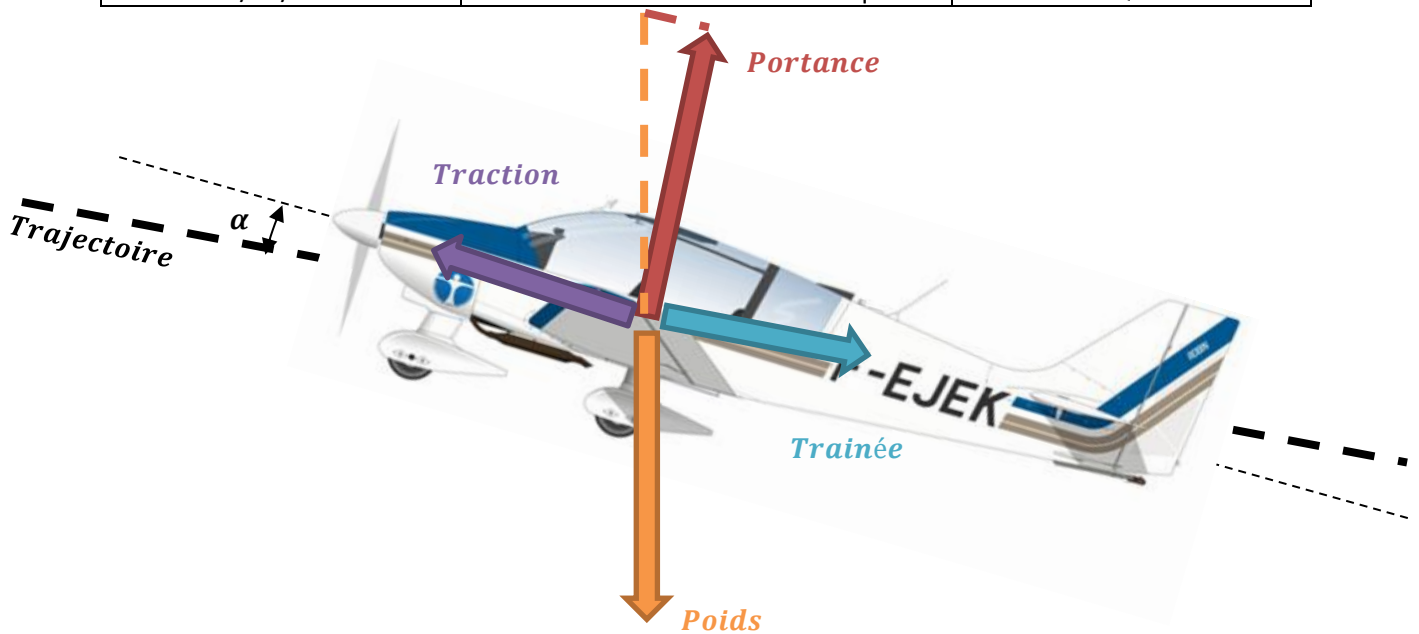


À la suite de l'action sur la commande de profondeur à cabrer, l'incidence augmente, la portance augmente, la traînée aussi :



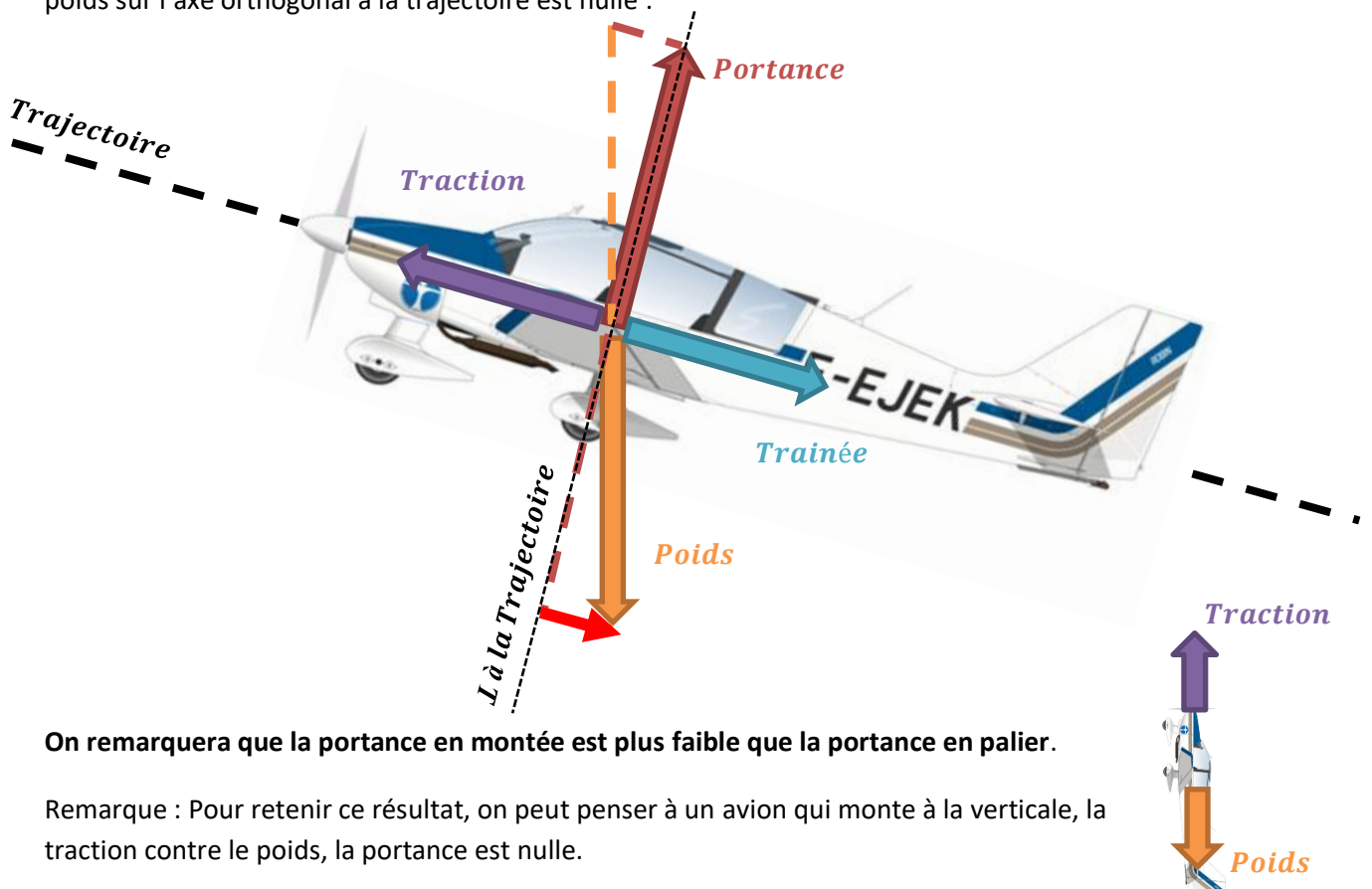
Cette situation est intermédiaire et ne dure pas. La somme des forces devient non nulle. La composante verticale est vers le haut et modifie la trajectoire vers le haut. La composante dans la direction du vent relatif (trainée supplémentaire) tend à faire ralentir l'avion. La trajectoire étant modifiée, l'incidence rediminue et portance et trainée vont diminuer.

Remarque : nous négligerons les petites évolutions de la trainée dans la suite, ce qui ne nuira pas à la compréhension des principes de modification de la trajectoire de l'avion.



Pour simplifier la réflexion dans la suite, nous confondrons axe longitudinal de l'avion et trajectoire (incidence nulle) car si tel n'est pas le cas, les directions des forces traction/trainée ne sont pas parfaitement parallèles. Cette simplification nous permettra de mettre en évidence les principes du vol en montée. Comme les angles d'incidences restent petits, ces simplifications sont très proches de la réalité.

La trajectoire de vol en montée est atteinte lorsqu'il y a équilibre entre la portance et la composante du poids parallèle à la portance, ou plus simplement, quand la projection des forces de portance et de poids sur l'axe orthogonal à la trajectoire est nulle :

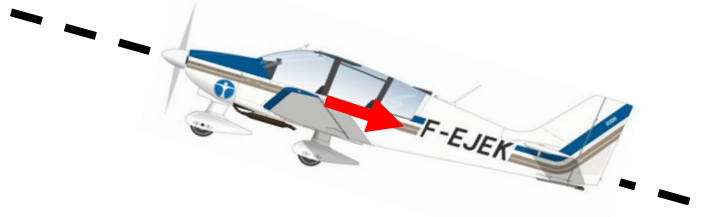


On remarquera que la portance en montée est plus faible que la portance en palier.

Remarque : Pour retenir ce résultat, on peut penser à un avion qui monte à la verticale, la traction contre le poids, la portance est nulle.

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

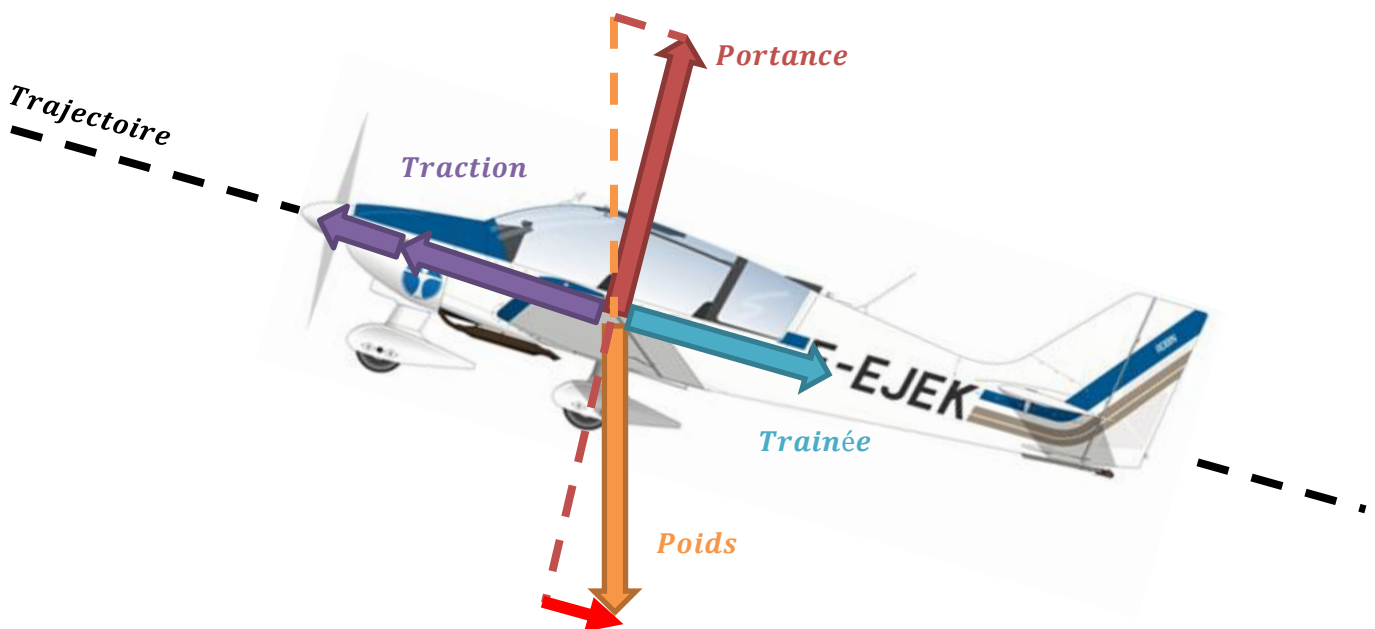
Sans modification de la traction, il existe une composante de poids non compensée et qui tend à ralentir l'avion (flèche rouge). Ainsi, la somme de toutes les forces sur l'avion dans cette situation est :



Si l'on ne compense pas cette force, l'avion va ralentir. Si l'on maintient l'assiette, la vitesse va diminuer, la portance aussi, la pente va donc diminuer. **Sans nouvelle action du pilote**, l'avion va finir

- Soit par s'équilibrer sur une trajectoire avec une vitesse et une pente plus faible (retour vers l'horizontale) que celles souhaitées (on volait à 100kt, on finit par monter à 70 kt)
- Soit **aller jusqu'au décrochage** si la vitesse chute trop.

