

LE BIOMIMÉTISME DANS L'AVIATION



En quoi l'Homme s'est-il inspiré de la nature pour améliorer les performances de ses avions et ces améliorations sont-elles vraiment efficaces ?

ANTHONY GOMES

TESSA ALBARIC

RÉMI ROCHE

2017-2018

Lycée Louise Michel Narbonne

Sommaire

- I) Introduction3
- II) Les différentes inspirations de la nature dans l'aviation ...4
 - 1) Les pionniers de l'aviation, adeptes du biomimétisme4
 - 2) Le développement du biomimétisme de nos jours 9
- III) Étude approfondie des winglets 22
 - 1) Leur histoire, un dispositif inspiré de la nature 22
 - 2) Leur principe de fonctionnement25
 - 3) Leur efficacité permet des économies de carburant 32
 - 4) Les différents types de winglets 34
 - 5) Calculs de traînées induites 38
 - 6) Comparaison et analyse des résultats45
- IV) Démonstration de leur efficacité47
 - 1) Test en soufflerie virtuelle de deux ailes. 47
 - 2) Test en soufflerie réelle de deux ailes49
 - 3) Comparaison et analyse des résultats 52
- V) Conclusion 53
- VI) Bibliographie54
- VII) Lexique55
- VIII) Remerciements 57

À l'attention du lecteur : Les mots marqués d'un nombre entre parenthèse en exposant sont définis/expliqués dans le lexique (pages 55-56)

D) Introduction



Le Songe d'Icare, Sergueï Solomko

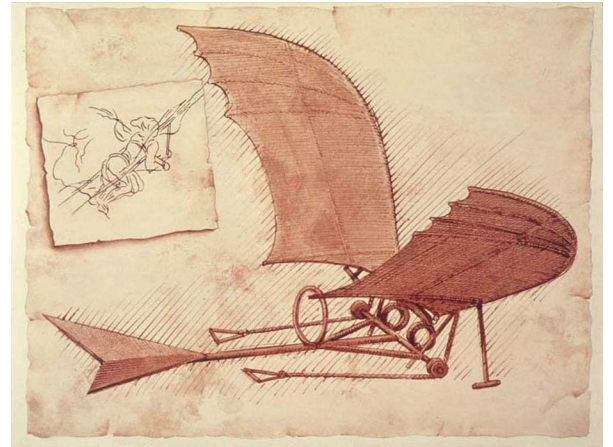
Depuis des siècles, les Hommes rêvent de voler. Avant le XX^{ème} siècle, faire voler un appareil plus lourd que l'air tenait de la fantaisie ou du rêve. Le mythe d'Icare et Dédale décrit le premier « vol » de l'homme : Icare muni d'ailes faites de cire et de plumes et donc semblables à celles d'un oiseau, s'envole, si haut que la cire fond et cause sa perte. Cela serait donc le premier biomimétisme aéronautique de l'Histoire.



Icare et Dédale, Charles Paul Landon, 1799

Mais qu'est ce que le biomimétisme ?

Observons l'étymologie du mot : le préfixe « bio- » qui vient du Grec Ancien « βίος » (*bíos*) exprime l'idée de vie en général donc qu'elle soit animale, végétale ou autre. Il est suivi de « mimétique » qui vient du Grec Ancien « μιμητικός » (*mīmētikós*) qui exprime l'idée d'imitation. Le biomimétisme est, en effet, le fait de s'inspirer de la nature dans des innovations et des inventions afin d'en exploiter les avantages.



Dans ce TPE, nous avons décidé d'aborder le biomimétisme dans l'aviation, nous montrerons comment l'Homme s'est inspiré de la nature pour rendre ses avions plus performants. Nous traiterons de manière plus approfondie d'un dispositif utile appelé winglet. Nous réaliserons alors des expériences, des recherches et des calculs afin de démontrer leur efficacité et de rendre compte des économies qui peuvent être réalisées.

II) Les différentes inspirations de la nature dans l'aviation

1) Les pionniers de l'aviation, adeptes du biomimétisme

Avant que les avions modernes que nous connaissons soient inventés, plusieurs inventeurs ont recherché à imiter la nature pour essayer de voler. Beaucoup perdirent la vie avant de comprendre que construire une machine qui bat des ailes comme les oiseaux était bien trop complexe et peu adapté ou encore que sauter de la tour Eiffel muni d'un costume de vol en tissu était une mauvaise idée.

L'un des premiers hommes à avoir fait des esquisses d'un appareil volant imitant un oiseau fut Léonard de Vinci. Il a pensé une machine qui battrait des ailes appelée «ornithoptère». Ce projet resta au stade du croquis mais certains pionniers du XIX^{ème} siècle ont réellement conçu et essayé des machines de ce genre qui finissaient souvent par se disloquer sans avoir décollé.



