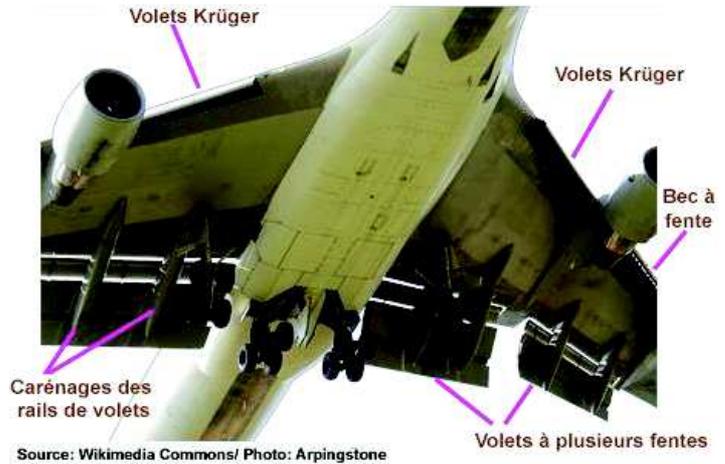


I. Définitions

Les **dispositifs hypersustentateurs** sont des **surfaces mobiles** dont la fonction est de **modifier la forme de l'aile** afin d'en **augmenter la portance**.

Un avion doit pouvoir voler à une grande vitesse en croisière mais aussi à faible vitesse en phase d'atterrissage et de décollage. Ces deux objectifs sont contradictoires car une aile, qui a un bon rendement pour une vitesse donnée, voit ses performances diminuées pour toute autre vitesse.



Source: Wikimedia Commons/ Photo: Arpingstone

Boeing 747 en phase d'approche juste avant l'atterrissage

Dans tous les cas la portance doit équilibrer le poids...

II. Objectif : maintenir la portance en faisant diminuer V_s

Sachant qu'à la vitesse de décrochage V_s (V_{Stall}), l'expression de la portance est donnée par la relation : $R_z = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_s^2 \cdot C_z$, on en déduit que si l'on veut conserver une portance (R_z) suffisante à des vitesses inférieures à la vitesse de décrochage (V_s) "en configuration lisse" il est nécessaire de jouer sur l'un des autres paramètres !

- La masse volumique de l'air ? ...

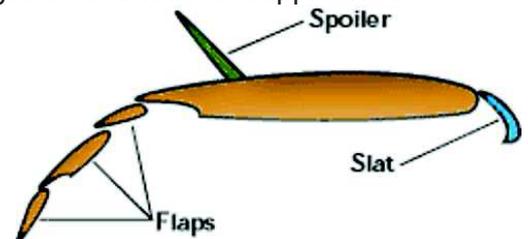
La masse volumique de l'air, notée ρ dans l'expression de la portance, n'est évidemment pas modifiable... mais on en profite pour se rendre compte qu'un air surchauffé (*en été, en Afrique ...*) ou un aéroport situé en altitude, jouent sur cette valeur et la font baisser !

La vitesse de décrochage augmente ... ce qui nécessite d'augmenter la vitesse d'approche !

- La surface alaire ? ...

Modifier la surface de l'aile (S) paraît délicat ! En pratique cela se fera en utilisant des volets plus sophistiqués (Fowler) ou des dispositifs de bord d'attaque (comme les volets Krueger) qui vont à la fois augmenter la surface alaire et le C_z .

(l'avion est à géométrie variable par extension de l'aile vers l'avant et/ou vers l'arrière !)...



Volets "Fowler" à 3 sections étendant l'aile côté bord de fuite... volet Krüger à l'avant.

- Le coefficient de portance C_z ? ...

C'est sur ce dernier paramètre, le C_z , que l'on opère. Ainsi, pour compenser une diminution de vitesse de l'appareil, on utilise des dispositifs hypersustentateurs qui, en faisant varier le profil de l'aile vont entraîner une augmentation de la portance grâce à l'augmentation notable du C_z .

Un précurseur "STOL", le Breguet 941, est doté de grandes hélices qui permettent de souffler l'aile et ses appendices aérodynamiques. ⇨



III. Les principaux systèmes utilisés

Les principaux modèles utilisés sur les avions peuvent être classés en deux groupes en fonction de leur mode d'action :

- Les **volets de courbure (flaps)** dont l'effet est principalement d'augmenter la portance (et la traînée) par augmentation de la courbure du profil.

et/ou

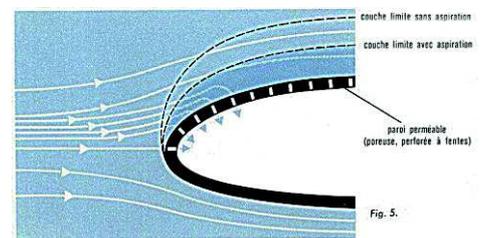
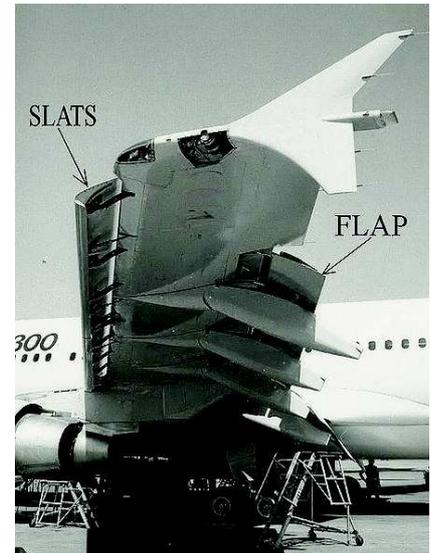
- Les **becs de bord d'attaque (slats)**, qui augmentent, eux aussi, la portance.

plus un effet complémentaire...

- Ces deux dispositifs mobiles peuvent, pour les plus complexes, créer une **extension de surface** (les déplacements importants de surfaces mobile augmentant la surface alaire).

Ces systèmes peuvent être améliorés par :

- l'utilisation de **fentes** qui améliorent l'écoulement d'air sur l'extrados aux grands angles d'incidence pour retarder le décollement de la couche limite et par conséquent l'apparition du décrochage.
- un **soufflage d'air** sur les volets
- une **aspiration de la couche limite** au travers de trous percés dans l'aile



Aspiration de la couche limite

IV. Comment les performances sont-elles augmentées ?

- **Les variations du coefficient de portance.**

L'utilisation d'une petite surface auxiliaire en AVANT de la surface portante, placé avec une FENTE de dimension convenable entre les deux, va permettre d'augmenter le coefficient de portance maximale jusqu'à 60%. (Graphique *Courbe bleue*)

Les **fentes** ne font que prolonger la courbe du coefficient de portance (courbe du bas prolongée en pointillés).

L'utilisation de **volets** permet d'augmenter le coefficient de portance pour toute la plage des angles d'attaque. (C'est la **courbe rouge** du haut qui est prolongée vers le haut).

La **combinaison des deux** peut s'avérer très performante au point d'augmenter la portance de 150 % !!!

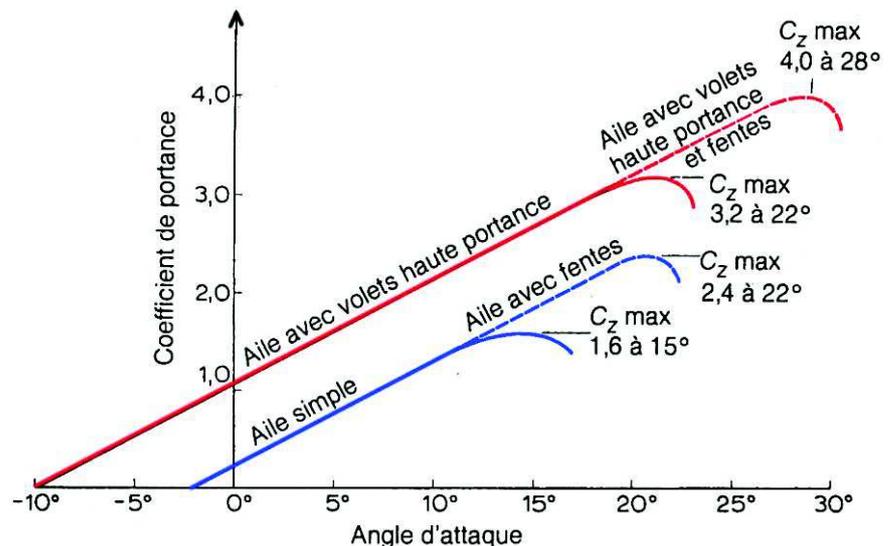
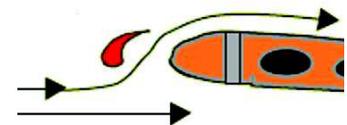
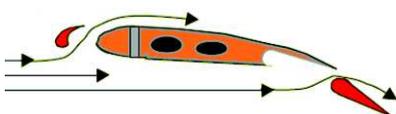


Illustration colorisée et extraite de : Mécanique du vol (A.C. KERMODE)

Remarquez aussi sur le schéma l'augmentation de l'angle de décrochage qui passe de 16° à 23° puis 30° (Enorme !).

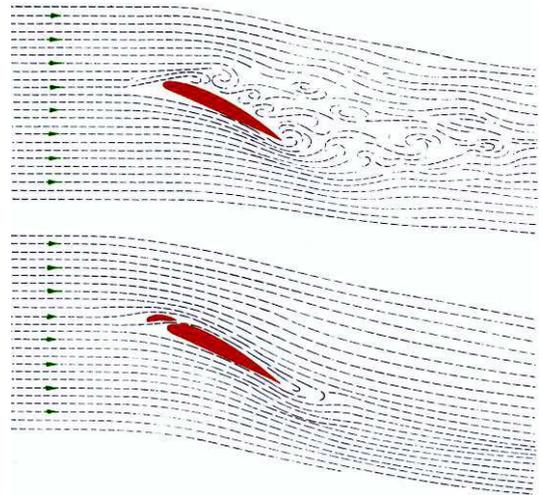
- Le rôle aérodynamique.

Pour les **volets classiques** c'est assez simple : on modifie la courbure de l'aile. La portance augmente parce que le profil à changé !

Le rôle des **fentes** est différent il retarde le décrochement de la couche limite et par conséquent maintient plus longtemps un écoulement laminaire sur l'extrados.

Rôle des fentes de bord d'attaque : schéma ci-contre ⇒

D'autres dispositifs ont été utilisés dans ce but comme par exemple l'aspiration d'air au niveau de petits trous percés dans l'extrados. Ces systèmes sont coûteux et surtout dépendant d'un moteur... ils sont donc gourmands en énergie et peuvent être sujets à des pannes. On leur préférera donc d'autres solutions plus "mécaniques".



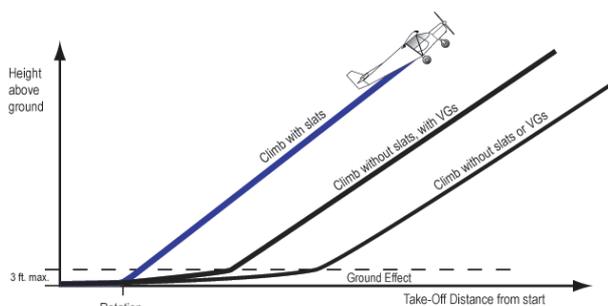
V. Utilisation des volets en phases de décollage et d'atterrissage :

- Influence "positive" des dispositifs hypersustentateurs :

Les propriétés des dispositifs hypersustentateurs sont utilisées :

- au **décollage** : avec 10 à 15° de volets, la portance nécessaire pour équilibrer le poids de l'avion est atteinte à une vitesse plus faible qu'en configuration lisse. La vitesse de décollage et la distance de roulement sont ainsi légèrement réduites.
- en **approche** : un braquage de 20 à 40° des volets et éventuellement la sortie des becs permettent de réduire la vitesse tout en augmentant l'angle de descente.
- à l'**atterrissage** : pour réduire la vitesse de décrochage et la distance de roulement, grâce à l'augmentation de la traînée.

- Les cas d'utilisation extrêmes



Ici un ULM STOL (Short Take Off and Landing)



Décollage ou atterrissage sur 10 m environ !

Les performances obtenues avec des avions légers ou ultralégers sont époustouflantes !!!

Voir les vidéos sur internet (recherchez STOL compétition). Résultats :

([world_record_attempt_Amazing_plane_take_off_and_landing.mp4](#) ; [Valdez_Fly-In_STOL_Compétition_2011_Highlights](#))



L'exploit de Jules Védrines ... qui, avec un Caudron G3, se pose sur le toit des Galeries Lafayette à Paris le 19 janvier 1919.

- Influence indésirables des dispositifs hypersustentateurs sur le vol :

- Il apparaît (habituellement) un fort **moment à piquer** lors de la sortie des dispositifs de bord de fuite (**volets**)
- A l'inverse il apparaît (habituellement) un fort **moment à cabrer** lors de la sortie des **becs** de bord d'attaque.
- En configuration atterrissage, l'utilisation des deux dispositifs permettant d'augmenter fortement l'angle de décrochage, il en résulte une importante **diminution de la visibilité vers l'avant** et un risque de faire toucher la queue sur le sol avant le train principal.
- Noter aussi qu'il faut parfois, pour certains avions, rentrer les portances pour mieux freiner avec les roues.



ULM STOL avec becs et volets à fente



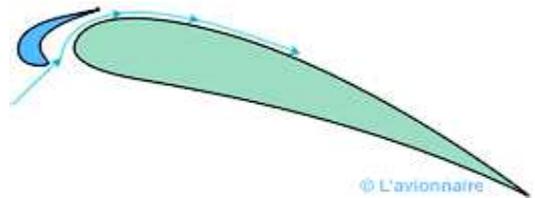
Volets fowlers 3 sections (avec fentes)

VI. Différents dispositifs de bord d'attaque

- Bec à fente

Ce dispositif sert à empêcher ou à retarder le décollement de la couche laminaire sur l'extrados.

La pression élevée de l'intrados passant par la fente permet de redonner de l'énergie à la couche limite sur l'extrados.



- Bec à fente fixe

Ces dispositifs fixes ont équipés les premiers avions à décollage et atterrissage court.

*L'un des avions le plus connu est le **Fiseler Fi 156** surnommé **Storch** (cigogne) qui fut repris et développé après la guerre par **Morane-Saulnier** sous le nom de **MS 502** puis **MS 505**.*



Source: Wikimedia Commons/ Photo: Martial Heland



Bec d'un petit avion (CH 701) "STOL"

*⇐ Partie d'une aile d'un **Fiseler Fi156***

*Durant la dernière guerre le **Fiseler "Storch"** était un avion d'observation. Il a aussi servi à une évasion de **Bénito Mussolini**... et à la fin du film **"La grande Vadrouille"**.*

Dans les années 1970 cet avion servait encore de remorqueur de planeurs dans certains clubs.

- Bec à fente automatique

A vitesse élevée les becs sont plaqués contre le bord d'attaque de l'aile et ils se déploient vers l'avant automatiquement grâce à la dépression locale à incidence élevée.

Ces becs sont montés notamment sur les Morane-Saulnier Rallye.



Source: <http://www.trapanelles.tcweb-host.com/> Thierry JR Cavalié
Morane-Saulnier 893 Commodore. Ce type d'appareil est souvent utilisé pour remorquer les planeurs.

- Bec à fente commandé ou Slat (en anglais)

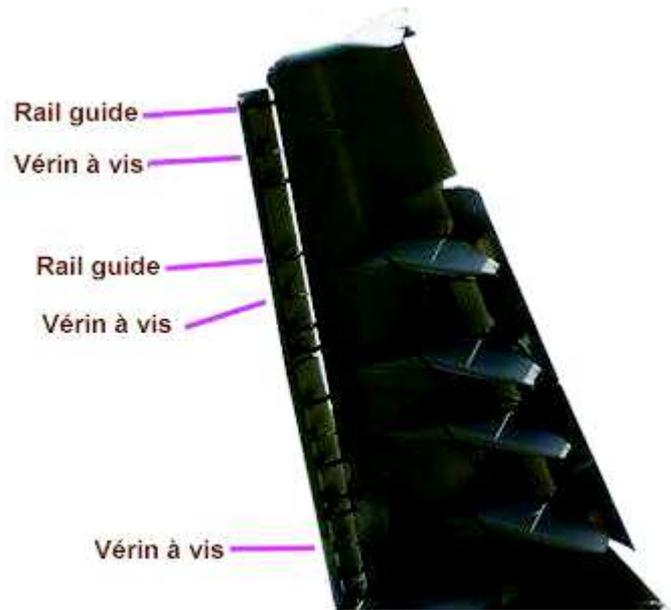
Commandé par le pilote ce bec allie augmentation de la surface, augmentation de la courbure par basculement et traitement de la couche limite par la fente.

Partie d'une aile d'un airbus A300 ⇒ On retrouve ça sur des avions plus rapides comme le Mirage III

Principe de fonctionnement :

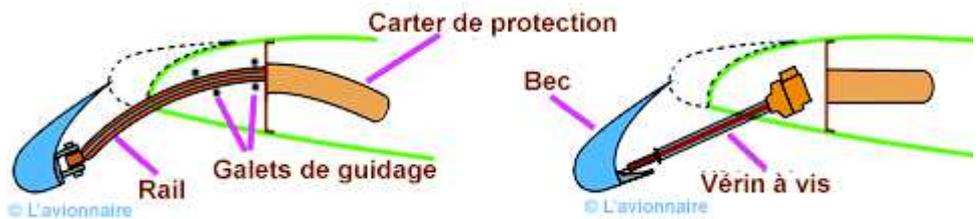
Chaque aile est équipée de plusieurs vérins à vis qui sortent ou rentrent le bec.

Celui-ci est maintenu par des rails, eux-mêmes guidés par des galets.



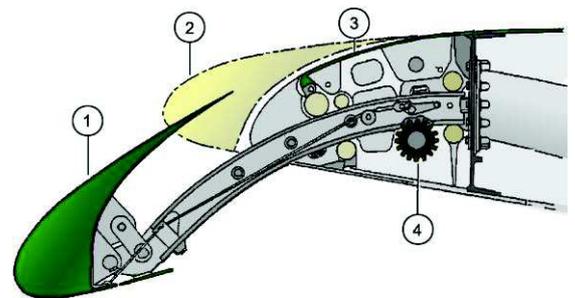
Source: Wikimedia Commons/ Photo: Arpingstone

La sortie ou la rentrée sont contrôlées par un limiteur de couple et un détecteur de dissymétrie.



Le mécanisme des becs est assez sophistiqué.

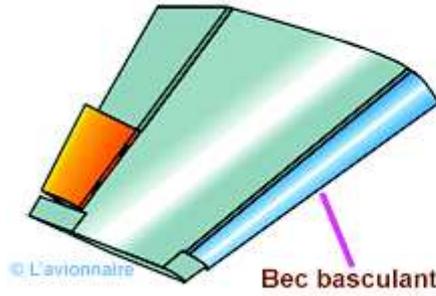
Ici un "SLAT" de Boeing 737 qui refuse de rentrer (probable problème hydraulique).



- **Bord d'attaque basculant**

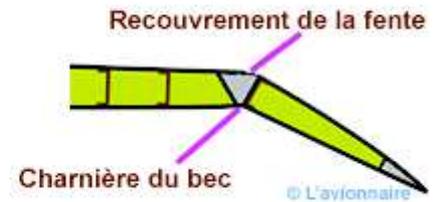
C'est la partie avant du profil qui bascule vers le bas, créant un effet de cambrure de l'aile.

Ce dispositif est principalement utilisé sur les avions de chasse. (F16, F 104)



Aile du Lockheed F-104 Starfighter. Le vérin hydraulique est placé dans le fuselage. ⚡

Détail du bec basculant



Une équipe de recherche a conçu un bord d'attaque de forme variable (*Smart Droop Nose*) s'intégrant à la voilure de l'avion. "La forme du bord d'attaque peut être modifiée pendant les phases de décollage et d'atterrissage de telle sorte qu'aucun bec de bord d'attaque distinct n'est nécessaire".

Schéma ci-contre (les deux positions sont superposées) ⇒



- **Volet Krüger**

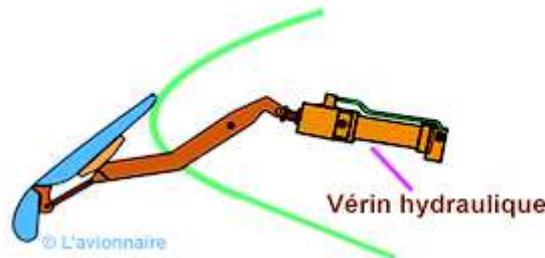
Principe de fonctionnement :

Plusieurs vérins hydrauliques déploient vers l'avant un volet principal qui vient se positionner contre le bord d'attaque de l'aile. Un deuxième volet très arrondi se déploie également pour se mettre dans le prolongement du premier volet.

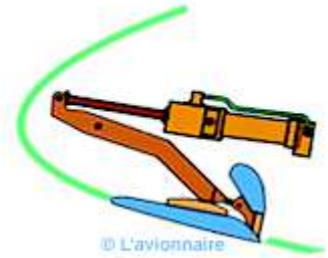


Source: Wikimedia Commons/ Photo: Arpingstone

Position sorti



Position rentré

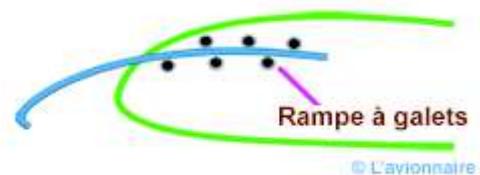


Le but de ces volets est d'augmenter la surface alaire de l'aile ainsi que la courbure.

- **Bec Betz**

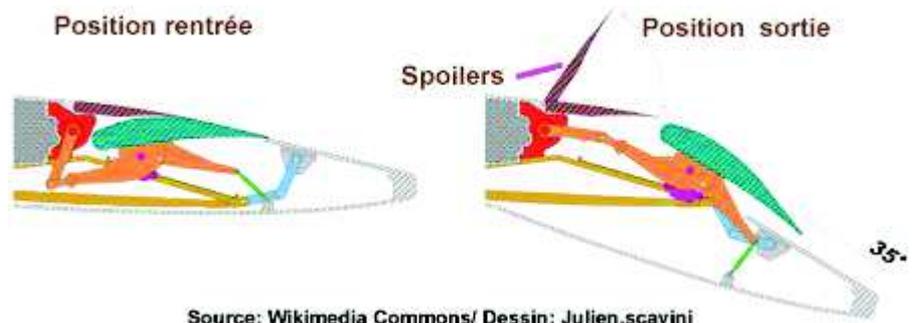
Actionné par plusieurs vérins le volet coulisse sur une rampe à galets.

Ce type de volet a été supplanté par le volet Krüger dont il est une variante.



VII. Différents dispositifs de bord de fuite

Appelés volets (*ou flaps en anglais*), ils se situent au bord de fuite de l'aile entre les ailerons et le fuselage.

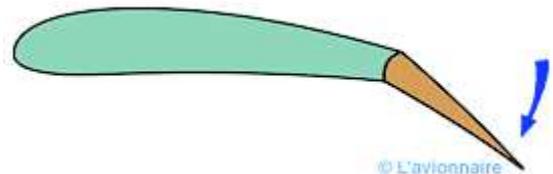


Source: Wikimedia Commons/ Dessin: Julien.scavini

- Volet de courbure

Comme son nom l'indique ce type de volet permet de faire varier la courbure de l'aile, donc la portance et la traînée.