Pour maintenir la vitesse du palier à la montée, il faut donc augmenter la traction pour compenser la composante de poids parallèle à la trajectoire :



Conclusions :

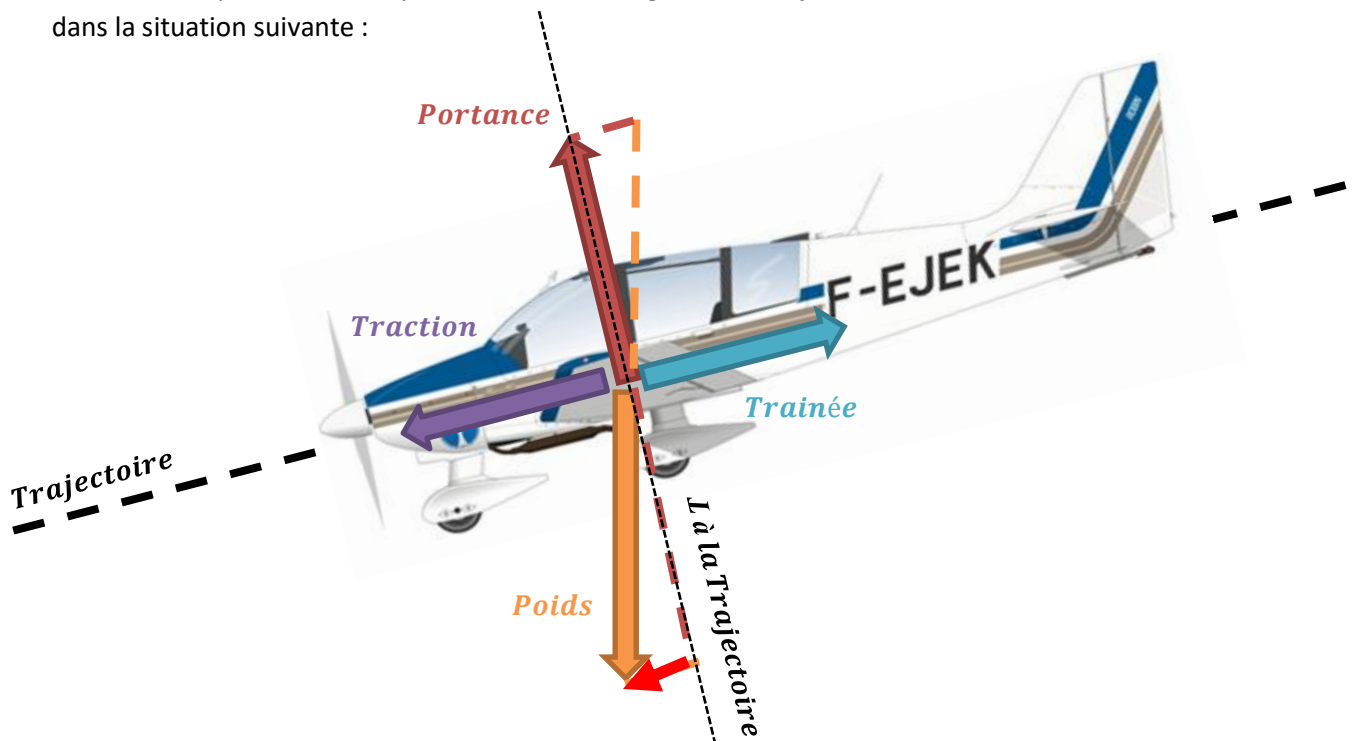
- Pour une mise en montée à vitesse constante, il faut
  - o Augmenter l'assiette en tirant sur le manche
  - o Augmenter la puissance
- Pour monter à vitesse plus faible qu'en croisière, il suffit de tirer sur le manche, mais attention, selon l'assiette affichée, la vitesse peut chuter sous la vitesse de décrochage...
- La force de traction en montée est dépendante de la trainée, du poids et de l'assiette affichée

<a href="http://www.cpge-sii.com">www.cpge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.c.iii Vol en descente

Maintenant que nous avons bien détaillé la mise en montée, résumons plus simplement les phénomènes intervenant lors de la mise en descente.

Le pilote affiche une assiette à piquer. L'incidence diminuant, la portance diminue, et le bilan des forces tend à faire descendre l'avion. La trajectoire s'incline vers le bas, l'incidence réaugmente jusqu'à ce que la composante verticale de la portance équilibre le poids, ou plus simplement, quand la projection des forces de portance et de poids sur l'axe orthogonal à la trajectoire est nulle. On se retrouve alors dans la situation suivante :



On remarquera que la portance en descente est plus faible que la portance en palier.

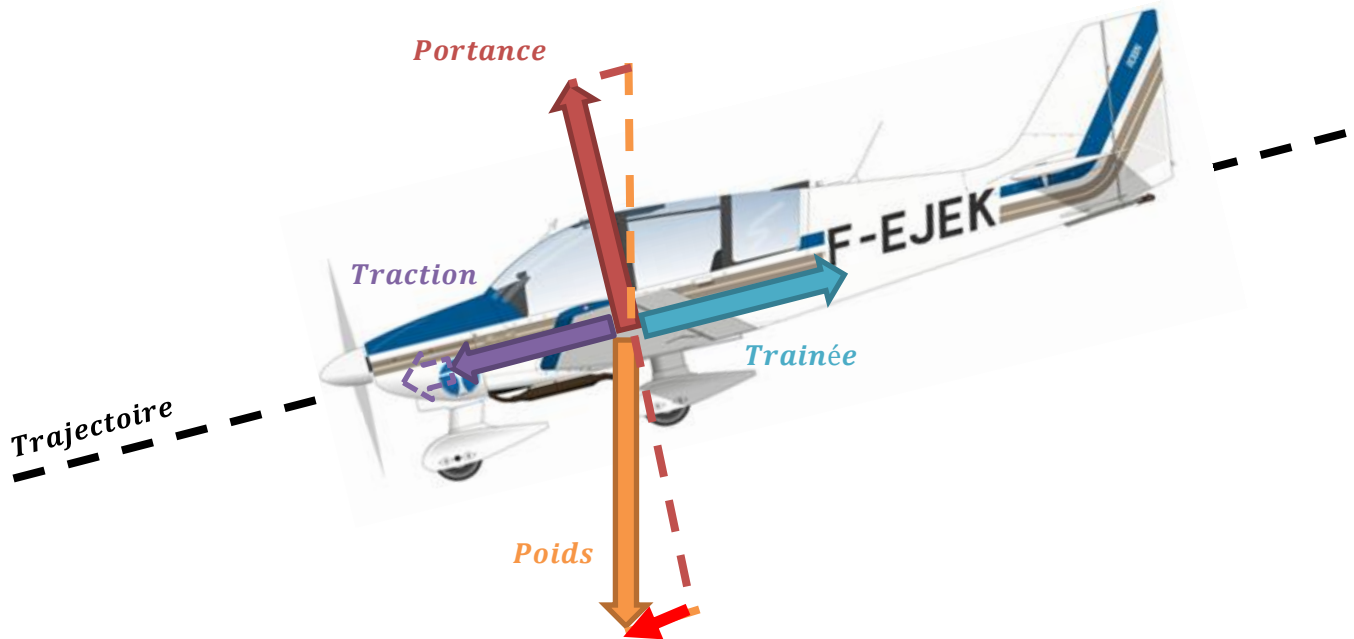
Sans modification de la traction ou sans utilisation d'aérofreins, il existe une composante de poids non compensée et qui tend à accélérer l'avion (flèche rouge). Si l'on ne compense pas cette force, l'avion va accélérer. Si l'on maintient l'assiette, la vitesse va augmenter, la portance aussi, l'assiette va donc augmenter. **Sans nouvelle action du pilote**, l'avion va finir

- Soit par s'équilibrer sur une trajectoire avec une vitesse plus forte et une pente plus faible (retour vers l'horizontale) que celles souhaitées (on volait à 100kt, on finit par descendre à 120 kt)
- Soit **aller jusqu'à la vitesse à ne jamais dépasser VNE** (velocity never exceed) si la vitesse augmente trop, ce qui est dangereux – [Vidéo](#)



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Pour maintenir la vitesse du palier à la descente, il faut donc diminuer la traction ou augmenter la traînée (aérofreins) pour compenser la composante de poids parallèle à la trajectoire.

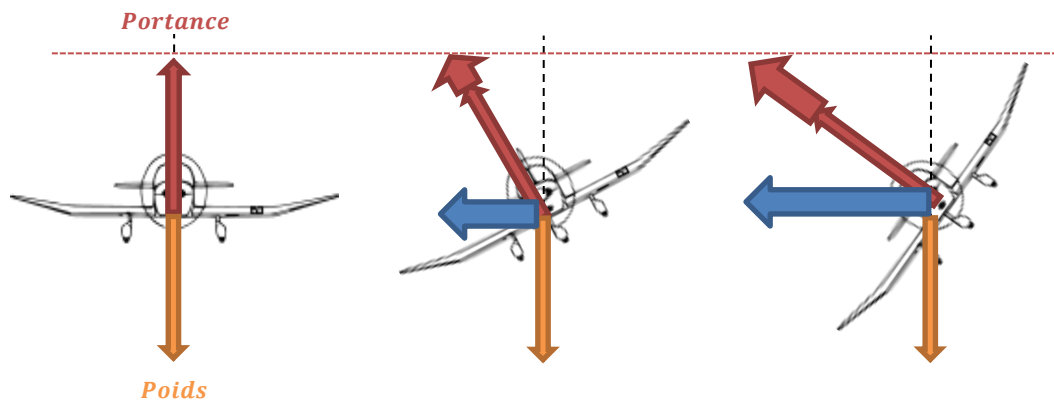


Conclusions :

- Pour une mise en descente à vitesse constante, il faut
  - o Diminuer l'assiette en poussant sur le manche
  - o Diminuer la puissance ou augmenter la traînée (aérofreins)
- Pour descendre à vitesse plus forte qu'en croisière, il suffit de pousser sur le manche, mais attention, selon l'assiette affichée, la vitesse peut passer au-dessus de la VNE...
- La force de traction en descente est dépendante de la traînée, du poids et de l'assiette affichée

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.c.iv Vol en virage



Lors d'un vol en palier, la portance contre exactement le poids.

Lors de la mise en virage, la portance est inclinée dans le sens du virage.

Avant virage, la composante verticale de la portance, égale au poids, permettait de le contrer. En virage, la portance restant identique si rien n'est modifié, composante verticale de portance devient plus faible que le poids, et l'avion descend.

Par ailleurs, la composante horizontale de la portance conduit l'avion à tourner dans le sens de l'inclinaison.

Pour effectuer un virage à altitude constante, il est donc obligatoire d'augmenter l'incidence afin d'augmenter la portance jusqu'à contrer le poids.

L'augmentation d'incidence induit une augmentation de la traînée.

Ainsi, lors d'un vol en virage horizontal stabilisé :

- Si l'incidence n'est pas augmentée, le virage s'accompagne d'une perte d'altitude
- Le maintien d'altitude est réalisé par une augmentation de l'incidence
- A altitude constante (incidence augmentée), sans augmentation de la traction, la vitesse diminue

Remarque : la somme des forces sur l'avion est représentée sur le schéma par la flèche bleue. Cette force tend à changer la trajectoire de l'avion dans le sens de l'inclinaison pour provoquer le virage. Comme nous l'avons abordé dans une remarque précédente, sans stabilité en lacet, l'avion changerait de trajectoire sans s'orienter dans le sens du virage... Ce qui rendrait celui-ci impossible. La stabilité de route tend constamment via un léger dérapage (vent relatif venant de l'intérieur du virage), à changer l'axe de l'avion.



<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.d Décollage et atterrissage

Nous avons abordé dans le paragraphe sur les volets l'influence de la vitesse sol sur les distances de décollage/atterrissage. Elles évoluent d'environ 5% par nœud (kt).

On comprendra aisément qu'il **est fortement préférable de décoller/se poser face au vent !**



#### 1.1.4.d.i Masse volumique et pression

Rappelons les formules de portance et trainée vues précédemment :

$$T = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x(\alpha) \quad ; \quad P = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z(\alpha)$$

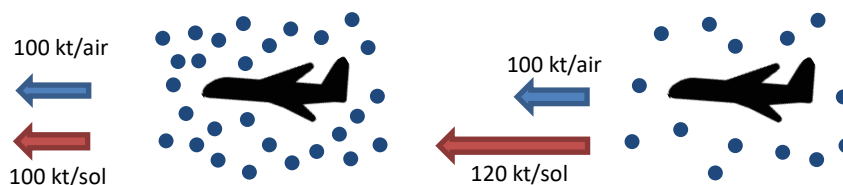
La masse volumique  $\rho$  :

- Diminue lorsque la température augmente
- Diminue lorsque la pression diminue

Ainsi, portance et trainée diminuent lorsque la température augmente et lorsque la pression diminue. Toutefois elles diminuent dans les mêmes proportions, le rapport  $\frac{P}{T}$  reste identique. Le changement des performances au décollage et à l'atterrissage n'est donc pas directement relié à la diminution de la portance et de la trainée de l'avion.

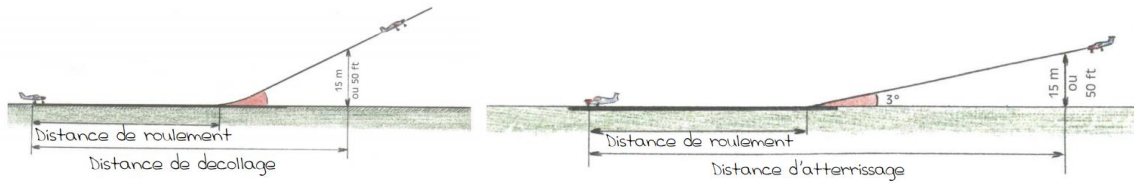
**Au décollage si  $\rho$  faible** : L'avion décolle sur une distance plus grande du fait de la diminution de la traction de l'hélice.

**A l'atterrissage si  $\rho$  faible** : L'avion se déplaçant dans la masse d'air, plus il fait chaud et moins il y a de pression, plus l'avion « doit voler vite » par rapport au sol pour avoir autant de particules d'air qui passent sur lui au cours du temps. Autrement dit, pour la même « vitesse air », il vole plus vite par rapport au sol. Il va donc atterrir sur une plus grande distance. On notera qu'en plus, il y a moins de trainée aérodynamique...



