

AERODYNAMIQUE

Partie II. ESSAIS AÉRODYNAMIQUES ET PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'AVION

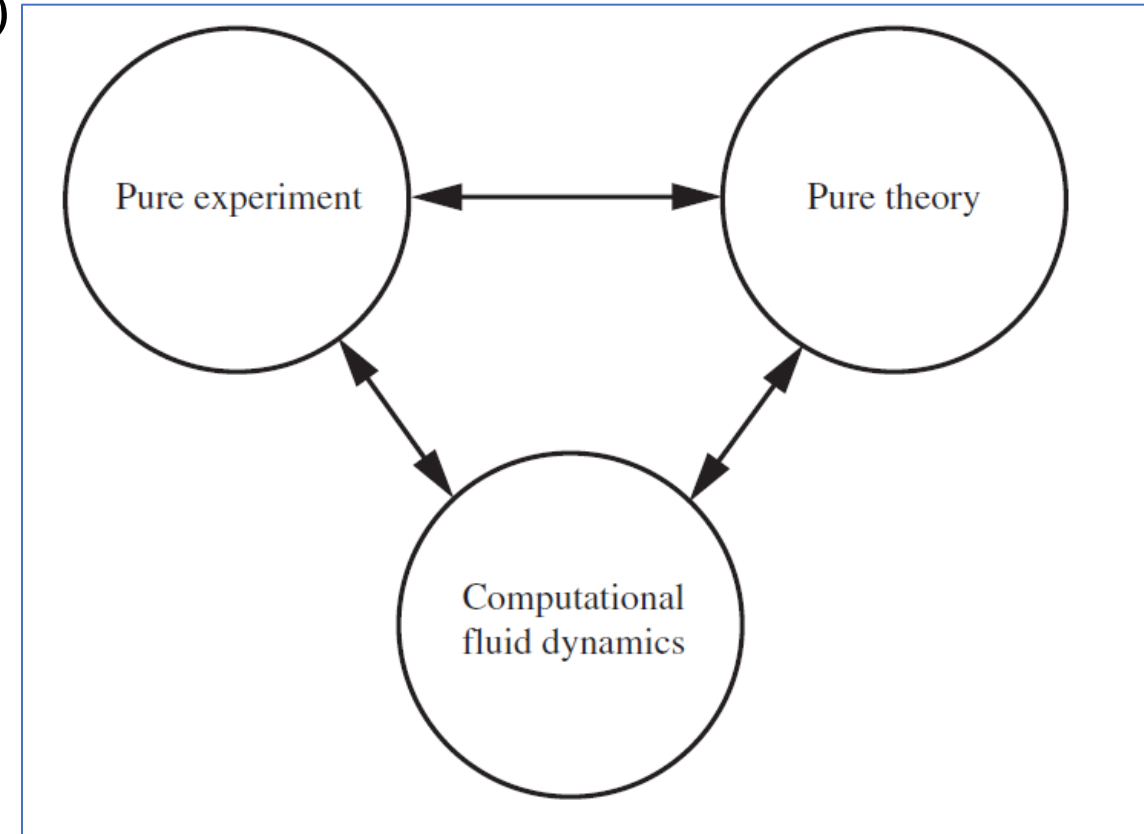
"Inventer un avion n'est rien. Le construire est un début. Voler c'est tout.." – Otto Lilienthal



III. LES ESSAIS ET TESTS AERODYNAMIQUES: LA SOUFFLERIE ET LES SIMULATIONS NUMERIQUES

III.1. La soufflerie

III.2. Computational Fluid Dynamics (CFD)



Organisation de l'aérodynamique moderne

III.1 LA SOUFFLERIE

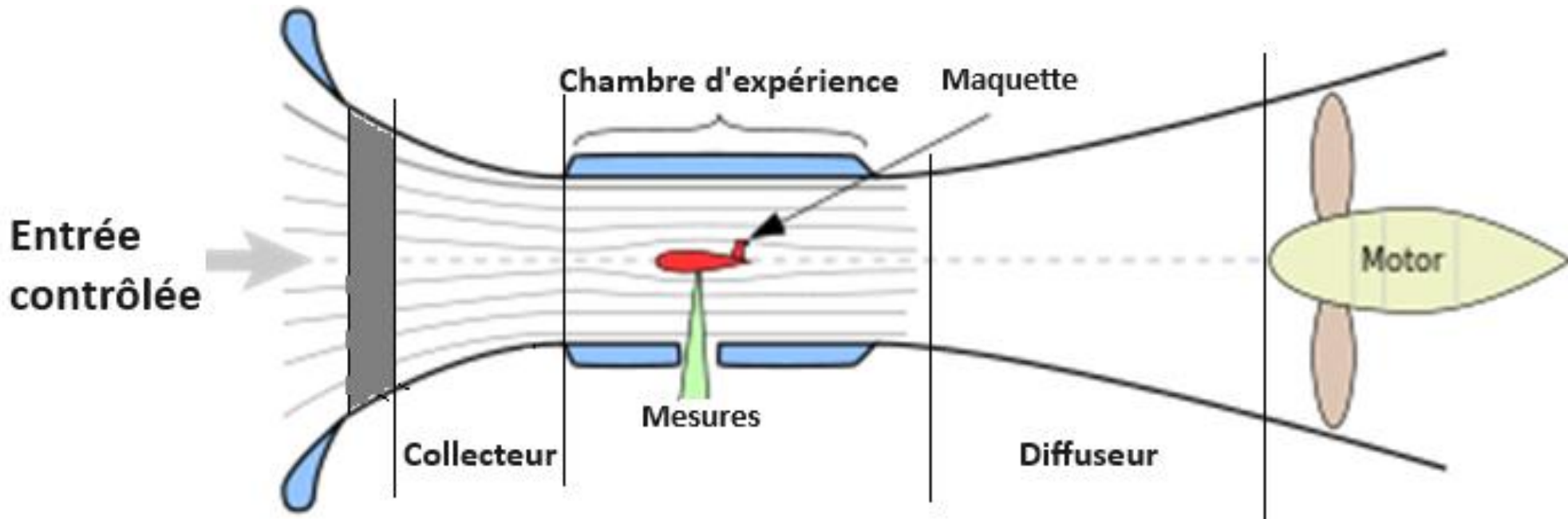
Principe : Un aéronef se déplaçant dans une masse d'air peut être assimilé à un objet fixe dans un courant d'air.

Simulation contrôlée d'écoulements d'air autour d'objets, souvent à échelle réduite, pour étudier leur comportement aérodynamique.

Utilisation: Permet à poste fixe, d'observer à loisir les comportements de l'objet dans différentes positions, à des vitesses différentes

III.1 LA SOUFFLERIE

Description



Equation de continuité (conservation de masse)

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2$$

S_1 et V_1 : Section et vitesse à l'entrée du collecteur

S_2 et V_2 : Section et vitesse à la sortie du collecteur

III.1 LA SOUFFLERIE

Différents types de soufflerie

Suivant la vitesse du flux qui les traverse :

- subsonique
- supersonique



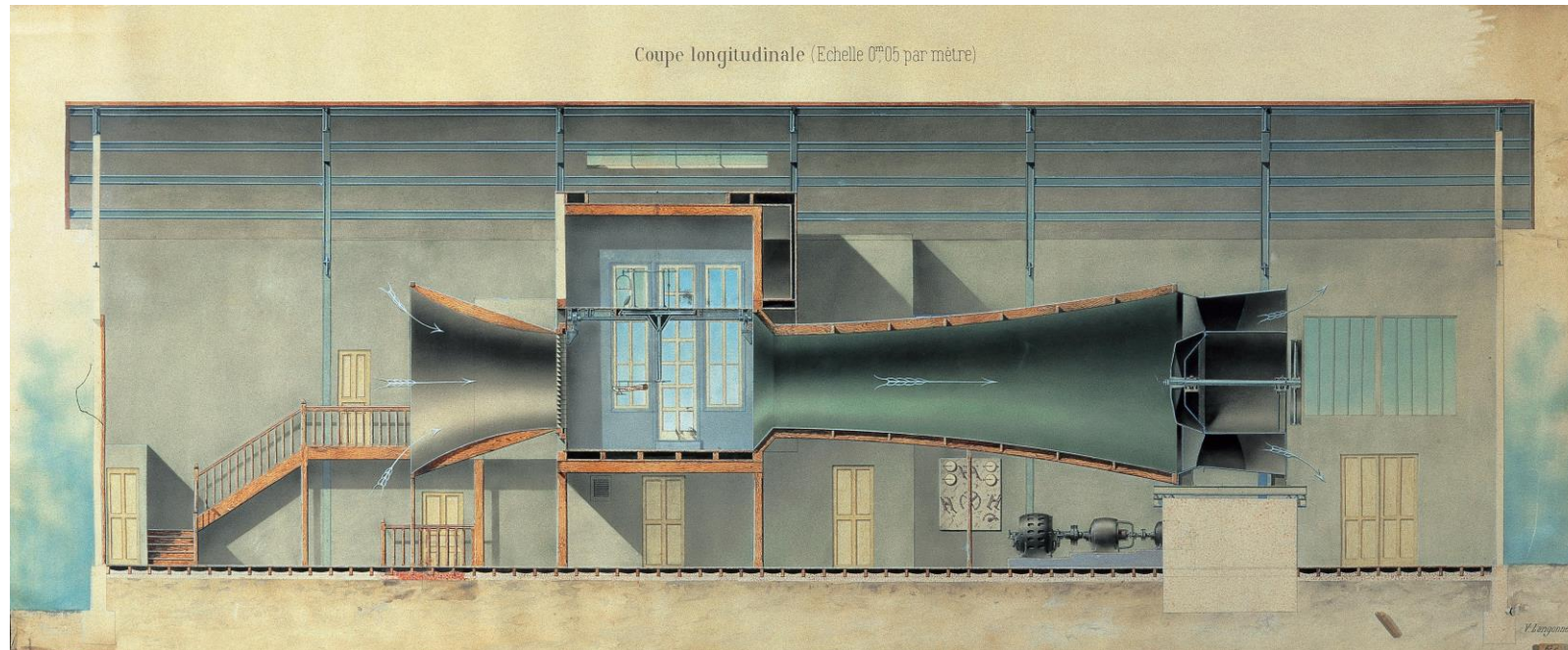
Le JF-22, la soufflerie hypersonique chinoise pouvant générer des écoulements à Mach 30

III.1 LA SOUFFLERIE

Différents types de soufflerie

Suivant leur conception :

- **La soufflerie de type «Eiffel » ou à circuit ouvert** : l'air est prélevé à l'extérieur, il passe dans les différents éléments de la soufflerie puis est évacué à l'extérieur.