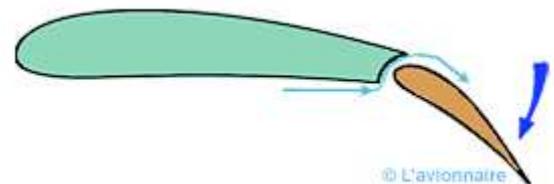
En braquant le volet vers le bas la portance augmente, mais la traînée aussi. Plus le braquage sera important, plus la portance augmentera mais plus la traînée sera importante.



Sur certains types de planeurs il est possible de braquer les volets négativement (vers le haut). En réduisant la courbure, la traînée est réduite mais la portance aussi. Ce qui permet d'augmenter la vitesse pour passer une zone délicate (descendance) ou de diminuer le temps de transit entre deux ascendances sans trop pénaliser la finesse.

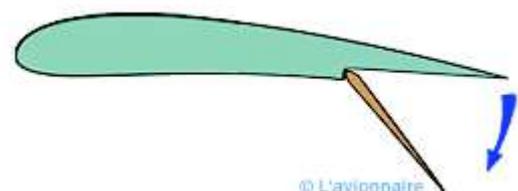
- Volet de courbure à fente

Ce type de volet allie le braquage vers le bas avec un léger recul, qui ouvre une fente entre l'aile et le volet pour permettre à l'air de passer de l'intrados vers l'extrados afin de redonner de l'énergie à la couche limite et de retarder le décollement de celle-ci sur le volet.



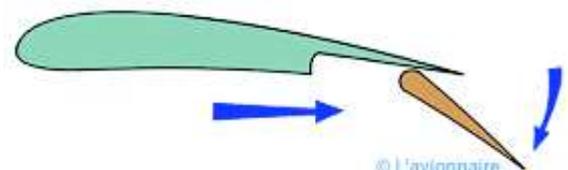
- Volet d'intrados

En augmentant la courbure de l'aile il augmente la portance. Par contre en n'agissant que sur l'intrados de l'aile sans modifier l'extrados, ce type de volet génère une forte traînée.



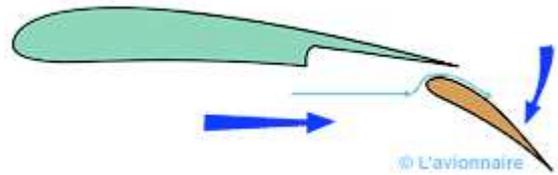
- Volet d'intrados avec déplacement vers l'arrière (Zap)

Ce type de volet combine un déplacement vers l'arrière pour augmenter la surface alaire avec un braquage vers le bas pour augmenter la courbure.



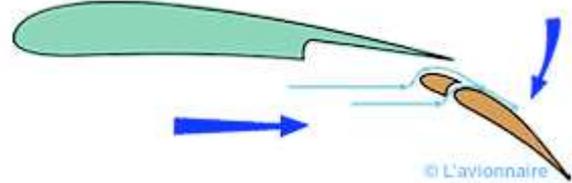
- Volet Fowler volet d'intrados avec déplacement vers l'arrière associé à une fente

Le volet Fowler combine un déplacement vers l'arrière pour augmenter la surface alaire avec un braquage vers le bas pour augmenter la courbure associé à une fente pour traiter la couche limite sur l'extrados du volet.



- Volet Fowler d'intrados avec déplacement vers l'arrière associé à plusieurs fentes

Ce type de volet peut être en deux ou trois parties, avec une, deux ou trois fentes.



VIII. Dispositifs divers

- Soufflage

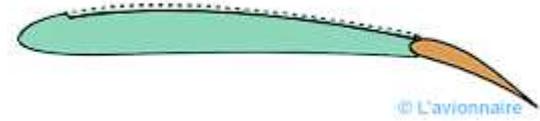
De l'air prélevé du ou des réacteurs est soufflé sur l'extrados au niveau du bord de fuite juste avant les volets lorsque ceux-ci sont abaissés.



- Aspiration de la couche limite

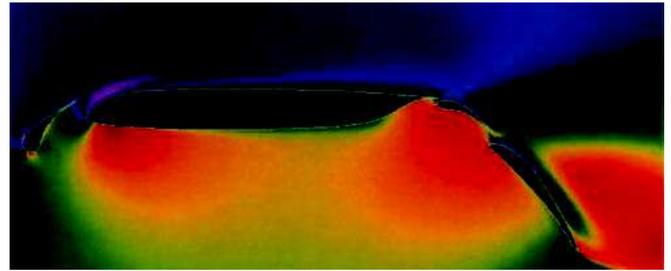
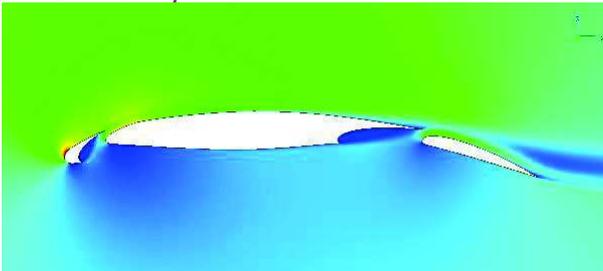
La couche limite est aspirée à travers de trous très fins sur l'extrados, ce qui retarde son décollement.

Ce système est séduisant mais n'est plus employé car il se heurte à des difficultés techniques (*conduites d'aspiration*) et consomme beaucoup d'énergie pour être efficace.



IX. Simulations

Des simulations de pression et d'écoulement



X. Récapitulatif des améliorations dues aux dispositifs hypersustentateurs

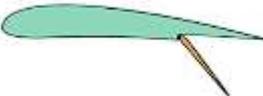
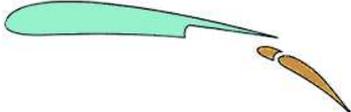
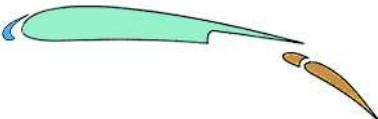
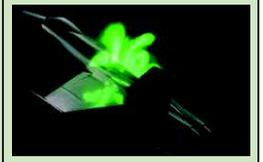
Désignation	Forme de l'Aile	Angle de braquage	Augmentation de portance en %
Profil de base		0°	0 %
Volet de courbure		12 à 45°	51 %
Volets intrados sans recul		14 à 50°	60 à 67 %
Volet à fente		16 à 45°	53 à 65 %
Volet soufflé		60 % très variable selon vitesse	Environ 60 % selon angle et vitesse du jet d'air
Volet Fowler surface augmentée de 30%		15 à 40°	88 à 90 %
Volet Krueger (Volet de bord d'attaque)		25°	50 %
Bec automatique		Bec sorti (20°)	26 à 50 %
Bec et Volet Fowler		Bec & Volet + 40°	93 %
Double Volet Fowler avec fentes		Volet + 20°	100 %
Bec et Double (ou triple) Volet Fowler		Bec & Volet + 40°	120 % (150 %)

Tableau complété par des données du cours d'aérodynamique de Kermod.



I. Spoilers et aérofreins - Définitions

Les **spoilers** et les **aérofreins** peuvent servir soit à dégrader la vitesse de l'avion soit à augmenter sa pente de descente. Pour cela, on peut soit diminuer le C_z , soit augmenter le C_x .

- **Spoilers (ou dispositifs hyposustentateurs)**

Le spoiler est un destructeur de portance...

Il est destiné à améliorer le contrôle de la pente de descente et le freinage mécanique à l'atterrissage.

... l'augmentation de la traînée est un effet secondaire.

Variation de C_z et par effet secondaire du C_x en fonction de l'angle de braquage. ⇒

Utilisés symétriquement, les **spoilers** augmentent le C_x et diminuent le C_z . Ils sont utilisés pour les fortes pentes de descente ou pour le freinage au sol.

Utilisés au sol, les spoilers diminuent toute portance résiduelle liée à la vitesse de l'avion, ce qui fait que, tout le poids de l'avion s'applique sur les roues et le freinage est alors plus efficace.

Notons que, comme pour les volets, il est possible de modifier le braquage des spoilers pour une utilisation adaptée.

- **Aérofreins (ou freins aérodynamiques)**

Comme son nom l'indique l'aérofrein est un FREIN. Il permet de ralentir l'avion par création de turbulences augmentant la traînée!

L'aérofrein a pour rôle d'augmenter la traînée ...

Les aérofreins font donc augmenter le C_x mais le C_z reste à peu près constant.

Ils sont utilisés pour :

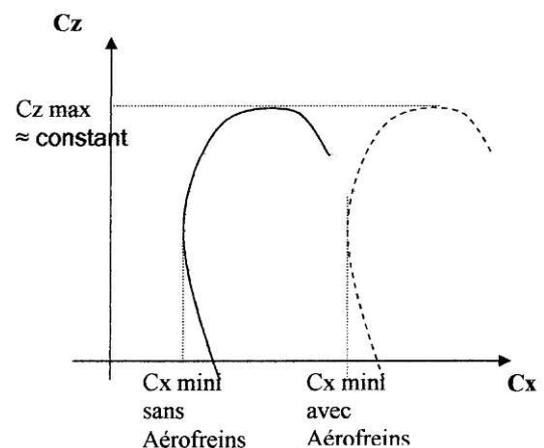
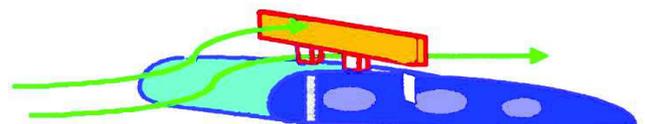
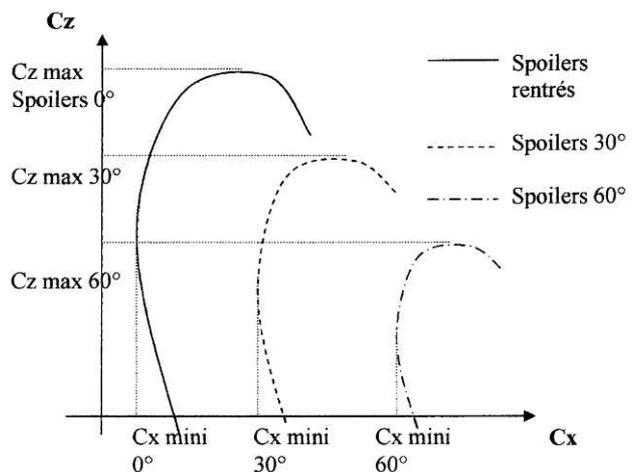
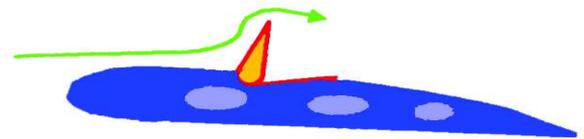
- pour diminuer la vitesse (au sol ou en vol)
- pour augmenter le taux de descente sans augmenter la vitesse
- stabiliser certains appareils lors des phases d'approche et d'atterrissage.

Variation de C_x , sans variation de C_z en fonction du braquage des aérofreins. ⇒

Dans certains cas (les planeurs par exemple), les aérofreins placés sur les ailes diminuent également la portance, par décollage des filets d'air de la surface de l'aile. C'est un effet secondaire voulu par le constructeur.

II. Description des différents types d'aérofreins

Les aérofreins sont des surfaces mobiles actionnées par l'énergie hydraulique (sauf pour les planeurs et avions légers).



- **Aérofreins positionnés au-dessus du fuselage**

Les aérofreins placés sur le fuselage n'ont pas d'influence sur la portance.

Certains avions de chasse utilisent ce type d'aérofreins comme l'Eurofighter Typhoon, ou le McDonnell-Douglas F-15 Eagle.



McDonnell-Douglas F-15 Eagle



Eurofighter Typhoon (avec le parachute de freinage associé)

Principe de fonctionnement : Un vérin hydraulique braque vers le haut une partie du dessus du fuselage.

- **Aérofreins positionnés en-dessous du fuselage**

Ce type d'aérofreins est aussi utilisé par certains avions de chasse comme l'Etendard IV Marine ou le Super-Etendard.



Etendard IV M



Mig 23 : quatre panneaux d'aérofreins déployés autour de la tuyère.

- **Aérofreins positionnés dans le cône de queue**

Ils sont utilisés par certains avions de transport comme le BAe 146 ou le Fokker 70 ci dessous. Ils sont parfois dit en "pétale" (comparaison avec l'ouverture d'une fleur).



BAe 146



Fokker 70



Schéma du Fokker 28

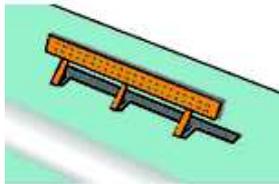


• Aéofreins positionnés sur les ailes

Ces types d'aéofreins étaient utilisés par exemple par la Caravelle de Sud Aviation et l'Aérospatiale SN-601 Corvette.

On en trouve aussi sur le C-160 Transall... en notant que les aéofreins extradors sont "surélevés" pour éviter de perturber la couche limite et de modifier la portance.

Les aéofreins du Transall C-160 ⇒



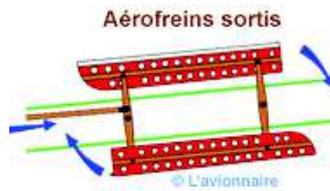
⇐ Sud Aviation - SE 210 Caravelle ↑ Détail en mode rentré ⇒



• Les aéofreins de planeurs

Sur un planeur, a commandes des aéofreins se fait simplement par une association de câbles et de tringleries.

Il existe des systèmes à deux panneaux (extrados et intrados) et, pour les planeurs modernes, des modèles à un seul panneau (extrados).



Système Schempp-Hirth ↑



Planeur moderne : DUO-DISCUS-X ↑ (aéofreins d'extrados seulement)



Planeur ancien : K 13 ↑ (aéofreins d'extrados ET d'intrados)

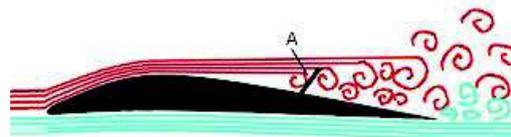
Les trous, plus ou moins nombreux, selon les planeurs ont pour fonction de canaliser l'écoulement de l'air.

Détails des aéofreins du DUO-DISCUS-X ⇒

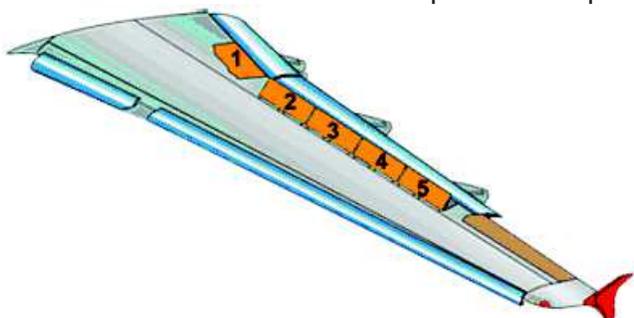


III. Description des différents types de spoilers

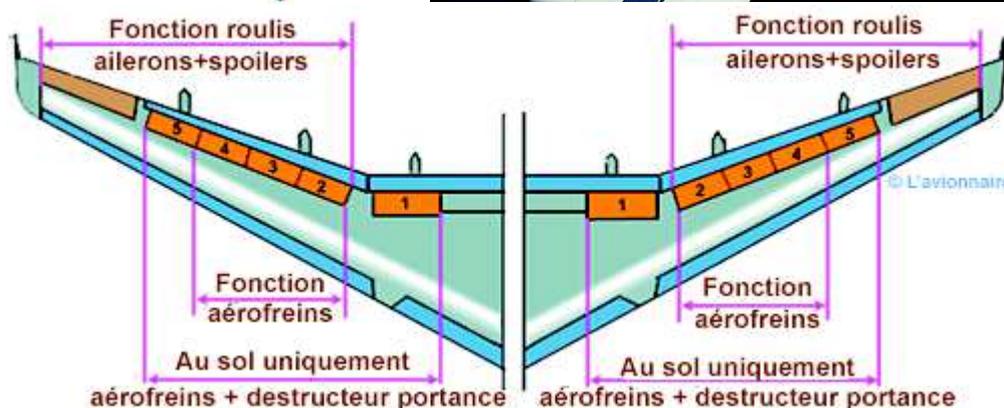
Les **spoilers** sont des surfaces mobiles d'extrados dont le braquage provoque, sur l'aile concernée, une **diminution de portance** et un accroissement de la traînée.



L'airbus 319 servira de base pour les explications suivantes. Sur cet appareil cinq panneaux mobiles numérotés de 1 à 5 composent les spoilers.



Chaque panneau est commandé par un vérin hydraulique. Ce vérin hydraulique étant lui-même commandé par une servo-valve qui reçoit des ordres électriques provenant du boîtier de commande.



IV. Principe de fonctionnement :

- **En vol** : commandés symétriquement par une manette ils font fonction d'aérofreins. Commandés de manière différentielle, ils jouent le rôle d'aide aux ailerons pour le "gauchissement" ce qui améliore la maniabilité de l'appareil.
- **Au sol** : à l'atterrissage après le toucher des roues, braqués symétriquement ils jouent le rôle d'aérofreins et de destructeurs de portance. A vitesse élevée l'avion est ainsi plaqué au sol ce qui augmente l'efficacité du freinage.

En pratique...

En approche lors de la check-list le pilote "arme" les spoilers, à l'atterrissage ceux-ci sortiront automatiquement si :

- les manettes de puissance sont en position ralenti
- les amortisseurs gauche et droit du train principal sont comprimés
- la vitesse des roues du train principal est supérieure à 85 kt

Dans le cas où les spoilers n'ont pas été armés, ceux-ci sortiront dès qu'une ou plusieurs reverses seront passées et si les conditions ci-dessus sont remplies.

Sur certains avions, lorsque les spoilers sont complètement sortis après l'atterrissage le Cz de l'aile devient négatif. Lors d'une remise de gaz pour une raison quelconque, les spoilers rentreront automatiquement sans aucune intervention du pilote.



Boeing 767 Spoilers ouverts ⤴ et schéma de contrôle ⤵

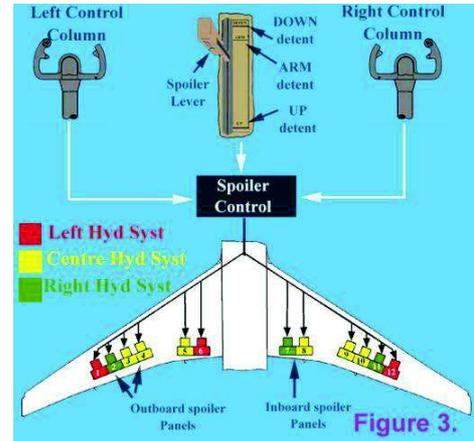
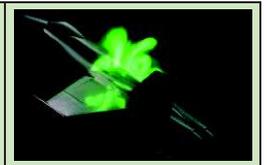


Figure 3.



VI - Décollage atterrissage.



I. Pourquoi tenir compte du vent ?

En vol ce qui compte c'est la vitesse de l'avion par rapport à la masse d'air... peu importe la vitesse et la direction de cette masse d'air ! (*)

Au sol votre vitesse est souvent insuffisante pour maintenir l'avion en l'air et c'est donc la composition des vitesses (*somme vectorielle de la vitesse sol et de la vitesse du vent*) qui va déterminer votre capacité à voler ou non ! En approche (atterrissage) le vent va modifier votre pente de descente et, selon qu'il est de face ou de dos, réduire ou allonger votre trajectoire réelle par rapport au sol.

(*) L'influence se réduit à la valeur et à la direction de votre vitesse (*projeté sur le*) sol. Cela influe énormément sur votre navigation (avance, retard, déviation ou dérive) ... mais pas sur votre vol !

II. Décollage... face au vent !

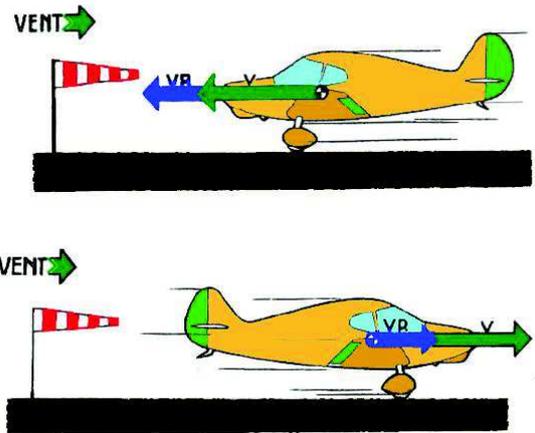
Tout le monde "sait" qu'il faut **décoller** (mais aussi se poser) **face au vent**. La **manche à air** (biroutte) indique la direction et la force du vent (approximativement)... Expliquons pourquoi :

Vent de face (schéma du haut) la **vitesse du vent** V_v s'ajoute à la vitesse V de l'avion pour donner une vitesse relative V_R de l'avion par rapport à l'air plus grande que V .

La vitesse de décollage dépendant de V_R elle est atteinte très rapidement. Le décollage est donc facilité face au vent.

A l'inverse, vent de dos, la distance de roulage peut s'allonger considérablement car V_R devient très inférieure V . Cela peut constituer un grave danger.

Effets du vent sur le décollage



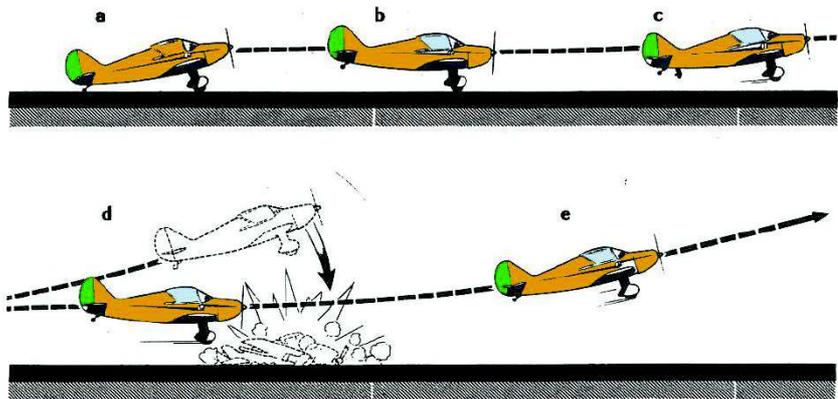
a – plein gaz lâcher les freins.

b – accélération (lever la queue pour les trains classiques)

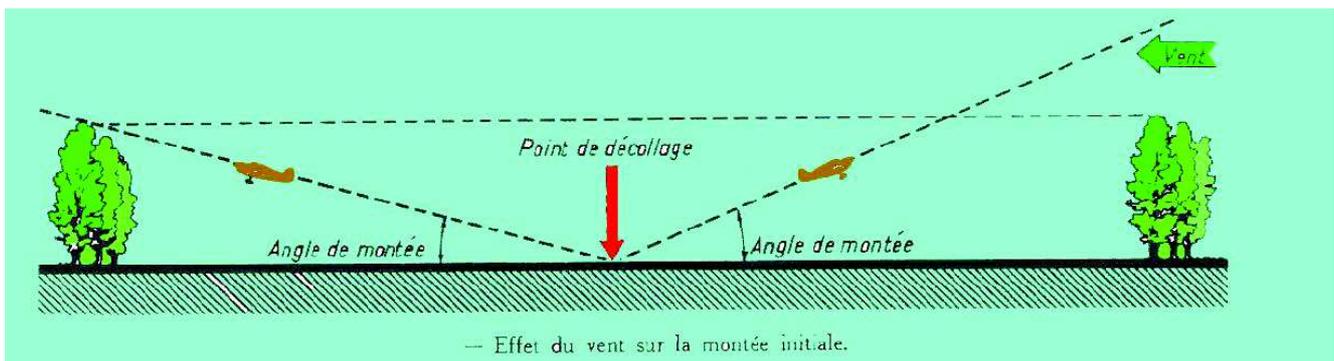
c – décollage

d – prise de vitesse (vouloir monter immédiatement réduit la vitesse... ce qui peut vous faire passer en dessous de la vitesse de décrochage)

e – mise en montée



— Phases du décollage.