**De ce fait, distance de décollage et d'atterrissage sont plus importantes lorsqu'il fait chaud et que la pression est faible (dépression et/ou en altitude).**

Lors du décollage comme à l'atterrissage, on distingue la distance de roulement, de la distance de passage des 15m, qui correspond à la distance de décollage ou atterrissage complet d'un avion :



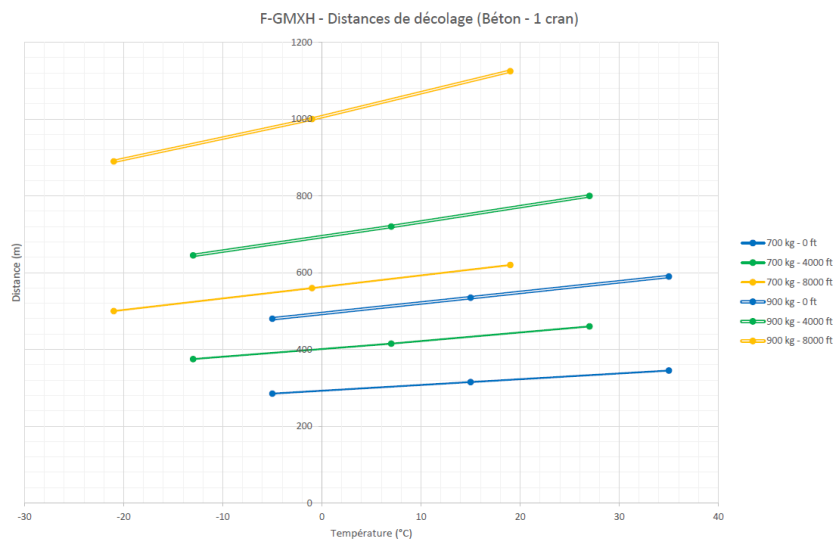
Voici un exemple de tableau de performance de décollage d'un DR400-120 CV donné dans le manuel de vol de l'avion :

**Performances de décollage**  
Par vent nul, volets au 1er cran, hélice Mac Cauley 71-47

Altitude	Température	Masse 900 Kg		Masse 700 Kg	
		Piste Béton	Piste Herbe	Piste Béton	Piste Herbe
0	Std -20	480 (225)	570 (315)	285 (130)	320 (165)
	Std = 15	535 (255)	640 (360)	315 (145)	355 (185)
	Std +20	590 (285)	715 (410)	345 (165)	395 (215)
4000	Std -20	645 (305)	800 (460)	375 (175)	430 (230)
	Std = 7	720 (345)	905 (530)	415 (195)	485 (265)
	Std +20	800 (390)	1025 (615)	460 (220)	540 (300)
8000	Std -20	890 (425)	1165 (700)	500 (235)	595 (330)
	Std = -1	1000 (475)	1350 (820)	560 (265)	675 (380)
	Std -20	1125 (535)	1550 (960)	620 (300)	760 (440)

Dans chaque case : - Distance totale en m depuis l'arrêt pour passer 15 m à  $V = 1,3 V_{SI}$   
- (Longueur de roulement pour atteindre  $1,1 V_{SI}$ )  
Influence du vent : pour 10 Kt multiplier par 0,78  
pour 20 Kt multiplier par 0,63  
pour 30 Kt multiplier par 0,52

Et les courbes associées :



Notez l'écart :

- 285m : Piste en béton – Niveau de la mer 1013.25 hPa – Température -5°C – 700 kg
- 1550m : Piste en herbe – 8000 ft/1013.25hPa – Température +19°C – 900 kg

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.d.ii Effets du vent

#### • Un exemple pour comprendre

Soit une masse d'air se déplaçant à vitesse constante, par exemple 10 kt. Soit un avion se déplaçant dans la masse d'air, dans la même direction que le vent, à 100 kt. La vitesse sol de l'avion est donc de 110 kt.



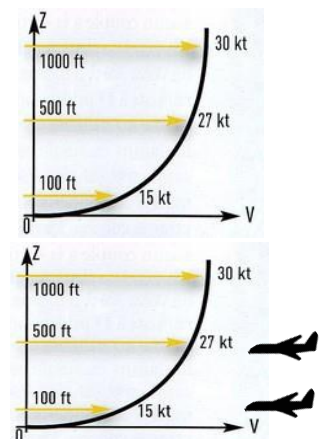
Si le vent s'arrête tout à coup, les lois de Newton nous disent que l'avion garde sa vitesse par rapport au référentiel terrestre, c'est-à-dire par rapport au sol. Autrement dit, l'avion se retrouve avec une vitesse air de 110 kt instantanément. Il va donc avoir tendance à garder sa vitesse sol !

*Par analogie, soit un homme marchant sur un tapis roulant, dans le bon sens. Le tapis avance à 10 km/h, l'homme à 5. Si le tapis tombe en panne, et s'immobilise immédiatement, l'homme se retrouve à 15 km/h par rapport au tapis ou sol.*

**Danger** : A l'atterrissage, face au vent, on peut comprendre l'effet négatif qu'aurait l'arrêt brutal du vent. Si l'avion se présente à 60 kt, avec un vent de face de 20kt, la vitesse sol est de 40 kt. Si le vent tombe d'un coup, l'avion volant à 60 kt se retrouve à 40kt par rapport au sol, et à l'air qui ne bouge plus, il décroche.

#### • Le gradient de vent et ses effets

Tout fluide en contact avec une surface prend la vitesse de cette surface au niveau du contact, par adhérence. Ainsi, le vent a une vitesse nulle au sol, et cette vitesse augmente avec l'altitude. Du fait de sa viscosité, voici ci-contre à quoi peut ressembler le profil de vitesse du vent avec l'altitude.



Imaginons un avion face au vent, au décollage ou à l'atterrissage, à la vitesse de 100 kt par rapport au sol. Supposons qu'il passe en un instant très court de 100 à 500 ft ou inversement, sur le profil de vitesse du vent vu précédemment.

Du fait de son inertie, l'avion aurait tendance à garder sa vitesse par rapport au sol égale à 100 kt.

On observerait alors :

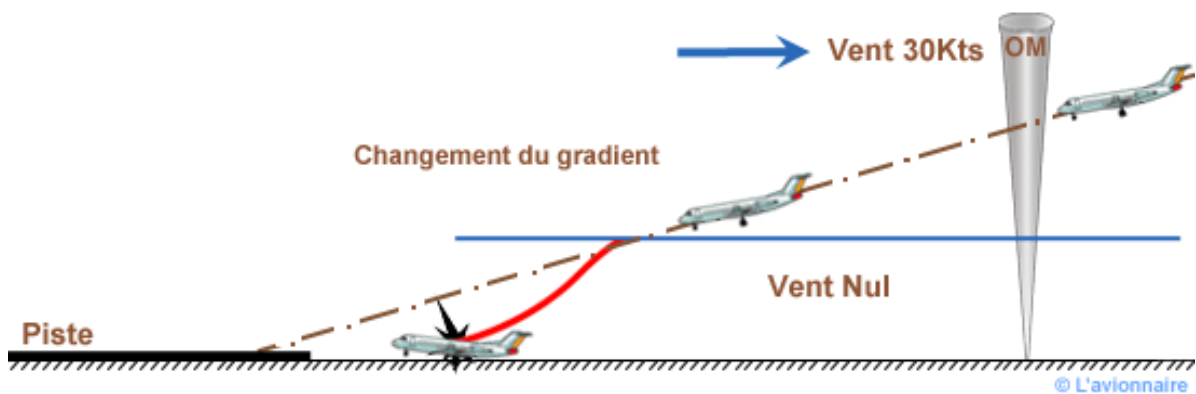
- Lors de la montée, le vent ayant une vitesse supérieure de 12 kt, l'avion se retrouverait à une vitesse air de 112 kt.
- Lors d'une descente, sa vitesse chuterait à 88 kt.

Il faut tenir compte de ces effets, qui sont toutefois plus faibles puisque l'avion passe d'une altitude à l'autre progressivement.

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

**Au décollage :** Lors du décollage, face au vent, plus l'avion s'élève, plus la vitesse du vent augmente. L'avion voit donc sa vitesse air augmenter légèrement en montant. **Il en profite pour monter !** Lors d'un décollage vent arrière, on comprend aisément qu'au-delà du fait que la distance de décollage est augmentée, la présence du gradient de vent va faire diminuer la vitesse air et mettre l'équipage en danger.

**A l'atterrissage :** Lors de la phase d'approche, un avion vole à une vitesse air de 30% supérieure à sa vitesse de décrochage dans la configuration approche (pleins volets). On dit aussi qu'il vole à 1,3 de  $V_S$ . Lors de la descente pour un atterrissage face au vent, un avion qui ne corrige pas l'effet du gradient verrait sa **trajectoire s'incurver vers le sol** :



Il faut donc tenir compte de l'évolution du vent en descente.

Par ailleurs, par fort vent, la vitesse air diminuant, la vitesse peut passer en dessous des 1,3 de  $V_S$ , et donc compromettre la sécurité du vol.

Pour éviter cela, à partir d'une composante de **vent de face** (uniquement)  $V_{face}$  de 10 kt, on ajoute à la vitesse d'approche une quantité appelée  $K_{ve}$  telle que :

$$\text{Si } V_{face} > 10kt, K_{ve} = \frac{V_{face} - 10}{2}$$

Normalement, l'avion se retrouvera à la bonne vitesse proche du sol du fait du gradient, il aura **résorbé**  $K_{ve}$ .

### • **Les rafales**

Lorsqu'il y a des **rafales** de vent, on peut majorer sa vitesse de la composante de la rafale de face :

$$V_{face}^{rafale} = V_{face}^{max} - V_{face}^{moyen}$$

Ceci afin d'éviter un décrochage si le vent tombe subitement. Mais attention ! Les distances d'atterrissage s'en trouveront augmentées !

<a href="http://www.cpage-sii.com">www.cpage-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

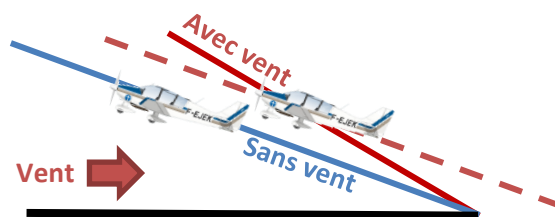
### • **Performances**

Pour diminuer les distances de décollage et atterrissage, et de fait la vitesse relative de l'avion par rapport au sol, ces procédures se font face au vent.

La pente de descente étant à la discrétion du pilote pouvant jouer sur le moteur (et les aérofreins ?), on s'intéresse à l'effet du vent sur la pente de montée qui elle, est toujours censée être la même sans vent pour une vitesse fixée :

- Un vent de face augmente la pente de montée
- Un vent arrière diminue la pente de montée

L'avion suit toujours la même pente dans l'air, mais la masse d'air se déplace avec le vent. On peut imaginer que si le vent est égal à la vitesse de l'avion, celui-ci monterait verticalement comme un ascenseur...



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

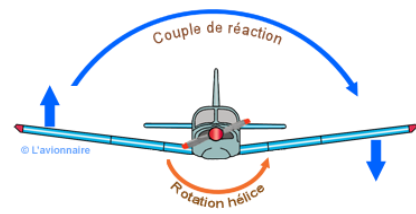
### 1.1.4.e Les effets moteur

Comme nous parlons dans ce paragraphe du vol motorisé après avoir étudié différents phénomènes comme le lacet inverse et le roulis induit, il me semble intéressant d'aborder les effets moteur.

Pour la suite, prenons l'exemple d'un avion dont l'hélice « tourne à droite », c'est-à-dire que vue de la place pilote, le haut de la pale part à droite, ou encore, elle tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

#### 1.1.4.e.i Couple de renversement

Lorsque l'hélice tourne, le moteur « force » sur celle-ci dans le sens de sa rotation. Il en résulte par le principe d'action/réaction que l'hélice force sur l'avion dans le sens inverse. Cette action est un couple, appelé couple de renversement, qui tend à faire tourner l'ensemble de l'avion dans le sens inverse de celui de l'hélice (comme pour un hélicoptère qui a besoin d'un rotor anti



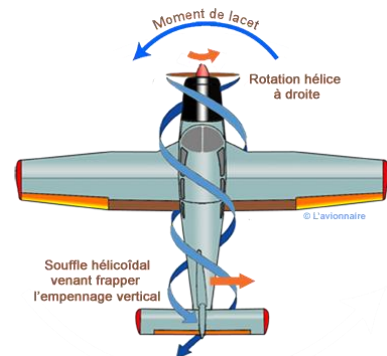
couple pour ne pas tourner sur lui-même).

On pourra remarquer que l'usure du pneu gauche des avions dont l'hélice tourne à droite est plus importante à cause du couple de renversement qui sur contraint la roue gauche...

#### 1.1.4.e.ii Souffle hélicoïdal

Lorsque le moteur tourne, l'hélice entraîne l'air en rotation, ce qui se traduit par :

- Un mouvement hélicoïdal de l'air autour de l'avion
- Une force sur la dérive vers la droite
- Un mouvement de lacet de l'avion vers la gauche



Cette force est directement reliée au régime moteur. Ainsi, à faible puissance, l'effet est moindre, et en régime plein gaz, l'effet est important.

Un avion est conçu pour contrer cet effet en régime de croisière... Ainsi, dès lors que le régime sera différent, il faudra corriger cet effet :

- Plus faible ? Action de correction en lacet à gauche
- Plus fort ? Action de correction en lacet à droite

L'effet du souffle hélicoïdal est très visible au décollage. L'avion « veut partir à gauche », et il faut contrer cet effet par du lacet à droite...

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.4.e.iii Effet gyroscopique

Un gyroscope est un système mécanique composé d'un solide « assez lourd » qui est mis en rotation autour d'un axe et qui reste dans une direction constante sans sollicitations extérieures.

Lorsque l'on impose une rotation de la masse en rotation autour d'un axe perpendiculaire à son axe de rotation, elle réagit en créant une rotation autour de l'axe perpendiculaire aux deux premiers. Essayez avec un hand spinner par exemple.