Esquisse de Léonard de Vinci, 1488



Franz Reichelt portant le costume avec lequel il voulait voler en sautant de la tour Eiffel en 1912

La voilure ⁽¹⁾ mobile n'étant donc pas la solution qui réalisa le rêve de l'Homme qui était de voler, la voilure fixe s'avéra permettre le vol d'un appareil plus lourd que l'air à la fin du XIX^{ème} siècle. Nous pouvons citer l'ingénieur Allemand Otto Lilienthal qui, en s'inspirant du vol des oiseaux (notamment des cigognes et de la forme de leurs ailes) a réussi le premier vol en planeur en 1891 et en réalisa environ 2000 au cours de sa vie. Son planeur se contrôlait avec les mouvements du corps du pilote, puis la grande innovation de cet aéronef fut la forme arrondie des ailes et leur profil ⁽²⁾. Otto Lilienthal a justement observé ces caractéristiques chez les cigognes. Il a aussi réalisé des recherches scientifiques sur l'origine de la portance et la géométrie de l'aile, toujours en s'inspirant des oiseaux. Il a même rédigé un ouvrage intitulé « *Le vol des oiseaux comme le fondement de l'art du vol* ». Otto Lilienthal est donc bien un pionnier de l'aéronautique et un adepte du biomimétisme.

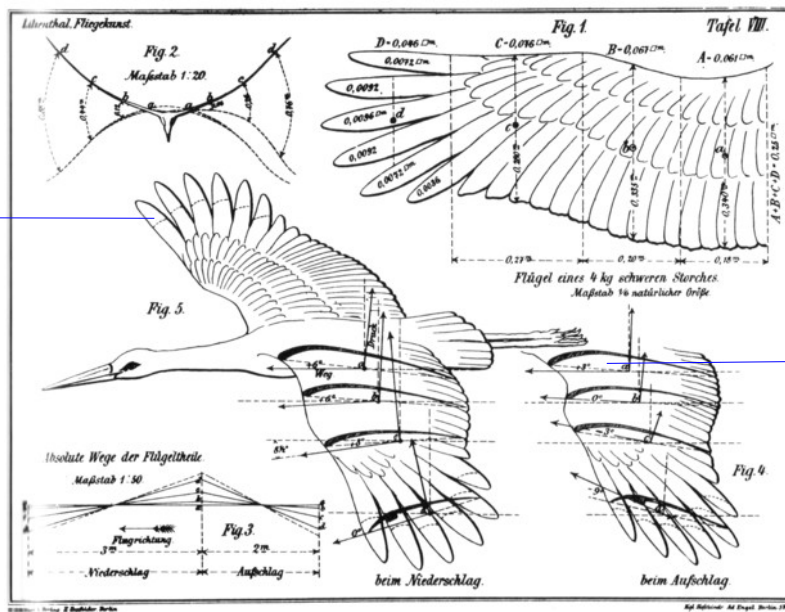


O. L. 1848-1896



Forme de plume en bout d'aile

Otto Lilienthal et son planeur inspiré des cigognes, 1892



Observation et dessin des plumes de la cigogne

Dessin d'un profil d'aile semblable aux profils modernes

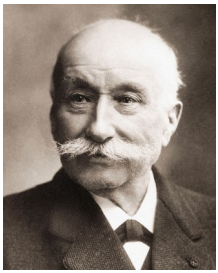
Travaux d'Otto Lilienthal sur les cigognes, 1889
On retrouve une certaine similitude entre l'oiseau et son appareil



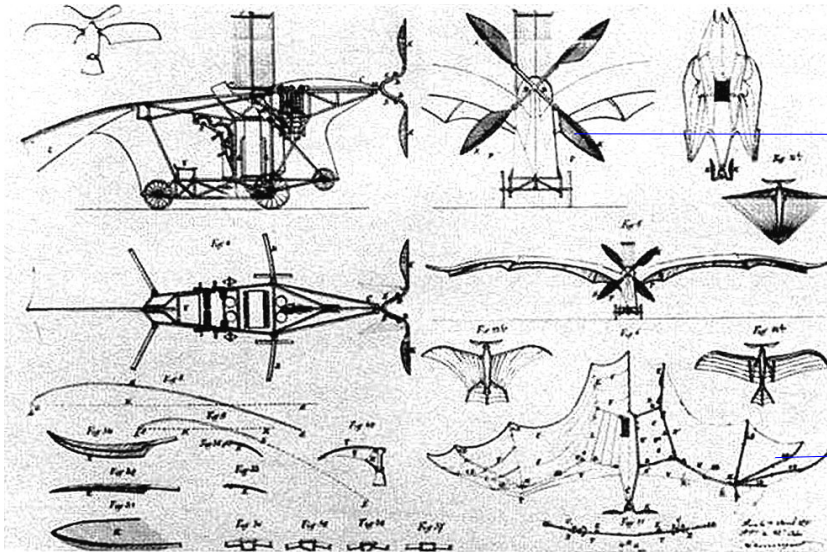
Apparition d'un empennage qui assure la stabilité horizontale