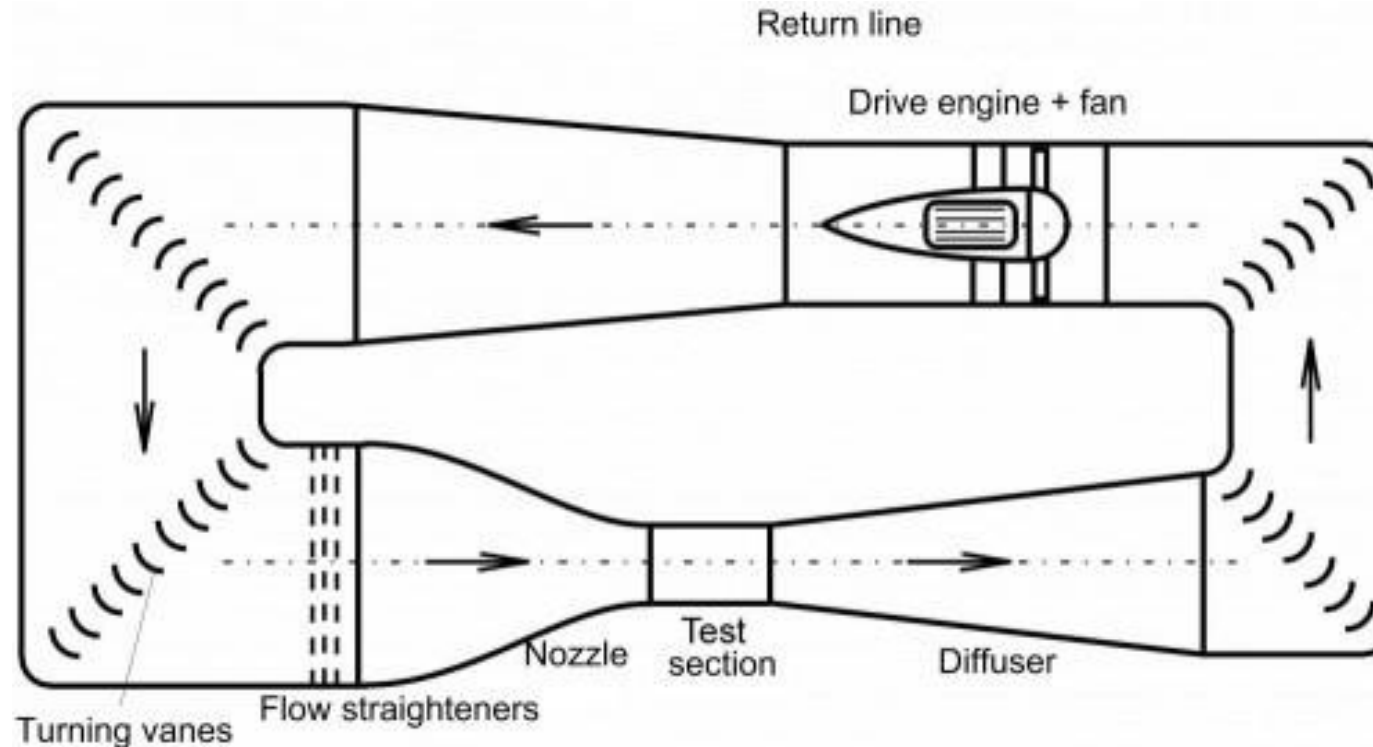


III.1 LA SOUFFLERIE

Différents types de soufflerie

Suivant leur conception :

- **La soufflerie à retour** : l'air sortant du diffuseur revient au collecteur et s'écoule en circuit fermé. Le diffuseur est prolongé et dévié quatre fois à 90° , les angles étant franchis grâce à des aubages évitant de trop grandes perturbations.



III.2 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Equivalent numérique de la soufflerie : Permet de faire de tests de conception sur ordinateur

Des packages sont disponibles pour plusieurs applications

- **AeroSandbox** : Bibliothèque python pour la conception et l'analyse aérodynamique complète des aéronefs
- **Xfoil** : Programme interactif pour la conception et l'analyse des profils subsonique
- **Ambiance** : Implémentation en python de l'atmosphère standard de l'OACI
- **scikit-aero** : Calculs aéronautiques divers (Atmosphère standard, équations de Saint venant, transformation de Joukowski...)

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

IV.1. DEFINITION ET ROLE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION.

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT

IV.4. LA VOILURE : définitions, références et caractéristiques

IV.5. AXES DE REFERENCES

IV.6. COMMANDES ET GOUVERNES

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.1. DEFINITION ET ROLE DE L'AVION

Aéronef

- **Aérodynes** : aéronef plus lourd que l'air

Avion, hélicoptère

- **Aérostats** : aéronef plus léger que l'air

ballon, planeur

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

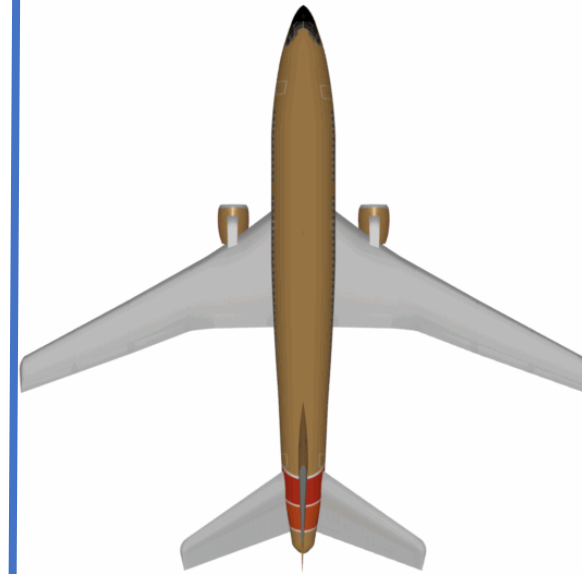
- le planeur ou la cellule
- le groupe de propulsion
- les circuits
- les équipements et les aménagements.

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

La cellule

1. **Le fuselage** : auquel est fixé un grand nombre d'organes (Equipements, circuits, groupe de propulsion). Il permet l'emport de la charge utile. Il a aussi pour rôle de réunir la voilure à l'empennage.
2. **La voilure** : elle assure la sustentation, le stockage du carburant, la fixation du train d'atterrissage (qui peut être fixe ou rentrant), éventuellement le support des moteurs et enfin la stabilisation de l'avion en roulis et lacet.
3. **L'empennage** : composé d'une dérive et d'un plan horizontal réglable sert à stabiliser l'avion en lacet par l'intermédiaire de la dérive et en tangage grâce à l'empennage horizontal.



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

La cellule

4. Les atterrisseurs : composés d'un train principal (sous l'aile, rarement sous le fuselage), d'une roulette de queue (train classique) ou d'une roulette de nez (train tricycle).

5. Les gouvernes principales ou primaires : servent à modifier l'attitude de l'avion dans les trois directions (stabilité commandée, et maniabilité).

- **les ailerons** : liés aux ailes ils permettent à l'avion de s'incliner pour tourner.
- **la gouverne de direction** : liée à la dérive, elle permet à l'avion d'avoir une position symétrique aux filets d'air en vol et de se maintenir dans l'axe de piste aux abords des terrains.
- **la gouverne de profondeur** : liée au Plan Horizontal Réglable, permet à l'avion de cabrer ou de piquer.



IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

La cellule

6. Les gouvernes secondaires servent à modifier les caractéristiques aérodynamiques de l'avion :

- ***les hypersustentateurs*** servant à augmenter la portance à basse vitesse est assurée par les becs et les volets.
- ***l'hyposustentateurs***, servant à détruire la portance et à augmenter la traînée est assurée par les spoilers et les lift dumpers.
- ***aérofreins (speed brake)***, assurent l'aérofreinage qui diminuent la vitesse de l'avion, et augmentent la pente de descente en descente d'urgence.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

La cellule

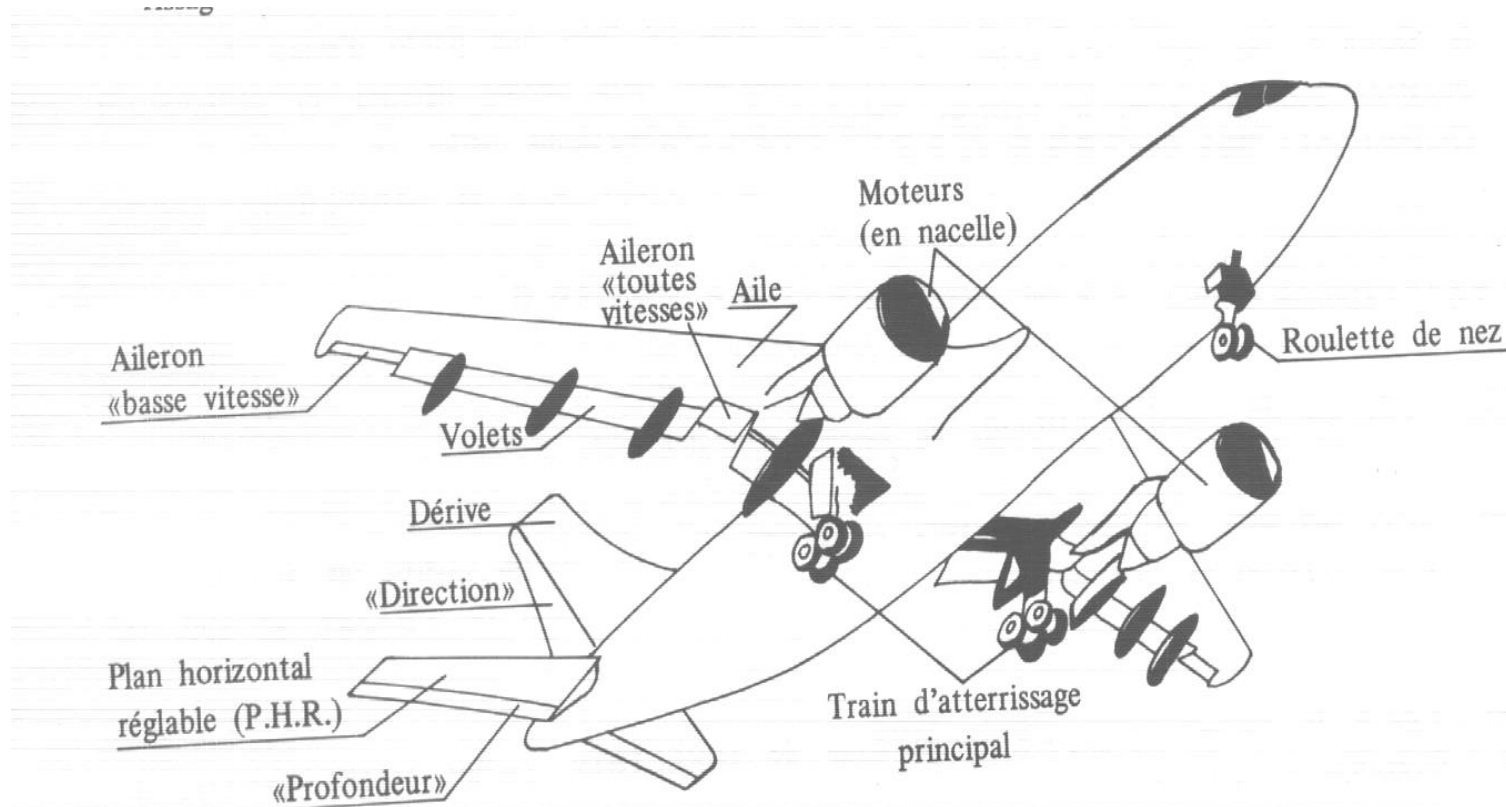


Fig. 2

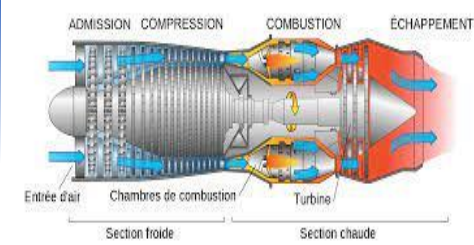
IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

Le groupe de propulsion

Les moteurs servent à propulser l'avion et peuvent être situés aux endroits suivants :

- sous les ailes (en nacelle) : A 300-310-330-340 et B 747
- au pied de la dérive : B 727
- dans la dérive : DC 10
- sur les côtés à l'arrière du fuselage (F-28, MD 82)
- à l'avant dans le nez du fuselage : monomoteur.