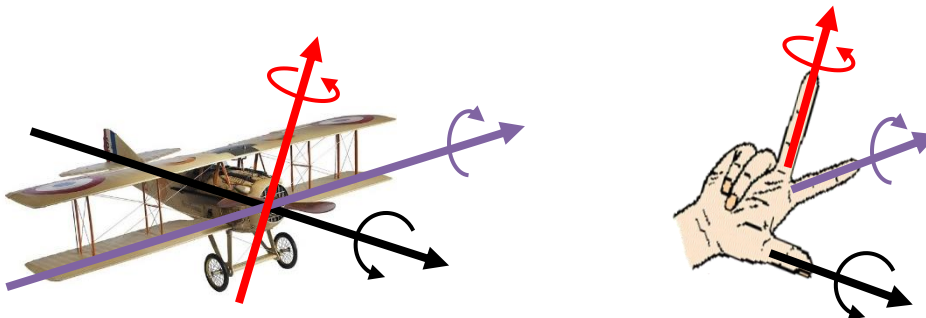
Une hélice possède le même comportement. Elle tourne dans l'axe longitudinal de l'avion. Lorsque l'on impose une rotation sur

- L'axe de tangage à l'avion, il y a génération d'une rotation en lacet
- L'axe de lacet, il y a génération d'une rotation en tangage

Il est possible de déterminer le sens du mouvement généré en utilisant sa main droite :

- Pouce (axe moteur)
  - o Tendre le pouce parallèlement à la direction de l'hélice
  - o La direction du pouce doit être choisie telle que lorsqu'on regarde le pouce d'au-dessus, l'hélice tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, ou sens « direct »
- Index (axe mouvement imposé)
  - o Placer l'index parallèlement à la direction du mouvement imposé
  - o L'orienter tel que vu de dessus, le mouvement imposé soit en sens direct
- Majeur (axe et mouvement résultant)
  - o Tendre le majeur, il sera dans une direction perpendiculaire aux deux premiers doigts : c'est l'axe autour duquel un mouvement est généré
  - o Regarder le majeur de dessus : la rotation engendrée sera en sens direct

Exemple : sur un avion ayant l'hélice qui tourne à droite, on impose un mouvement de tangage à piqué, il en résulte un mouvement de lacet à gauche :



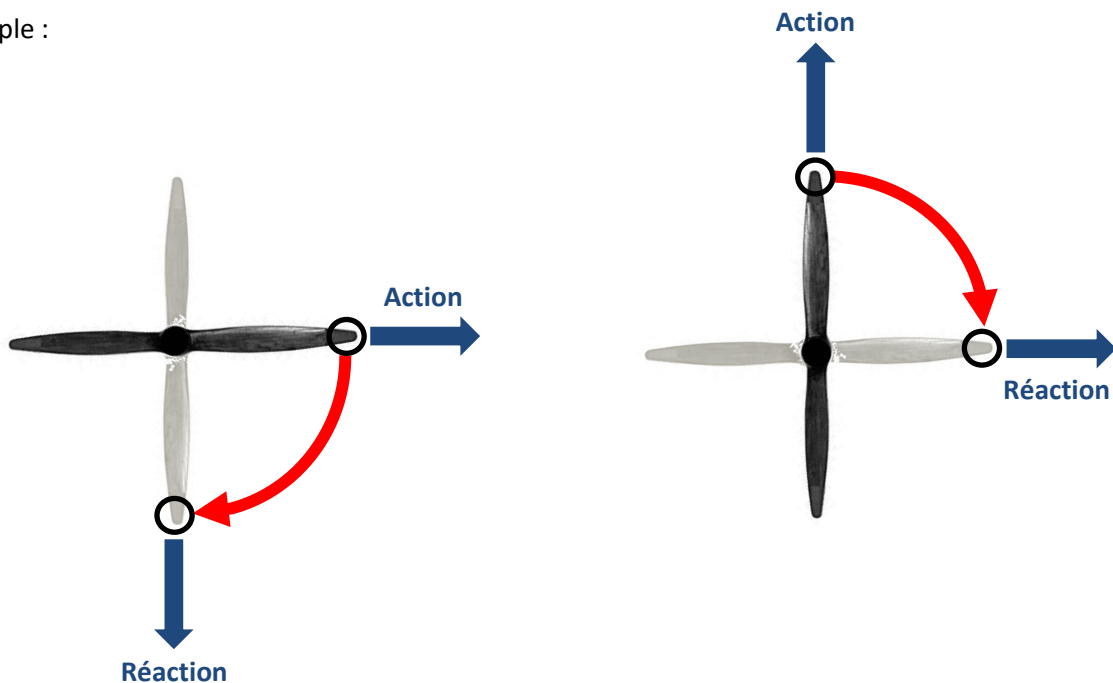
<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Finalement, voici un moyen très simple de se souvenir des effets gyroscopiques :

- S'imaginer regarder l'hélice tourner depuis la place pilote
- Regarder le bout de pale quand il est dans la direction de l'action que l'on va réaliser
- Voir la direction indiquée par le bout de pale  $\frac{1}{4}$  de tour plus loin (dans le sens de rotation de l'hélice)
- Cette direction, c'est la direction vers laquelle va aller l'avion en lacet du fait de l'effet gyroscopique

L'avantage de cette méthode, c'est qu'elle s'adapte au sens de rotation de l'hélice, et est immédiate pour identifier l'effet gyroscopique engendré 😊

Exemple :

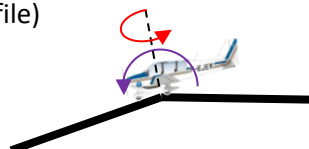


Conclusions pour une hélice qui tourne à droite :

- Tangage en montée  $\Rightarrow$  Lacet à droite
- Lacet à droite  $\Rightarrow$  Tangage à piqué

Remarques :

- Un avion à train classique subit un effet gyroscopique en lacet à gauche (hélice tournant à droite) lors de sa mise en ligne de vol
- Un avion subit l'effet gyroscopique lors d'un décollage en montagne, au moment où la piste se met à descendre (changement de profile)



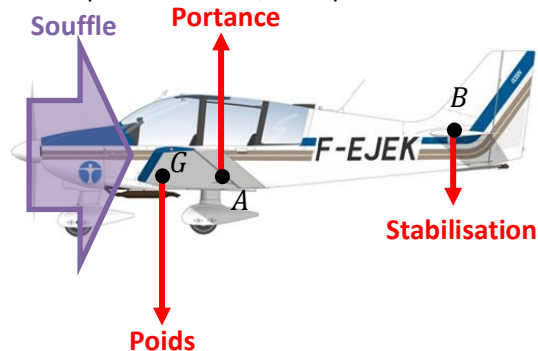


<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

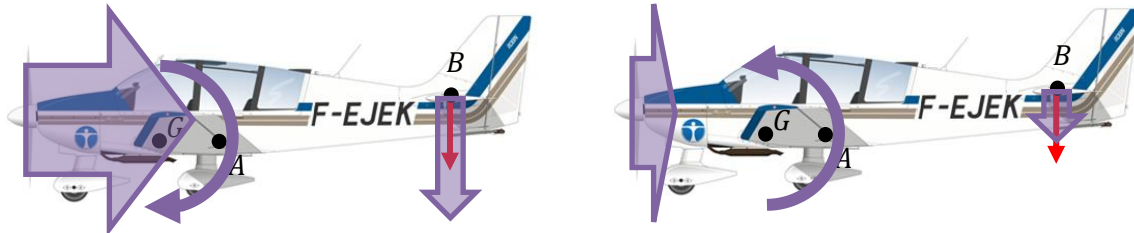
### 1.1.4.e.v Couple cabreur/piqueur

#### • Effet sur la profondeur

Reprenons le schéma d'un avion en palier stabilisé, en équilibre sur l'axe de tangage :



La « petite portance » créée par l'empennage de profondeur est dirigée vers le bas. L'augmentation de la puissance de l'avion va augmenter le vent reçu par la profondeur, et augmenter cette portance vers le bas. La réduction de la puissance va avoir l'effet inverse.



Ainsi, et en l'absence d'autres phénomènes :

- Lors d'une augmentation de puissance, l'avion réagit à cabrer
- Lors d'une diminution de puissance, l'avion réagit à piquer

#### • Effet par rapport au CDG

Selon le positionnement « en hauteur » du moteur sur l'avion, l'effet sur la profondeur peut être amplifié ou contré et induire une réaction inverse, c'est-à-dire :

- Lors d'une augmentation de puissance, l'avion réagit à **piquer**
- Lors d'une diminution de puissance, l'avion réagit à **cabrer**

En effet, si le moteur est en hauteur par rapport au centre de gravité, l'augmentation de poussée va induire un couple piqueur, et inversement :



C'est par exemple très prononcé sur mon ULM Springbok 3000 de European Air Wings...



### 1.1.4.e.vi Remarques

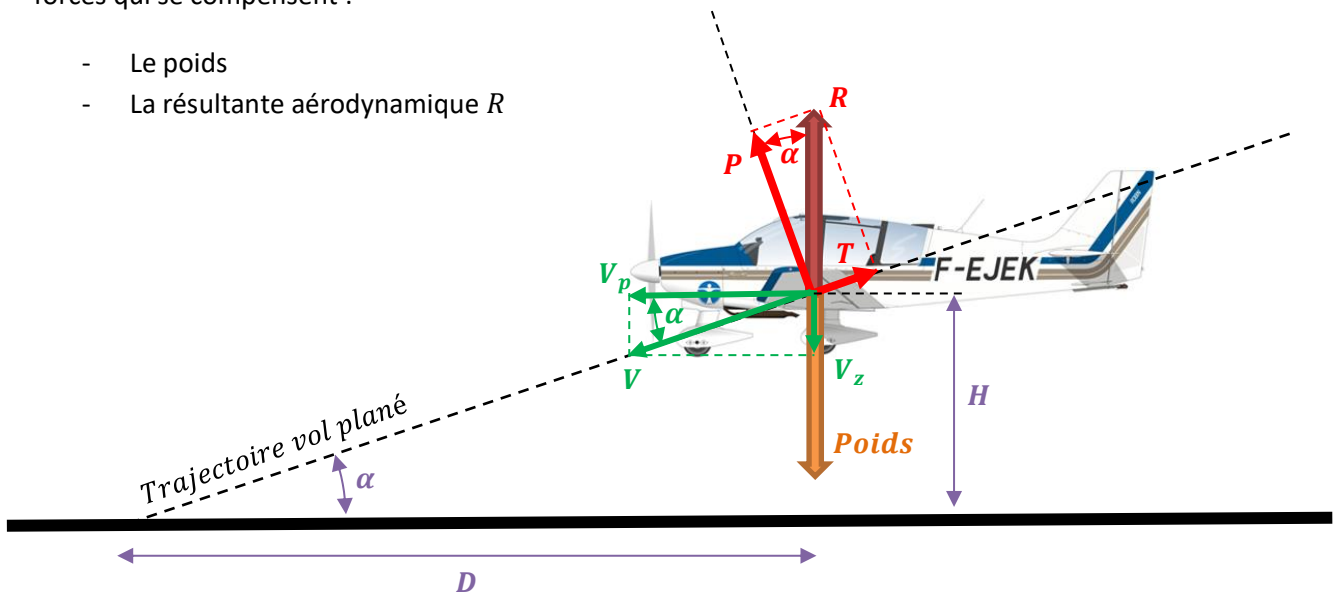
Plus les moteurs sont puissants et le vol est lent, plus les effets sont visibles. Les avions sont conçus pour annuler les effets moteurs en croisière. Dans les autres phases du vol, il faut les corriger.

## 1.1.5 Le vol plané

### 1.1.5.a Notion de finesse

Lorsqu'un avion vole en vol plané, il atteint une trajectoire rectiligne uniforme sous l'action de deux forces qui se compensent :

- Le poids
- La résultante aérodynamique  $R$



On peut remarquer sur cette image que l'angle  $\alpha$  est tel que :  $\tan \alpha = \frac{T}{P} = \frac{H}{D} = \frac{V_z}{V_p}$

En utilisant les formules de  $P$  et  $T$ , on a :  $\frac{P}{T} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 S C_z}{\frac{1}{2}\rho V^2 S C_x} = \frac{C_z}{C_x}$ , ce qui donne :

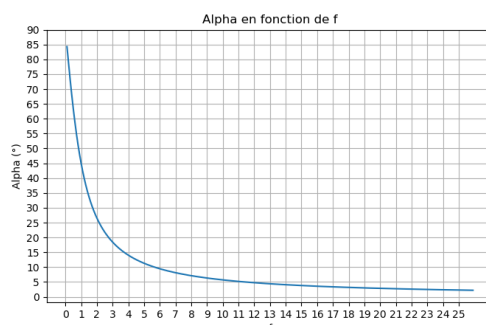
$$\tan \alpha = \frac{T}{P} = \frac{H}{D} = \frac{V_z}{V_p} = \frac{C_x}{C_z}$$

On définit la finesse comme le rapport :  $f = \frac{1}{\tan \alpha}$

$$f = \frac{\text{Portance}}{\text{Trainée}} = \frac{\text{Coefficient de portance}}{\text{Coefficient de trainée}} = \frac{\text{Distance horizontale}}{\text{Distance verticale}} = \frac{\text{Vitesse horizontale}}{\text{Vitesse verticale}}$$