— Effet du vent sur la montée initiale.

L'angle de montée se mesure entre l'horizontale (sol) et la trajectoire de l'avion/sol. On comprend facilement que cet angle augmente **vent de face** et que **le franchissement des obstacles est facilité**.

A l'inverse, un décollage vent de dos peut, par le double effet de l'allongement du roulage et de l'abaissement de la trajectoire (angle de montée plus faible) rendre un décollage très dangereux.

• Check-list décollage (CAEA)

Il y a autant de check-list que d'avions (elle est dans le manuel de vol)... mais les grands principes sont

1 – la sécurité (visu, radio, contrôle avion et plus particulièrement moteur avec pompe électrique en marche en plus de la pompe mécanique).

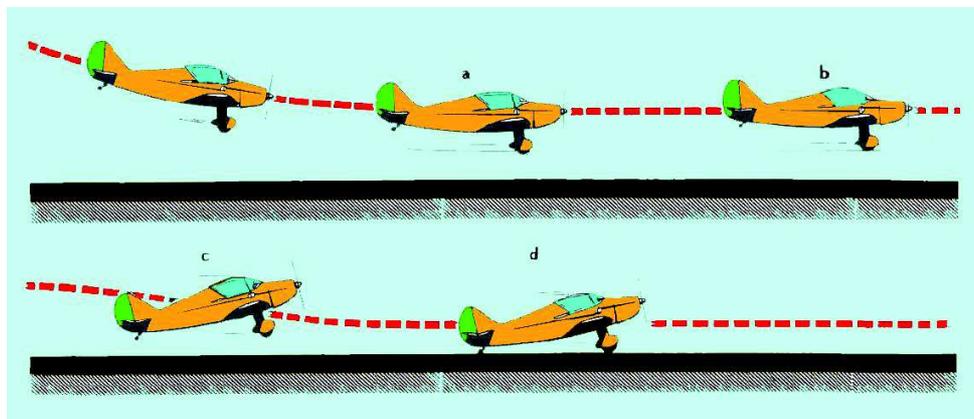
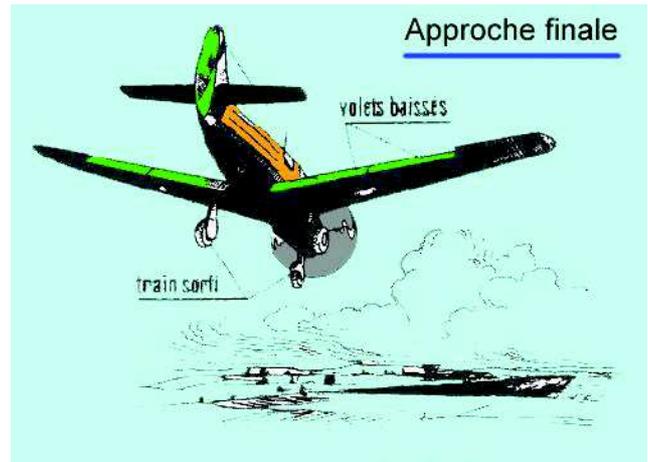
2 – l'aérodynamique : 1 cran de volet est un bon compromis accélération/portance. Une fois que l'on a décollé et que la vitesse/air suffisante il faut supprimer les trainées inutiles (rentrer le train et les volets).

III. Atterrissage ... face au vent !

Il faut donc AUSSI **atterrir face au vent**.

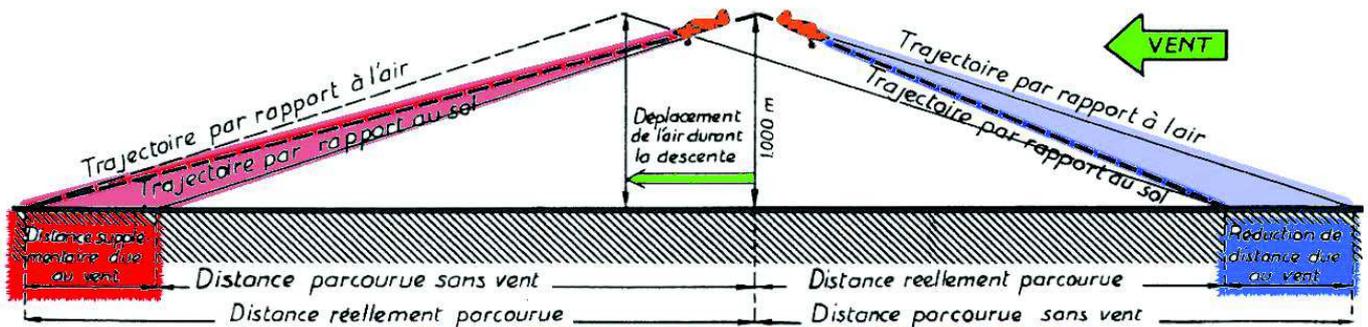
Il faut AUSSI **réduire sa vitesse** alors que l'on est en descente (*réduction moteur augmentation des trainées... sortie du train d'atterrissage*).

Pour réduire encore la vitesse tout en préservant la sécurité (*rester au-dessus de la vitesse de décrochage*) on va **sortir progressivement tous les crans de volets** (*et même les becs pour certains avions*).



a – l'arrondi, juste avant de toucher le sol, amène l'avion sur une trajectoire parallèle au sol.
 b – moteur réduit l'avion décélère... mais l'effet de sol peut le maintenir en l'air quelque temps même en dessous de la vitesse habituelle de décrochage
 c – décrochage (au ras du sol pour un "kiss landing")
 d – touché des roues (ici un posé "trois points" caractéristique des avions à train classique).
 e – freinage puis libération de la piste

- La pente de descente



— Effet du vent sur la distance parcourue en descente planée.

Vous remarquerez que le vent perturbe votre descente en allongeant votre trajectoire lorsqu'il est de dos. On privilégie donc TOUJOURS le vent de face.

- Contrôle de la descente

Il se fait par l'intermédiaire de l'assiette qui pilote le vario (en général, 500 ft/mn est une bonne valeur pour un avion de club) et de la puissance qui pilote la vitesse, le choix du couple vario/vitesse déterminant une **pente de descente**.

Votre vitesse de descente sera néanmoins limitée : vous ne dépasserez pas la « vitesse maximale de croisière » V_{NO} (de l'anglais « Velocity Normal Operating ») si l'air est turbulent, et vous ne dépasserez en aucun cas la vitesse à ne jamais dépasser » V_{NE} (de l'anglais « Velocity Never Exceed »). Ces deux vitesses figurent dans le manuel de vol de votre avion. Vous ne commencerez à sortir les volets que lorsque vous serez rentré dans la zone prévue (arc blanc de l'anémomètre).

Arc blanc: de V_{FE} à V_{S0} : zone d'utilisation normale en configuration atterrissage

- **Check-list atterrissage (CAEA)**

1 – la sécurité (visu, radio, contrôle avion et plus particulièrement moteur avec pompe électrique en marche en plus de la pompe mécanique...). On utilise le phare d'atterrissage (qui permet à l'avion d'être vu en plein jour) et on n'oublie pas de sortir le train d'atterrissage.

2 – l'aérodynamique : on va passer progressivement tous les crans de volet au fur et à mesure que la vitesse décroît (bien aidée par l'apparitions de trainées supplémentaires comme le train d'atterrissage).

3 – la surveillance de la vitesse (la conserver TOUJOURS supérieure à la vitesse de décrochage avec une marge de sécurité importante (+30%) pour contrer d'éventuelles rafales).

IV. La turbulence de sillage.

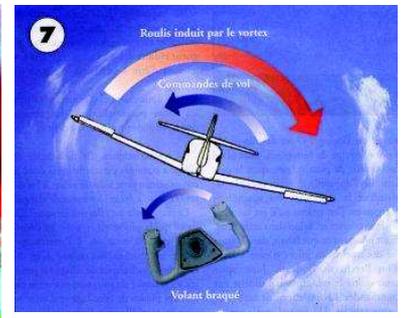
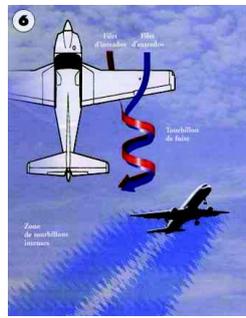
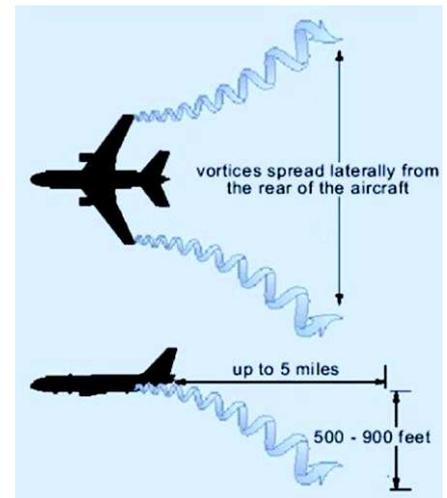
La turbulence de sillage est un phénomène général relatif a tout objet en déplacement dans l'air.

Si on s'y intéresse dans la partie décollage/ atterrissage c'est que, dans cette zone d'évolution, ses effets peuvent avoir des conséquences dramatiques.

On retiendra l'intensité de cette turbulence pour les avions dépend de la taille de l'appareil.

Cette turbulence redescend vers le sol d'environ 1000 ft à la vitesse de 500 ft/min.

Les turbulences générés par les appareils à voilure tournante (hélicoptères, autogires) sont 8 à 12 fois plus importante (elles correspondent a celle d'un avion 8 à 12 fois plus lourd !).



- **Gestion de la turbulence dans le trafic.**

Tour de piste en se plaçant légèrement au dessus de l'appareil qui me précède.

En cas de vent de travers je vole au vent de l'aéronef qui me précède

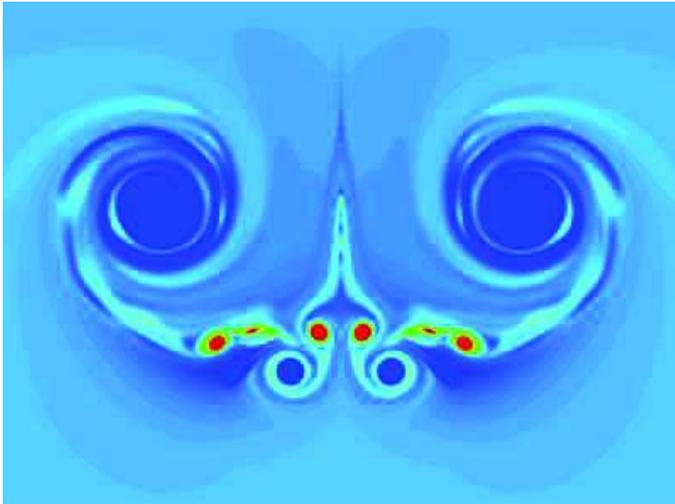
Décollage vent de face j'attends de **1 à 4 minutes** selon la taille de l'aéronef qui me précède.



Turbulence de sillage "F18 Hornet"



Turbulence de sillage "Caravelle"



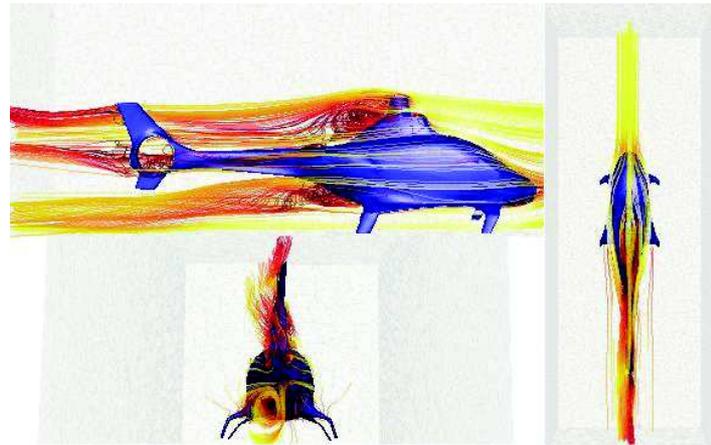
Turbulence de sillage



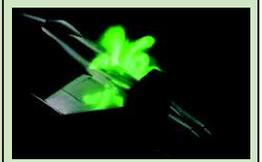
Turbulence de sillage



Décollage derrière un gros porteur sans tenir compte de la turbulence de sillage : voilà le résultat ... un Cessna 150 pendu par sa roue gauche à une ligne HT



Turbulence autour d'un hélicoptère



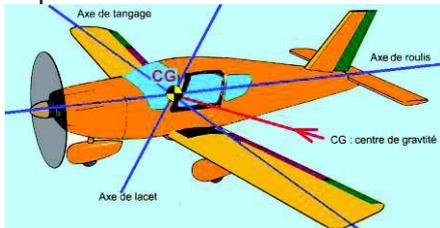
I. Trois points très particuliers qu'il est important de bien définir

- Le centre de Gravité CG ou G (en physique)

Le **centre de gravité** (C_G) ou barycentre des masses est par définition le point d'application de la force de gravitation : le **poids** (P).

Sa position ne dépend que des masses des différentes parties de l'avion et absolument pas de son aérodynamique. Par contre il peut se déplacer lors du chargement (passagers, essence, bagages... etc) mais aussi en vol, lorsque du carburant est consommé, ou même simplement déplacé pour équilibrer certains avions. Ce point n'est donc PAS un point FIXE.

C'est aussi le point autour duquel s'appliquent **les moments de toutes les autres forces** en particulier les **forces aérodynamiques** s'exerçant sur les ailes et les gouvernes et qui ont un effet très dépendant du "bras de levier".



En mécanique du vol, le mouvement de l'avion est assimilé au mouvement de son centre de gravité.

De même, pour l'étude du mouvement "autour" du centre de gravité, ce point est l'intersection (ou l'origine) des trois axes de rotation de l'avion (Roulis, tangage et lacet).

- Centre de poussée CP

La portance se crée sur chaque partie de l'aile (principalement car la contribution du fuselage est habituellement négligeable). Le point d'application de la portance s'appelle le **centre de poussée** (CP). Il correspond au point d'application de la **résultante des forces aérodynamiques**. Comme pour le centre de gravité c'est un "barycentre" c'est-à-dire un point qui rassemble une multitude de petits effets en un point unique.

Pour les avions classiques le **centre de poussée** est un point qui se situe au niveau du profil entre 30 et 50% de la corde depuis le bord d'attaque.

- Le foyer F

Le **foyer** est un point très important pour un avion. En fait c'est sa position par rapport au centre de gravité qui a une très grande importance qui détermine sa stabilité et sa maniabilité. Il est défini comme le **point d'application des variations de portance**. En pratique il se situe entre 20 et 30% de la corde depuis le bord d'attaque. Sa position varie peu.

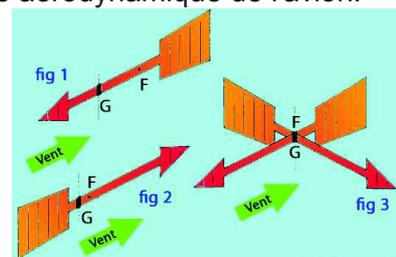
Ce point difficile à définir de manière simple dépend de la forme aérodynamique de l'avion.

Commençons par l'identifier sur une girouette...

Considérons une girouette, articulée autour d'un axe passant par son centre de gravité G . Elle indique bien la direction d'où vient le vent et changera de direction si le vent tourne. (fig 1). Si on l'écarte, à la main, de cette position d'équilibre, elle y reviendra. L'équilibre est **stable**.

Pour la seconde girouette, l'axe, toujours en G , se trouve très près de la grande surface. Elle tourne le dos au vent ! Si on la remet dans le bon sens, elle s'écartera et retrouvera la position d'équilibre précédente (fig 2). Cette girouette fonctionne à l'envers !

La dernière girouette présente un axe placé dans une position intermédiaire. Elle ne bouge plus ! Quel que soit le vent elle reste dans la position dans laquelle on la place (les 2 positions de la fig 3), ignorant totalement la direction d'où vient le vent. L'axe est placé au "foyer" de la girouette".



Détermination expérimentale du foyer d'un avion (ou simplement d'une aile... mais ce n'est pas le même !)

La détermination de la position du foyer s'effectue sur une maquette... en reprenant la même démarche que pour la girouette. Le fuselage percé de trous peut recevoir un axe sur les différents perçages. Le système (maquette traversée par un axe) est dans un premier temps équilibré afin de s'affranchir de la pesanteur puis placé dans un flux d'air (veine d'une soufflerie aérodynamique).

- Cas n° 1 : pour un perçage situé plutôt "en avant" l'avion se positionne normalement dans le flux d'air.
- Cas n° 2 : pour un perçage situé plutôt "en arrière" l'avion se retourne lorsqu'il est dans le flux d'air.
- Le cas intéressant ! On comprend que, pour un perçage intermédiaire, il doit exister une position pour laquelle l'avion est indifférent au flux d'air (il conserve sa position initiale)... le point ainsi déterminé est le **foyer de l'avion**.

Le foyer est le point pour lequel le moment de tangage ne varie pas avec l'incidence.

II. Ces points sont ils fixes ?

Déjà il faut savoir de quoi on parle... en particulier pour le CP et le foyer F certains auteurs s'intéressent seulement à l'aile et d'autres à l'avion complet ce qui change beaucoup de chose et surtout la position de ces points. Ici on va s'intéresser à l'avion complet.

• Déplacement du centre de Gravité CG

Le pilote doit savoir où se trouve le centre de gravité de son appareil. La position "à vide" est inscrite dans le manuel de vol.

Lors du chargement (*passagers, bagages, carburant*) le pilote déplace ce point et il doit estimer sa nouvelle position "après chargement".

Ce point peut aussi effectuer un "déplacement en vol" par exemple lorsque le carburant est consommé... mais, sur certains appareils, il est aussi parfois déplacé, à l'initiative du pilote, par transfert de carburant ou par vidange, (*sur le Concorde qui était un cas très intéressant, le carburant était déplacé pour chaque phase du vol suite au déplacement des forces aérodynamiques en particulier lors du franchissement du "mur du son" ! Il y a aussi le cas des "water ballast" des planeurs*).

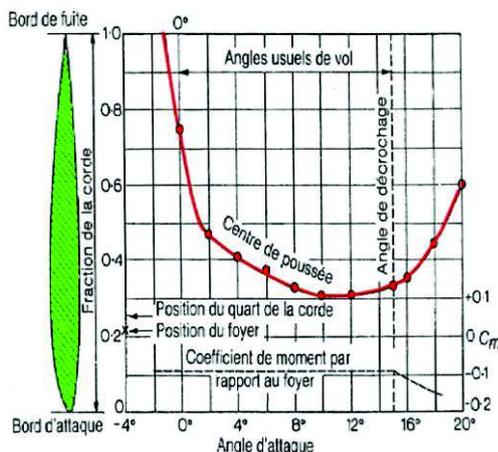


Planeur à réaction ? Non vidange des "water ballasts" !

• Déplacement du centre de poussée CP (CAEA)

L'emplacement du CP dépend bien sûr de l'avion mais il dépend aussi de l'angle d'attaque (*modification de la répartition des pressions sur l'aile... et donc du point d'application de la portance*).

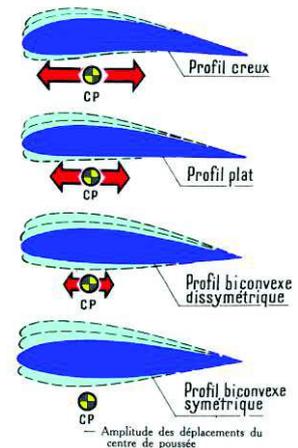
Il se déplace donc lors des différentes phases de vol en fonction des variations de la vitesse et de l'incidence.



Très en arrière aux incidences négatives il avance franchement (40% de la corde à 4°), passe par un maxi (30% pour 10°) puis recule franchement dès que l'incidence de décrochage est dépassée. (schéma à gauche).

L'amplitude du déplacement dépend du profil. (schéma à droite).

Plus ses déplacements sont importants et plus l'avion sera délicat à piloter.



• Déplacement du foyer (CAEA)

En pratique on va considérer que le centre de poussée et le centre de gravité sont superposés (c'est loin d'être vrai)... et que l'avion est stable après réglage (*trim*) de la gouverne de profondeur.

Le foyer viendra alors jouer son rôle de **point d'application des variations de portance**. Ce choix permettant ensuite une compréhension simplifiée de l'équilibre et de la stabilité de l'avion.

Pour une configuration donnée ce point est fixe.

Mais l'emplacement du foyer peut lui aussi varier si on fait varier l'aérodynamique de l'avion... par exemple en sortant simplement les volets !

III. Centrage et stabilité

• C'est quoi la stabilité ?

Pour qu'un l'avion soit pilotable (*par un être humain !!! (*)*), il est nécessaire qu'il soit stable c'est à dire qu'il réagisse dans le "bon sens" lors d'une perturbation de son équilibre.

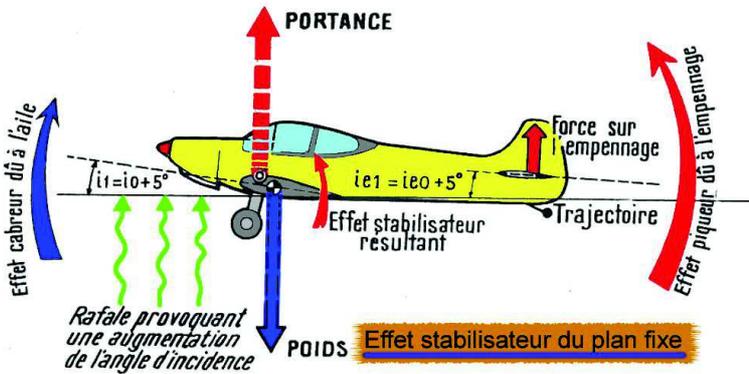
Si l'avion subit un brusque changement d'incidence il est souhaitable qu'il réagisse par une action tendant à contrer cet écart... Par exemple : si une perturbation provoque un mouvement à piquer, l'avion réagit en relevant le nez spontanément sans que le pilote agisse sur les commandes

(* Certains avions sont construits instables (Il existe des prototypes de chasseurs modernes avec flèche inversée type X29 ou Su47...) mais seul un ordinateur et des commandes de vol électriques permettent de les faire voler.

La stabilité d'un aéronef est caractérisée par la tendance pour cet aéronef à revenir à sa position d'équilibre lorsqu'une cause quelconque l'en écarte.

• **Rôle de l'empennage dans la stabilité**

L'aile seule ne peut apporter une stabilisation suffisante ... ce rôle est tenu par l'empennage horizontal.



Si on suppose une rafale de vent faisant augmenter l'incidence de 5°.