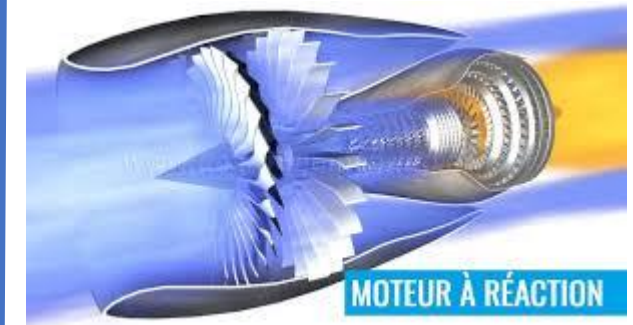
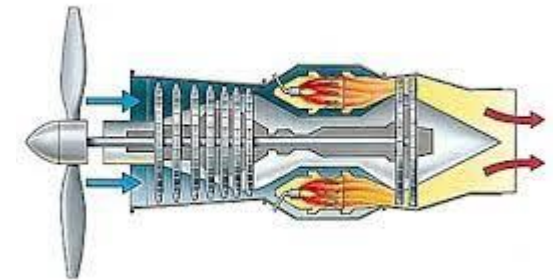


IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

Le groupe de propulsion

- **Groupe motopropulseur (GMP)** : moteurs conventionnels (moteur à piston et son hélice) ;
- **Turbopropulseurs** : turbine à gaz entraînant une hélice (turbine délivrant une puissance sur un arbre qui entraîne une hélice), on parle de groupe **TURBOPROPULSEUR (GTP)** ;
- **Turboréacteurs** : turbine à gaz qui accélère les gaz en sortie de tuyère et créent une force de poussée, on parle de Groupe **TURBOREACTEUR (GTR)**, mais aussi de « jet » ou de « réacteur ».



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

Les circuits

- Les circuits de génération d'énergie : hydraulique, électrique et pneumatique
- Les circuits de servitude :
 - *Carburant*
 - *huile*
 - *alcool* : il aide à l'antigivrage en abaissant le point de congélation de l'eau à -70°C .
 - *eau* : elle est utilisée pour les toilettes, les réacteurs et les échangeurs thermiques.
- Les circuits et installations de sécurité :
 - *Lutte contre le givre et la pluie*
 - *Lutte contre l'incendie* : on fera de la détection incendie suivie de l'extinction.
 - *Oxygène* : il sert à assurer la survie en situation dégradée.
 - *Conditionnement d'air* : il assurera la climatisation par régulation de la température cabine et la pressurisation par régulation de la pression cabine.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS PRINCIPAUX D'UN AVION

IV.2.4. LES EQUIPEMENTS ET AMENAGEMENTS

Les équipements permettent de contrôler le comportement de l'avion. On distingue :

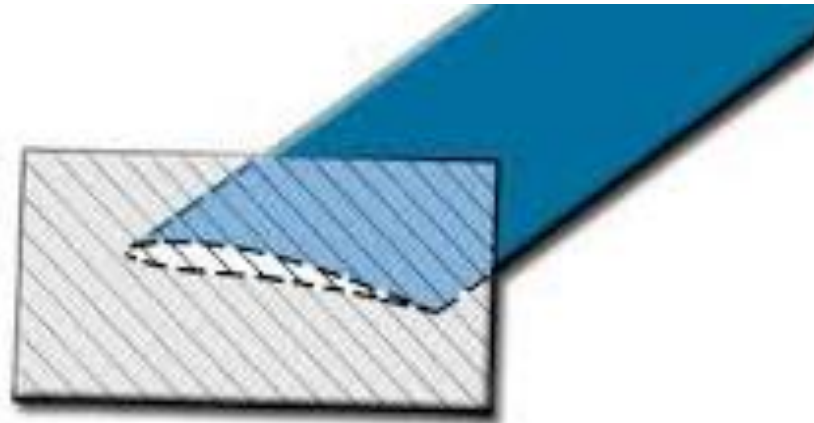
- ✓ Les instruments de bord (de contrôle, de pilotage, de guidage et de navigation)
- ✓ Les équipements de radiocommunication et de radionavigation.

Les aménagements généraux intéressent la disposition du poste de pilotage et de la cabine (condition de sécurité, de confort et de rendement).

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

Le profil est **une section verticale de l'aile** par un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion. Le profil de référence est en général le profil d'implanture de l'aile.



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

Le profil est **une section verticale de l'aile** par un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion. Le profil de référence est en général le profil d'implanture de l'aile.

La forme géométrique du profil détermine la capacité de la voilure à :

- créer de la portance dans un courant d'air.
- optimiser les forces aérodynamiques.
- assurer la maniabilité, la vitesse et la stabilité.



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

Références du profil

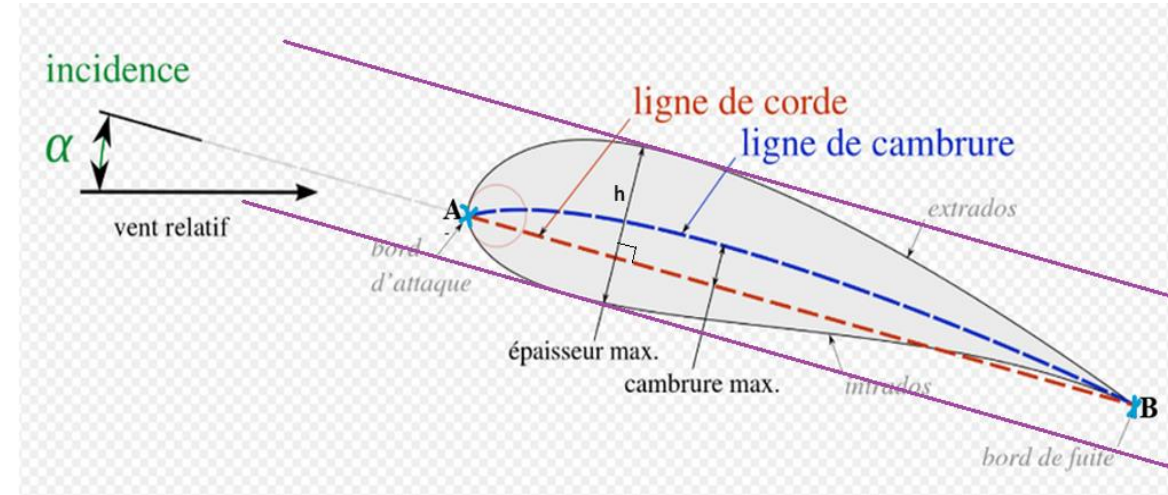
La Corde : C'est le segment de droite [A B] joignant le bord d'attaque au bord de fuite.

La Profondeur du profil : C'est la longueur ℓ du segment [A B].

La Ligne moyenne, ossature ou squelette ou ligne de cambrure : C'est le lieu géométrique des points M, équidistants de l'intrados et de l'extrados, pris par rapport à une droite Δ , perpendiculaire à la corde [A B], et se déplaçant du bord d'attaque au bord de fuite.

L'incidence α ou i : C'est l'angle orienté formé entre le vecteur vitesse et la corde de profil.

L'incidence est positive si le vecteur vitesse issu d'un point quelconque de la corde, est situé sous la corde.



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

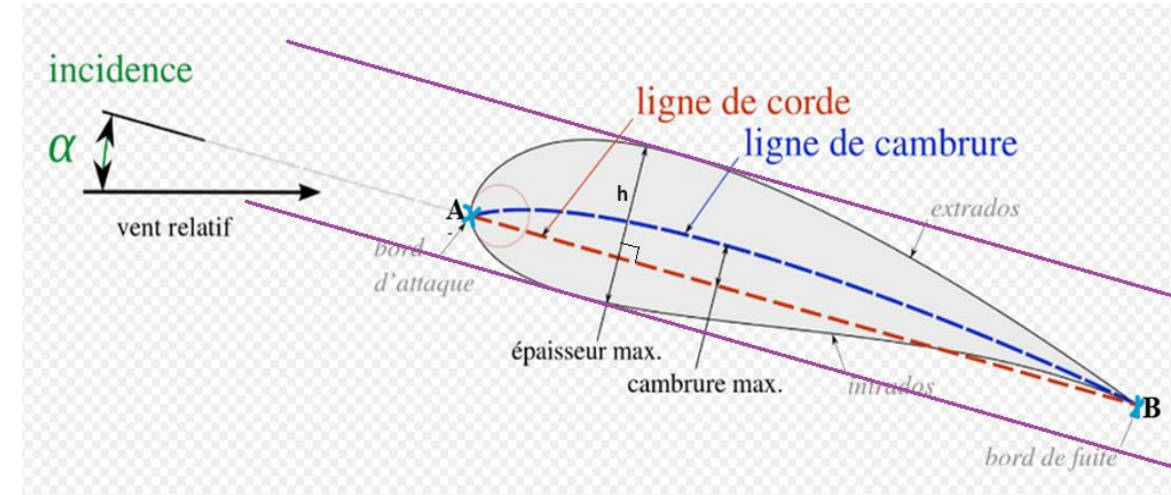
IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

Références du profil

Épaisseur maximale h : C'est le plus grand segment joignant l'intrados à l'extrados et perpendiculaire à la corde. C'est la distance entre les deux tangentes parallèles à la corde [AB] et mesurée de l'extrados à l'intrados.

Épaisseur relative e : Elle est égale à l'épaisseur maximale sur la profondeur du profil, $e = \frac{h}{\ell}$ Elle s'exprime en pourcentage et caractérise le profil.

- les profils minces : $e < 6\%$
- les profils semi-épais : $6\% < e < 12\%$
- les profils épais : $e > 12\%$



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

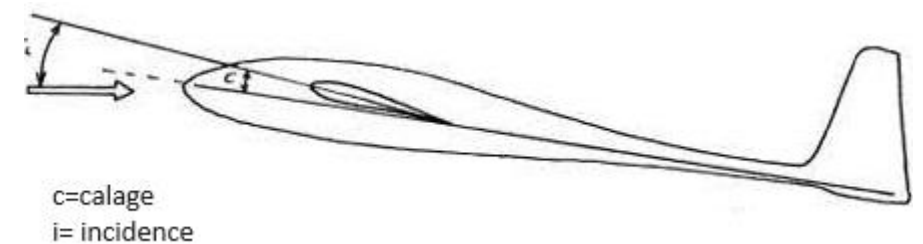
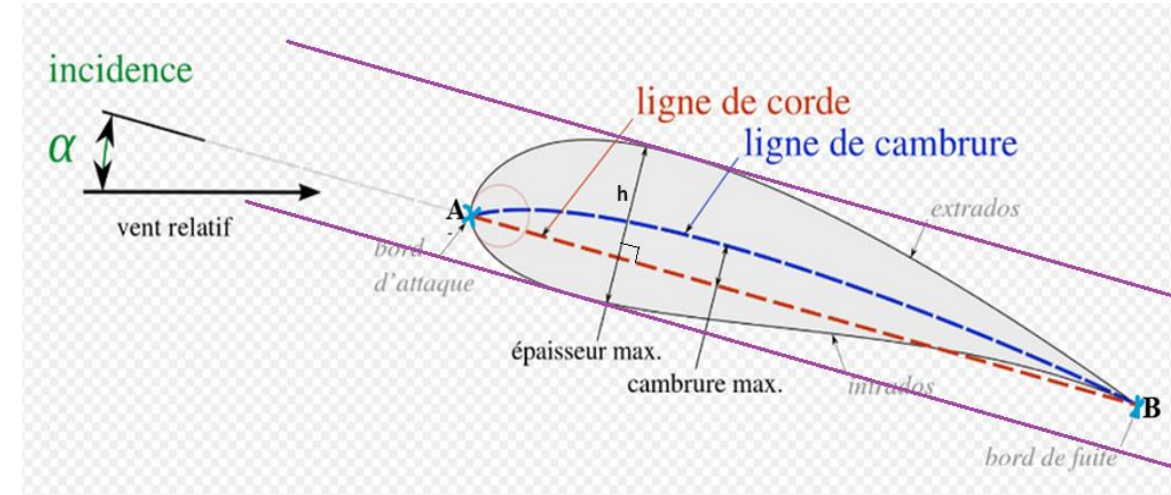
Références du profil

Flèche ou cambrure maximale f : La flèche maximale est la distance maximale entre la ligne moyenne et la corde.

Courbure ou cambrure relative C : La courbure relative est égale à la flèche maximale sur la profondeur du profil.

on l'exprime en pourcentage : $C = \frac{f}{\ell}$

Le Calage : C'est l'angle orienté compris entre l'axe longitudinal de l'avion et la corde. Le calage est généralement positif (environ 2°).