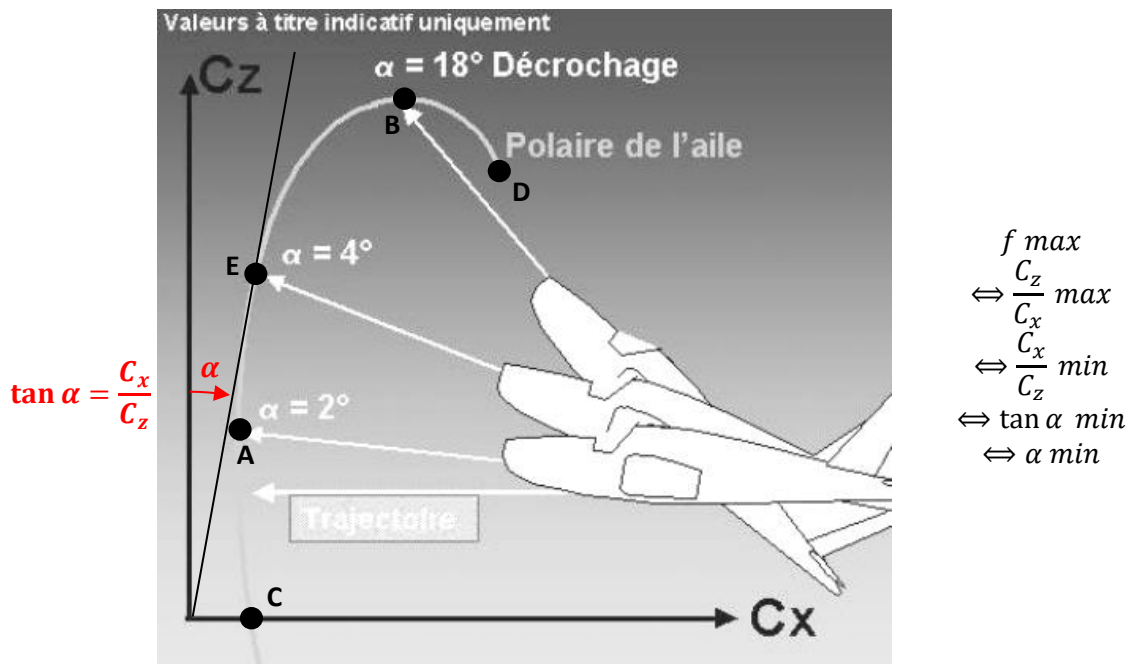
$$f = \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{P}{T} = \frac{C_z}{C_x} = \frac{D}{H} = \frac{V_p}{V_z}$$

Ainsi, pour aller le plus loin possible en vol plané, il suffit d'avoir  $\alpha$  le plus petit possible, c'est-à-dire la plus grande finesse possible. Voici une courbe illustrant la valeur de l'angle  $\alpha$  en fonction de la finesse :



### 1.1.5.b Incidence de finesse maximale

Soit la polaire d'une aile ci-dessous :



En tout point de la courbe, le rapport  $\frac{C_z}{C_x}$  est le coefficient directeur de la droite qui joint l'origine au point considéré. Le meilleur rapport  $\frac{C_z}{C_x}$  correspond donc au point où cette droite a la pente la plus forte, soit le point E. On peut ainsi ajouter aux points déjà définis précédemment le point :

- **E : Point de finesse maximale associé à une incidence fixée**

Le meilleur rapport  $f = \frac{D}{H} = \frac{C_z}{C_x} = \frac{P}{T} = \frac{V_p}{V_z}$  est donc atteint pour une incidence donnée et se trouve sur la polaire.

Remarque : ce sont exactement les mêmes conclusions que pour le décrochage.

**Décrochage et finesse maximale sont définis uniquement par une incidence**

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.5.c Vitesse de finesse maximale

#### 1.1.5.c.i Introduction

Rappelons que la polaire d'un aéronef est définie en fonction de son profil aérodynamique, et non du poids de l'appareil, pour différentes incidences. En plané, il suffirait d'afficher l'incidence de finesse maximale pour aller le plus loin. Toutefois, très peu d'avions sont équipés d'un incidence mètre ([ICON A5](#)). Il faut donc utiliser une « vitesse de finesse maximale ». Mais comme nous l'avons vu lorsque nous avons parlé du décrochage, pour une même vitesse, l'incidence dépend du poids de l'avion. Autrement dit, **pour avoir la même incidence, celle de la finesse max par exemple, il y a une vitesse associée à chaque masse.**

On parle donc de « **vitesse de finesse max** ». Cette vitesse est évidemment très importante en cas de panne moteur en avion et pour les planeurs puisqu'elle correspond à la vitesse permettant de planer le plus loin possible.

Compte tenu du décalage des polaires en présence de volets vu plus haut dans ce cours, on comprendra qu'il est préférable de planer volets rentrés, la finesse max étant dégradée par ceux-ci.

#### 1.1.5.c.ii Influence du poids

La résultante aérodynamique  $R$  devant contrer le poids  $Poids$  de l'appareil pour une incidence donnée ( $C_z$  constant) et une trajectoire définie par la finesse max ( $\alpha$  constant, pente constante), il en résulte une vitesse de finesse maximale correspondant à l'égalisation :

$$R = Poids \Leftrightarrow \frac{Portance}{\cos \alpha} = Poids \Leftrightarrow Portance = Poids * \cos \alpha$$

$$\frac{1}{2} \rho V^2 S C_z = Poids * \cos \alpha \Leftrightarrow V^2 = \frac{2 * Poids * \cos \alpha}{\rho S C_z}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{2 * Poids * \cos \alpha}{\rho S C_z}}$$

Autrement dit, pour que la résultante  $R$  puisse contrer l'augmentation de poids pour la même incidence de finesse max définie par la polaire ( $C_z$  fixé) et sur la même pente définie par l'angle  $\alpha$ , il est nécessaire que l'appareil vole plus vite (augmentation de  $V_p$ ).

Exemple pour un DR221 :

**NOTA** : Vitesse de la plus grande finesse, volets rentrés et moteur réduit à fond :

$$V_i = 145 \text{ Km/h à } 740 \text{ Kg}$$

$$V_i = 130 \text{ km/h à } 600 \text{ Kg}$$

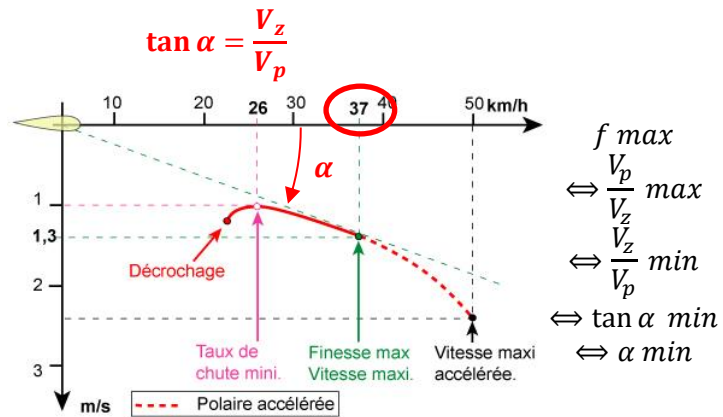
Conséquences :

- **Plus l'avion est lourd, plus la vitesse de finesse max est importante, pour la même finesse**
- Les planeurs de compétitions ont réservoirs d'eau afin de les « ballaster », ce qui leur permet d'aller plus vite pour la même finesse !

### 1.1.5.c.iii Polaire des vitesses

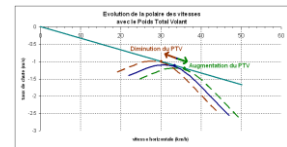
Pour déterminer la vitesse de finesse max, on utilise la polaire des vitesses où l'on trace  $V_z$  en fonction de  $V_p$ .

La meilleure finesse est atteinte pour le meilleur rapport  $\frac{V_p}{V_z}$ , soit le plus petit rapport  $\frac{V_z}{V_p}$ . Il faut donc prendre la tangente à la courbe ci-dessus dont l'inclinaison est la plus faible. On obtient alors la vitesse de finesse maximale en lisant l'abscisse du point trouvé (37 km/h).



Remarques :

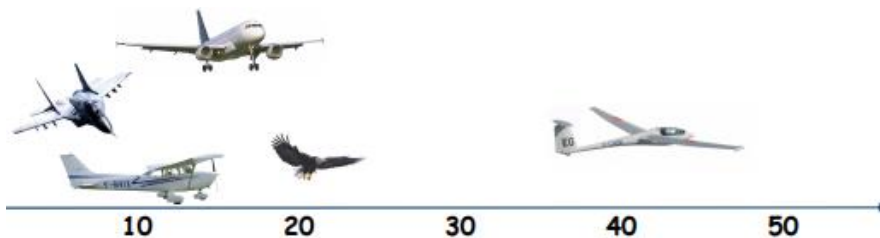
- Cette polaire se décale vers le bas à droite lorsque le poids de l'appareil augmente (augmentation de  $V_p$  et  $V_z$  dans les mêmes proportions comme vu au paragraphe précédent). La pente de la tangente reste toutefois la même, évidemment.
- Nous n'aborderons pas l'effet du vent horizontal et des courants verticaux, qui translatent cette courbe verticalement et horizontalement. Les pilotes de planeurs maîtrisent cela !
- On trouve une autre information intéressante sur cette courbe : la vitesse de taux de chute mini, pour rester le plus longtemps possible en vol, sans toutefois aller au plus loin possible !



### 1.1.5.d Classification des finesses

Le meilleur appareil est celui qui présente une polaire ayant un point  $E$  tel que la droite tangente à la courbe soit la plus verticale possible.

Voici un ordre de grandeur des finesses d'avions et planeurs actuels :



Concrètement :  $Finesse = f = D/H$ , autrement dit :  $D = H * Finesse$ .

**Un avion à la hauteur  $H$  plane  $f$  fois son altitude  $H$**

Exemples :

- Un avion ayant une finesse de 10 plane 10 fois son altitude. 10 est l'ordre de grandeur de la finesse de nos avions de clubs.
- Un avion de ligne de finesse 25 volant à 30 000 ft, ou 10 000 m, plane sur 250 km !!!
- Un planeur qui vole à 144 km/h (40 m/s) et qui a un variomètre qui indique -0,8 m/s a une finesse de :  $f = \frac{V}{V_z} = \frac{40}{0,8} = 50$

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.1.6 Le facteur de charge

### 1.1.6.a Définition

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

C'est en quelque sorte le poids supporté par les passagers sous l'action des accélérations subies lors du vol (virages, ressources). On parle donc de « poids apparent », c'est le poids que le pilote a l'impression de peser sous l'effet du facteur de charge.

Ce nombre est sans unités, on parle parfois de « g ». Subir une accélération de 2g correspond à subir 2 fois son poids. Dans le cas où  $n = 0$ , on est juste décollés de son siège ([vidéo de l'avion 0g](#)). Lorsque  $n = -1$ , c'est comme si on avait la tête en bas.

### 1.1.6.b Effets

#### 1.1.6.b.i Sur la structure

Un facteur de charge positif oblige les ailes à porter une charge plus importante que le poids réel de la machine, augmentant les contraintes que subissent les matériaux. Un facteur de charge négatif sollicite les ailes à l'envers...

Un facteur de charge trop important peut conduire à la rupture de l'aéronef.

Les avions sont testés et certifiés pour des facteurs de charge limités. Pour un DR400 par exemple, il peut varier dans la plage  $[-1,9g; +3,8g]$ .

#### 1.1.6.b.ii Sur les humains

Le facteur de charge a une grande influence sur le sang dans le corps humain. Sous facteurs de charge positifs, le sang descend dans les jambes, causant un voile noir (perte de la vision) et pouvant aller jusqu'à la perte de connaissance. Un facteur de charge négatif crée un afflux de sang sous pression dans la tête une un voile rouge sur la vision.

Regardez [cette vidéo](#) en anglais d'un essai en centrifugeuse.

Un humain supporte au maximum 9g en positif (avions de chasse) avec des équipements permettant de comprimer les jambes pour que le sang reste dans la partie supérieure du corps (combi anti-g).

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.6.b.iii Sur le décrochage

Nous avons vu que le décrochage intervient à une incidence fixe.

Nous avons dit que lors qu'un vol rectiligne uniforme ( $n=1$ ), cette incidence était assimilable à une vitesse donnée, appelée vitesse de décrochage.

Or, nous avons vu que cette vitesse de décrochage dépendait de la masse de l'avion. **Un facteur de charge, c'est « comme si l'avion était plus lourd »**. A un facteur de charge de 2, l'avion « pèse deux fois son poids ». Donc, sous facteur de charge, l'incidence est augmentée.

Lorsque l'avion est soumis à un facteur de charge ( $n>1$ ) (vol non rectiligne : ressources, virages), l'incidence évolue et nous donc rapproche de l'incidence de décrochage. Autrement dit, **la vitesse à laquelle le décrochage intervient est augmentée**.

La vitesse de décrochage  $V_S$  (stall) évolue avec le facteur de charge ainsi :

Ainsi :

$$V_S^{n>1} = V_S^{n=1} * \sqrt{n}$$

La vitesse de décrochage augmente donc avec le facteur de charge.

Exemple : soit un avion de vitesse de décrochage 100 km/h et de vitesse maximale de 200 km/h. Le facteur de charge augmentant la vitesse de décrochage à 200 km/h se calcul en résolvant  $200 = 100 * \sqrt{n}$ , soit  $\sqrt{n} = 2$ , ou encore  $n = 4$ . Un avion classique ne peut donc pas voler à plus de 4g sans décrocher.

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.1.6.c Les situations rencontrées

#### 1.1.6.c.i Vol en palier ligne droite

En vol stabilisé en palier à altitude constante, le facteur de charge vaut 1.

L'avion subit une seule fois son poids.

#### 1.1.6.c.ii Vol dos

En vol dos, l'avion subit un facteur de charge de -1.

Bien que la structure puisse le supporter, il faut des avions capables d'être manœuvrés facilement du vol en palier au vol dos, et il est nécessaire que les fluides et l'essence dans l'avion soient toujours exploitables (huile moteur, essence) lorsque l'avion est à l'envers...

#### 1.1.6.c.iii Ressource

Lors de variations brusques d'assiette, les facteurs de charges observés peuvent être élevés.

On prend souvent l'exemple du pilote qui passe au-dessus de sa maison pour impressionner, et qui finit par s'écraser sur celle-ci...