- La portance augmente
 - Le centre de poussée avance
 - Tout ceci crée une augmentation supplémentaire du cabrage !
- Pour le plan fixe l'effet est le même.
- La portance augmente
 - Une force supplémentaire s'exerce sur l'empennage. Elle est dirigée vers le haut.

Au bilan l'empennage crée un couple piqueur (stabilisateur car retour vers l'assiette initiale) qui s'oppose à l'effet cabreur de l'aile.

L'avion sera STABLE si l'effet redresseur produit par le plan fixe est supérieur à l'effet perturbateur créé par l'aile.

• **Le centrage**

Pour obtenir la stabilité il faut positionner le centrage en respectant certaines règles dictées par la mécanique et l'aérodynamique.

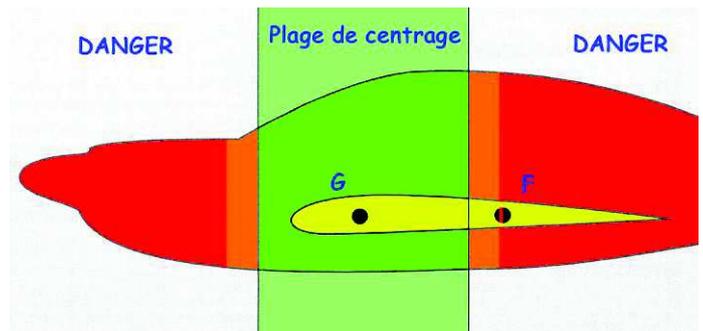
Centrer un aéronef signifie placer son centre de gravité à une certaine distance du foyer.

La règle absolue de la stabilité est de placer le centre de gravité en avant du foyer.

Si G se rapproche un peu trop de F l'avion devient très réactif à la moindre sollicitation des commandes. On veillera donc à garder une marge.

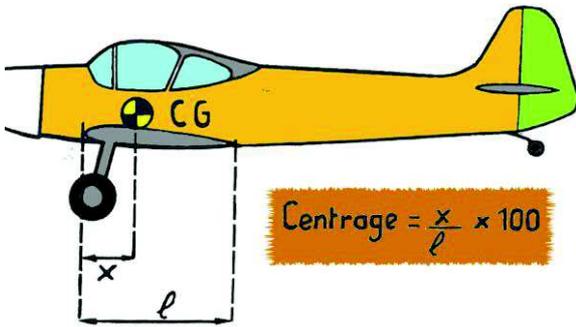
La distance G F s'appelle la **marge statique**.

La zone de positionnement de G (en vert sur le schéma) par rapport à F s'appelle la **plage de centrage**.



En dehors de cette plage le centrage devient dangereux. (En pratique la plage de centrage a été calculée avec une tolérance raisonnable... mais il ne vaut mieux pas explorer cette zone de tolérance)

- La valeur du centrage



Pour quantifier le centrage on regarde où se situe le centre de gravité par rapport à une référence fixe de l'avion... le bord d'attaque de l'aile.

On note x cette position et l la longueur de la corde de profil.

Le rapport x/l fournit un pourcentage que l'on nomme **centrage**.

- Centrage avant ou centrage arrière ? Positions relatives de CP et CG.

On dira qu'un avion est **centré arrière** lorsque son centre de gravité se trouve en arrière du centre de poussée.

On dira qu'un avion est **centré avant** lorsque son centre de gravité se trouve en avant du centre de poussée.

Du point de vue de la stabilité c'est le centrage avant qui est la solution la plus favorable car les effets de l'aile et du plan fixe s'ajoutent pour améliorer la stabilité.

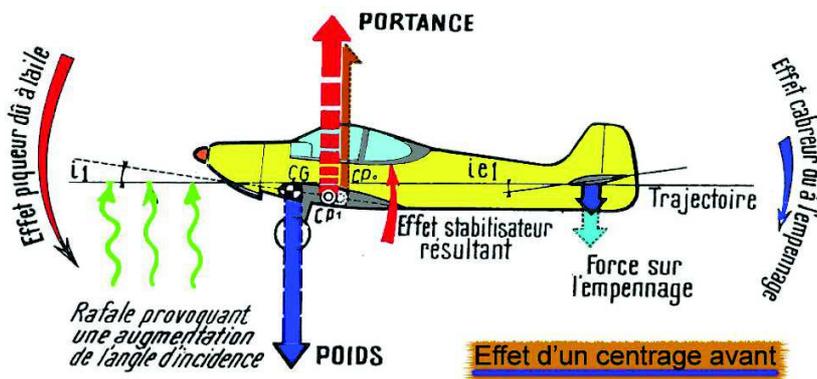
Cependant, c'est une autre préoccupation qui amène à déterminer la limite avant de centrage. En effet, plus le centre de gravité avance, plus important doit être l'effort demandé à l'empennage et ceci au détriment de la **maniabilité**, c'est-à-dire la possibilité pour le pilote d'effectuer sans effort prohibitif les manœuvres permettant de contrôler l'appareil.

Un avion **centré avant** est très stable mais peu maniable
 Un avion **centré arrière** est plus vif (limite instable) et donc très maniable.
 orsque son centre de gravité se trouve en avant du centre de poussée.

Le **manuel de vol** d'un avion indique donc toujours une limite arrière de centrage déterminée pour répondre à une condition de stabilité... et une limite avant de centrage déterminée pour répondre à une condition de maniabilité.

IV. Exemples d'analyse des effets liés au centrage

- Effet stabilisateur d'un centrage avant

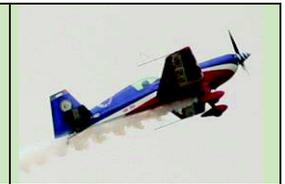


Imaginons une "rafale de vent" qui fait augmenter l'incidence (i_1) et voyons ce qui se passe.

La portance de l'aile augmente et crée un effet piqueur.

A l'inverse, sur l'empennage, c'est l'effet vers le bas qui augmente et provoque un effet cabreur.

Le bilan est un effet global légèrement piqueur qui rattrape (stabilisation) l'effet de la rafale.



Ce cours, plutôt destiné à la préparation CAEA qu'au BIA, a été extrait du très intéressant site : <http://l'avionnaire.fr>. Après avoir été récupéré il n'a été que très légèrement modifié et remis en page afin d'être adapté à nos séances de cours.

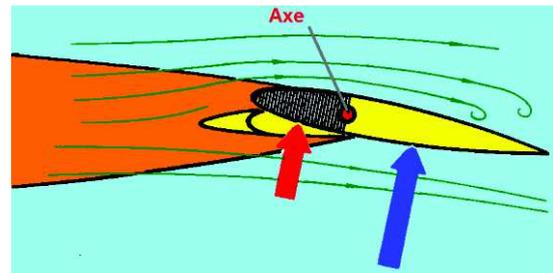
I. Généralités sur la compensation des gouvernes (BIA)

Pour réduire la fatigue musculaire du pilote consécutive aux réactions qu'introduisent dans les commandes les forces aérodynamiques appliquées aux gouvernes, on pratique souvent la **compensation des gouvernes**.

Plusieurs méthodes de compensation sont employées.

Une première solution consiste à **déporter l'axe** d'articulation de la gouverne de façon à ce qu'une partie de la surface de celle-ci se trouve en avant de cet axe.

Lorsque la gouverne est braquée la pression de l'air s'exerçant sur la partie avant tend à augmenter le braquage et s'oppose partiellement à l'action de l'air frappant la partie arrière qui tend à ramener la gouverne en position neutre.

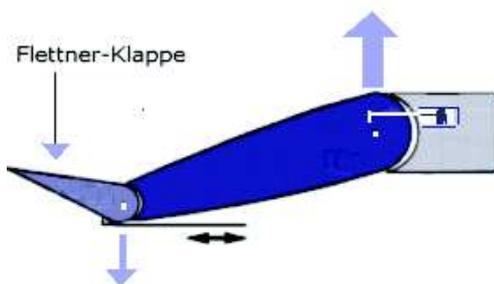


Ici la partie avant de la gouverne "aide" le pilote alors la partie arrière plus large nécessite un effort musculaire sur le manche.

Une autre méthode, très répandue, consiste en une petite surface disposée au bord de fuite de la gouverne à compenser. Cette surface auxiliaire, appelée **flettner** ou **tab** (ou **compensateur** en français !), peut être cabrée en sens inverse du braquage de la gouverne.

En raison du bras de levier important, bien que la surface du tab soit faible, l'action aérodynamique s'y exerçant réduit efficacement l'effet produit par le braquage de la gouverne.

(1) L'effort développé par le pilote est égal au moment aérodynamique de la gouverne par rapport à l'axe d'articulation. Ce moment devient : $M = (R \times d) - (r \times D)$.



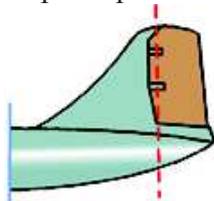
Voyons tous ces dispositifs en détail ! !!!

II. Les compensateurs d'évolution

Les compensateurs d'évolution sont des dispositifs montés sur les commandes permettant de réduire ou d'annuler l'effort exigé pour manœuvrer les gouvernes de vol.

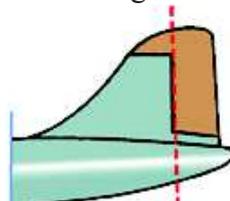
• Déport d'axe

Le principe est de reculer l'axe de rotation de la gouverne vers le bord de fuite.



© L'avionnaire

Partie déportée
Ex: DC3



© L'avionnaire

Corne débordante
Ex: Caravelle



Photo : F.Robert

Ci-dessus l'empennage vertical d'un DC3.

La partie déportée, ou corne débordante exerce un effet aérodynamique dans le bon sens et augmente l'efficacité de la gouverne.

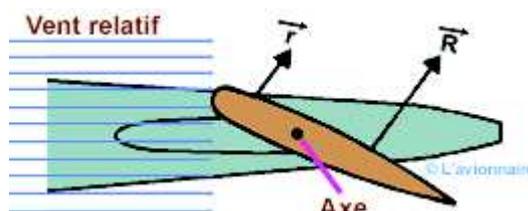
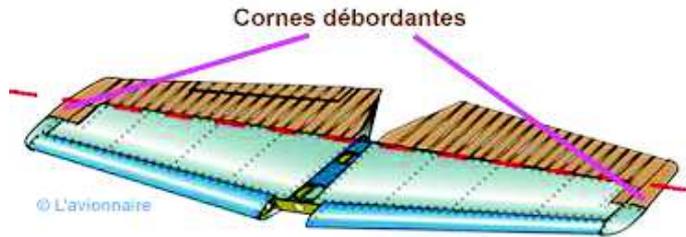


Photo : F.Robert

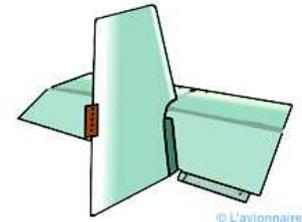
Ci-dessus l'empennage d'un Piper L 18.

Les avions modernes n'utilisent plus ce procédé pour la gouverne de direction, mais certains avions l'utilisent encore pour les ailerons ou la gouverne de profondeur comme l'ATR 42 et 72 ou le Cessna 172 ci-contre.



• **Tab fixe**

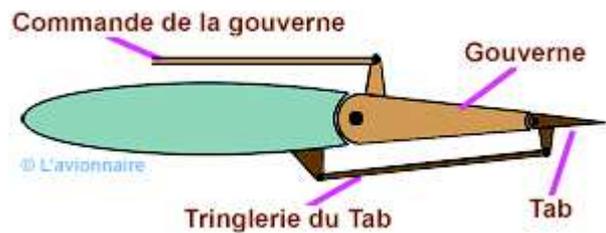
Cette méthode très simple consiste à fixer une petite plaque métallique sur le bord de fuite de la gouverne. Montée sur la gouverne de direction sur nombre d'avions légers, elle est utilisée pour contrer le souffle hélicoïdal en vol de croisière. L'inconvénient est que le réglage ne peut se faire qu'au sol et devra être vérifié ensuite par un vol d'essai.



Gouverne de direction du Jodel 119

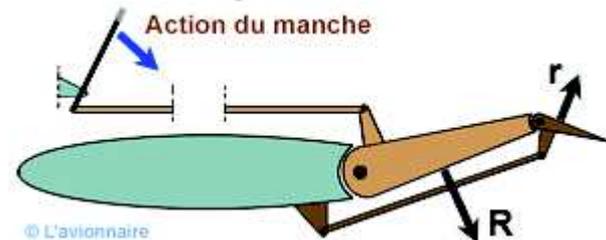
• **Tab automatique**

Une biellette relie le tab au plan fixe. Le contre braquage du tab est automatique lorsque le pilote agit sur le manche relié à la gouverne. En position neutre le tab est dans le prolongement de la gouverne.



Dans la figure ci-dessous le pilote tire sur le manche:

- l'ensemble mobile va pivoter autour de l'axe d'articulation A.
- le tab descend et la force r est dirigée vers le haut.
- une force R allant croissant apparaît sur la gouverne.



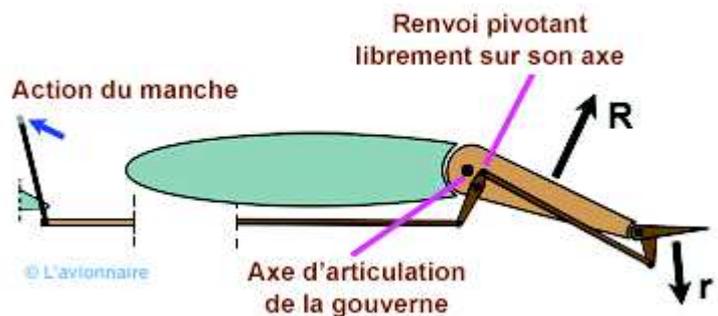
Mais la force aérodynamique r est suffisante pour maintenir la gouverne braquée.

• **Servo-Tab ou Tab commandé**

Dans ce cas le pilote agit directement sur le tab. Le renvoi entre la commande et la biellette du tab pivote librement sur son axe.

En poussant sur la commande :

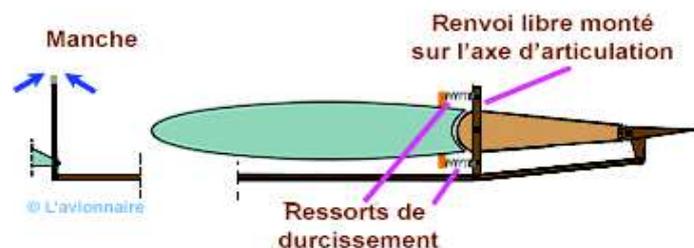
- le tab monte et la force r est dirigée vers le bas.
- l'ensemble va pivoter autour de l'axe d'articulation A.
- une force R apparaît sur la gouverne.



A noter que le tab diminue l'efficacité de la gouverne.

• **Tab à ressorts**

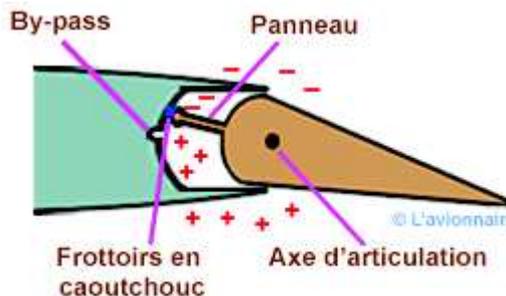
La commande du tab transite pour un renvoi libre monté sur l'axe d'articulation de la gouverne. Les ressorts permettent une sensation musculaire lors du braquage du tab.



• **Panneau compensateur**

La surface de compensation se trouve à l'intérieur du plan fixe. Ce système est monté sur Boeing 707.

Ci-dessus l'abaissement de la gouverne provoque une augmentation de pression côté intrados et une diminution de pression côté extrados, cette différence de pression se transmet aux chambres situées dans le plan fixe et fait office de compensateur.



Des frottoirs souples en caoutchouc en bout du panneau permettent l'étanchéité entre les deux chambres.

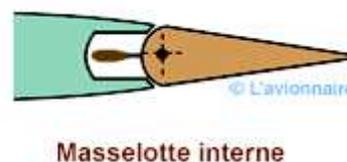
En position neutre les deux chambres sont reliées par un by-pass de façon à conserver au système son rôle de compensateur d'évolution.

• **Equilibrage statique**

Les gouvernes peuvent être soumises à des oscillations causées par la flexion et la torsion de la structure dont les fréquences naturelles sont modifiées par les forces aérodynamiques. A certaines vitesses les fréquences de torsion et de flexion se rejoignent, créant un battement ou flottement de la gouverne qui s'amplifiera très rapidement pouvant aller jusqu'à la destruction de l'aérodyne.

La gouverne sera plus sensible au flottement appelé 'flutter' si son centre de gravité est éloigné de son axe d'articulation.

Il existe plusieurs solutions pour ramener le centre de gravité plus en avant en plaçant des masses de plomb.



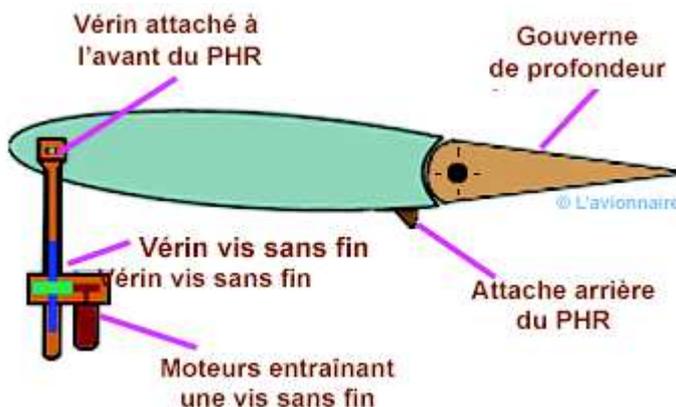
Source ; Wikimedia Commons/ Photo:Jaypee Deutsches Museum Munich

Ci-contre le compensateur à masselotte externe des ailerons du Fiseler Fi156 (Morane Saulnier 500/505)

III. Les compensateurs de régime

• **Plan horizontal réglable - PHR**

Deux moteurs électriques (généralement un normal et un de secours) entraînent un vérin composé d'une vis sans fin. L'ensemble du mécanisme est soit monté à l'arrière du fuselage (Airbus), soit monté dans le plan fixe vertical (Fokker et Falcon). La tête du vérin est fixée à l'avant au PHR. En faisant tourner les moteurs dans un sens ou dans l'autre, la tête du vérin monte ou descend et fait varier l'incidence du PHR, qui sert alors de compensateur.



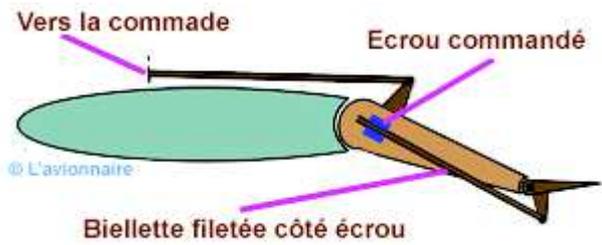
Sur l'Airbus 300 le débattement du PHR est de 3° vers le haut et 12° vers le bas. A noter que sur certains gros porteurs le PHR sert également de réservoir de carburant.

- **Trim**

Une biellette dont l'un des bouts est fileté, relie le tab à un écrou placé sur l'axe d'articulation de la gouverne.

En faisant tourner l'écrou soit par un système de moteur électrique, soit par un système manuel (câble et pignons) dans un sens ou dans l'autre, on fait varier la longueur de la biellette.

Il serait donc tout à fait possible de piloter en utilisant ce trim.



- **Assistance**

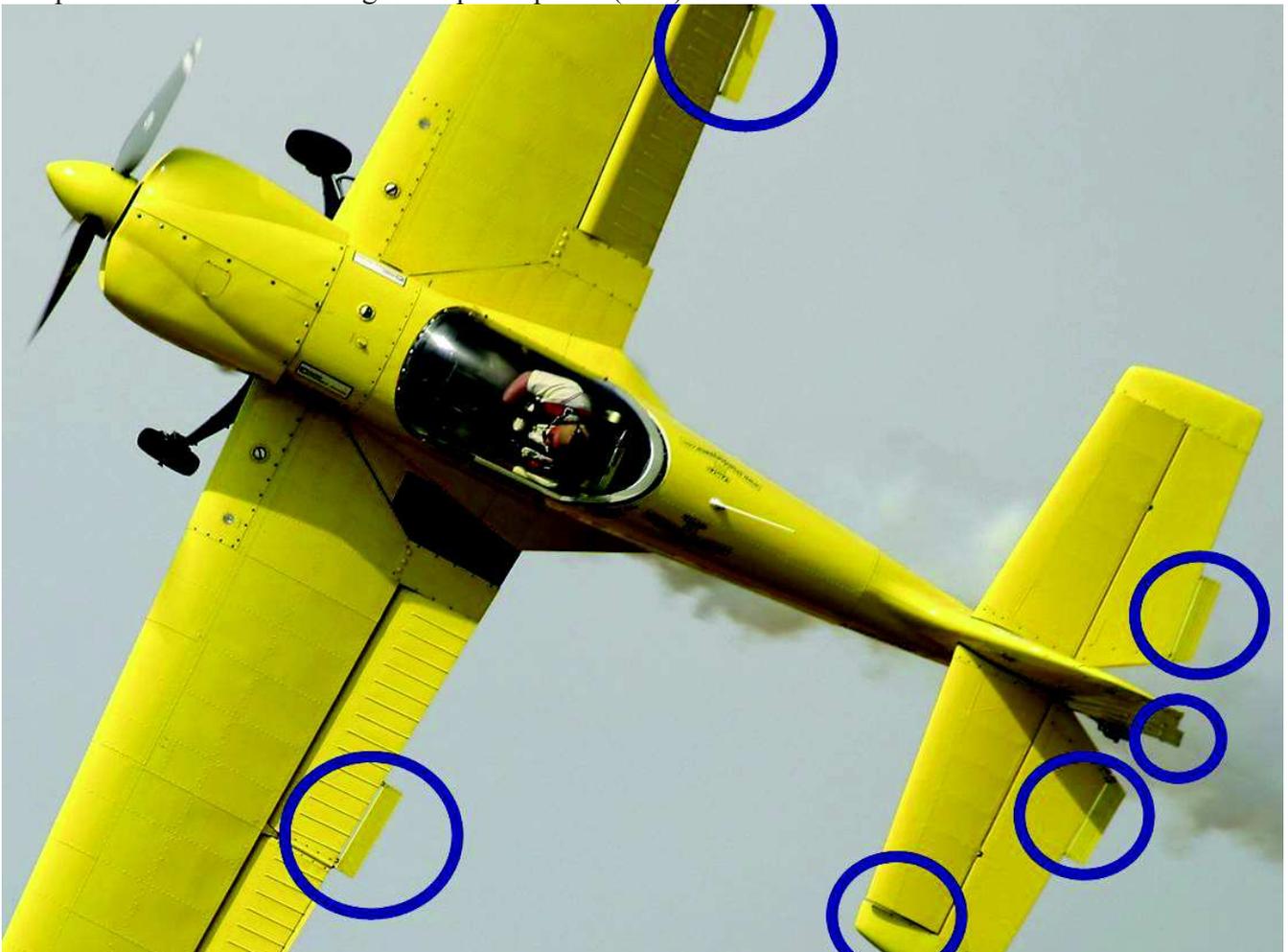
Sur les avions de transports modernes en raison des dimensions importantes des gouvernes et des forces aérodynamiques s'exerçant dessus, ainsi que la longueur des tringleries pour atteindre ces gouvernes, le pilote n'agit plus directement sur les gouvernes mais sur des servo-commandes qui produisent la force nécessaire pour braquer les gouvernes...