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

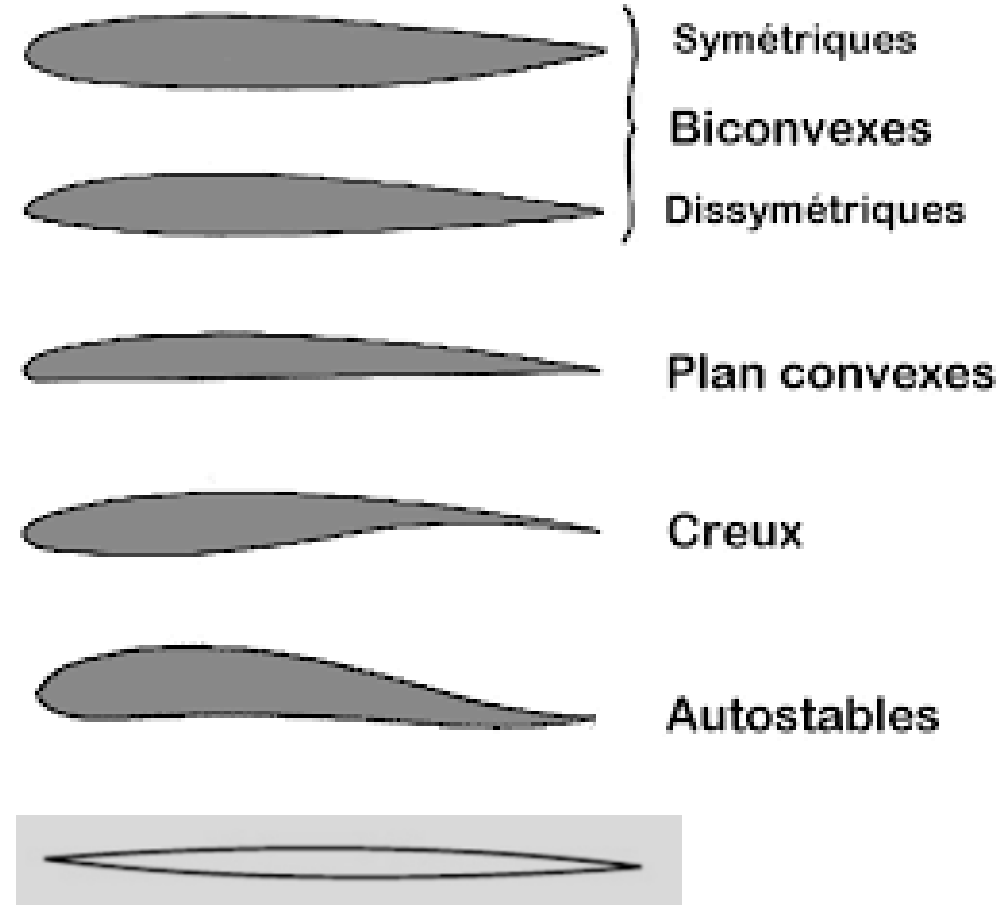
IV.3.2. Différentes formes de profils

Profil biconvexe symétrique : L'ossature et la corde sont confondus. Utilisé : empennages horizontaux et verticaux des avions modernes, ainsi que pour les gouvernes.

Profil biconvexe dissymétrique : L'ossature et la corde sont distinctes, la courbure de l'extrados est plus accentuée que celle de l'intrados. C'est le profil type d'aile le plus utilisé en aviation générale et de transport.

Profil creux : L'extrados est convexe, l'intrados est très légèrement convexe à proximité du bord d'attaque, puis il devient concave vers le bord de fuite. Ce type de profil se rencontre surtout sur les planeurs.

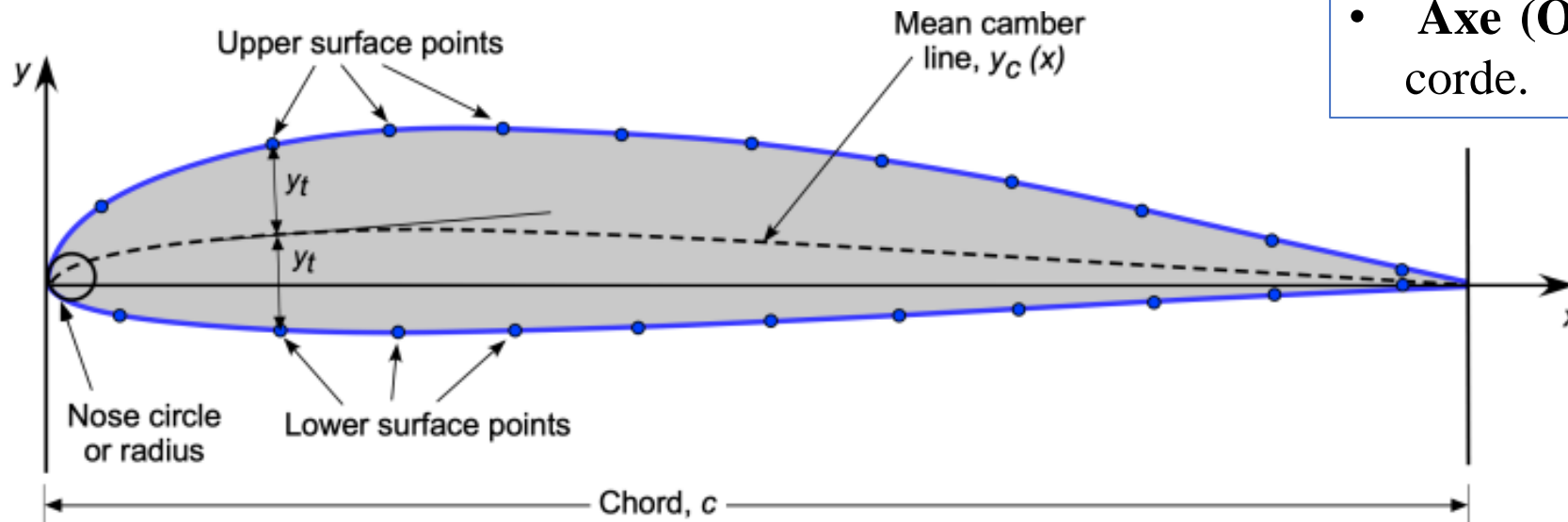
Profil laminaire : C'est un profil mince, biconvexe, presque symétrique, à bord d'attaque aiguë. utilisé sur les avions à grandes vitesses



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

IV.3.3. Description complète du profil



système de coordonnées (Ox , Oy)

- **Origine (0,0)** : bord d'attaque
- **Axe (Ox)** : axe passant par la corde.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

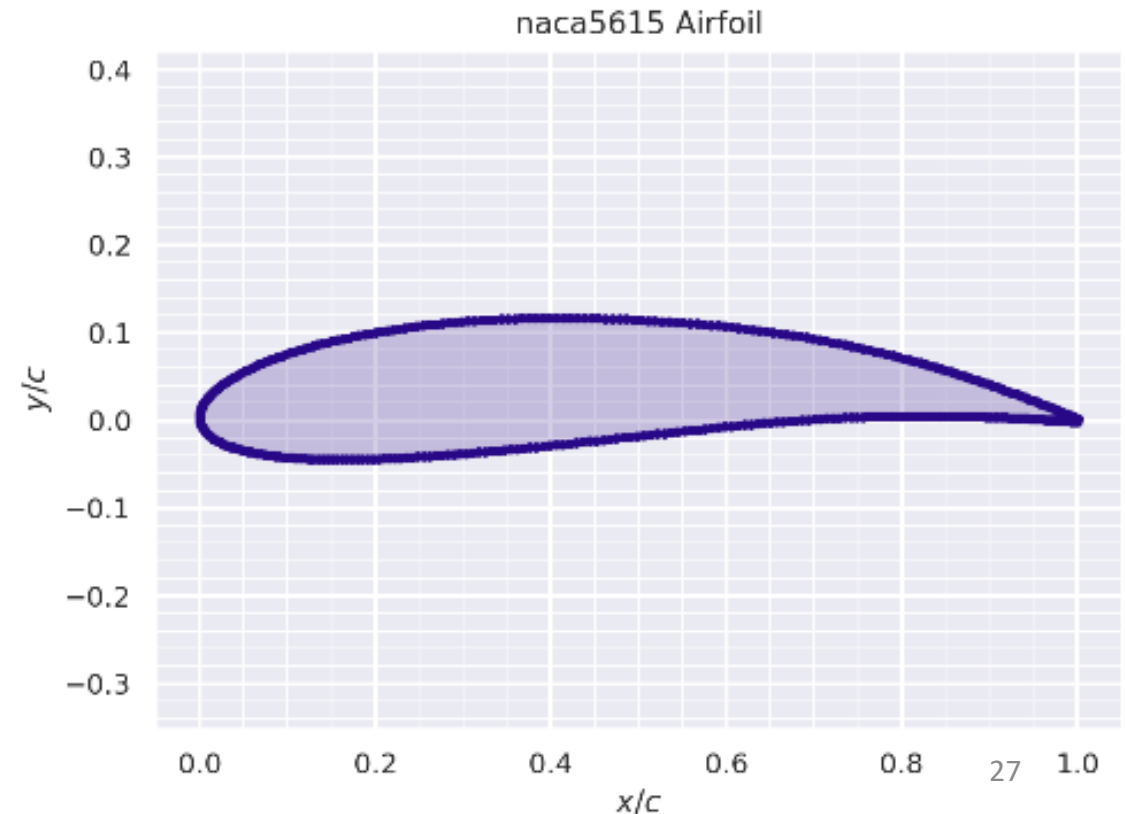
IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

IV.3.3. Description complète du profil

Le National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), ancêtre de la NASA a mené l'étude la plus complète et systématique de l'effet de la forme des profils d'ailes sur les caractéristiques aérodynamiques et a établi un catalogue de profil.