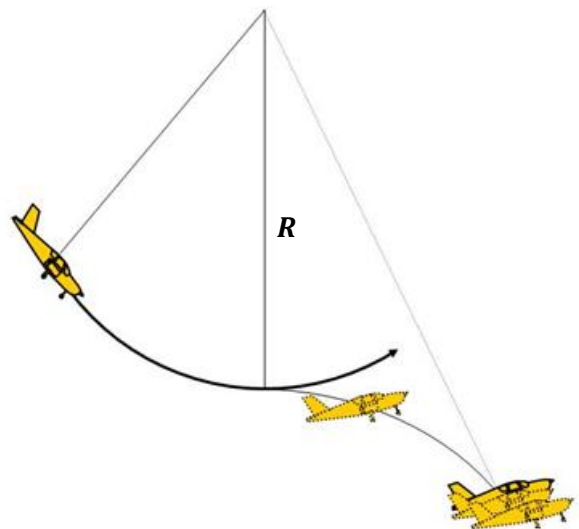
#### Tirer sur le manche augmente le facteur de charge !

Le facteur de charge en ressource vaut :

$$n = 1 + \frac{V^2}{Rg}$$

Avec :

- V la vitesse de l'avion
- R le rayon de la ressource
- g l'accélération de la pesanteur



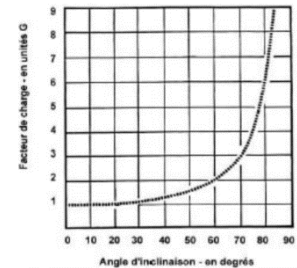
La vitesse de décrochage augmente donc de manière importante lors de ressources. Il faudra toujours veiller à avoir des actions souples et progressives à cabrer.

### 1.1.6.c.iv Vol en palier - Virage

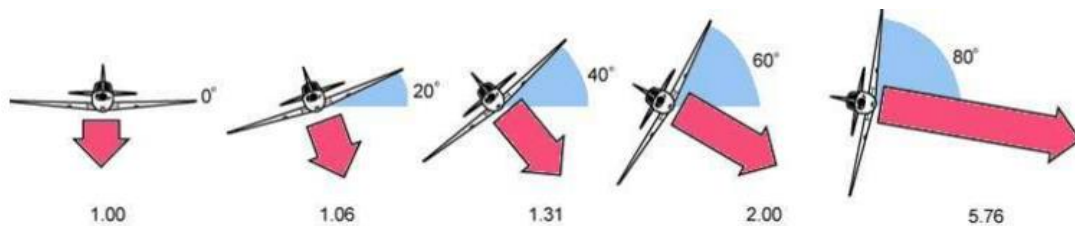
En virage à altitude constante, comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire d'augmenter l'incidence, ce qui nous rapproche quelque peu de l'incidence de décrochage. La vitesse de décrochage en palier est donc augmentée. Elle est directement reliée à l'angle d'inclinaison de l'avion via le facteur de charge  $n$  généré.

$$n = \frac{1}{\cos \varphi}$$

A retenir donc : En vol à altitude constante, le facteur de charge augmente avec l'inclinaison



Le facteur de charge augmente donc avec l'inclinaison.



Ainsi :

$\varphi$	30°	45°	60°
$n$	1,15	1,41	2
$V_s$	+7%	+18%	+41%

Exemples concrets :

- Je vole à 130 km/h, ma vitesse de décrochage est de 100 km/h. Si je fais un virage à altitude constante à 60° d'inclinaison, j'ai l'impression de peser deux fois mon poids et ma vitesse de décrochage devient 141 km/h, je décroche...
- En reprenant l'exemple précédent d'un avion décrochant à 100 km/h quand  $n = 1$  et à 200 km/h quand  $n = 4$ , on résout  $\frac{1}{\cos \varphi} = 4 \Leftrightarrow \cos \varphi = \frac{1}{4} \Leftrightarrow \varphi = \cos^{-1}\left(\frac{1}{4}\right) \approx 75^\circ$ . Il n'est donc pas possible d'effectuer un virage en palier symétrique à plus de 75° d'inclinaison sans décrocher (en supposant que l'avion arrive à maintenir 200 km/h).

On retient les ordres de grandeurs suivants :

$\varphi$	30°	45°	60°
$V_s$	+10%	+20%	+40%

Dans les phases de vol d'attente ( $V = 1,45V_s$ ), voire dans les phases de vol lent ( $V = 1,2V_s$  ou  $1,3V_s$ ), on limite les inclinaisons de vol afin de maintenir une sécurité face au décrochage :

Phase	Vol lent		Attente
Vitesse	$1,2V_s$	$1,3V_s$	$1,45V_s$
Angle maxi	10°	20°	37°

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.II. Le vol d'aérostat

Un aérostat est un aéronef « plus léger que l'air », volant grâce à la poussée d'Archimède. Il n'a pas besoin de se déplacer (à la différence d'un aérodyne) pour avoir une force portante.



On distingue deux grandes familles d'aérostats :

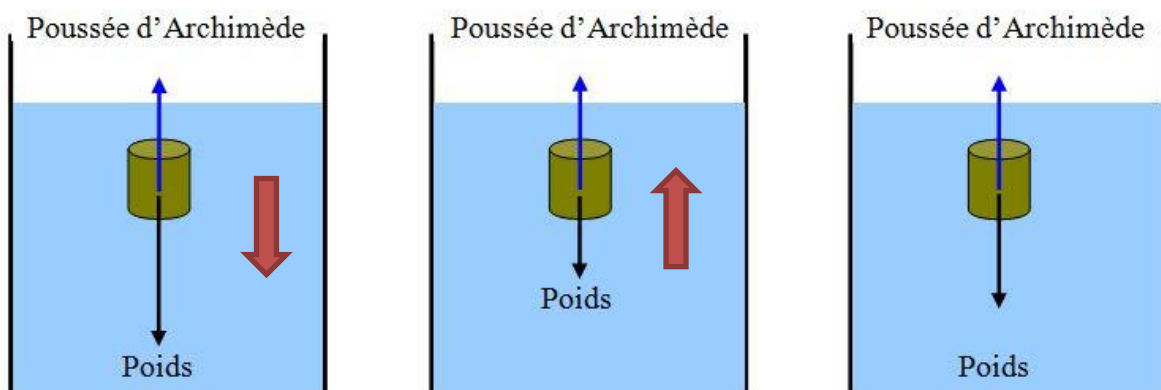
- Ballons à air chaud, souvent ouverts (même pression et même composition de l'air dans et hors du ballon)
- Ballons à gaz, fermés, enfermant un gaz de masse volumique plus faible que l'air environnant (ex : ballon gonflé à l'hélium)

Dans ce chapitre, je n'aborderai les principes que pour le ballon à air chaud. On comprendra rapidement que la majorité des points abordés sont applicables quel que soit le type d'aérostats.

### 1.II.1 La poussée d'Archimède

#### 1.II.1.a Principe

**Tout corps plongé dans un fluide soumis à la gravité, subit une force parallèle à la gravité, de sens opposée, et égale au poids du fluide déplacé.**



C'est la poussée d'Archimède qui permet aux bateaux de flotter.

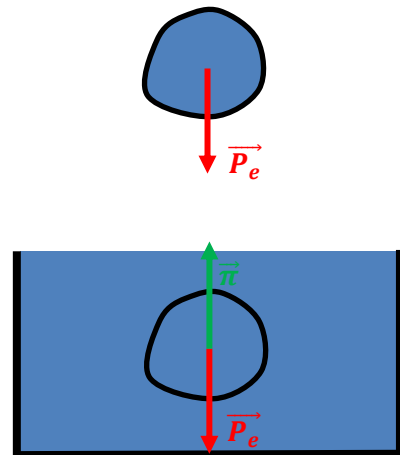
Mais c'est aussi elle qui permet aux aérostats de voler.

<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.II.1.b Quelques explications

Sans rentrer dans une démonstration trop compliquée, nous allons essayer de montrer en quoi la poussée d'Archimède n'existe qu'en présence de gravité, et pourquoi elle est égale au poids du fluide déplacé.

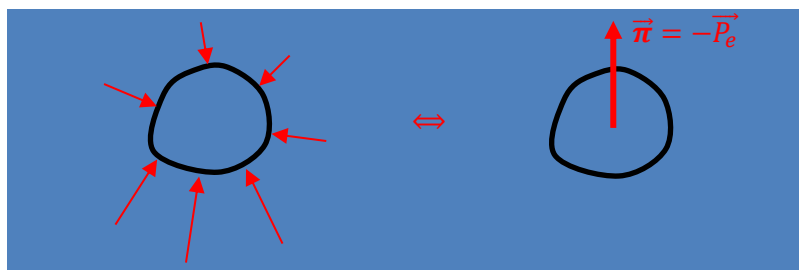
Pour simplifier, considérons de l'eau à la surface de la Terre. Imaginons que nous possédions une enveloppe fermée comme un ballon, indéformable, extrêmement légère (assez pour négliger son poids), et remplie d'eau soumise à son poids  $\vec{P}_e$ . Hors de l'eau, l'enveloppe tombe du fait de la gravité. Supposons maintenant que cette enveloppe soit plongée dans de l'eau calme. Qu'on mette l'enveloppe ou qu'on l'enlève, l'eau est en équilibre.



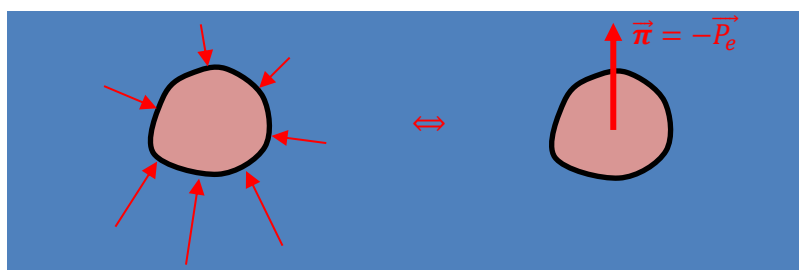
Pour la suite, on peut indifféremment considérer l'enveloppe présente, ou imaginer une enveloppe fictive délimitant le volume d'eau étudié que l'on appellera « système ».

Le système étant à l'équilibre, on peut en déduire que la somme des forces sur celui-ci est nulle ( $\sum \vec{F} = \vec{0}$ ). Or, il est soumis à son poids  $\vec{P}_e$  et à la pression de l'eau autour de lui. On peut donc dire que la somme de l'ensemble des petites forces de pression sur le système crée une force  $\vec{\pi}$  égale au poids du système  $\vec{P}_e$ , et opposée à celui-ci :  $\vec{\pi} = -\vec{P}_e$ . Cette force est appelée « Poussée d'Archimède », elle est égale au poids de l'eau du système étudié et de sens opposé à la gravité.

Du fait de la gravité, dans tous les fluides, la pression augmente avec la profondeur. Voici une représentation de quelques petites forces issues de la pression sur le système ainsi que son équivalent en poussée d'Archimède :



Finalement, imaginons que l'on enlève l'eau pour la remplacer par un solide quelconque de même volume et limites :



<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

Ce solide est soumis à la même résultante de pression que le volume d'eau présent précédemment. La force est donc égale au poids du volume d'eau présent avant de mettre l'objet, c'est toujours la poussée d'Archimède 😊

Remarque : si on reprend toute cette explication en supposant qu'il n'y a pas de gravité, la pression est constante tout autour du système qui n'est soumis à aucun poids et est à l'équilibre, il n'y a donc pas de poussée d'Archimède.

## 1.II.2 La force aérostatique

### 1.II.2.a Définition

Dans un ballon à air, un grand volume d'air est chauffé pour qu'il soit plus léger que l'air ambiant. La présence de ce volume à une température différente de celle de l'air ambiant, génère :

- Une force vers le bas, correspondant au poids de l'air qui le compose
- Une force vers le haut, poussée d'Archimède qui s'exerce sur ce volume d'air

Notons  $V$  le volume du ballon,  $\rho_{int}$  la masse volumique de l'air dans le ballon et  $\rho_{ext}$  la masse volumique de l'air de l'atmosphère, air ambiant hors du ballon. Le poids d'un volume d'air est égal au produit de son volume par sa masse volumique :  $P = \rho V g$  avec  $g$  l'accélération de la pesanteur.

Le poids de l'air dans le ballon s'exprime ainsi :

$$P = Poids_{air\ ballon} = V \rho_{int} g$$

Il faut bien comprendre comment se comporte la poussée d'Archimède : le ballon étant présent dans l'air ambiant, il déplace un volume d'air de l'atmosphère égal à son propre volume. Le poids du volume d'air déplacé (égal à la poussée d'Archimède) s'exprime donc de la manière suivante :

$$\pi = Poussée\ Archimède = Poids_{air\ déplacé} = V \rho_{ext} g$$

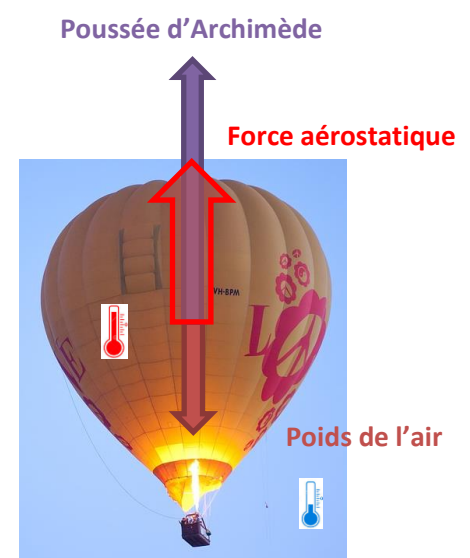
**La force aérostatique est la différence entre la norme de la poussée d'Archimède et la valeur du poids de l'air chaud dans le ballon.** Cela correspond donc à la force verticale totale générée par l'air chaud.

La force aérostatique s'exprime donc ainsi :

$$F_a = Force\ aérostatique = \pi - P = V \rho_{ext} g - V \rho_{int} g$$

$$F_a = V * (\rho_{ext} - \rho_{int}) g$$

Cette force s'exprime en Newton (N).



<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.II.2.b Influence de la température

Lorsque l'air dans le ballon est à la même température que l'air hors du ballon (les pressions sont égales à la pression atmosphérique), les masses volumiques de l'air intérieur et extérieur sont égales ( $\rho_{ext} - \rho_{int} = 0$ ). La force aérostatique est donc nulle.