IV. Exemple d'un avion de voltige.

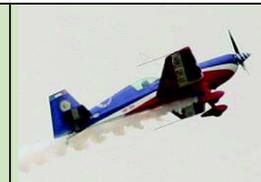
Ici, sur un avion de voltige, les efforts au manche seraient très importants compte tenu du surdimensionnement des gouvernes. On note donc qu'elles sont toutes compensées.

Certaines compensations peuvent d'ailleurs être FIXES comme celle de la gouverne de direction qui a été réglée de manière à être neutre.

On note ensuite des cornes débordantes (gouverne de profondeurs) les autres sont des compensateurs d'évolution réglables par le pilote (trim) en vol.



Des compensateurs et trim sur toutes les gouvernes de cet avion d'acrobatie. Notez aussi, tout en bas à droite, la partie déportée dite "à corne débordante" qui permet de réduire les efforts du pilote lorsqu'il actionne la gouverne de profondeur.



Ce cours correspond au programme du CAEA. Cela reste culturellement intéressant pour le BIA.

1) Introduction

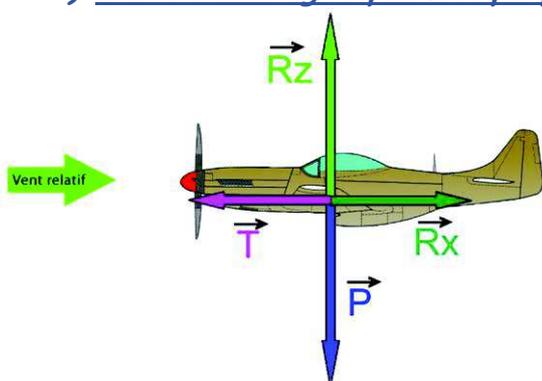
Nous allons nous intéresser au vol d'un avion de type monomoteur à hélice... ce qui nécessite d'abord de comprendre le rôle et le fonctionnement d'un moteur et d'une hélice.

Il faut aussi avoir vu les notions de traînée, portance etc... ainsi que la polaire.

Pour commencer, et pour simplifier le problème, on considèrera que nous allons voler en palier, que la puissance du moteur est connue et que l'hélice a un rendement de 100%.



2) Puissance du groupe motopropulseur.



Rappel de physique : on peut définir la puissance de deux

manières. C'est une énergie divisée par un temps $P = \frac{W}{t}$ (plus on a

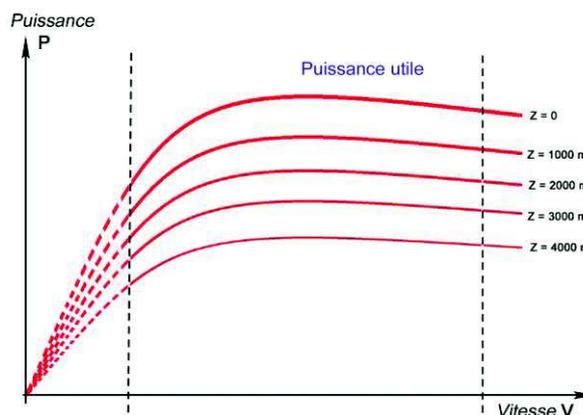
d'énergie libérée dans une même durée et plus le moteur est puissant).

Mais on préférera ici le produit d'une force par une vitesse :

$P = F.V$ (résultat en watts W)... tout simplement parce que cette force sera la traction (T sur le schéma ci-contre) exercée par le GMP sur l'avion !

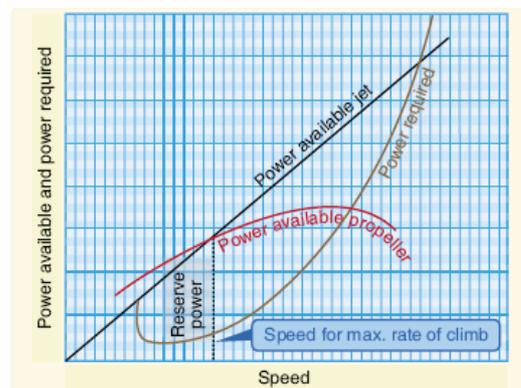
Nous observons ici différentes courbes de puissance utile délivrée par un GMP (Groupe MotoPropulseur) de type moteur 4 temps atmosphérique entraînant une hélice. Le rendement de l'hélice a été pris en compte (la puissance délivrée par le moteur à l'hélice est supérieure à ce que restitue l'hélice pour fournir la force de traction).

Cette puissance utile varie avec l'altitude: elle diminue à cause de la raréfaction de l'air. (*)



(*) Notons que ce n'est pas le cas pour les moteurs turbocompressés qui compensent (au moins dans les basses couches de l'atmosphère) cette chute de pression d'admission par une action du turbo... qui a, lui aussi, ses limites.

(*) De même, les moteurs à réactions, ne sont pas non plus concernés car leur rendement augmente avec l'altitude (la courbe de puissance en fonction de V ressemble à une droite passant par l'origine).



3) Puissance nécessaire au vol

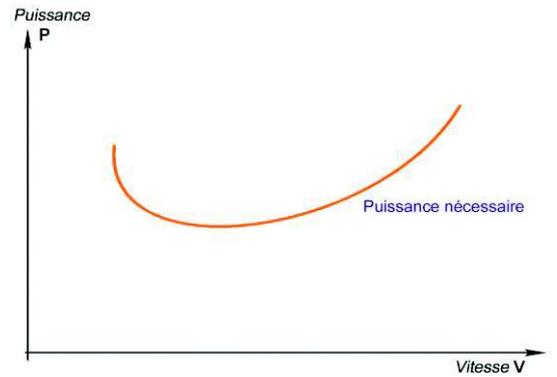
En palier la traction (T) compense la trainée (R_x)...

La courbe de R_x en fonction de V est connue. $R_x = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_x$.

Il suffit de multiplier par la vitesse pour avoir (P_n): la courbe de la

puissance nécessaire au vol.
$$P_n = R_x \cdot V = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_x$$

La forme et la position de cette courbe dépendent de plusieurs facteurs... Exemple ci-contre



On peut citer : l'**altitude** avec les différentes composantes de la trainée qui évoluent différemment selon la vitesse ; le **poids** de l'appareil ; et même la proximité du sol (effet de sol !).

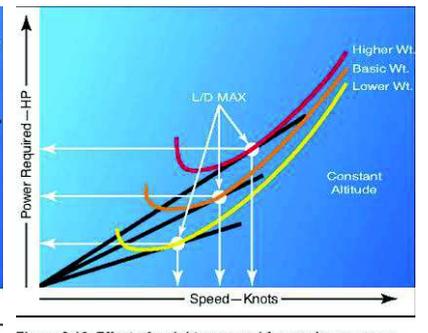
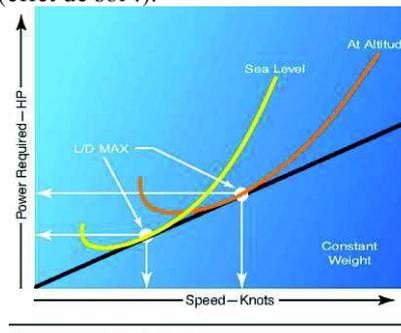
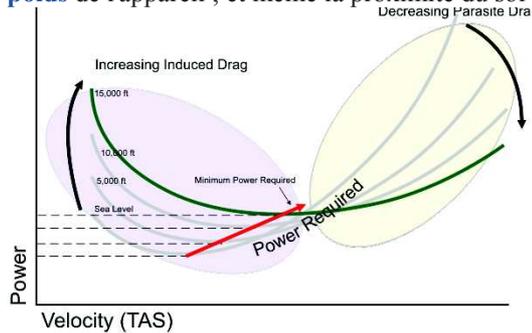
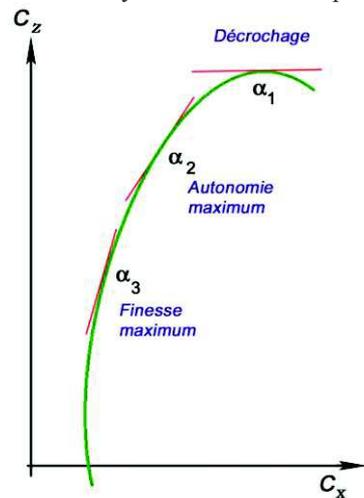


Figure 9-13. Effect of altitude on range.

Figure 9-12. Effect of weight on speed for maximum range.

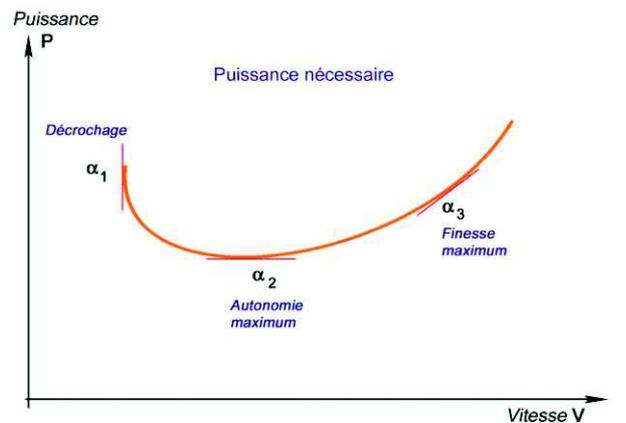
Ces schémas détaillent ces évolutions de la courbe de base et de ses conséquences sur le rayon d'action et l'évolution de la vitesse à sélectionner pour optimiser son vol.

L'analyse de cette courbe peut se faire en y retrouvant certains points particuliers de la **polaire**.



α_1 - Incidence de **décrochage**. Aucun vol possible pour une vitesse inférieure.

α_2 - P_n minimum c'est à dire **autonomie maximum** (C_x^2 / C_z^3) minimum. Cela correspondra aussi au **plafond maximum** et à la **séparation des deux régimes de vol**.



α_3 - **Finesse maximum** (C_z / C_x maximum), **rayon d'action maximum**, traction minimum.

De α_1 à α_2 la vitesse est faible et l'incidence importante. Il faut une puissance élevée pour vaincre la trainée due à l'incidence.

Autour de α_2 la vitesse est moyenne et l'incidence moyenne. Il faut une puissance faible pour voler.

Au-delà de α_2 la vitesse est forte et l'incidence faible. Il faut une puissance élevée pour vaincre la trainée due à la vitesse.

4) Domaine de vol

Nous allons maintenant superposer nos deux courbes de puissance. La P_u fournie par le GMP et la P_n nécessaire pour voler.

Etudions le cas particulier d'un vol en palier à 1000 pieds

Pour ce vol on porte sur un graphique la puissance en fonction de la vitesse.... Mais quelle puissance ? Celle du moteur ET celle nécessaire au vol en palier.

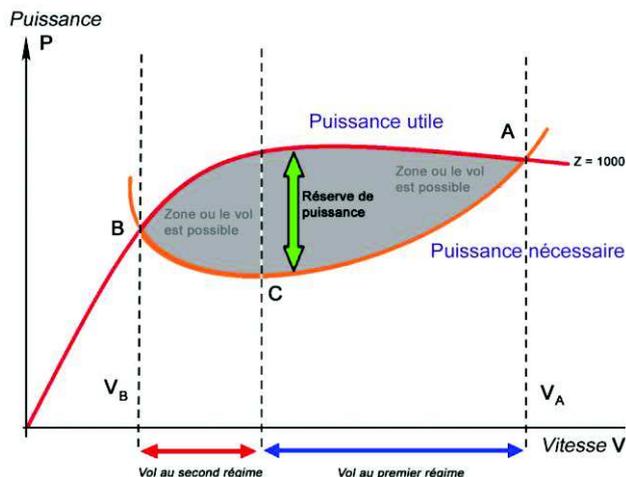
- La courbe de puissance du GMP (*Moteur + hélice*) dépendante de l'altitude et du rendement de l'hélice ... ce sera la puissance utile (P_u) ou disponible (en rouge sur le schéma).
- La courbe de puissance nécessaire au vol (P_n) (en orange sur le schéma).

En pratique on vole au point **A** ou au point **B** (second régime).

A chacun de ces points correspond une assiette et une vitesse de vol.

Mais on peut déplacer ces points dans toute la zone grisée qui reste accessible.

En réduisant la puissance on peut voler a n'importe quel point sur la courbe orange entre B, C et A.



La portion située entre B et C (vitesse lente et forte incidence) correspond a une zone de vol dite au **second régime**. Le pilote doit être vigilant car **cette zone est dangereuse**.

La portion située entre C et A (vitesse élevée et faible incidence) correspond a une zone de vol dite au **premier régime**. C'est une zone de vol est confortable (stable) pour le pilote

- **Vol au second régime = DANGER !**

Si je suis au point B et que pour une raison quelconque ma vitesse diminue un peu... n'ayant aucune réserve de puissance je suis la courbe orange vers le haut et en arrière... jusqu'au décrochage.

Si je suis au point B et que pour une raison quelconque ma vitesse augmente un peu... l'avion se trouve en excès de puissance et accélère... jusqu'au point A.

Le vol au point B (second régime) est INSTABLE !

- **Vol au premier régime = vol stable !**

Si je suis au point A et que pour une raison quelconque ma vitesse diminue un peu... l'avion se trouve en excès de puissance et accélère... et revient jusqu'au point A.

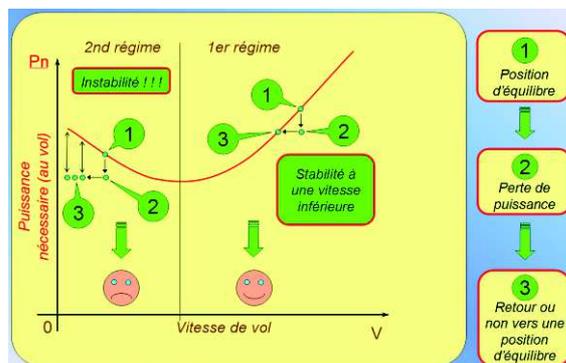
Si je suis au point A et que pour une raison quelconque ma vitesse augmente un peu... l'avion se trouve en manque de puissance et ralenti... ce qui le ramène au point A.

Le vol au point A (premier régime) est très STABLE.

- **Analyse des deux régimes de vol en cas de perte de puissance.**

On constate au premier régime que la perte de puissance va entrainer une perte de vitesse... et un retour vers une position d'équilibre stable...

On constate au second régime que la perte de puissance va entrainer une perte de vitesse... et l'impossibilité d'un retour vers une position d'équilibre. Le vol est instable...



- **Comment voler sur un autre point situé entre B et A ?**

Il suffit de réduire la puissance du moteur en agissant sur la manette des gaz. La courbe de puissance utile s'abaisse. B avance, A recule. A vous de choisir votre régime de vol... mais attention ! Comme le montre l'explication ci-dessus le second régime étant INSTABLE il faudra d'abord prendre de la vitesse par augmentation de puissance (ou mise en descente) et diminution d'incidence AVANT de réduire pour retrouver un point sur la branche second régime.

- **Voler à la puissance minimum... et donc à autonomie (en temps) maximum !**

Pour un poids donné, la traction minimale (pour maintenir un vol stable en palier) sera obtenue lorsque la puissance P_u sera minimum. En réduisant cette puissance A et B vont se rejoindre en C. Si je réduits encore... je tombe car la puissance est insuffisante pour maintenir le palier !

Le vol au point C correspond à la séparation des régimes de vol, c'est le vol à **puissance minimum** ou à **autonomie maximum**.

- Que se passe-t-il si, partant d'un point situé entre B et A, j'augmente la puissance (gaz) ?

Si je maintiens le palier, mon incidence baisse, ma vitesse augmente... et si je mets toute la puissance disponible j'arrive au point A (déjà vu).

Autre cas... je maintiens l'incidence (ou la vitesse). L'augmentation de puissance va me permettre de monter (réellement mais aussi graphiquement dans la zone grisée) ! Je pourrais alors, à cette nouvelle altitude, refaire un palier... avec d'autres paramètres (nouvelles courbes).

- Voler à la finesse maximum

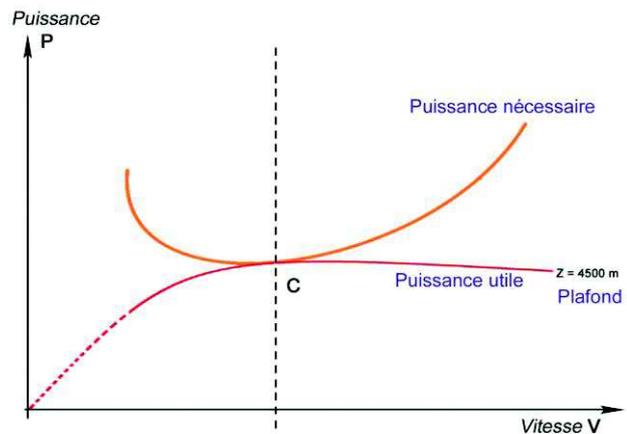
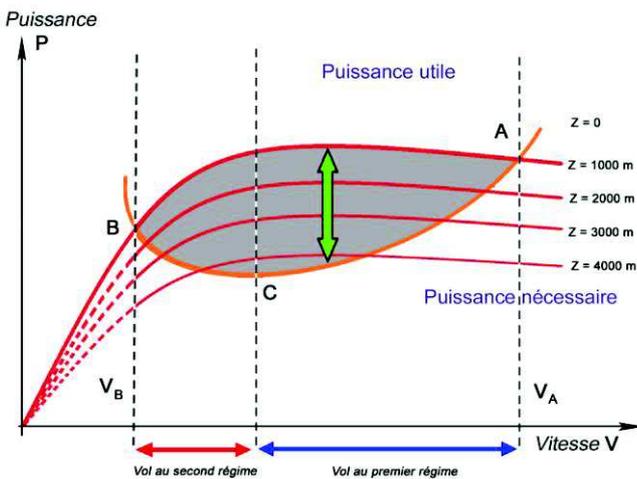
Pour un poids donné, la traction minimale (*pour maintenir un vol stable en palier*) sera obtenue lorsque la finesse sera maximale. La **finesse maximale** étant obtenue à l'incidence où le rapport Cz / Cx est maximal, cette incidence est lue sur la polaire au point de contact de la droite issue de l'origine et tangente à la polaire.

Le vol à la finesse maximum permettra d'obtenir le **rayon d'action maximum**.

5) Notion de plafond

Sur les prochains schémas la courbe de puissance nécessaire au vol ne sera pas modifiée pour des raisons de lisibilité du schéma. En réalité cette courbe se déforme et se déplace un peu vers le haut lorsque l'altitude augmente.

Placé à 1000 m j'utilise ma réserve de puissance pour monter... la limite de mon domaine de vol (zone grisée) se rétrécit au fur et à mesure que ma courbe de puissance utile s'abaisse.



On voit sur l'exemple qu'il ne me reste plus beaucoup de réserve de puissance à 4000 m... si je continue encore un peu les points A, B et C se réunissent au point C...

J'ai atteint la plus haute altitude possible. Le "**plafond**" de cet appareil.

En pratique, lorsqu'il a atteint le "plafond" un appareil vole avec sa puissance maximum et une seule possibilité d'assiette.

Toute action sur les commandes fera redescendre l'appareil.

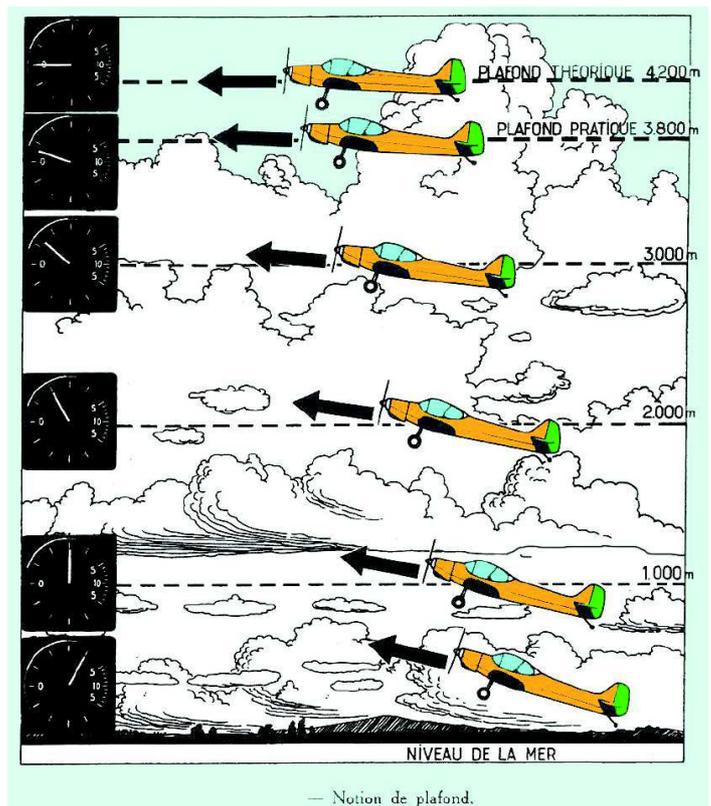
- Commentaire sur la notion de plafond :

Sur les 6 positions illustrées ci-contre, l'avion "souhaite monter".

A basse altitude, l'incidence est très importante et le variomètre très positif.

En gagnant de l'altitude, la raréfaction de l'air et la baisse de puissance utile du moteur font que le variomètre indique une montée de moins en moins performante pour une incidence de montée à maintenir de plus en plus faible.

Finalement, on atteint une limite. L'avion ne peut plus monter. Il a atteint son plafond. En pratique on atteint rarement le plafond théorique ce qui explique les deux dernières illustrations.



— Notion de plafond.

6) Utilisation de la réserve de puissance ($P_u - P_n$) pour la montée.