Série à 4 chiffres

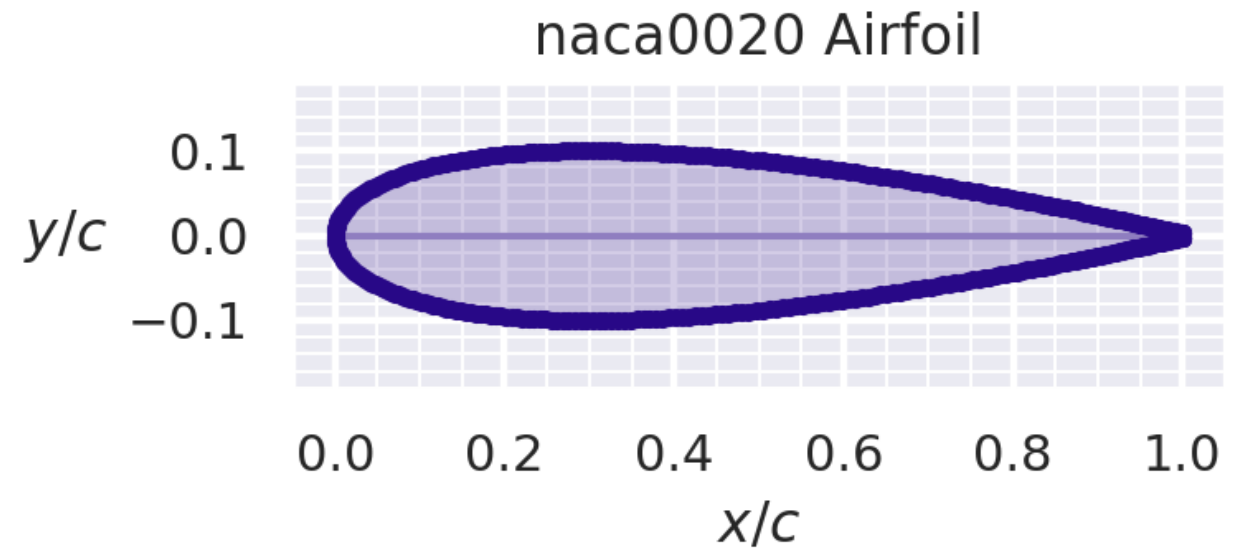
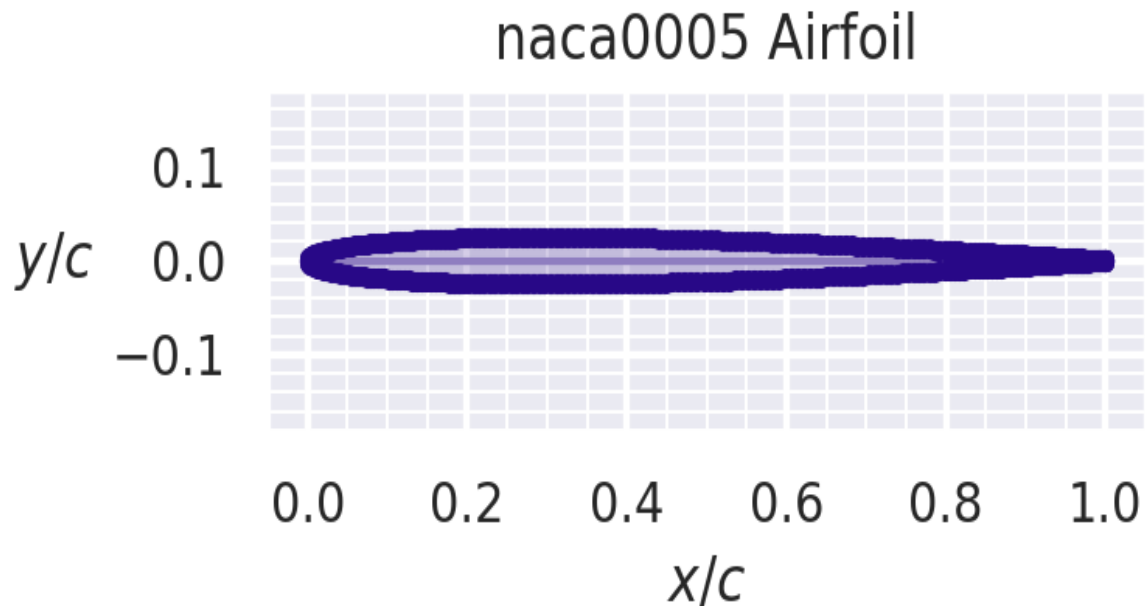
- *NACA00du* : Profils symétriques, où *du* représente l'épaisseur relative du profil en pourcentage
- *NACA m cd u* : Série NACA à 4 chiffres. Où *m* représente la courbure relative en pourcentage, *c* l'abscisse au dixième de la corde ($10 \times \frac{x}{c}$) où la courbure maximale est atteinte.



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

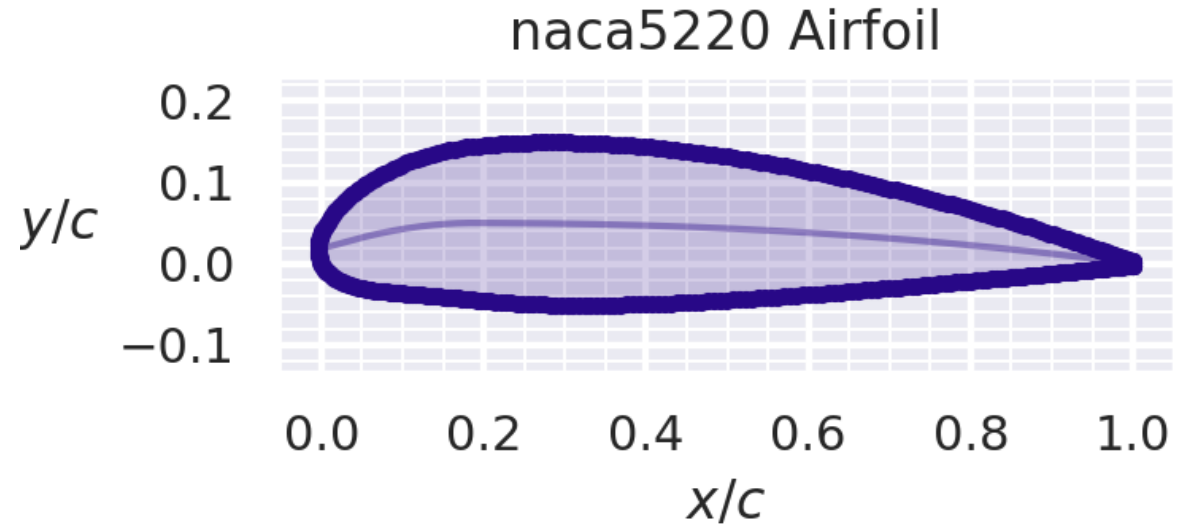
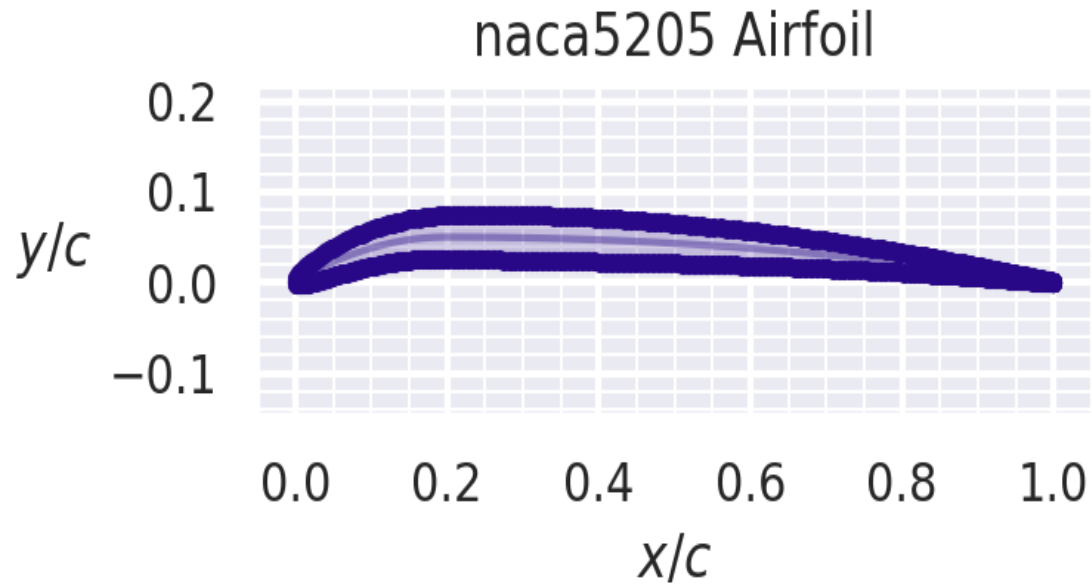
IV.3.3. Description complète du profil



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

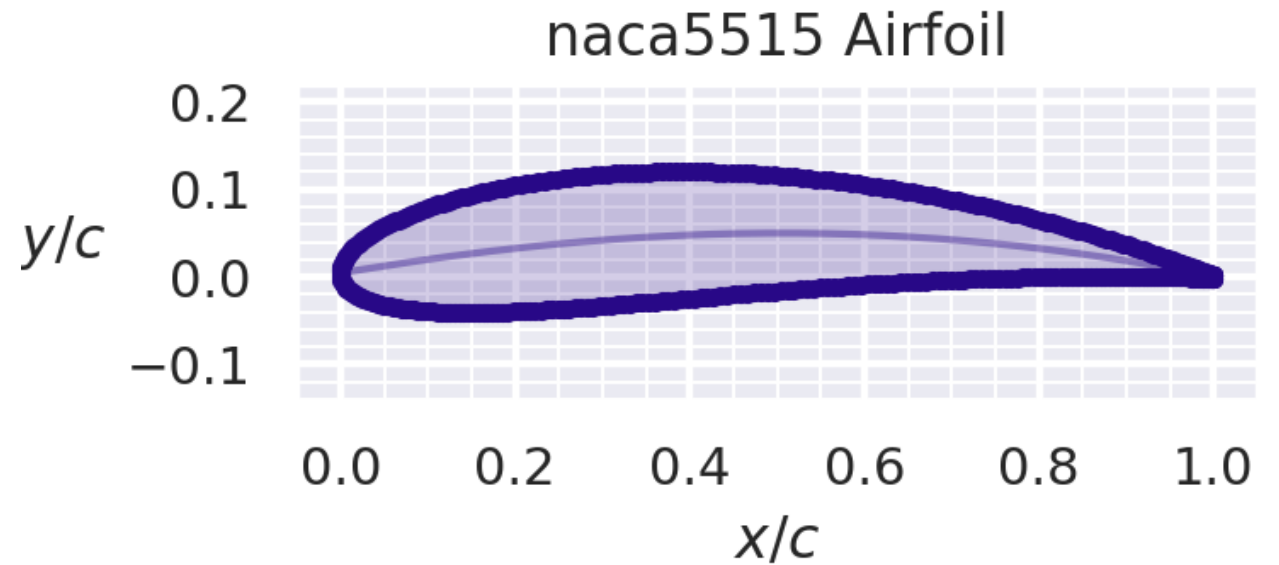
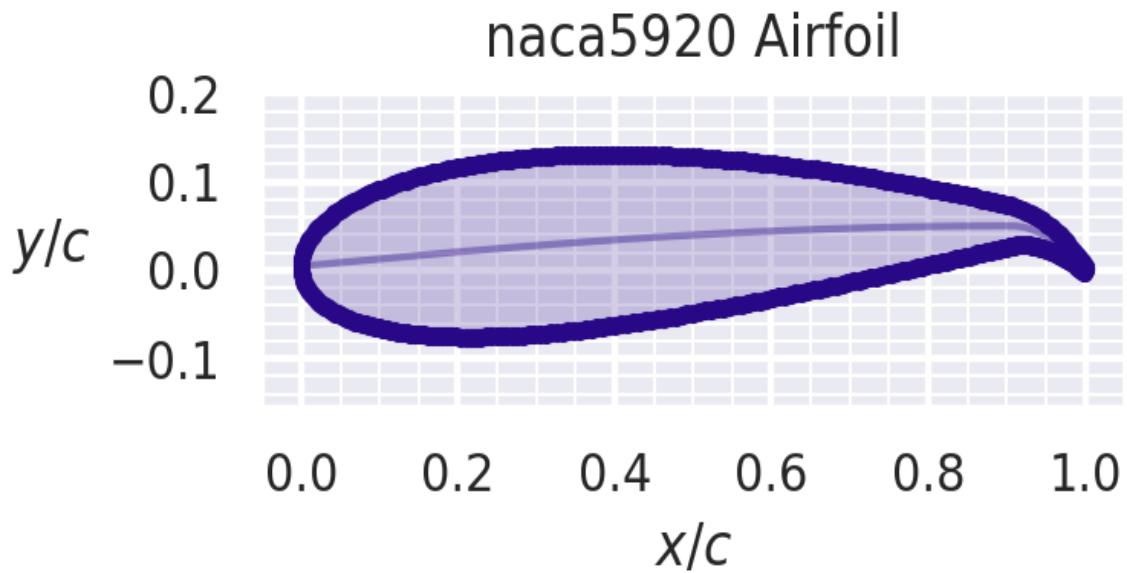
IV.3.3. Description complète du profil



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

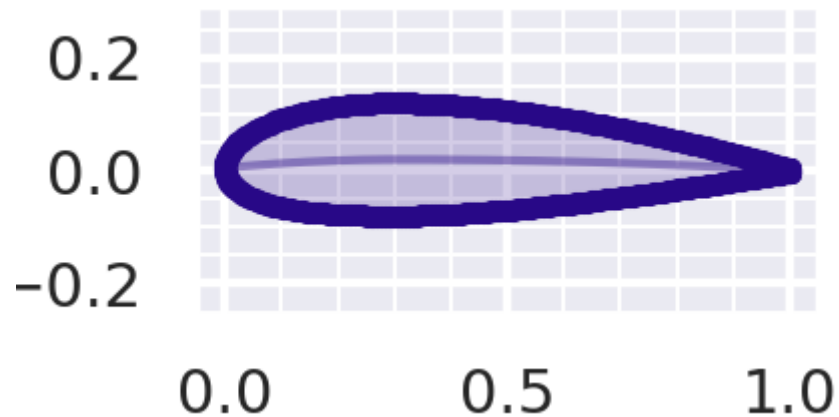
IV.3.3. Description complète du profil



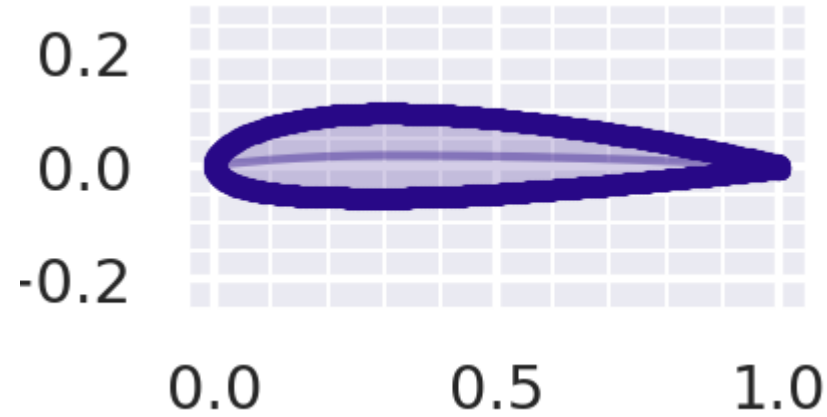
IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

IV.3.3. Description complète du profil (Application)



A



B

Nous avons naca2320 et naca2315. Quelles codifications correspondent à A et B?