**Pour qu'il y ait force aérostatique, il faut donc une différence de température entre l'air dans le ballon et l'air hors du ballon.**

En supposant que l'air est un gaz parfait (vous en apprendrez plus en physique), pour un volume donné, et en appelant  $P$  sa pression,  $M$  sa masse molaire,  $T$  sa température en kelvin et  $R$  la constante universelle des gaz parfaits, on a :

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

On a donc une relation directe entre  $\rho$  et  $T$ . Plus la température est importante, plus la masse volumique est faible.

Rappelons la formule de la force aérostatique :  $F_a = V(\rho_{ext} - \rho_{int})g$

$$\text{Soit : } F_a = V(\rho_{ext} - \rho_{int})g = V\left(\frac{PM}{RT_{ext}} - \frac{PM}{RT_{int}}\right)g$$

Dans un ballon à air :

- La pression  $P$  est la même dans et hors du ballon
- L'air étant de même composition, la masse molaire  $M$  est identique
- La constante  $R$  est une constante...

On a donc :

$$F_a = \frac{VPMg}{R} \left( \frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) = \frac{VPMg}{R} * (T_{int} - T_{ext})$$

$$F_a = k(T_{int} - T_{ext}) \quad k > 0$$

Cette différence de température ( $T_{int} - T_{ext}$ ) est créée par apport de chaleur dans le ballon, ce qui induit une augmentation de température de l'air dans l'aérostatis par rapport à l'air ambiant, il se retrouve alors plus léger que l'air ambiant, ce qui génère une force verticale vers le haut.

**On notera que plus l'air extérieur est chaud, moins il y a de force aérostatis ! Ou encore, plus l'air intérieur est froid, moins il y a de force aérostatis. C'est la différence intérieur/extérieur qui pilote cette force.**

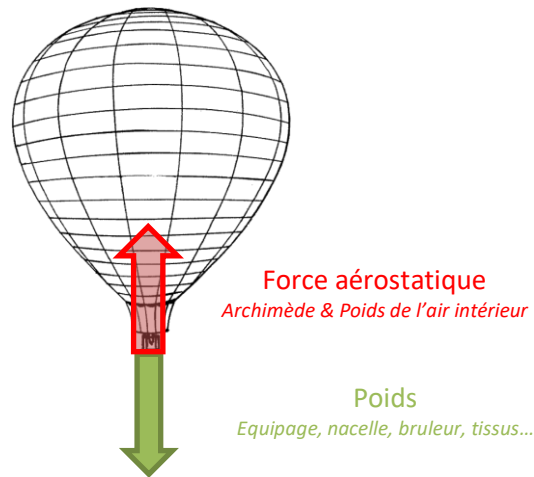
<a href="http://www.cpgpe-sii.com">www.cpgpe-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.II.3 L'équilibre du vol

### 1.II.3.a La situation d'équilibre

Pour que l'aérostat soit en équilibre, il doit être soumis à une somme de forces nulle.

Il faut donc que la force aérostatique (verticale vers le haut) soit égale au poids de l'aérostat (hors poids de l'air inclus dans la force aérostatique) et de son équipage et équipement embarqué.



Remarque : équilibre ne veut pas dire immobile, car les lois de Newton nous disent que si la somme des forces est nulle, soit il n'y a pas de mouvement, soit le mouvement est rectiligne et uniforme (vitesse constante).

### 1.II.3.b La charge transportable - Ballon à air

La force aérostatique s'écrit :

$$F_a = V\rho_{ext}g - V\rho_{int}g = (m_{air\ extérieur}^{Ballon} - m_{air\ intérieure}^{Ballon})g$$

On veut qu'elle porte une masse  $M$  (poids  $P = Mg$ ), il faut donc à l'équilibre que :

$$F_a = P \Leftrightarrow (m_{air\ extérieur}^{Ballon} - m_{air\ intérieure}^{Ballon})g = Mg \Leftrightarrow M = m_{air\ extérieur}^{Ballon} - m_{air\ intérieure}^{Ballon}$$

La charge transportable  $M$  en kg par une Montgolfière est l'écart entre la masse de l'air déplacé par le ballon dans l'atmosphère ( $m_{air\ extérieur}^{Ballon}$ ) et la masse de l'air dans le ballon ( $m_{air\ intérieure}^{Ballon}$ ) :

$$M = m_{air\ extérieur}^{Ballon} - m_{air\ intérieure}^{Ballon}$$

Exemple : une Montgolfière de  $10\ 000\ m^3$  d'air chaud à masse volumique de  $1,100\ kg/m^3$  se déplaçant dans de l'air de masse volumique de  $1,225\ kg/m^3$  peut porter une charge de :

$$M = 10\ 000 * 1,225 - 10\ 000 * 1,100 = 12\ 250 - 11\ 000 = 1\ 250\ kg$$

On pourra retenir l'ordre de grandeur suivant :  $1\ 000\ m^3$  d'enveloppe permettent d'emporter environ  $100\ kg$

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.II.4 Le principe du vol

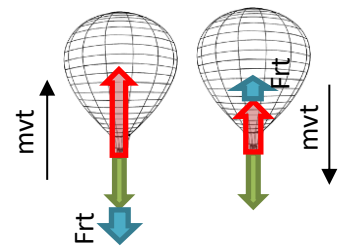
### 1.II.4.a Déplacement vertical

Pour faire monter ou descendre un aérostat, il suffit de changer la température de l'air à l'intérieur :

- Chauffer l'air conduit à une diminution de sa densité, et donc de la masse d'air embarquée, cela augmente la force aérostatique et induit une montée de l'aérostat. Tant que rien n'est changé et tant que l'air ne se refroidit pas, le bilan des forces est positif, et l'aérostat monte.
- Refroidir (ou renouveler l'air en ouvrant la soupape d'évacuation située au sommet de l'enveloppe), conduit à une augmentation de sa densité, et donc de la masse d'air embarquée. Lorsque la température de l'air est assez faible pour que la force aérostatique ne contre plus le poids de celui-ci, la descente commence. Elle continue jusqu'à ce qu'une action soit réalisée.

Dans les deux cas, la vitesse va accélérer jusqu'à la situation d'équilibre où la force de frottement dans l'air de l'aérostat, opposée au mouvement, égalise :

- La composante de force aérostatique supérieure au poids en montée
- La composante de poids supérieure à la force aérostatique en descente



### 1.II.4.b Déplacement horizontal

Le déplacement des aérostats horizontalement peut être :

- Libre : on se déplace au gré des vents (montgolfière)



- Motorisé (Zeppelin)

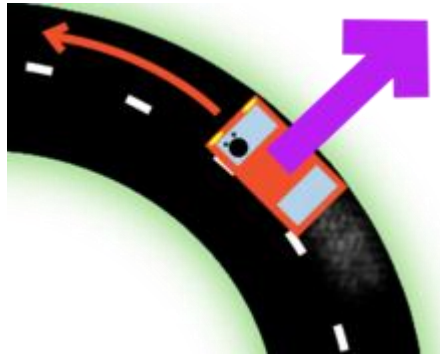


<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

## 1.III. Le vol des satellites

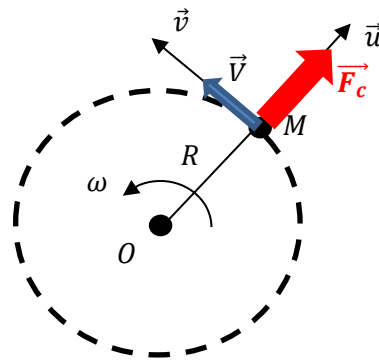
### 1.III.1 La force centrifuge

Voici un exemple simple :



Lorsque l'on tourne en voiture, on est soumis à une force qui nous pousse vers l'extérieur du virage.

Soit un mouvement de rotation à vitesse  $V$  constante d'un solide de masse  $m$  au point  $M$  autour de  $O$  à la vitesse  $\omega$  :



Soit  $\vec{V} = V\vec{v}$  la vitesse du point  $M$ , on a la relation :  $V = R\omega$

La force centrifuge qui s'exerce sur l'objet a pour expression :

$$\vec{F}_c = mR\omega^2\vec{u} = m\frac{V^2}{R}\vec{u}$$

<a href="http://www.cpgc-sii.com">www.cpgc-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

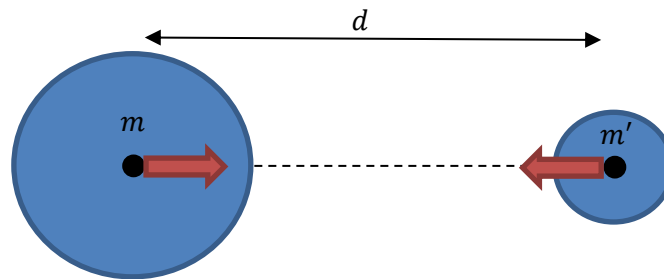
### 1.III.2 La force de pesanteur

Tout objet proche d'un corps interagit avec celui-ci. Chacun s'attire mutuellement, c'est la force de gravité, ou pesanteur.

Sur Terre, elle vaut :

$$P = mg \quad ; \quad g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

En réalité, cette valeur de  $g$  varie avec l'altitude. Soient deux corps de masses  $m$  et  $m'$  à une distance  $d$ .



Appelons  $P$  la norme de cette force :

$$P = \pm G \frac{mm'}{d^2}$$

Avec  $G$  la constante de :  $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

A la surface de la Terre, un homme de masse  $m$  est donc soumis à une force de gravité valant :

$$P = m \frac{GM_{\text{terre}}}{R_{\text{Terre}}^2} = mg \quad ; \quad g = \frac{GM_{\text{terre}}}{R_{\text{Terre}}^2} = \frac{6,674 \cdot 10^{-11} * 5,972 \cdot 10^{24}}{6\,371\,000^2} \approx 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

On peut donc remarque que l'attraction gravitationnelle diminue avec la distance à la Terre.

Remarque : les phénomènes de marrées sont principalement liés à l'attraction de l'eau par la lune et le soleil.

<a href="http://www.cpgpe-sii.com">www.cpgpe-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.III.3 L'équilibre du vol

Un satellite en équilibre sur une orbite est soumis à une somme de forces nulle. Les deux forces qui s'appliquent sur lui sont :

- La force gravitationnelle
- La force centrifuge

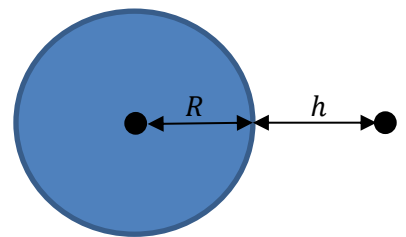
Nous verrons qu'il y a une légère trainée qu'il faut de temps en temps compenser par un apport d'énergie avec des boosters. C'est d'ailleurs pour cela que les satellites ont une durée de vie limitée.

Ainsi, en orbite et à l'équilibre, pour un satellite de masse  $m$  à une hauteur  $h$  du sol, on a l'égalité suivante :

$$P = F_c \Leftrightarrow mG \frac{M_{Terre}}{(R_{Terre} + h)^2} = m \frac{V^2}{R_{Terre} + h}$$

Soit :

$$G \frac{M_{Terre}}{(R_{Terre} + h)^2} = \frac{V^2}{R_{Terre} + h}$$



Il en sort une vitesse permettant de rester sur une orbite de hauteur  $h$  :

$$V = \sqrt{\frac{GM_{Terre}}{R_{Terre} + h}}$$

Ainsi :

- A vitesse prédéfinie, l'altitude est définie
- A altitude prédéfinie, la vitesse est fixée

**Pour voler à une hauteur  $h$ , un satellite doit avoir une vitesse bien définie**

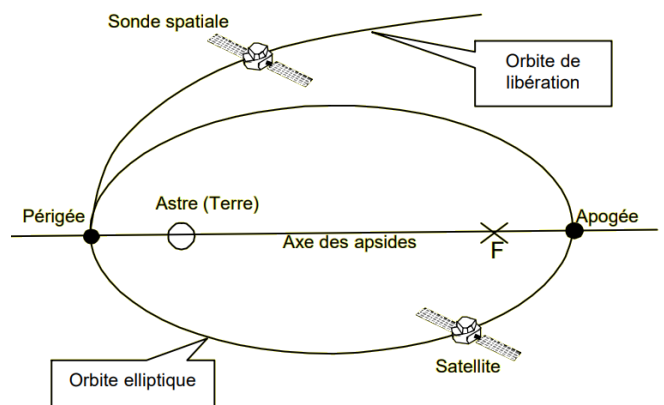
### 1.III.4 Le principe du vol

#### 1.III.4.a Les orbites

##### 1.III.4.a.i Les orbites non circulaires

Dans une orbite elliptique, un satellite décrit une trajectoire de forme elliptique dont la terre (ou l'astre) est un foyer. Le point le plus près de l'astre s'appelle « Périgée », le plus éloigné s'appelle l' « Apogée ».

L'orbite de libération est l'orbite empruntée par les objets pour sortir du champ gravitationnel de la Terre.

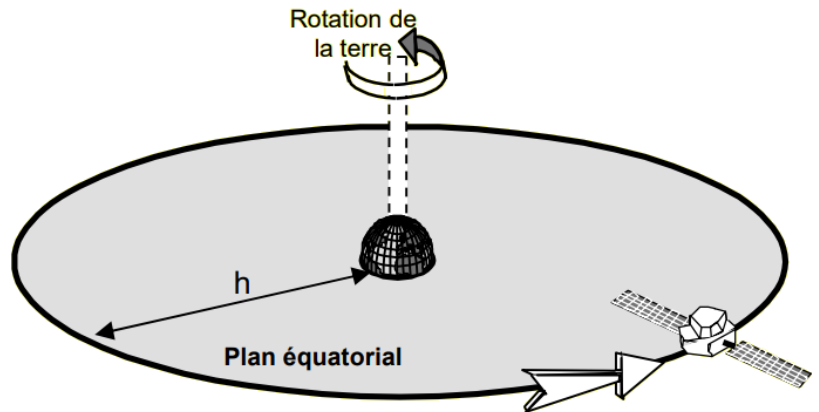


<a href="http://www.cpge-sii.com">www.cpge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.III.4.a.ii Les orbites circulaires

#### • Orbite géostationnaire terrestre

Une orbite géostationnaire est une orbite circulaire de centre le centre de la Terre, sur laquelle un satellite est immobile au-dessus d'un point fixe de la surface terrestre au cours du temps (intérêt par exemple pour les chaînes télévisées).