• Rappel sur l'avion en montée

Si θ est l'angle de montée on peut écrire les relations suivantes :

Sur $z'z$:

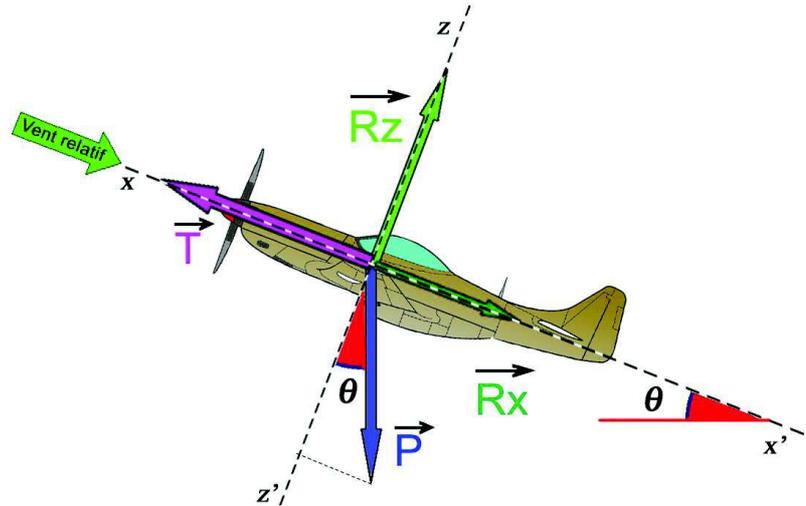
$$R_z = m \cdot g \cdot \cos(\theta) = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_z$$

Sur $x'x$: $T = R_x + m \cdot g \cdot \sin(\theta)$

$$\text{soit } T = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_x + m \cdot g \cdot \sin(\theta)$$

Et en passant à la puissance ($T \times V$)

$$P_u = T \cdot V = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_x + m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot V$$



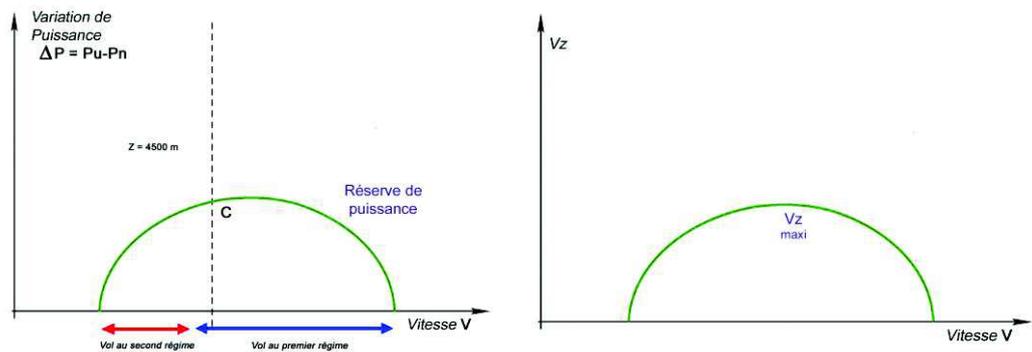
Comme la composante verticale (V_z) de la vitesse sur trajectoire (V) est liée à θ par $V_z = V \cdot \sin(\theta)$ l'expression de P_u

s'écrit donc $P_u = P_n + m \cdot g \cdot V_z$ d'où on peut extraire : $V_z = \frac{P_u - P_n}{m \cdot g}$

• Courbe $P_u - P_n$ et V_z

La courbe $P_u - P_n$ en fonction de V se déduit facilement des courbes de puissances.

Elle est aussi, à un coefficient près, identique à V_z en fonction de V !

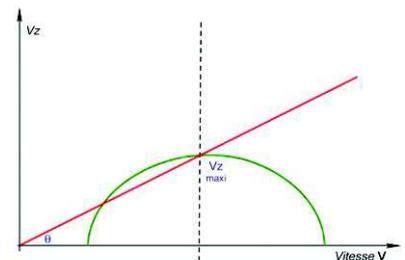


On peut alors se pencher sur les différentes vitesses ascensionnelles V_z .

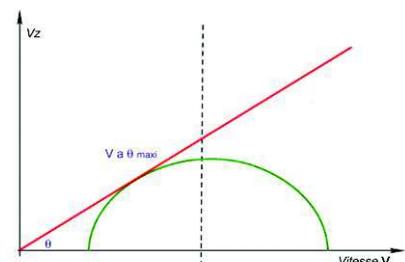
• Les vitesses de montée V_z . remarquables

La courbe V_z en fonction de V passe par un maximum $V_{z, \text{maxi}}$ c'est la **vitesse de montée maximum**... donc permettant d'atteindre le plus rapidement une altitude.

On remarque que l'on peut lire l'angle de montée θ sur le graphique puisque c'est l'angle entre la droite rouge et l'horizontale.



Donc, si nous recherchons le **meilleur angle de montée** θ_{maxi} il suffit de tracer la tangente à la courbe. Cette vitesse dite de **pente maximum**, pourra servir **pour éviter un obstacle élevé**.



Pour être complet il faut savoir que, sur certains avions, le θ_{maxi} est obtenu en utilisant les volets... ce qui change un peu la donne sur les graphiques. .

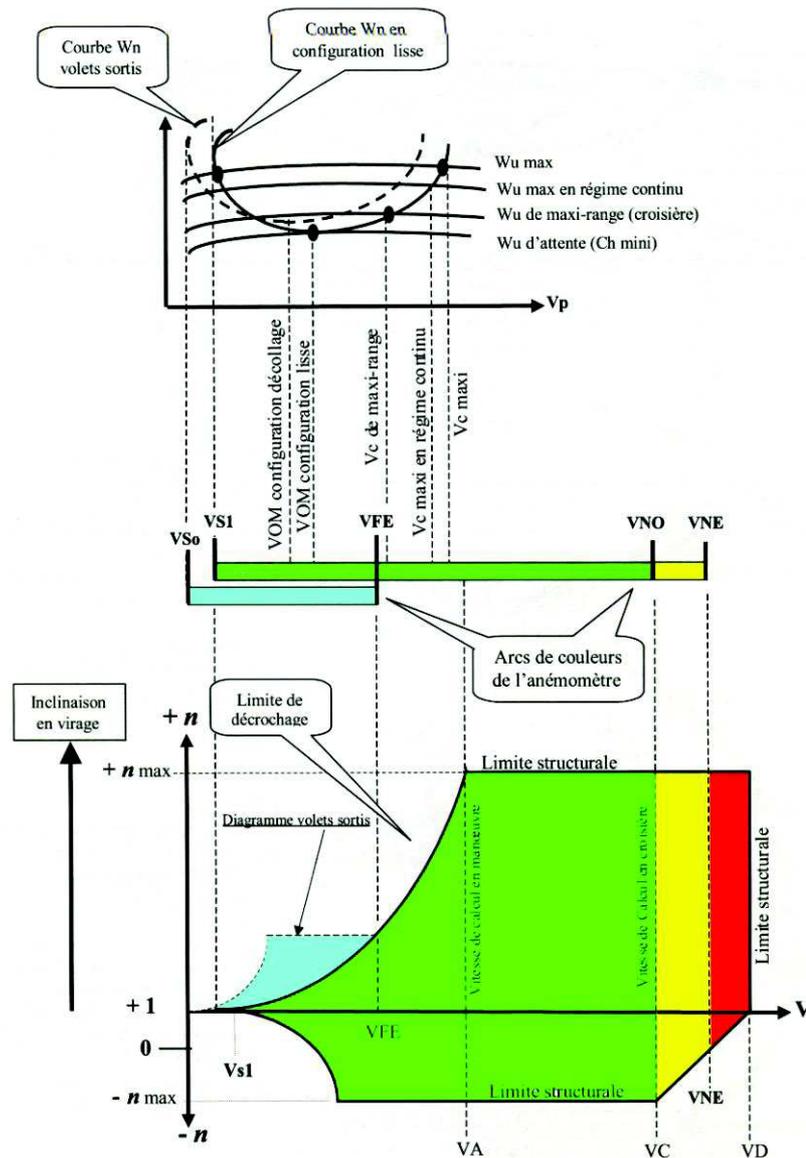
7) Limitations du domaine de vol : facteur de charge et vitesse.

Document colorisé
extrait du cours CAEA de
Charles Pigaillem.

Il y a un lien entre les vitesses, les puissances et les limitations du facteur de charge d'un appareil.

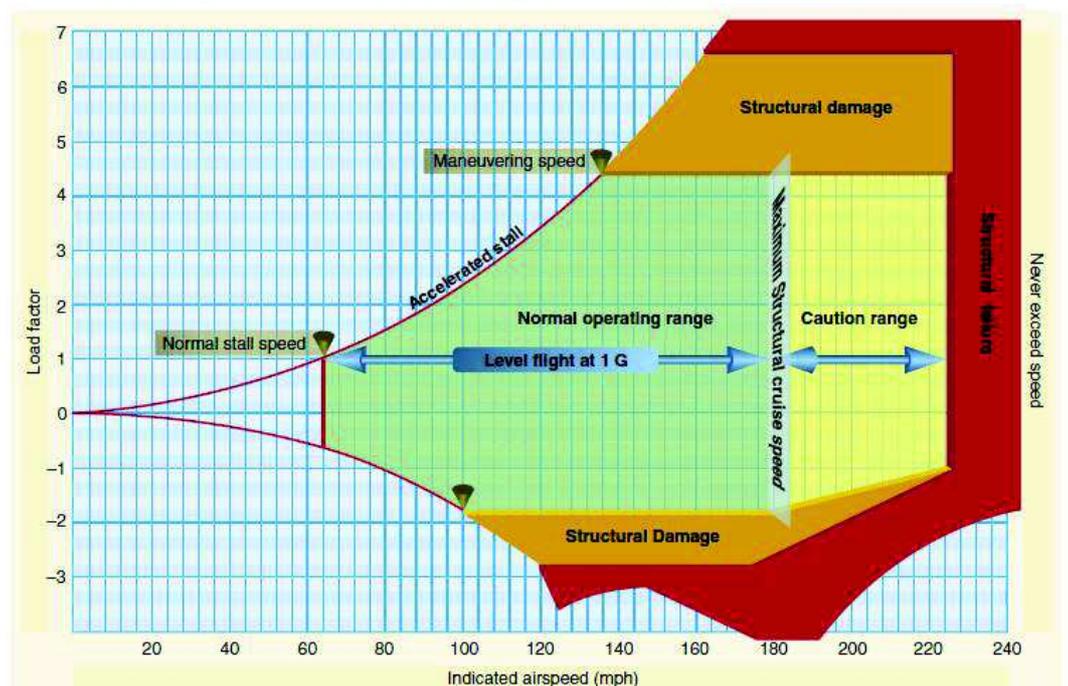
Il est intéressant de relier tous ces points et toutes ces zones.

Notez que la courbe P_n (W_n chez M Pigaillem) prend une forme différente lorsque les volets sont sortis ce qui fait apparaître un AUTRE domaine d'évolution.



Ce schéma, assez similaire au précédent, met en évidence :

- Le bon domaine de vol (en vert)
 - La zone de précaution (en jaune)
 - les zones dangereuses pour la structure (en orange)
- et
- la zone de rupture ! (en rouge)



8) Quelques vitesses usuelles "en pratique"

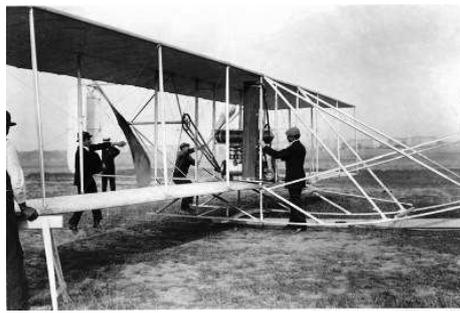
$V_{z\ max}$	Maximum de réserve de puissance
$V_{\ max}$	100 % de la puissance
$V_{\ autonomie\ maximale}$	50 % de la puissance
$V_{\ croisière}$	75 % de la puissance

9) Quelques puissances nécessaire au vol... Rapport puissance/poids

L'avion à pédale (<i>Gossamer condor</i>)	40 km.h ⁻¹	10 W/kg
L'avion des frères Wright	60 km.h ⁻¹	100 W/kg
Avion de tourisme	250 km.h ⁻¹	300 W/kg
Chasseur a hélice (1945)	700 km.h ⁻¹	800 W/kg
Chasseur a réaction (2012)	2700 km.h ⁻¹	5000 W/kg
Navette spatiale (<i>schuttle</i>)	11 000 km.h ⁻¹	20 000 W/kg



Gossamer condor



Wright Flyer



Diamond DA 20



P51 "Mustang"



F 35



Schuttle Atlantis



I. Vol stationnaire.

• Comment obtient-on la portance ?

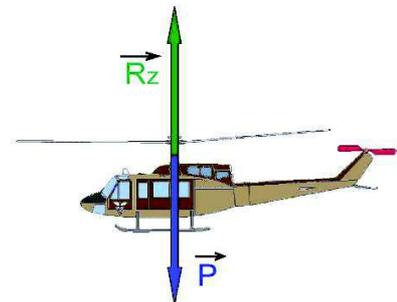
Pour résumer simplement, l'hélicoptère vole en remplaçant les ailes fixes d'un aéroplane "normal" par une **voilure tournante** constituée de pales. Lorsque l'hélicoptère met son rotor en mouvement, celui-ci génère une **portance**, de la même façon que le fait une voilure fixe dans un vent relatif.

Cette portance est contrôlée et orientée par le pilote afin de produire un déplacement dans pratiquement toutes les directions.

Nous ne nous préoccupons pas ici ni du rotor anti couple dont le rôle est d'empêcher l'hélicoptère de tourner autour du rotor... ni du plateau cyclique ou de la commande de pas qui sont des moyens de piloter l'hélicoptère.

• Bilan des forces.

On sait que l'hélicoptère a un poids (\vec{P}) et que le rotor produit une portance que nous noterons (\vec{R}_z). Lorsqu'un hélicoptère est en stationnaire au-dessus du sol, la somme des forces auquel il est soumis est nulle (*1^{ère} loi de Newton - cours de mécanique* : $\sum \vec{F} = \vec{0}$). En clair la portance est verticale et exactement opposée au poids.



$$\vec{P} + \vec{R}_z = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

(*) On peut l'appeler R_z ou R indifféremment puisque R_x est nulle

II. Vol en montée ou en descente verticale à vitesse cte

• Bilan des forces.

A **vitesse** de montée, ou de descente, **constante**, la **somme de ces forces** est toujours **nulle** !

On a toujours le poids (\vec{P}) et la résultante aérodynamique \vec{R} regroupant la portance (\vec{R}_z) et la trainée (\vec{R}_x) : $\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_z$

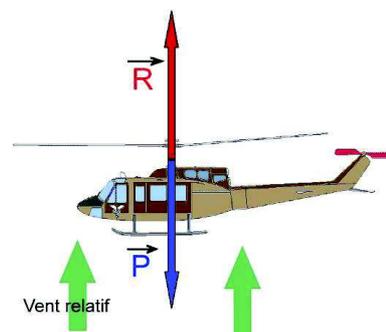
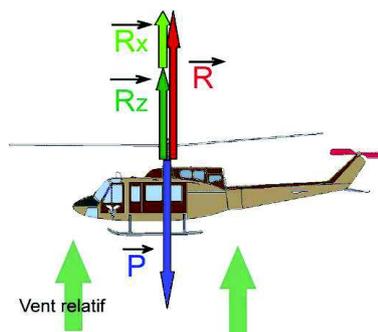
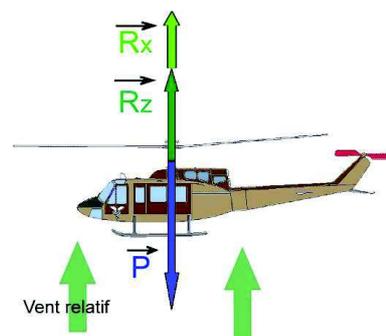
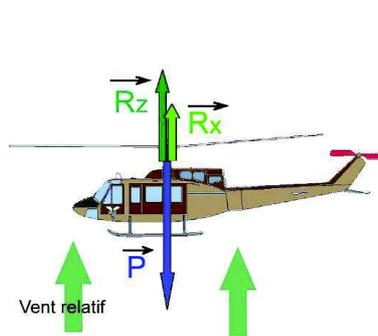
$$\vec{P} + \vec{R}_z + \vec{R}_x = 0 \text{ ou encore } \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

• Etude et schémas pour la descente.

Les efforts du moteur traduits ici par (\vec{R}_z) sont inférieurs au poids (et au cas statique) puisque l'hélicoptère descend et que la trainée (\vec{R}_x) lui donne un "petit coup de main" pour le freinage aérodynamique.

Le bilan est TOUJOURS nul :

$$\vec{P} + \vec{R}_z + \vec{R}_x = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$



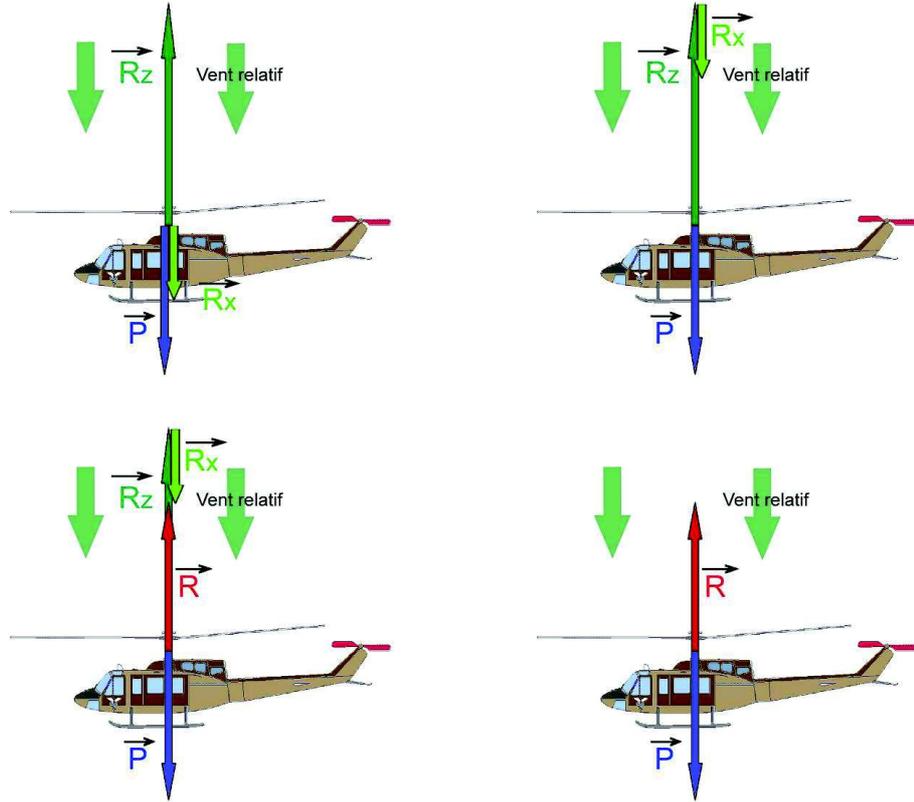
Attention seul le premier et le dernier des 4 schémas sont corrects les 2 autres montrent la construction vectorielle !

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_z$$

• Etude et schémas pour la montée.

Les efforts du moteur traduits ici par (\vec{R}_z) sont très supérieurs au poids (et au cas statique) puisque l'hélicoptère monte et qu'il doit aussi vaincre la traînée (\vec{R}_x) ... mais le bilan est TOUJOURS nul :

$$\vec{P} + \vec{R}_z + \vec{R}_x = \vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$



III. Le vol horizontal à vitesse constante

• La portance... et la traînée.

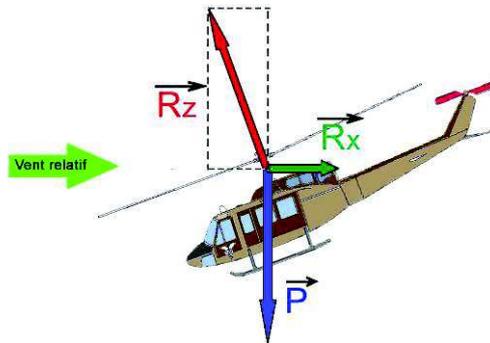
La portance (\vec{R}_z) doit changer d'orientation pour créer un déplacement horizontal. Si l'hélicoptère avance, il devra donc incliner son rotor vers l'avant... et sa cellule s'inclinera aussi.

Ce déplacement va, comme pour un avion, générer une traînée (\vec{R}_x).

• Bilan des forces.

Comme précédemment on a toujours le poids (\vec{P}) et une portance (\vec{R}_z) auxquelles s'ajoute une traînée (\vec{R}_x).

Lorsqu'un hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme la somme des forces auquel il est soumis est nulle (1^{ère} loi de Newton - cours de mécanique : $\sum \vec{F} = \vec{0}$). Si on ne se préoccupe pas des effets de couple et anti-couple (*) on garde : poids + portance + traînée = 0.



$$\vec{P} + \vec{R}_z + \vec{R}_x = \vec{0}$$

Comme pour tous les objets en mouvement ... si la vitesse est constante (grandeur ET direction) alors la somme des forces appliquées au mobile est nulle. C'est valable pour un hélicoptère en montée, en descente... en déplacement oblique ou à l'horizontale.

Les seuls cas où l'on observe une somme des forces non nulles correspondent à une variation de vitesse (accélération au décollage, ralentissement à l'atterrissage, passage de montée à vol horizontal etc...).

(*) ATTENTION ! L'anti-couple fournit une force qui sert à s'opposer à la rotation de la cellule autour du rotor (autre force !). Ces forces sont dans un autre plan que le plan vertical et leurs moments se compensent... Nous considérerons que les effets résiduels sont inclus dans la traînée de l'hélicoptère !

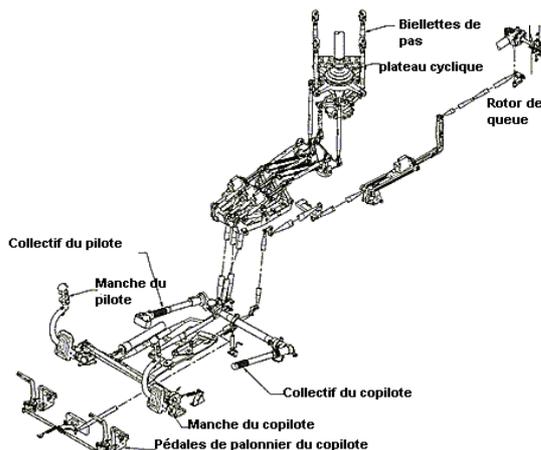
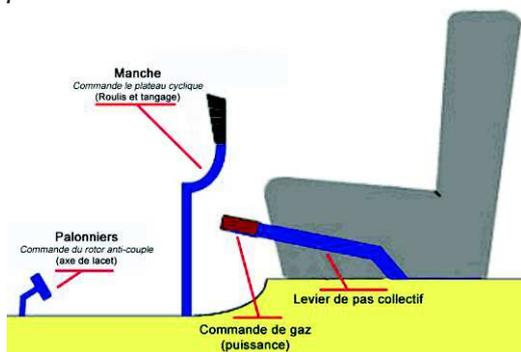
IV. Le pilotage de l'hélicoptère

• Les commandes

Palonniers : action sur l'anticouple, c'est une commande de pas variable qui fait tourner autour de l'axe de **lacet**.

Pas collectif : c'est le pas variable du rotor. Il délivre la portance.

Manche : il commande la position du plateau cyclique c'est-à-dire les axes de **roulis** et **tangage** par inclinaison de la portance.



On ne s'étendra pas davantage car cela devient rapidement très complexe !