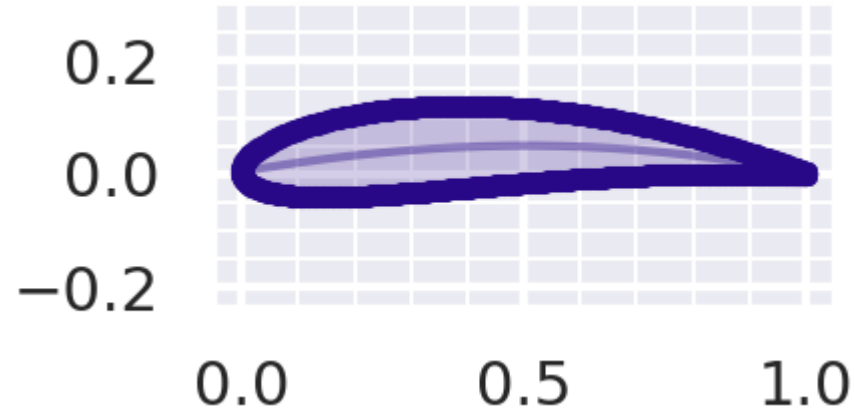
A: naca2320

B: naca2315

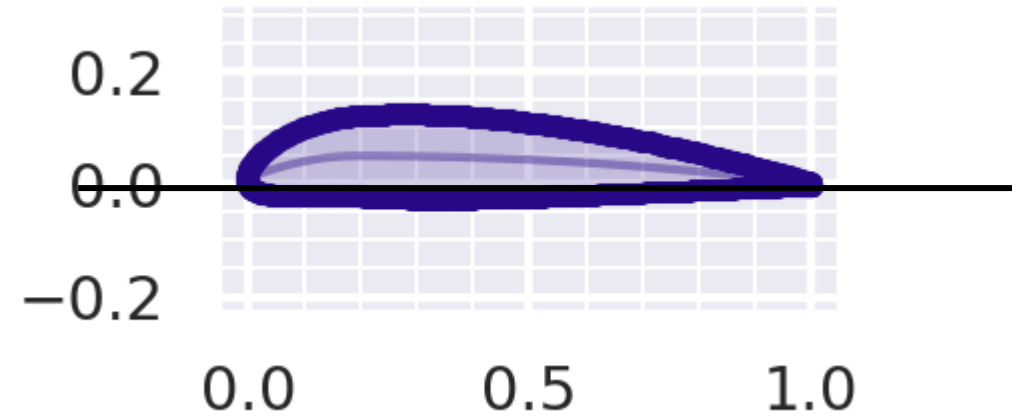
IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.3. LE PROFIL D'AILE D'ENVERGURE INFINIE DANS UN ÉCOULEMENT INCOMPRESSIBLE (THÉORIE DU PROFIL)

IV.3.3. Description complète du profil (Application)



A



B

Nous avons naca5215 et naca5515. Quelles codifications correspondent à A et B?

A: naca5515

B: naca5215

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

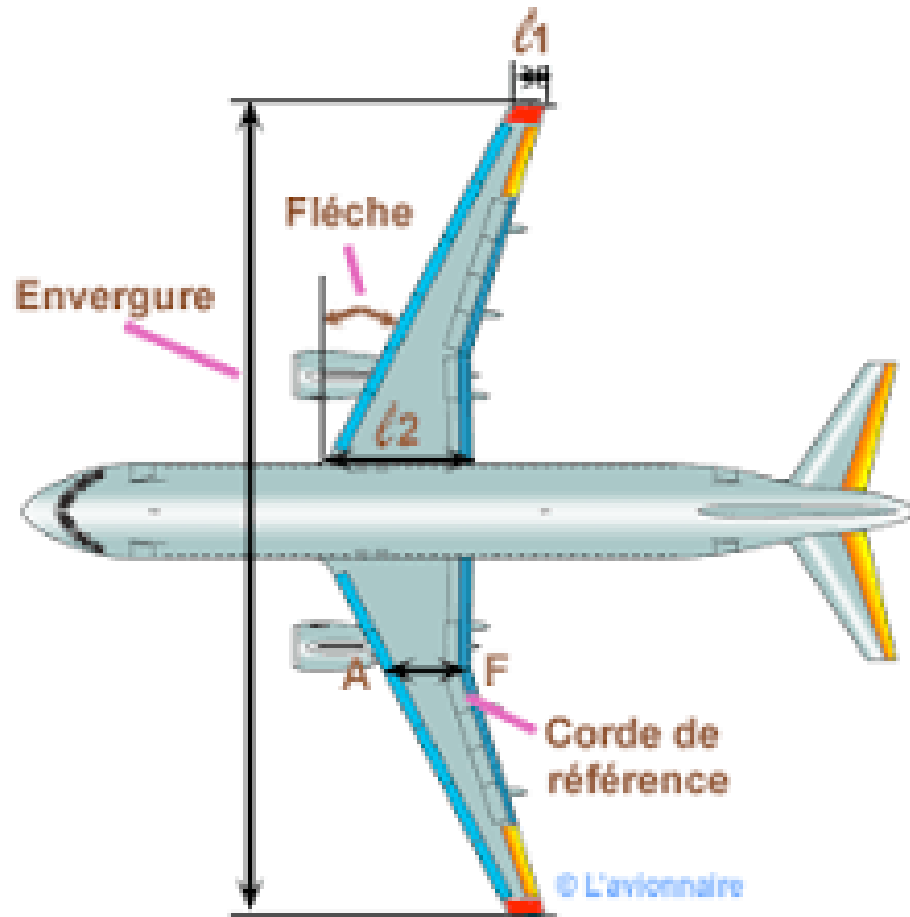
IV.4 LA VOILURE

La voilure d'un aéronef, appelée simplement "aile" dans le cas de l'avion, est une composante aérodynamique cruciale de l'aéronef qui génère la portance nécessaire pour le maintenir en l'air.

La voilure est conçue de manière à exploiter les principes aérodynamiques pour créer une différence de pression entre la surface supérieure et inférieure de l'aile, générant ainsi la portance.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE



Surface de la voilure S

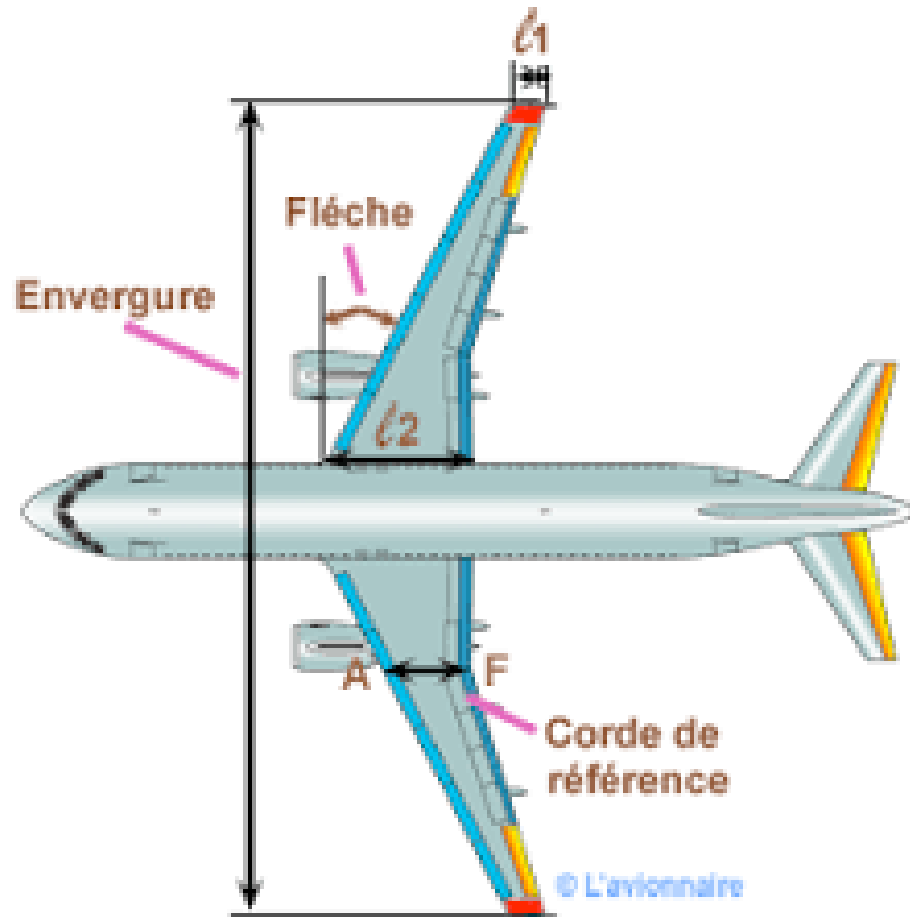
Par convention, c'est la surface projetée sur un plan horizontal des deux ailes et de la partie du fuselage comprise entre les deux ailes.

Envergure B

C'est la longueur B prise d'une extrémité à l'autre de la voilure, perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'avion.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE



Corde ou profondeur moyenne de l'envergure de la voilure

En partant de l'emplanture nous constatons souvent que le profil évolue en allant vers l'extrémité de l'aile : l'épaisseur, la courbure, la profondeur sont modifiées.

On est donc amené à définir la corde ou profondeur moyenne : $\ell_m = \frac{S}{B}$

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE



Allongement λ

C'est le rapport de l'envergure B sur la corde moyenne ℓ_m . L'allongement est l'envergure relative de la voilure.