Toute trajectoire circulaire autour de la Terre doit avoir la terre pour centre. La seule trajectoire circulaire permettant à un objet de rester fixe au-dessus d'un repère au sol est donc obligatoirement dans le plan de l'équateur.

Tous les satellites géostationnaires sont à la même hauteur. En effet, la vitesse du satellite à la hauteur  $h$  qui tourne à la même vitesse que la Terre ( $\omega$ ) a pour expression :

$$V = (R_{Terre} + h)\omega_{Terre}$$

Or, comme nous l'avons vu précédemment, pour être en équilibre, le satellite doit avoir une vitesse bien définie :

$$V = \sqrt{\frac{GM_{Terre}}{R_{Terre} + h}}$$

Pour être en équilibre et en même temps tourner en 24h, le satellite doit donc respecter les deux conditions (équilibre entre force centrifuge et force gravitationnelle ET vitesse imposée par la rotation de la Terre).

On trouve donc  $h$  comme solution de l'équation :  $(R_{Terre} + h)\omega_{Terre} = \sqrt{\frac{GM_{Terre}}{R_{Terre} + h}}$

On trouve ensuite la vitesse que doit avoir le satellite puisqu'on a la relation :  $V = (R_{Terre} + h)\omega_{Terre}$

On caractérise donc l'orbite géostationnaire ainsi :

- **Altitude géostationnaire :  $h \approx 36\,000\text{ km}$  (35 786 km)**
- **$V = 3\,074\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$**
- **Sur le plan équatorial**
- **Il tourne autour de la Terre en 24 h**



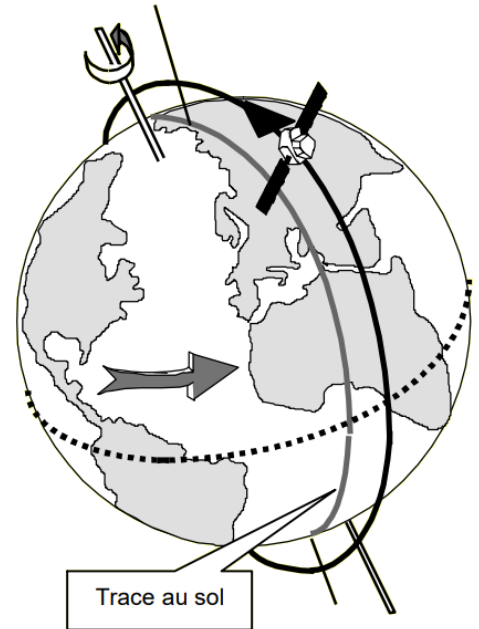
Si on ne place pas le satellite à la bonne hauteur à la bonne vitesse, il ne sera pas en équilibre et son orbite va évoluer. Pour une vitesse donnée, il évoluera pour aller à la hauteur correspondante.

En fin de vie (réserves d'ergol presque vides, les géostationnaires sont mis sur une « orbite cimetière » ou « poubelle », plus haute (vers 36300 km) que l'orbite géostationnaire, à l'aide du reste d'ergol puis arrêtés). Ainsi, sa vitesse d'équilibre sera modifiée, et il ne tournera plus exactement à la même vitesse que la Terre !

<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### • Orbites héliosynchrones terrestres : satellites défilants

Les orbites héliosynchrones terrestres sont des orbites circulaires de centre le centre de la Terre, dans des plans presque orthogonaux au plan équatorial. Les satellites dits « défilants » y tournent constamment autour de la Terre, celle-ci tournant en dessous d'eux en même temps. Ils couvrent donc l'ensemble de la surface terrestre en plusieurs rotations.



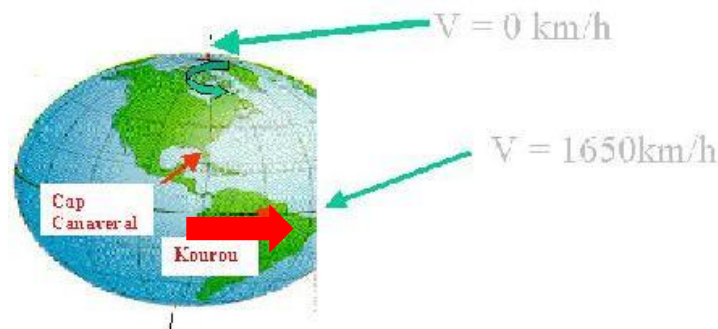
Elles sont caractérisées par :

- Altitude de 500 km à 1600 km
- Inclinaison d'environ 87° par rapport au plan équatorial
- Leur période de révolution va de 90 à 120 minutes

### 1.III.4.b La mise en orbite

#### 1.III.4.b.i Lieu d'envol

La Terre tourne sur elle-même à raison d'un tour par jour environ. Aux pôles, la vitesse issue de ce mouvement de rotation est nulle. A l'équateur, cette vitesse est maximum.



Par ailleurs, le sol va de l'ouest vers l'est.

Pour profiter de ce mouvement, de cette vitesse d'entraînement, on lance les fusées à des latitudes proches de l'équateur et dans le sens du mouvement, **c'est-à-dire vers l'est**.

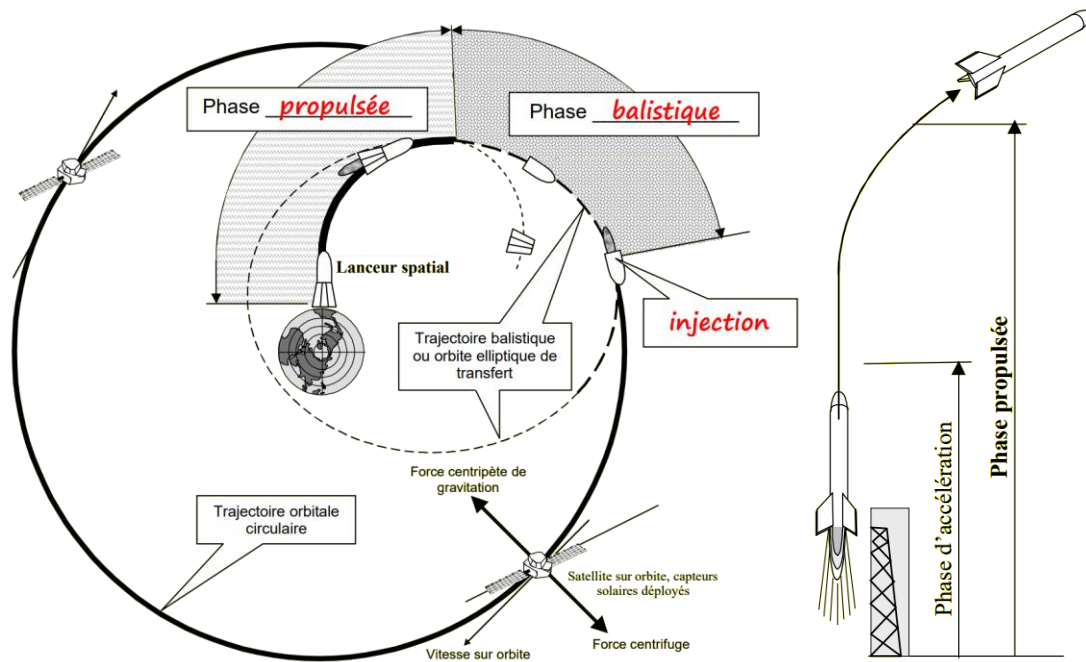
On peut prendre comme exemple le lancer de javelot. Le lanceur profite du mouvement de son corps (rotation de la Terre) pour ajouter une vitesse initiale à son javelot. Ensuite, son bras crée une seconde poussée (poussée de la fusée) dans la même direction. Ainsi, au lancement, les deux vitesses s'ajoutent.



<a href="http://www.cpgs-sii.com">www.cpgs-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.III.4.b.ii Phases du vol

Soit le schéma suivant :



La mise en orbite se réalise en trois phases : Phase propulsée – Phase balistique – Injection. Nous allons donc les détailler.

#### • **Phase propulsée**

La phase propulsée correspond à la phase après décollage ou il y a accélération puis évolution à vitesse constante. On programme un changement de trajectoire pour faciliter l'injection au point culminant.

Retrouvez en lien [ici](#) la vidéo de lancement d'Ariane 5 en 2013.

#### • **Phase balistique**

Phase lors de laquelle la vitesse est ralentie par traînée aérodynamique et l'action de la gravité. La trajectoire suivie est alors elliptique.

#### • **Injection**

A l'apogée de la trajectoire balistique, le module allume ses moteurs pour accélérer jusqu'à la vitesse qui lui permettra de rester sur son orbite prévue.

A la bonne vitesse, le satellite est en équilibre sur sa trajectoire.

A une vitesse trop faible, il se rapproche de la Terre et s'installe sur une orbite inférieure.

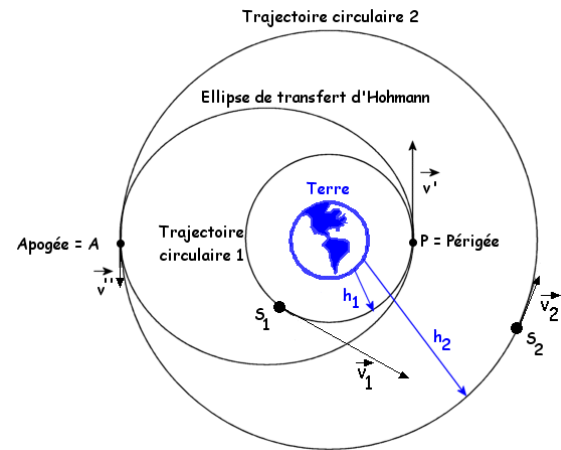
A une vitesse trop forte, il s'éloigne de la Terre et s'installe sur une orbite supérieure.

<a href="http://www.cpgge-sii.com">www.cpgge-sii.com</a>	Cours	Denis DEFAUCHY
09/03/2024	Brevet d'Initiation Aéronautique	LFPQ - LFP

### 1.III.4.c Changement d'orbite

Pour changer l'orbite d'un objet :

- On part de l'orbite circulaire à la hauteur  $h_1$
- Arrivé au point P, on accélère l'objet de manière très précise afin de modifier son orbite et lui faire atteindre le point A via une orbite elliptique
- Arrivé au point A, on l'accélère encore afin qu'il s'installe sur la nouvelle trajectoire circulaire à la hauteur  $h_2$



Remarque : on profite évidemment des lois de la physique pour consommer le moins d'énergie possible d'une trajectoire à une autre. Car une autre possibilité consisterait à allumer des booster pour aller d'une trajectoire à l'autre...

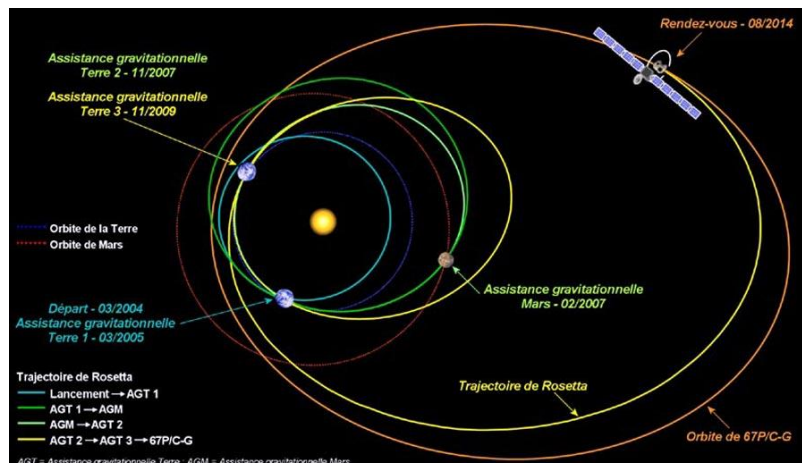
### 1.III.4.d Le maintien en orbite

Lorsqu'un satellite est en orbite, s'il reste à vitesse constante, il reste sur son orbite. Le milieu interstellaire n'est pas un milieu totalement vide. Il reste quelques particules avec lesquelles les satellites entrent en collision. Ainsi, subissant une très faible trainée, les satellites ralentissent. Sans action de correction, le satellite passe alors sur une orbite inférieure. Et cela jusqu'à écrasement sur la Terre.

Il faut donc régulièrement apporter une légère énergie pour maintenir la vitesse du satellite constante, et donc maintenir une orbite donnée.

### 1.III.4.e Le voyage interstellaire

On envoie dans l'espace des sondes spatiales dont le rôle est d'explorer le système solaire. Lors d'un voyage interstellaire, les trajectoires sont étudiées afin de consommer le minimum d'énergie. Pour cela, on utilise l'« **assistance gravitationnelle** », aussi appelée « fronde gravitationnelle » ou « appui gravitationnel », phénomène issu de l'attraction des astres en mouvement. Ci-dessous, la trajectoire de Rosetta, partie en 2004 rencontrer Tchouri en 2014.



Ponctuellement, les propulseurs sont utilisés pour effectuer des modifications de trajectoire ou vitesse. Conclusion : on n'y va pas en ligne droite !!!!!