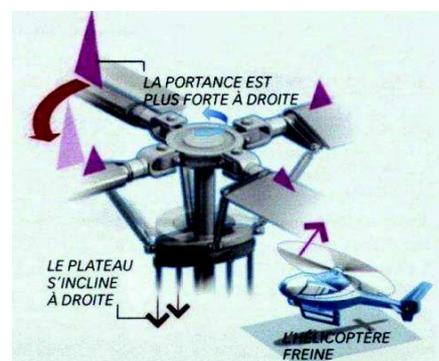
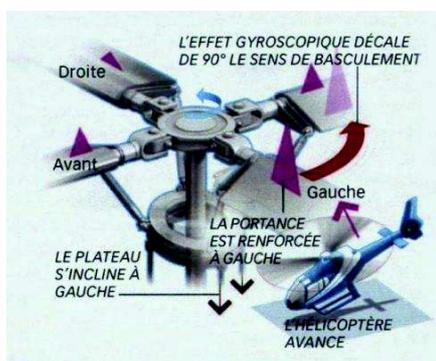
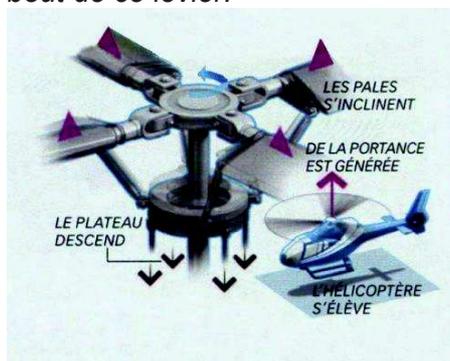
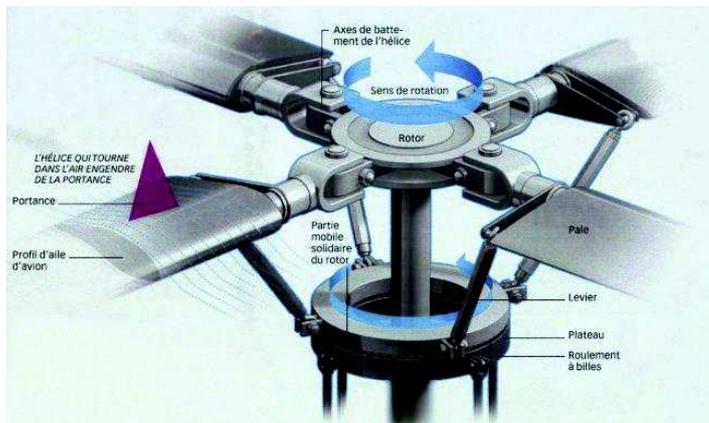
Pour des raisons de vitesse dans l'air... qui joue sur la portance... la pale avançante et la pale reculante on des calages différents (donné par le plateau cyclique).

La limitation de vitesse des hélicoptères étant d'ailleurs liée à la vitesse de la pale avançante qui est nécessairement inférieure à la vitesse du son. En outre les pales fléchissent et se vrillent pour répartir la portance selon le choix du constructeur.

V. Le fonctionnement du rotor

• Les commandes de gaz et de pas collectif

A régime moteur constant, la portance du disque rotor peut être modifiée en changeant l'inclinaison des pales (la portance augmente avec l'angle, c'est le principe des hélices à pas variable des avions). Pour cela on ajuste le pas collectif qui descend ou remonte un plateau situé sous le rotor et relié aux pales par des biellettes d'inclinaison. Le levier de commande du pas général (ou collectif) est habituellement situé à gauche du pilote, en le tirant vers le haut, on augmente le pas, en le rabattant, on le diminue. La commande des gaz est située au bout de ce levier.



Décollage : le plateau est descendu (pas collectif ou pas général), tirant sur les biellettes d'inclinaison des pales. La portance augmente et l'appareil décolle.

Avance : le plateau est incliné à gauche (pas cyclique), créant un surplus de portance de ce côté qui déséquilibre l'appareil. Celui-ci bascule non pas vers la gauche mais vers l'avant car la rotation crée un effet gyroscopique qui décale de 90° le mouvement.

Atterrissage : le plateau est incliné vers la droite (pas cyclique). La portance augmente de ce côté et l'hélicoptère se cabre (même effet gyroscopique que pour l'avance).

- Utilisation du manche qui commande le pas cyclique

Pas cyclique : pour se déplacer à l'horizontale, le pilote incline le plateau, les pales vont alors alterner entre une position standard et une position avec plus d'incidence renforçant localement la portance. L'hélicoptère est déséquilibré (avant, arrière), le contrôle de ce déséquilibre permet le déplacement. L'inclinaison du rotor est déclenchée par la commande de pas cyclique situé entre les jambes du pilote.

VI. A quoi sert l'anticouple ?

- Le principe d'interaction (Troisième loi de Newton)

Ce "Principe des Actions Réciproques" anciennement dénommé "Principe de l'Action et de la Réaction", est devenu le principe d'interaction car les deux "interactions" sont simultanées.

Qu'est-ce qu'il nous dit ici ? Le corps de l'hélicoptère et son moteur exerce une action qui fait tourner le rotor... ALORS cela signifie que le rotor va, lui aussi agir sur le corps de l'hélicoptère pour le faire tourner en sens inverse ! En fait ces forces qui provoquent des rotations sont des couples de forces (un peu comme les mains sur un volant ou les pédales d'un vélo).

- L'invention de l'anti-couple

Pour stabiliser l'hélicoptère qui se mettrait à tourner autour du rotor on doit générer un couple agissant en sens inverse l'anti-couple ! Comme ces forces interviennent par leur bras de levier (on parle de Moment des forces en physique) la force nécessaire pour stabiliser l'hélicoptère sera d'autant plus faible qu'elle sera éloignée du centre de gravité du système.



Un modèle Eurocopter avec un anti-couple dans un "Fenestron"

- La construction de l'anti-couple



Rotor anti-couple "fenestron"

L'anti-couple est constitué de plusieurs petites pales à pas variable. C'est en agissant sur ce pas que le pilote contrôle son appareil en "lacet".

Le fenestron, inventé par Sud Aviation/Eurocopter, améliore l'efficacité tout en diminuant le bruit.



Rotor anti-couple classique (Alouette III)

Documents spécifiques au lycée Jean Monnet

Pour le thème aérodynamique et mécanique du vol, deux textes d'introduction, sur lequel réfléchissent les élèves servent d'entrée en matière pour s'approprier le problème. Ces documents :

- « *Comment font les avions pour voler sans battre des ailes ?* »

et

- « *La sustentation* »,

Sont utilisés de la manière suivante :

Le document « *Comment font les avions pour voler sans battre des ailes ?* » est donné lors du tout premier cours. Après une lecture individuelle des élèves, on explique de manière très simpliste les conditions d'une sustentation, à savoir l'écoulement asymétrique de l'air de part et d'autre de l'aile, et donc la nécessité des ailes et du moteur (ou de la traction préalable dans le cas du planeur).

Viennent ensuite les rappels de dynamique des fluides (loi de Bernoulli et effet Venturi)

Est distribué ensuite le polycopié « *la sustentation* ».

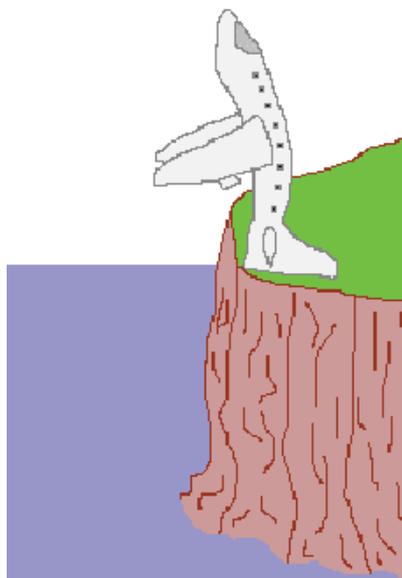
Les élèves ne le lisent pas en classe mais chez eux. Divers points sont évoqués dans ce document dont : la sustentation, le décrochage, la voilure, la densité, la pression, la surpression, la dépression, l'équilibre et la symétrie du vol entre autres. Ces points sont traités tout au long de la progression du cours d'AMV et ce document est alors évoqué à chaque fois.



Renseignements pris auprès d'un ami albatros, le battement d'ailes n'est pas utile au vol. Et disposer d'une bonne voilure doit suffire à l'affaire ! Un autre ami colibri est évidemment en désaccord avec cette théorie. Il précise qu'avec 100 battements par seconde nul besoin de grandes ailes.

Alors qui croire ?

Une chose est sûre, grandes ou petites, fixes ou mobiles les ailes sont indispensables au maintien dans les airs. Donc dans le cas d'un avion, la première étape consiste à mettre des ailes. La seconde étape est de mettre en place un moyen de propulsion : hélices, réacteurs, élastiques ou coup de pied aux fesses. Enfin, dernière étape, faire confiance aux lois de la physique. Et c'est bien là que tout se joue, car contrairement aux idées reçues un avion vole essentiellement du fait de ces lois et non grâce à ses moteurs.

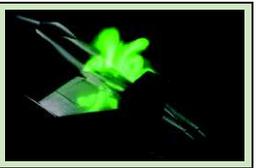


humaine ou tout droit sortie de l'imagination de dame Nature, une aile est en principe de forme bombée sur le dessus. La conséquence immédiate de cette structure est que durant un vol, les molécules d'air qui s'écoulent autour de l'aile, ont plus de chemin à parcourir lorsqu'elles passent au-dessus que si elles circulent en dessous. Et si on tient compte du fait que les molécules qui se présentent, bras dessus, bras dessous, sur le devant d'une aile doivent toujours être côte à côte une fois l'aile passée, il faut donc que l'air s'écoule plus vite sur la partie supérieure de celle-ci que sur sa partie inférieure. Cette accélération provoque une aspiration de l'aile vers le haut. Comme par ailleurs l'air qui passe dessous a tendance à pousser l'aile vers le haut, on se retrouve donc avec une capacité de l'avion à se maintenir en suspension dans les airs. Oui, mais n'oublions pas que si l'air ne s'écoule plus le long des ailes... l'avion tombe ! Il faut donc en permanence maintenir le bon débit qui entretiendra le précaire équilibre entre la chute et le vol. Le moteur ou le battement d'ailes remplissent cet office.

Alors battement des ailes ou non, pour le bien-être des passagers, il semble plus sage d'éviter les à-coups. Mais pour le plaisir des yeux, un grand oiseau blanc de 40 mètres d'envergure battant des ailes, ce doit être vraiment beau.

Dernière minute ... Un ami condor me précise qu'il n'entend pas laisser sa place de plus grand batteur d'ailes...

Texte extrait du site web « dispapa.com »

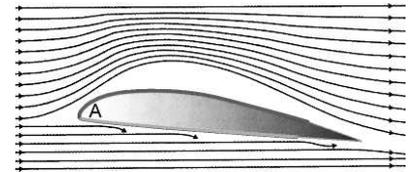


Les « plus lourds que l'air » se jouent des forces aérodynamiques pour se sustenter en vol.

Trois conditions doivent être remplies pour qu'un avion se maintienne en l'air.

- D'abord, qu'il dispose d'une surface portante.
- Ensuite, que sa vitesse d'évolution demeure toujours comprise entre une vitesse minimale dite vitesse de décrochage et une vitesse maximale (fonction de la résistance structurale de l'appareil).
- Enfin, que l'avion se montre stable autour de son centre de gravité.

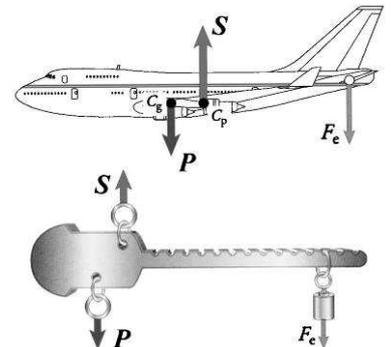
La première exigence tient à la forme de la voilure et à l'effet des écoulements aérodynamiques qui s'y produisent. À partir du bord d'attaque, l'air emprunte deux trajectoires autour du profil. Sur toute la partie inférieure de l'aile (intrados), l'air crée une surpression. Sur la majeure partie supérieure avant (extrados), l'écoulement de l'air éloigné de la surface engendre un « vide », donc une aspiration vers le haut. Les deux effets s'ajoutent pour créer la force aérodynamique de sustentation.



La force de surpression d'intrados ne participe que pour un tiers environ à la force aérodynamique totale de la voilure. Dans le bilan global des forces, c'est l'effet de dépression sur l'extrados qui apparaît comme majoritairement responsable de la sustentation.

On conçoit aisément la relation étroite qui existe entre vitesse et sustentation. La meilleure illustration consiste à sortir sa main d'une voiture roulant à bonne vitesse : elle tend à s'élever à la moindre inclinaison, et retombe dès qu'on décélère.

Une troisième condition permet à l'avion d'évoluer dans la masse d'air ; c'est la stabilité statique. Un avion se comporte en vol comme une balance romaine. Sur celle-ci, le poids de la charge suspendue au crochet se détermine en fonction de la position de la masselotte sur un bras de levier. Lorsque le bras en question est parfaitement horizontal, les conditions d'équilibre sont réunies. Dans un avion, les mêmes forces occupent les mêmes places, et jouent les mêmes rôles. La force de sustentation S s'applique en un point dit « centre de poussée » C_p , le poids P de l'avion s'applique au centre de gravité C_g . Telles quelles, ces deux forces créent un système instable. Pour le stabiliser, une force d'équilibre F_e dirigée vers le bas est nécessaire. D'où l'empennage arrière et sa partie horizontale sur laquelle s'exerce cette force.



D'après SERGE BROSSELIN, Air-France, septembre 97.

COMPRÉHENSION DU TEXTE

1. Quelle est la signification des mots suivants : sustentation, aérodynamique, décrochage, voilure ?
2. Comment devrait-on reformuler les expressions : « plus lourds que l'air » et « un vide » pour qu'elles soient scientifiquement rigoureuses ?

EXPLOITATION DU TEXTE

1. Expliquer pourquoi un avion se comporte comme une balance romaine.
2. Un avion pourrait-il décoller depuis la surface de la Lune ?
3. Énoncer la définition de la pression. Comment la pression agit-elle pour permettre la sustentation ?
4. Citer les facteurs favorisant la sustentation.
5. Quel est le rôle de l'empennage en vol ? Quel serait le mouvement de l'avion sans celui-ci ?
6. La répartition des passagers dans la cabine et des bagages dans la soute est-elle sans importance ?

Le programme du B. I. A.

Aérodynamique - Généralités

action de l'air sur les corps en mouvement ; études expérimentales ; résistance de l'air, causes, facteurs, mesures ;

Aérodynamique de l'aile

surfaces portantes plaque plane inclinée ; profil d'aile et définitions relatives au profil ; écoulement de l'air sur une aile, écoulement de l'air autour d'un profil. Variation de la portance et de la traînée en fonction de l'angle d'incidence ; centre de poussée ; influence de l'envergure de l'aile ; représentations graphiques des caractéristiques d'un profil ; utilisations ;

Mécanique du vol

descente planée rectiligne, forces appliquées ; finesse ; le décollage et l'atterrissage ; axes de rotation d'un aéronef en vol, stabilité longitudinale, stabilité latérale ; -décrochage.

Commentaires.

- Action de l'air sur les corps en mouvement - On se limitera aux basses vitesses où l'air se comporte comme un fluide incompressible.
- Etudes expérimentales - On pourra en particulier mettre en évidence la diminution de la pression statique avec la vitesse et l'effet Venturi.
- Résistance de l'air : causes, facteur, mesure.
- Surfaces portantes : plaque plane inclinée, profils d'aile et définitions relatives au profil. - On sera amené à définir l'angle d'incidence et la relation $R = \frac{1}{2} \rho S V^2 C$
- Ecoulement de l'air sur une aile, autour d'un profil : variation de la portance et de la traînée en fonction de l'angle d'incidence. Centre de poussée. - On indiquera les caractéristiques de certains profils types et l'utilisation qui en est faite. On définira la force (résultante) aérodynamique et à partir de là : portance et traînée.
- Influence de l'envergure de l'aile. - Ceci amènera à parler de traînée induite.
- Représentation graphique des caractéristiques d'un profil, utilisations. - Il ne s'agira que de la polaire d'une aile : variations de C_z en fonction de C_x pour une incidence variable à vitesse constante ; on notera la dilatation de l'échelle des C_x pour une meilleure lecture. Les seuls points particuliers à évoquer seront ceux correspondant à : portance maximale, décrochage, traînée minimale, finesse maximale, portance nulle.
- Vol en palier horizontal : équilibre des forces appliquées. - Ceci amènera à parler de la traction : avion → moteur ; planeur → remorqueur ;
- Vol en montée rectiligne ; équilibre des forces appliquées. - On sera amené à parler de poids apparent et de facteur de charge ; avion → moteur ; planeur → remorqueur ; treuil.

- Vol en descente rectiligne : forces appliquées ; finesse.
 - Décollage et atterrissage.
 - Axes de rotation d'un aéronef en vol. Stabilités longitudinale et latérale.
 - Vol en virage : facteur de charge.
 - Relation vitesse – incidence ; Décrochage.
 - Planeur, avion moteur réduit ou descente avec moteur.
- Le problème à poser sera :
Comment un planeur peut-il monter ?
- On parlera du vol aux grands angles ; On pourra éventuellement parler de vrille si on a parlé de dérapage intérieur (glissade) ou extérieur mais les principes de sortie de vrille ne seront pas évoqués dans le cadre de l'examen, on pourra seulement indiquer que ces consignes de sortie, spécifiques à chaque appareil, figurent toujours dans le manuel de vol.

Index

#

ρ , 53
 θ_{max} , 83

1

1^{ère} loi de Newton, 86, 87

2

2 Min, 38

3

360°/mn, 38

A

abattée, 47
Açores, 25
aérodynamique, 7, 92
aérofreins, 62
aérofreins de planeurs, 64
aiguille centrée, 39
aileron, 50
aileron à axe déporté, 50
aileron à débattement différentiel, 50

ailerons, 33
Ailerons, 32
Ailerons et roulis, 33
air, 9
Air Canada, 26
Airbus A330, 25
aire S, 17
allongement, 19
Alouette III, 89
Amortisseur de roulis, 51
angle d'incidence, 20
angle d'incidence maximal, 28
angle d'assiette, 34
angle d'attaque, 14
angle de calage, 35
Angle de calage, 19, 35
angle de lacet, 34
Angle de lacet, 34
angle d'incidence, 45
angle d'inclinaison, 34
angle maximal d'incidence, 45
angles d'incidence, 27
anticouple, 89
anti-couple, 89
approche, 55
aspiration de la couche limite, 54
Aspiration de la couche limite, 60
assiette, 34, 68
Assiette, 34
atterrissage, 55
Atterrissage, 68
augmenter la portance., 53
autonomie maximum, 80
Autostable, 22

avertisseur de décrochage, 47
avion en montée, 83
avion en vol, 5
axe déporté, 75
axe du vent relatif, 36
axe longitudinal, 36
axes, 32

B

BAe 146, 63
balance aérodynamique, 14
balance des forces, 14
Bec à fente, 56
Bec à fente automatique, 57
Bec à fente commandé, 57
Bec à fente fixe, 56
Bec Betz, 58
becs, 56
becs de bord d'attaque, 54
Bernoulli, 9, 10
Biconvexe, 22
biconvexes dissymétriques, 24
biconvexes symétriques, 23
bille-aiguille, 38
Boeing 767, 66
Boeing 767 d'Air Canada "Gimli", 26
bord d'attaque, 56
bord d'attaque, 21, 22, 92
Bord d'attaque, 18
Bord d'attaque basculant, 58
bord de fuite, 22, 56
Bord de fuite, 18

[bras de levier](#), 71
[buffeting](#), 47

C

[Cambrure](#), 22
[caractéristiques des diverses phases de vol de l'avion](#), 27
[Caravelle](#), 24, 64, 69
centrage, 73, 74
[Centrage et stabilité](#), 72, 74
[centré arrière](#), 74
[centre de gravité](#), 71
centre de Gravité, 71
[centre de poussée](#), 20, 29, 71
Centre de poussée CP, 71
CG, 71
[chambre d'expérience](#), 13
[charge alaire](#), 19
Check-list atterrissage, 69
[coefficient aérodynamique K](#), 17
[Coefficient de frottement](#), 11
[coefficient de portance](#), 21, 30, 54
[coefficient de portance \$C_z\$](#) , 45
[coefficient de traînée](#), 21, 30
coefficients, 30
[coefficients aérodynamiques](#), 14
[collecteur](#), 13
[combinaison anti-G](#), 43
[Commandes](#), 32
commandes de gaz, 88
[compensateur](#), 75
[Compensateurs de régime](#), 77
[Compensateurs d'évolution](#), 75
[compensation des gouvernes](#), 75
[compressibilité](#), 7
[conjugaison des commandes](#), 49
[convergent](#), 13
[coordonné](#), 37
[corde de profil](#), 27
[Corde de référence](#), 22
[corps fuselé](#), 15
[couche limite](#), 11, 16, 54
Courbe P_v - P_n , 83
courbure du profil, 54
CP, 71
[crabe](#), 36
création de turbulences, 62
[Creux](#), 22
croisière, 28
 [\$C_x\$](#) , 14, 62
 [\$C_x\$](#) , 30
 [\$C_x\$ et \$C_z\$](#) , 21, 30
 [\$C_z\$](#) , 14
 [\$C_z\$](#) , 30, 45, 53, 62

D

danger, 47
[danger du décrochage](#), 47
[débit](#), 9
décollage, 55
[Décollage](#), 67
décollage des filets d'air, 62
[décrochage](#), 28, 45, 46, 47, 54, 92
[décrochage dynamique](#), 46

Déplacement du foyer, 72
Déport d'axe, 75
[dérapiage](#), 39, 52
[Dérapé](#), 37
dérive, 36
[Dérive](#), 32
Dérive et lacet, 33
[descente](#), 32, 42
descente à vitesse constante, 29, 31
[descente verticale](#), 86
[destructeur de portance](#), 62
[deuxième loi de Newton](#), 6
[Diamond DA 20](#), 85
[dièdre](#), 51
[Dièdre](#), 19
[diffuseur](#), 13
dispositifs de bord d'attaque, 56
dispositifs de bord de fuite, 56
[dispositifs hypersustentateurs](#), 53
distance de roulement, 55
[domaine de vol](#), 79
[Domaine de vol](#), 80

E

[effet "Girouette"](#), 51
[effet de girouette](#), 36
[effet de roulis induit](#), 50
[effet redresseur](#), 51
[effet redresseur des surfaces](#), 52
[effet redresseur dû à la Flèche](#), 51
[Eiffel](#), 13
[Emplanture](#), 18
[en crabe](#), 36
[envergure](#), 18, 22
éolienne, 25
[épaisseur](#), 22
[épaisseur relative](#), 16
[Épaisseur relative](#), 22
Equilibrage statique, 77
extrados, 21, 22, 45, 54, 92
[Extrados](#), 18

F

F, 71
[F 35](#), 85
[F18](#), 69
[facteur de charge](#), 42, 43, 44, 46, 84
[facteurs influant sur la vitesse de décrochage](#), 46
[fenestron](#), 89
[fentes](#), 54, 55
[filtres](#), 13
[finesse](#), 23, 24, 25
[finesse / allongement](#), 23
finesse maximum, 82
[Finesse maximum](#), 80
flaps, 54, 59
flèche, 51
[Flèche](#), 18, 51

[flettner](#), 75
fluides visqueux, 10
[Fokker 70](#), 63
force, 4
[force centrifuge](#), 42
[force imaginaire](#), 42
force motrice, 29
[force motrice F](#), 29
forces, 92
[forces aérodynamiques](#), 71
[forces de pression](#), 4
[foyer](#), 71, 72
freinage mécanique à l'atterrissage, 62
[frise](#), 50

G

G, 71
[G négatifs](#), 43
[G positifs](#), 43
[Galeries Lafayette](#), 55
[géométrie variable](#), 53
Gimli, 26
girouette, 71
[glissade](#), 39
[Glissade extérieure](#), 39
Glissade intérieure, 39
[Glissé](#), 37
GMP, 79
[Gossamer condor](#), 85
[Gossamer Condor](#), 49
[goutte d'eau](#), 15
[Gouverne](#), 32
gouverne de direction, 33, 50
[grilles](#), 13
[groupe motopropulseur](#), 79

H

[hélicoptères](#), 86
[hydrodynamique](#), 10
[hypersustentateurs](#), 53

I

[incidence](#), 34, 46
[Inclinaison](#), 34
inclinaison constante, 36
[Inclinaison latérale](#), 32
inclinaison nulle, 39
interaction, 4
[intrados](#), 22, 45, 92
[Intrados](#), 18