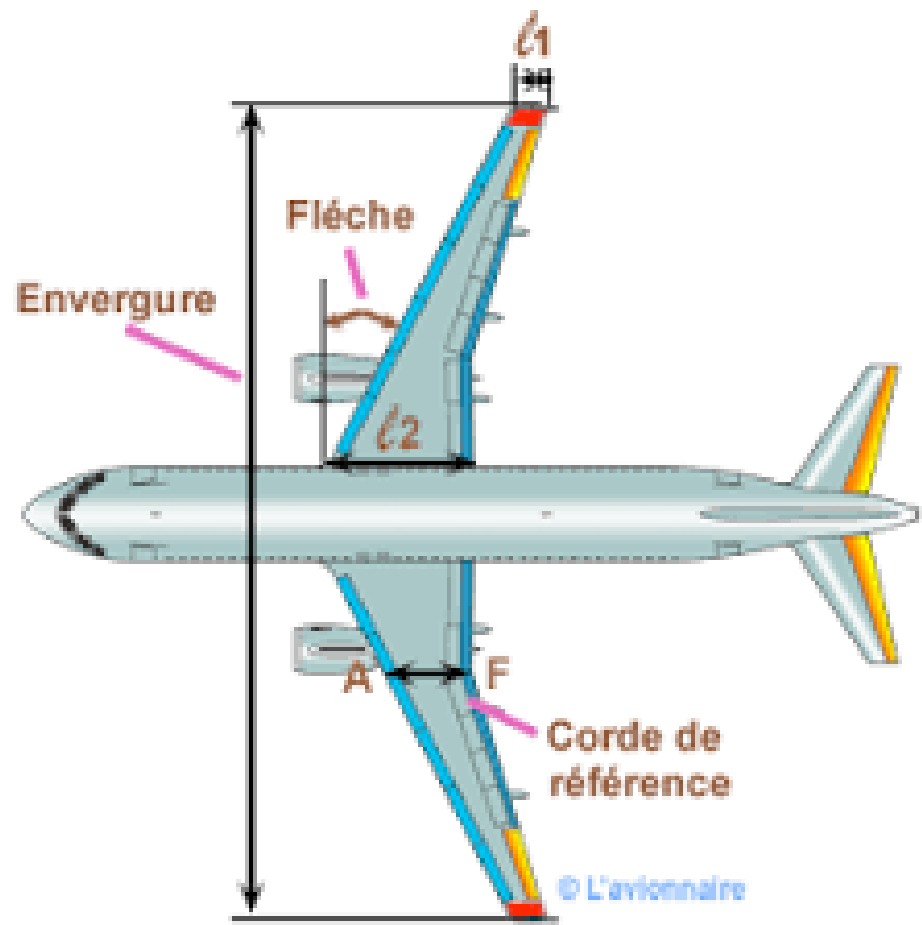
$$\lambda = \frac{B}{\ell_m}$$

L'avion est d'autant plus apte à voler vite que son allongement est faible, à condition que l'épaisseur relative soit faible.

- $3 < \lambda < 6$: avion rapide si $e < 6\%$ et avion lent si $e > 12\%$
- $6 < \lambda < 12$: avion transsonique avec $6\% < e < 12\%$ et avions lents si $e > 12\%$;
- $15 < \lambda < 30$: planeurs

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

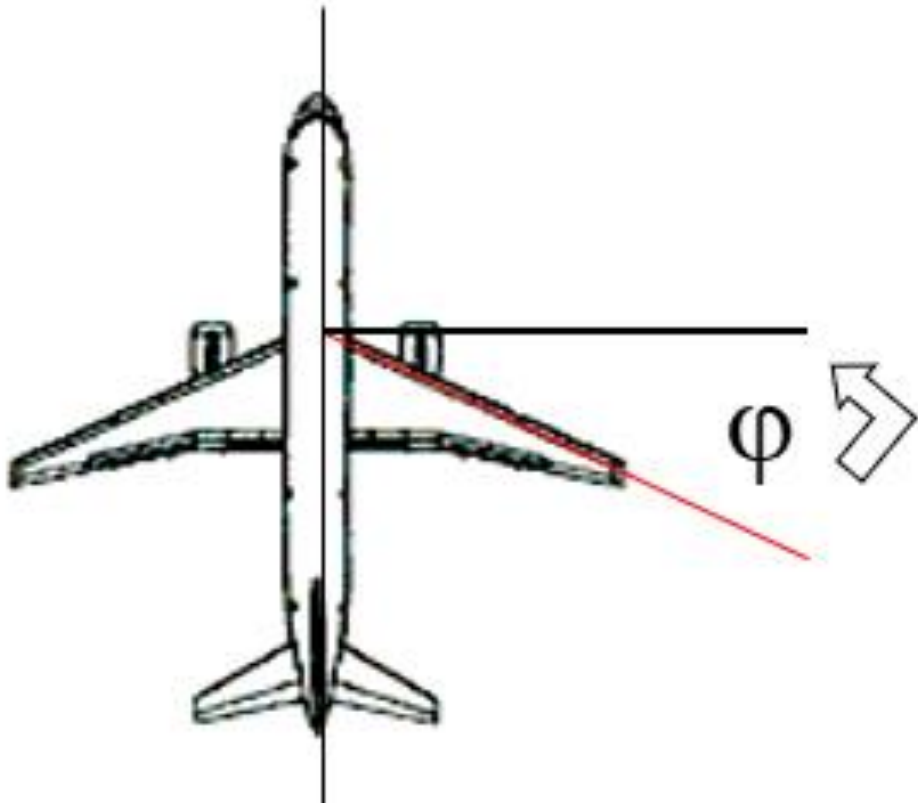
IV.4 LA VOILURE



Type d'avion	B(m)	B ² (m ²)	S ² (m ²)	λ
B 747	60	3600	511	7
B727	33	1089	158	6,8
A300	45	2025	260	7.8
A310	43.9	1927	219	8.8
A320	33.90	1149	126	9.1
MIRAGE F1	8.40	71	25	2.8

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE



La flèche φ

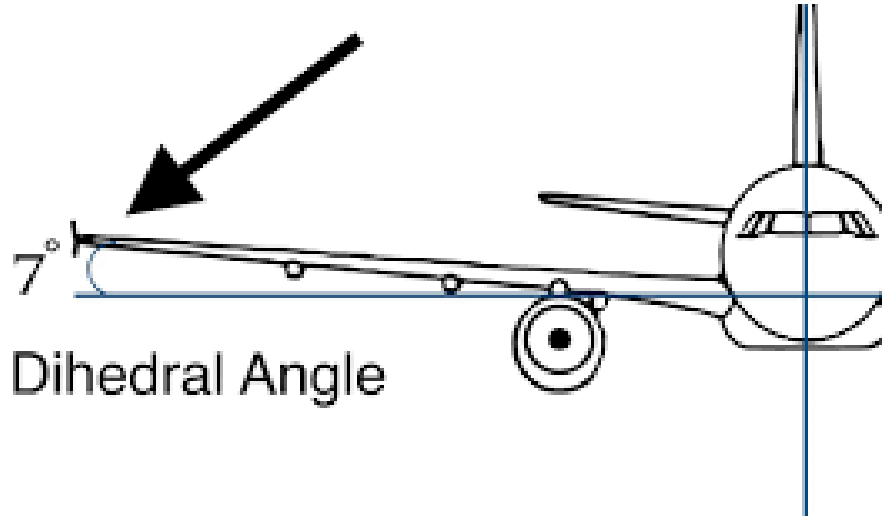
Angle formé entre une ligne de référence longitudinale de l'aile (ligne des 25% des cordes, à partir du bord d'attaque) et la perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

De la flèche dépend la vocation de l'avion :

- avion à flèche nulle : avion de tourisme (profil épais),
- avion à flèche positive plus ou moins accentuée : avion de transport moderne (réacteurs subsoniques élevés),
- avion à flèche accentuée : avions supersoniques.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE

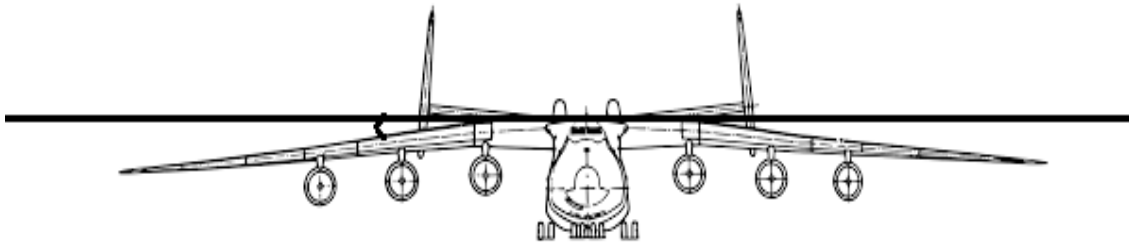


Dièdre δ

C'est l'angle δ d'un plan moyen d'une aile avec le plan horizontal perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

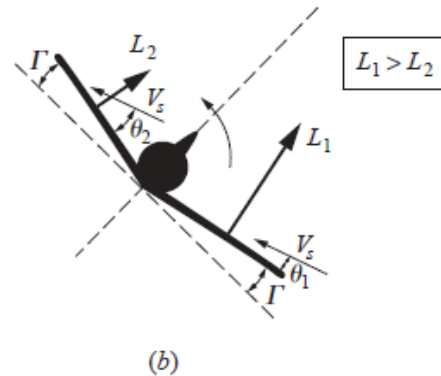
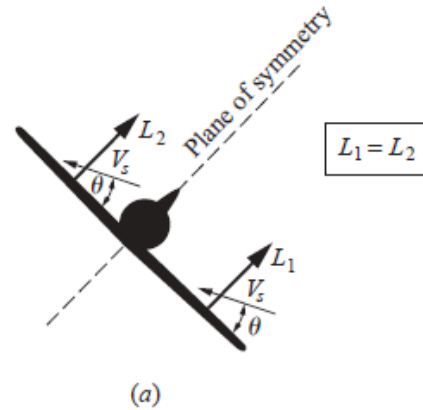
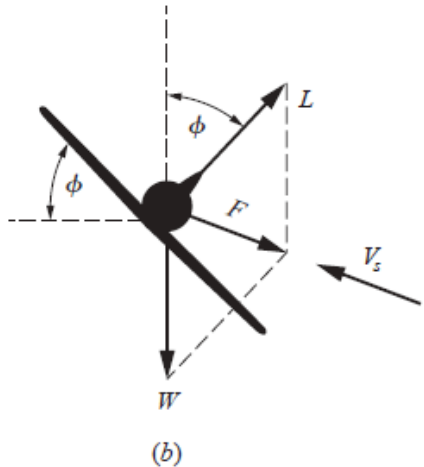
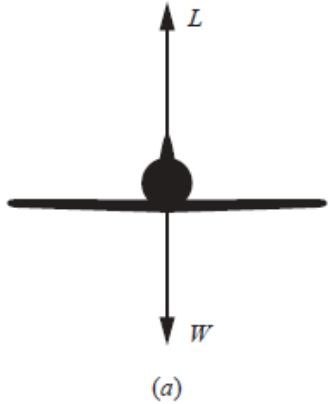
Il peut être positif (si l'aile se relève).

ou négatif (si l'aile s'abaisse).