J

[Jules Védrines](#), 55

K

[karman](#), 18

L

la vitesse d'écoulement, 9

La vrille, 48

lacet, 37

Lacet, 32

lacet induit, 50

lacet inverse, 49

laminaire, 11

Laminaire, 12

Ligne moyenne, 22

Limitations du domaine de vol, 84

loi de Bernoulli, 9

loi de Newton, 5

M

maître couple, 15

manche, 33, 39

Manche, 32, 88

manche (ou volant), 33

manche à air, 67

maniabilité, 74

manuel de vol, 68, 74

manuel de vol de son appareil, 28

marge statique, 73

masse, 46

masse volumique, 11

masse volumique de l'air, 29

masse volumique de l'air, 53

maximum de rayon d'action, 28

mécanique des fluides, 7

meilleur angle de montée, 83

Mig 23, 63

moment à cabrer, 56

moment à piquer, 56

moments de ces forces, 14

moments de toutes les autres forces, 71

montée, 42

Montée, 32

montée à vitesse constante, 29, 31

montée avec le meilleur angle

possible, 28

moteur, 29

mouvement circulaire uniforme, 36

mouvement de l'avion, 71

mouvement rectiligne uniforme, 5

N

Nombre de "G", 43

nombre de Reynolds, 10, 11

O

Orientation du nez, 32

oscillation en lacet, 52

P

P51 "Mustang", 85

pales à pas variable, 89

palonnier, 33

palonniers, 50

Palonniers, 32, 88

pas collectif, 88

Pas collectif, 88

pas cyclique, 89

pascal, 8, 9

Paul MacCready, 49

Pédales, 32

penne, 34

pente de descente, 62, 68

pente de descente, 68

pente maximum, 83

phases de vol, 27

Phases du vol, 42

piéd, 39

pilotage de l'hélicoptère, 88

plafond, 82

plafond maximum, 80

plage de centrage, 73

Plan convexe, 22

plan convexes, 24

Planeur ancien, 64

Planeur moderne, 64

poids, 5, 71

poids apparent, 42

poids P, 29

point d'application des variations de portance, 71

point d'application des variations de portance, 72

point de décollement, 71

point de transition, 17

polaire, 27

polaire d'une aile, 27

portance, 43, 86, 87

portance (R_Z), 20

portance (R_Z), 29

portance maximale, 28

portance nulle, 28

Prandtl, 13

premier régime, 81

pression, 4, 8, 9

Pression dynamique, 8

Pression statique, 8

Pression totale P_t, 8

principe d'inertie, 5

principe d'interaction, 4, 89

Profil de l'aile, 22

Profil laminaire, 24

profil supercritique, 24

profils biconvexes, 23

profils creux, 24

Profondeur, 22, 32

Profondeur et tangage, 33

puissance, 79

Puissance, 79

puissance nécessaire au vol, 80

Puissance nécessaire au vol, 80

puissances nécessaires au vol, 85

P_u-P_n, 83

R

Ram Air Turbine, 25

RAT, 25

rayon d'action maximum, 80

rayon de virage, 36

réserve de puissance, 83

ressource, 43

résultante aérodynamique, 20

résultante aérodynamique R, 29

Reynolds, 10

rotations d'un avion, 37

roulis, 37, 88

Roulis, 32

Roulis Hollandais, 52

roulis induit, 50, 52

R_Z, 53

R_Z = ½ ρ S V² C_Z, 45

S

S, 53

S et 2S, 15

Saumon, 18

Schuttle Atlantis, 85

second régime, 81

Short Take Off and Landing, 55

Slat, 57

somme vectorielle des forces, 29

sonnerie, 47

sortir du décrochage, 48

Soufflage, 60

soufflage d'air, 54

souffleries à circuit fermé, 13

souffleries à circuit ouvert, 13

souffleries aérodynamiques, 12

spoiler conjugués, 50

spoilers, 62, 65

stabilisateur de l'avion, 51

stabilité, 72, 73, 74

Stall, 45

STOL, 55

subsonique, 7

supersonique, 7

surface alaire, 18, 30, 53

surfaces mobiles, 53

sustentation, 92

sustentation dans l'air, 20

sustentation de l'avion, 29

symétrique, 36

symétriques ou dissymétriques, 23

T

tab, 75

Tab automatique, 76

Tab commandé, 76

Tab fixe, 76

tangage, 37, 88

Tangage, 32

taux 1, 38

taux 2, 38

taux de virage, 38, 39

taux standard, 38

température, 9

Tour de piste, 69

traction, 29

trainée, 15, 87

trainée (R_x), 20

trainée (R_x), 29

trainée de forme, 15

trainée de frottement, 15, 16

trainée de l'aile, 17

trainée induite, 17

trainée minimale, 28

[traînée parasite](#), 17
[traînée totale](#), 17
[Transall](#), 64
 Trim, 78
 Troisième loi de Newton, 89
 tube de courant, 8
 tube de venturi, 9
[turbulence de sillage](#), 69
 turbulent, 10
Turbulent, 12
 turbulente, 11
 type Eiffel, 13
 type Prandtl, 13

U

[US Airways](#), 25

V

vario, 68
 vecteur, 5
[Védrines](#), 55
 veine, 13
[vent](#), 66
 vent de face, 69
 vent de travers, 69
[vent relatif](#), 20, 22, 27, 29
[ventilateur](#), 13
 venturi, 9

virage, 6, 36, 43
 virage à altitude et rayon constant., 36
virage à gauche, 39
 virage coordonné, 43
[VIRAGE STABILISÉ](#), 39, 40
 viscosité, 9, 11
 vitesse ascensionnelle maximum, 28
 vitesse constante, 29
 vitesse critique, 10
 vitesse de chute minimale, 28
[vitesse de décrochage](#), 45, 46
 vitesse de descente, 68
[vitesse de montée maximum](#), 83
 vitesse du vent relatif, 21, 30
vitesse maxi, 28
 vitesse minimale de sustentation, 45
 vitesses de montée, 83
 vitesses de montée Vz. remarquables, 83
VNE, 68
 VNO, 68
voile noir, 43
voile rouge, 43
 voilure, 92
voilure tournante, 86
[vol 1549 d'US Airways](#), 25
[vol 236 Air Transat](#), 25
 vol en croisière, 28

[Vol en montée](#), 86
[vol horizontal](#), 87
 vol horizontal à vitesse constante, 29
 Vol plané d'une Caravelle d'Air France, 24
[VOL RECTILIGNE](#), 39
 vol stable, 81
[Vol stationnaire](#), 86
vol symétrique, 39
volant, 32
 Volet de courbure, 59
 Volet de courbure à fente, 59
 Volet d'intrados, 59
 Volet Fowler, 60
 Volet Krüger, 58
volets, 54, 59
volets classiques, 55
volets de courbure, 54
 vrille, 48
Vs, 53
 Vz, 83
 Vz maxi, 83

W

[water ballasts](#), 72
[Wright Flyer](#), 85

Table des matières

<i>Présentation du document & auteurs</i>	2
<i>Illustrations & Copyrights</i>	2
<i>Plan du cours</i>	2
I - Aérodynamique et mécanique du vol	4
Pourquoi un avion vole ? Qu'en penserait Newton ?	4
I. Qu'est-ce qu'une force ?	4
• Une force se traduit par des effets :	4
• Il y a 2 types de forces : les forces	4
• Représentation d'une force	5
II. Principe d'inertie et vol d'un avion	5
• BILAN	5
III. Pourquoi des schémas avec une multitude de forces ?	5
• Avion en vol, MRU, somme des forces nulle... schémas avec décomposition des forces. BILAN... lequel étudier ??? 6	6
IV. Que se passe-t-il si le mouvement n'est PAS uniforme	6
I - Aérodynamique	7
1 - Mécanique des fluides	7
I. L'aérodynamique... présentation	7

II.	Rappels succincts de mécanique des fluides incompressibles	8
•	$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho V^2$	8
III.	L'air	9
IV.	La loi de Bernoulli (ou principe de Bernoulli)	9
•	Le long d'un tube de courant la pression totale P_t et le débit Q restent constants.	9
•	$P_t = Cste$ et $Q = Cste$ C'est la loi de Bernoulli	9
•	Conséquences de cette loi :	9
•	Une bonne illustration de ce principe : Le tube de venturi	9
•	Mise en évidence expérimentale du phénomène	10
•	Le secret !	10
V.	Un peu d'histoire Partie purement culturelle sans incidence sur le BIA ou le CAEA	10
•	Les scientifiques :	10
•	Les définitions importantes :	11
	<i>I - Aérodynamique.</i>	12
	<i>2 - Etude des écoulements - Souffleries</i>	12
I.	Les deux types d'écoulements	12
II.	Les souffleries aérodynamiques	12
•	Description et types de souffleries	12
•	Mesures en soufflerie	14
•	Résultats de l'étude en soufflerie	14
III.	Les coefficients aérodynamiques	14
	<i>I - Aérodynamique.</i>	15
	<i>3 - La résistance de l'air.</i>	15
I.	Traînée(s) et couche limite	15
•	Quelques définitions	15
•	La traînée de forme	15
II.	Paramètres influençant la résistance de l'air	15
•	Manip "soufflerie"	15
•	Influence de la surface	15
•	Influence de la forme	15
III.	Écoulement et surfaces	16
•	La traînée de frottement et la couche limite	16
IV.	La résistance de l'air	17
	<i>II - Aérodynamique de l'aile.</i>	18
	<i>1 - Principales caractéristiques des ailes</i>	18
I.	Les différentes parties de l'aile (Rappel)	18
II.	Caractéristiques géométriques d'une l'aile	18
	<i>II - Aérodynamique de l'aile.</i>	20
	<i>2 - Forces exercées sur une aile.</i>	20
I.	Action de l'air sur une plaque. Résultante aérodynamique.	20
•	Vent relatif et résultante aérodynamique.	20
II.	Portance et traînée	20
•	Trainée et portance à partir d'une plaque.	20
•	Influence de la surface et de la vitesse	20
•	Expression de la portance R_z et de la traînée R_x	21
III.	Etude d'un profil aérodynamique.	21
•	Simulation des pressions en fonction de l'incidence.	21
	<i>II - Aérodynamique de l'aile.</i>	22
	<i>3 - Profil et caractéristiques dynamiques d'une aile</i>	22
I.	Caractéristiques géométriques d'un profil d'aile	22
•	Rappels	22
•	Autres définitions à connaître	22
II.	Caractéristiques dynamique d'une d'aile.	22
•	Les multiples expressions de la finesse	23
III.	Compléments sur les 4 types de profil fondamentaux (CAEA).	23
•	Profils biconvexes.	23

• Profils plans convexes	24
• Profils creux.....	24
• Profils dits autostables, supercritiques ou reflex.....	24
• Profil laminaire	24
IV. Les profils et la vitesse du son (CAEA).....	24
• Profils losangiques et lenticulaires.....	24
V. Quelques anecdotes : accident/plané/finesse	24
II - Aérodynamique de l'aile.....	27
4 - La polaire.....	27
I. Qu'est ce que "la polaire" ?	27
II. Que peut-on lire sur la polaire d'une aile ?	27
• Les points importants.....	28
• Commentaires sur les autres points (BIA facultatif – sinon CAEA)	28
• Polaire de l'aile ou de l'avion ? (CAEA)	28
III. Choix d'incidences et de vitesses... et autres informations utiles	28
III - Mécanique du vol.....	29
1 - Montée, descente et plané rectiligne.....	29
I. Montée, descente, vol horizontal... et principe d'inertie !.....	29
• Question !	29
• Réponses !.....	29
II. Les forces appliquées.....	29
• Le poids	29
• La traction ou force motrice.....	29
• La résultante aérodynamique $R = R_z + R_x$	29
III. Vol stabilisé, montée, descente, ... et "intuition" !!!.....	30
• Intuition basique	30
• Le prof de physique à toujours raison !	30
• Les schémas pour l'avion... ..	31
• Un dernier schéma pour l'hélicoptère	31
• Conclusion.....	31
III - Mécanique du vol.....	32
2 - Les axes... de rotation de l'avion.....	32
I. Les 3 axes.....	32
II. Les actions de pilotage correspondantes	32
III. Le fonctionnement des gouvernes associées	33
• Gouverne de profondeur et tangage.....	33
• Ailerons et roulis.....	33
• Gouverne de direction et lacet	33
IV. Les angles associés aux axes.....	34
V. Les angles associés au vol	34
• Définitions :	34
• Attention une assiette cabrée ne signifie pas montée :	34
• Exercice	35
VI. Les angles associés à l'aile d'avion !.....	35
• Rappel.....	35
• L'angle de calage	35
• Définitions pour UNE AILE !	35
VII. Récapitulatif : vidéo et simulation	35
• Vidéo	35
• Simulation.....	35
III - Mécanique du vol.....	36
3 - Vol en virage.....	36
I. La mise en virage.....	36
II. Virage, vitesse et inclinaison.....	36
• Relation entre rayon de virage et vitesse	36
• Relation entre le rayon de virage et l'inclinaison	36

III.	Virage coordonné, dérapé ou glissé.....	37
•	Le différentes manière de prendre un virage vues de l'extérieur.....	37
•	Les mêmes situations vues de l'intérieur.....	37
IV.	Rappel sur les axes.....	37
V.	Définition du "taux de virage".....	37
VI.	Le pilotage, les glissades et les dérapages.....	38
VII.	Vol rectiligne.....	39
VIII.	Virage stabilisé.....	39
IX.	Danger en virage.....	40
•	Le décrochage en virage.....	40
•	La vrille ou autorotation.....	41
•	Le virage engagé.....	41
IV -	Comprendre la mécanique du vol.....	42
1 -	Le facteur de charge.....	42
I.	Définition du facteur de charge.(noté n).....	42
II.	Phases du vol et facteur de charge :.....	42
•	En ligne droite.....	42
•	En virage ou lors d'une ressource.....	43
•	Nombre de "G".....	43
III.	Test de facteur de charge statique.....	44
IV -	Comprendre la mécanique du vol.....	45
2 -	Le décrochage.....	45
I.	Définition du décrochage.....	45
II.	Phénomène du décrochage :.....	45
III.	La vitesse de décrochage en vol horizontal :.....	45
IV.	Quels sont les facteurs influant sur la vitesse de décrochage ?.....	46
V.	Vitesse de décrochage et facteur de charge (CAEA).....	46
•	En résumé,.....	46
•	Exemple de calcul :.....	46
VI.	Quels sont les indices permettant de détecter l'approche du décrochage ?.....	47
VII.	Visualisation du décrochage en situation réelle.....	47
VIII.	Le danger du décrochage.....	47
•	Sortir du décrochage : le geste qui sauve !.....	48
IX.	Décrochage dissymétrique : La vrille.....	48
X.	Brutalité du décrochage.....	48
IV -	Comprendre la mécanique du vol.....	49
3 -	Les effets aérodynamiques.....	49
I.	Effets primaires et effets secondaires des gouvernes.....	49
II.	Le lacet inverse (BIA).....	49
•	Facteurs favorables au lacet inverse (CAEA).....	49
•	Le cas des planeurs (CAEA).....	49
•	Avions très spéciaux...(CAEA).....	49
•	(*) Surfaces de contrôle adaptées au problème (CAEA).....	50
III.	L'effet de roulis induit (CAEA).....	50
IV.	L'effet de lacet induit (CAEA).....	50
V.	A retenir !!!.....	50
VI.	L'effet "Girouette" (CAEA).....	51
VII.	La stabilité latérale : l'effet redresseur du dièdre (BIA).....	51
VIII.	Stabilité latérale : l'effet redresseur dû à la Flèche (BIA).....	51
IX.	L'effet "Amortisseur de roulis"(CAEA).....	51
X.	Stabilité latérale : effet redresseur des surfaces latérales sur le dérapage (CAEA).....	52
XI.	Le "Roulis Hollandais".....	52
V -	Compléments aérodynamiques.....	53
1 -	Les dispositifs hypersustentateurs.....	53

I.	Définitions.....	53
II.	Objectif : maintenir la portance en faisant diminuer V_s	53
	• La masse volumique de l'air ?	53
	• La surface alaire ?	53
	• Le coefficient de portance C_Z ?	53
III.	Les principaux systèmes utilisés	54
IV.	Comment les performances sont-elles augmentées ?	54
	• Les variations du coefficient de portance.	54
	• Le rôle aérodynamique.	55
V.	Utilisation des volets en phases de décollage et d'atterrissage :	55
	• Influence "positive" des dispositifs hypersustentateurs :	55
	• Les cas d'utilisation extrêmes	55
	• Influence indésirables des dispositifs hypersustentateurs sur le vol :	56
VI.	Différents dispositifs de bord d'attaque	56
	• Bec à fente	56
	• Bec à fente fixe	56
	• Bec à fente automatique.....	57
	• Bec à fente commandé ou Slat (en anglais)	57
	• Bord d'attaque basculant	58
	• Volet Krüger	58
	• Bec Betz.....	58
VII.	Différents dispositifs de bord de fuite	59
	• Volet de courbure	59
	• Volet de courbure à fente	59
	• Volet d'intrados	59
	• Volet d'intrados avec déplacement vers l'arrière (Zap)	59
	• Volet Fowler volet d'intrados avec déplacement vers l'arrière associé à une fente	60
	• Volet Fowler d'intrados avec déplacement vers l'arrière associé à plusieurs fentes	60
VIII.	Dispositifs divers	60
	• Soufflage.....	60
	• Aspiration de la couche limite	60
IX.	Simulations	60
X.	Récapitulatif des améliorations dues aux dispositifs hypersustentateurs	61
	<i>V - Compléments aérodynamiques.</i>	62
	<i>2 - Spoilers et aérofreins. (CAEA)</i>	62
I.	Spoilers et aérofreins - Définitions.....	62
	• Spoilers (ou dispositifs hyposustentateurs).....	62
	• Aérofreins (ou freins aérodynamiques).....	62
II.	Description des différents types d'aérofreins.....	62
	• Aérofreins positionnés au-dessus du fuselage	63
	• Aérofreins positionnés en-dessous du fuselage	63
	• Aérofreins positionnés dans le cône de queue	63
	• Aérofreins positionnés sur les ailes.....	64
	• Les aérofreins de planeurs	64
III.	Description des différents types de spoilers	65
IV.	Principe de fonctionnement :	65
	<i>VI - Décollage atterrissage.</i>	66
I.	Pourquoi tenir compte du vent ?	66
II.	Décollage... face au vent !	67
	• Check-list décollage (CAEA)	67
III.	Atterrissage ... face au vent !	68
	• La pente de descente	68
	• Contrôle de la descente	68
	• Check-list atterrissage (CAEA)	69
IV.	La turbulence de sillage.	69
	• Gestion de la turbulence dans le trafic.....	69
	<i>VI - Le centrage</i>	71

<i>Equilibre de l'avion, stabilité, manœuvrabilité</i>	71
I. Trois points très particuliers qu'il est important de bien définir	71
• Le centre de Gravité CG ou G (en physique).....	71
• Centre de poussée CP	71
• Le foyer F	71
II. Ces points sont ils fixes ?	72
• Déplacement du centre de Gravité CG	72
• Déplacement du centre de poussée CP (CAEA)	72
• Déplacement du foyer (CAEA)	72
III. Centrage et stabilité.....	72
• C'est quoi la stabilité ?	72
• Rôle de l'empennage dans la stabilité	73
• Le centrage	73
• La valeur du centrage.....	74
• Centrage avant ou centrage arrière ? Positions relatives de CP et CG	74
IV. Exemples d'analyse des effets liés au centrage	74
• Effet stabilisateur d'un centrage avant	74
VI -3- Les compensateurs.....	75
Version C.A.E.A.....	75
I. Généralités sur la compensation des gouvernes (BIA).....	75
II. Les compensateurs d'évolution.....	75
• Déport d'axe	75
• Tab fixe.....	76
• Tab automatique	76
• Servo-Tab ou Tab commandé	76
• Tab à ressorts	76
• Panneau compensateur.....	76
• Equilibrage statique	77
III. Les compensateurs de régime	77
• Plan horizontal réglable - PHR	77
• Trim	78
• Assistance	78
IV. Exemple d'un avion de voltige.....	78
VII - Le domaine de vol.....	79
Version C.A.E.A.....	79
1) Introduction	79
2) Puissance du groupe motopropulseur.....	79
3) Puissance nécessaire au vol	80
4) Domaine de vol.....	80
• Vol au second régime = DANGER !	81
• Vol au premier régime = vol stable !	81
• Analyse des deux régimes de vol en cas de perte de puissance.	81
• Comment voler sur un autre point situé entre B et A ?	81
• Voler à la puissance minimum... et donc à autonomie (en temps) maximum !	81
• Que se passe-t-il si, partant d'un point situé entre B et A, j'augmente la puissance (gaz) ?	82
• Voler à la finesse maximum	82
5) Notion de plafond	82
• Commentaire sur la notion de plafond :	82
6) Utilisation de la réserve de puissance ($P_u - P_n$) pour la montée.....	83
• Rappel sur l'avion en montée	83
• Courbe $P_u - P_n$ et V_z	83
• Les vitesses de montée V_z . remarquables.....	83
7) Limitations du domaine de vol : facteur de charge et vitesse.	84
8) Quelques vitesses usuelles "en pratique"	85
9) Quelques puissances nécessaire au vol... Rapport puissance/poids	85
VII - Le vol des hélicoptères.....	86

<i>Et de leurs cousins a voilure tournantes.....</i>	86
I. Vol stationnaire.....	86
• Comment obtient-on la portance ?.....	86
• Bilan des forces.....	86
II. Vol en montée ou en descente verticale à vitesse cte.....	86
• Bilan des forces.....	86
• Etude et schémas pour la descente.....	86
• Etude et schémas pour la montée.....	87
III. Le vol horizontal à vitesse constante.....	87
• La portance... et la traînée.....	87
• Bilan des forces.....	87
IV. Le pilotage de l'hélicoptère.....	88
• Les commandes.....	88
V. Le fonctionnement du rotor.....	88
• Les commandes de gaz et de pas collectif.....	88
• Utilisation du manche qui commande le pas cyclique.....	89
VI. A quoi sert l'anticouple ?.....	89
• Le principe d'interaction (Troisième loi de Newton).....	89
• L'invention de l'anti-couple.....	89
• La construction de l'anti-couple.....	89
<i>Documents spécifiques au lycée Jean Mounet.....</i>	90
<i>Comment font les avions pour voler sans battre des ailes ?.....</i>	91
<i>La sustentation.....</i>	92
<i>Le programme du B.1.A.....</i>	93
<i>Commentaires.....</i>	93
<i>Index.....</i>	94
<i>Table des matières.....</i>	97
<i>Conseils d'utilisation.....</i>	103

Conseils d'utilisation

En version modifiable (Word)

Ajout d'un renvoi vers la table d'Index.

*Sélectionner le mot ou le groupe de mot puis la combinaison de touches **Maj+Alt+X***

Choisir vos options puis valider.

Avant impression du document complet. (Avantage = pagination + index + table des matières)

Vérifier ensuite en mode aperçu qu'il n'y a pas de pages blanches, des erreurs de numérotation ou des polices anormales (des bugs de Word assez pénibles).

*Mettre ensuite à jour les références (table des matière et index) par un **Clic droit** sur les éléments actifs (tables des matières simplifiée du début et la complète de la fin ainsi que sur l'index) pour une **MISE à JOUR des CHAMPS** ou mieux de toute la table en commençant si possible par la fin.*