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE

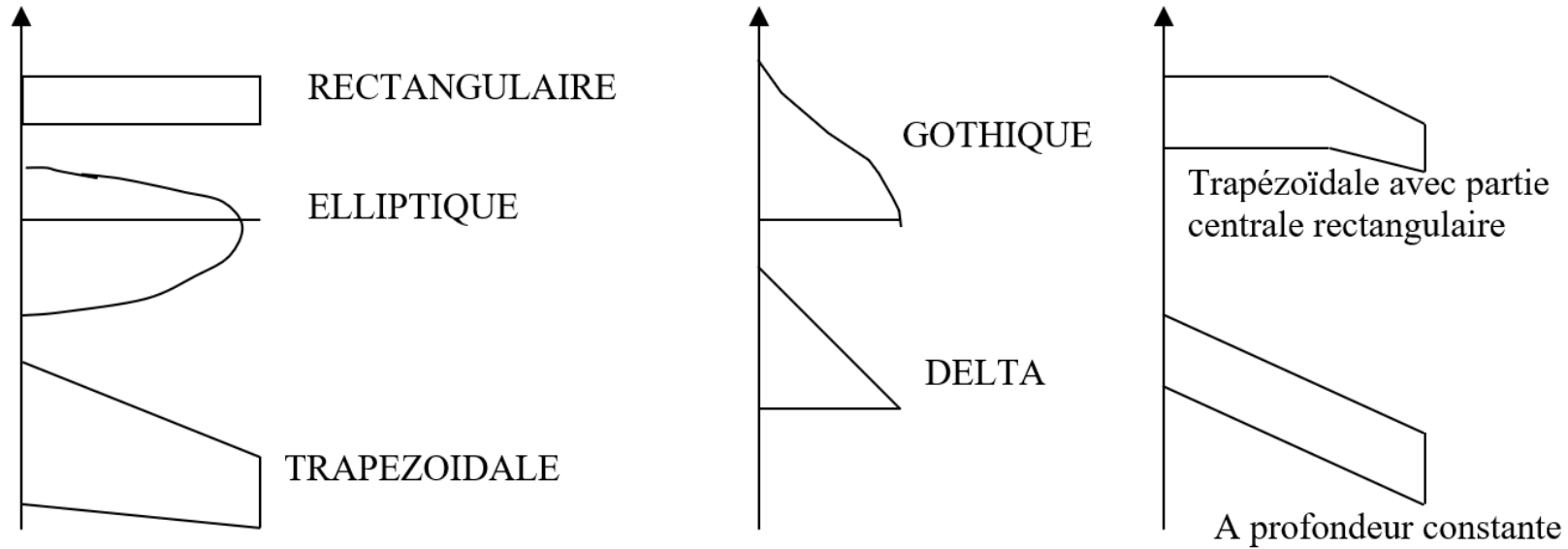


Dièdre δ

Lorsque l'avion est perturbé latéralement, le dièdre permet de créer une force de rappel pour restaurer la position de l'aéronef : Le dièdre est une solution pour assurer la stabilité latérale d'un aéronef (Voir mécanique de vol)

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE

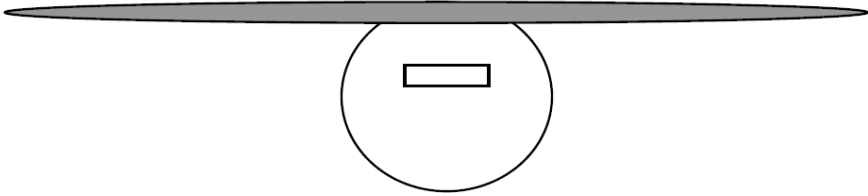


Forme en plan

La forme de la voilure associée à l'allongement, à l'épaisseur relative, et à la flèche caractérise la vocation de l'avion (Aile Gothique, aile delta : avions rapides)

IV. PRESENTATON GENERALE DE L'AVION

IV.4 LA VOILURE

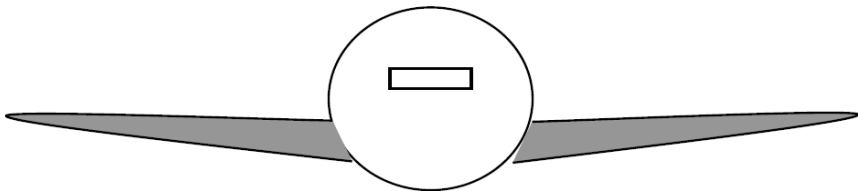


Montage de l'aile

Pour fixer l'aile au fuselage, deux méthodes sont utilisées :

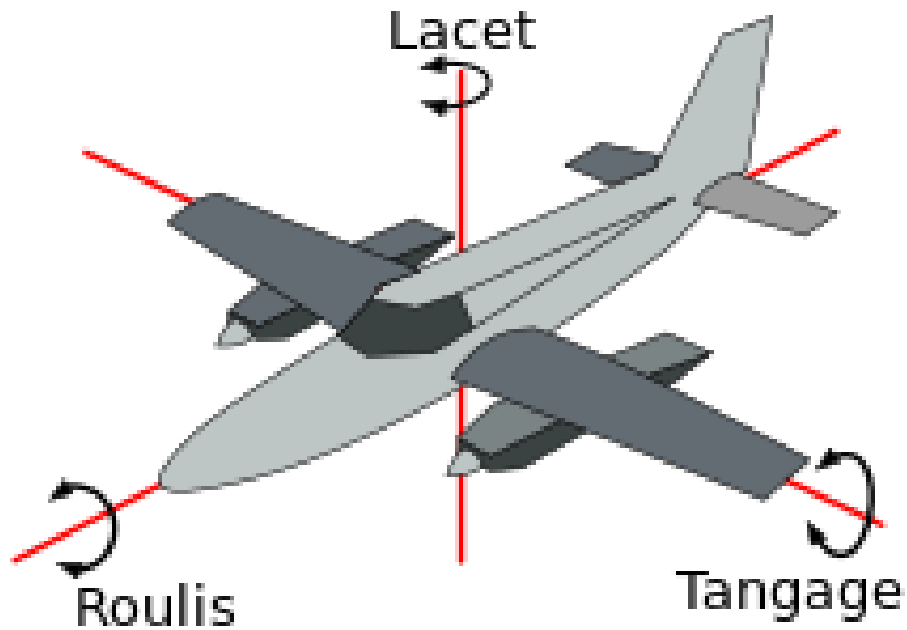
les deux ailes sont solidaires par l'intermédiaire de longerons traversant le fuselage de part en part.

les deux ailes sont fixées à l'emplanture : montage en porte-à-faux (ou cantilever).



IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.5 AXES DE REFERENCES



L'axe de tangage.

Lorsque l'avion se met à « piquer » (le mouvement du nez de l'avion vers le bas) ou à « cabrer » (mouvement du nez de l'avion vers le haut) il pivote autour de l'axe de tangage.

L'axe de roulis

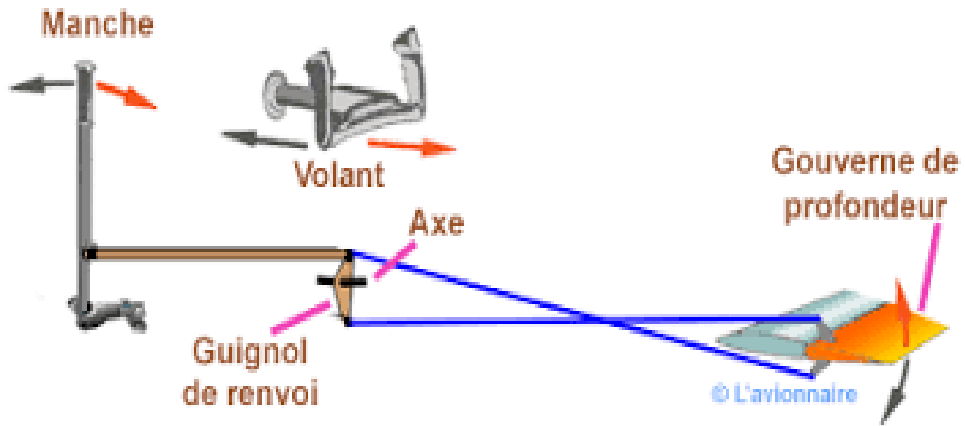
Lorsque l'avion s'incline à droite ou à gauche, il pivote autour de l'axe de roulis.

L'axe de lacet

Lorsque le nez de l'avion s'oriente à droite ou à gauche, les ailes restant horizontales, il pivote autour de l'axe de lacet.

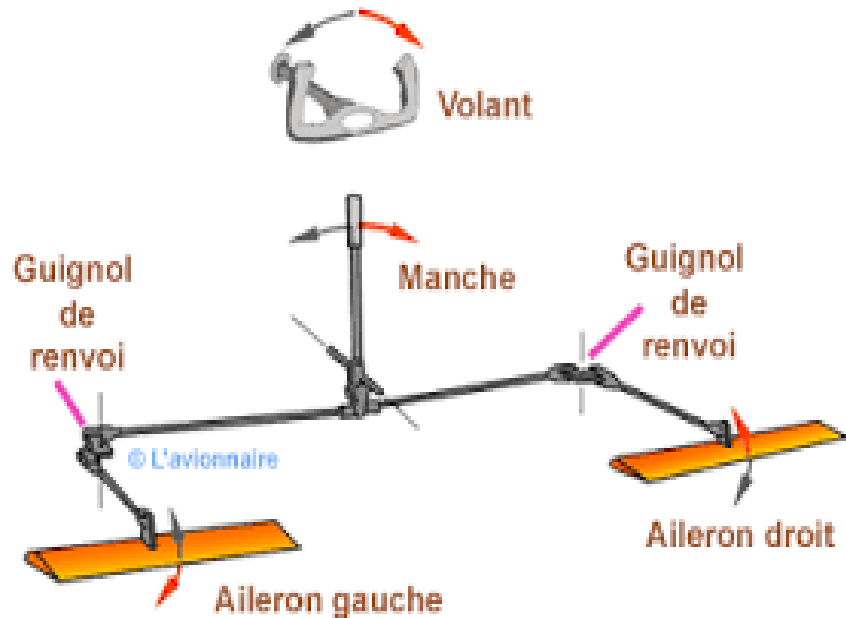
IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.6 COMMANDES ET GOUVERNES



Le manche ou volant.

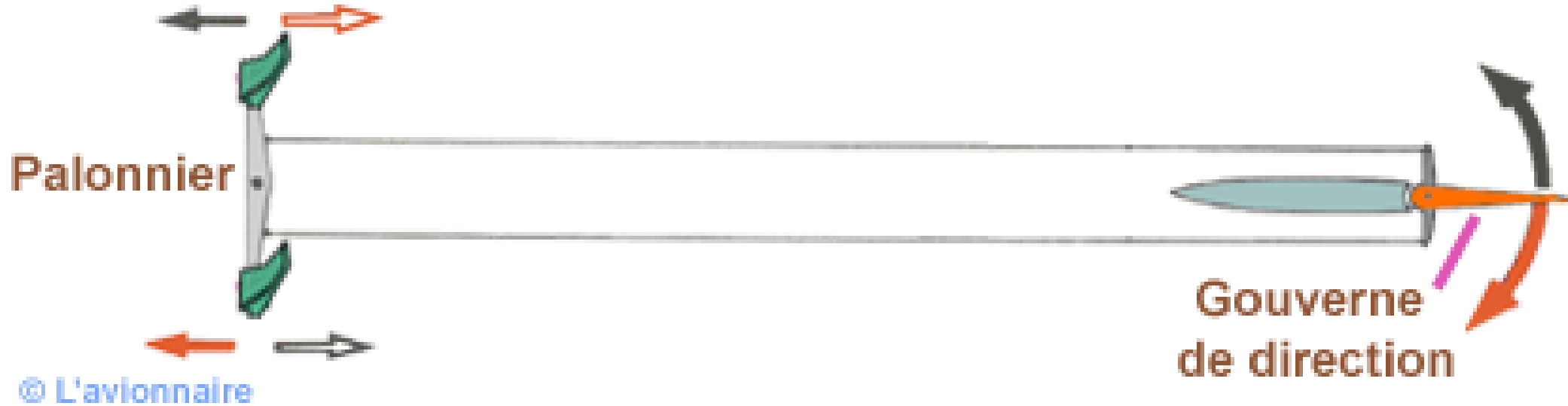
Action sur la profondeur : Si on pousse le manche vers l'avant, la gouverne de profondeur s'abaisse et on crée un moment aérodynamique piqueur. Si on tire le manche vers l'arrière, la gouverne de profondeur se relève et on crée un moment aérodynamique cabreur.



Action sur les ailerons : Lorsque l'on incline le manche vers la gauche, on provoque le relevage de l'aileron gauche, et simultanément l'abaissement de l'aileron droit. On crée alors un moment d'inclinaison à gauche. Lorsque l'on incline le manche vers la droite, on provoque le relevage de l'aileron droit, et l'abaissement de l'aileron gauche. On crée un moment d'inclinaison à droite.

IV. PRESENTATION GENERALE DE L'AVION

IV.6 COMMANDES ET GOUVERNES



Le palonnier

Le palonnier agit sur la gouverne de direction par l'intermédiaire de deux pédales qui sont solidaires et que l'on actionne avec les pieds.

Remarquons que l'on ne tourne pas en avion en air avec la gouverne de direction ; celle-ci, en effet, sert surtout à mettre l'avion en attaque symétrique par rapport à l'écoulement de l'air dans lequel il se déplace et pour le maintenir dans l'axe de piste au moment du décollage et de l'atterrissage.