Otto Lilienthal en vol à bord d'une des 16 machines qu'il a construit, 1896 (année de son décès dans un accident lors d'un test de planeur)

Nous ne pouvons pas parler d'histoire du biomimétisme aéronautique sans citer l'ingénieur français Clément Ader et son fameux avion : l'Éole. En effet, cet aéronef propulsé par un moteur à vapeur de 20 chevaux, doit sa forme à la chauve-souris roussette de Bali. Ader s'est procuré des spécimens de plus d'un mètre d'envergure et, après avoir observé leur vol dans une volière qu'il avait installée dans son jardin à Paris, il se lança dans la construction d'un aéronef qu'il baptisa « Avion 1 » ou encore « L'Éole » (c'est lui qui a inventé le mot « avion »). Il réalisa le premier vol motorisé plus ou moins contrôlé le 9 octobre 1890 qui fut en fait un « petit bond » de 50m environ, dû à l'effet de sol (expliqué à la page suivante).



C. Ader 1841-1925



Hélice quadripale en bambou

Aile courbée comme une roussette

Plans de l'Éole tirés du brevet déposé par Clément Ader, 1890



Chauve-souris Roussette ©Edouard Puginier



L'Éole de Clément Ader, 1890

En mettant les photos de la roussette et de l'Éole côte-à-côte, on observe une ressemblance flagrante. Cet avion est bien un exemple de biomimétisme historique : l'Homme s'inspire de la nature depuis ses début dans l'aéronautique pour concevoir ou améliorer ses avions.

➤ Schéma 1 : L'effet de sol

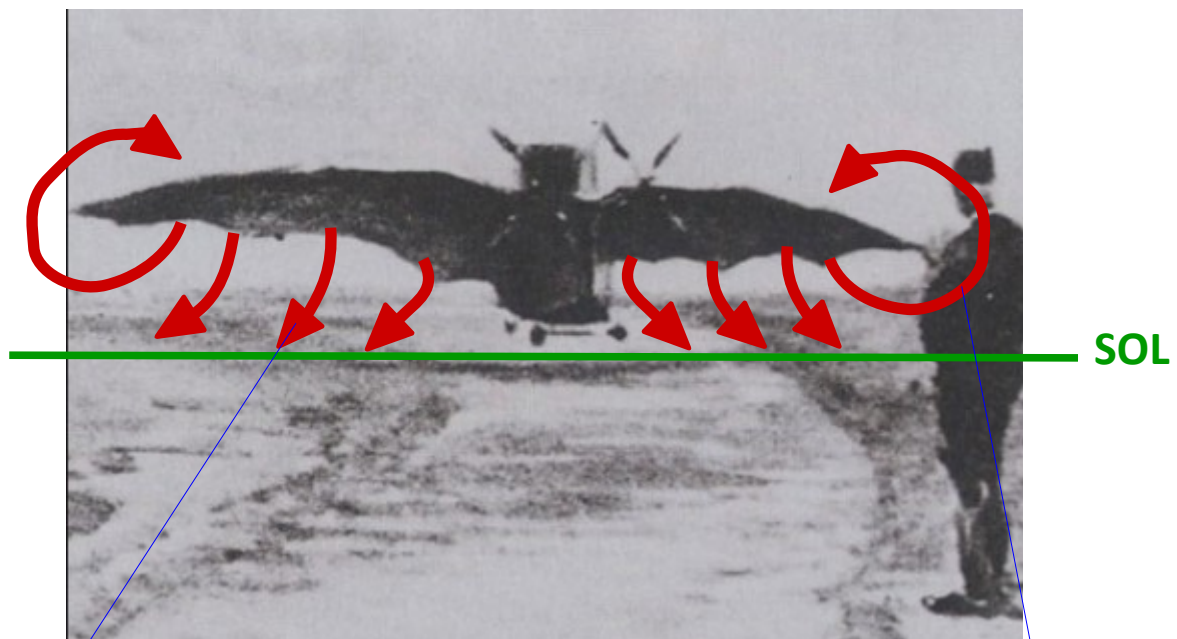
L'effet de sol est dû à un autre phénomène que nous détaillerons plus tard lors de notre TPE (lorsque nous étudierons la traînée induite – page 27).

Le phénomène en question est la création de tourbillons d'air au bout de l'aile appelés « tourbillons marginaux » .

Quand l'avion vole en altitude, les tourbillons sont libres de partir du dessous de l'aile (intrados) pour aller rejoindre le dessus de l'aile (extrados).

Cependant, lorsque l'avion se trouve très proche du sol, les tourbillons viennent buter contre celui-ci, créant alors une sorte de « coussin d'air » sous les ailes qui le maintient à quelques centimètres au dessus du sol.

C'est ce qu'il s'est passé lors du premier vol de l'Éole, il a parcouru une cinquantaine de mètres grâce à l'effet de sol.



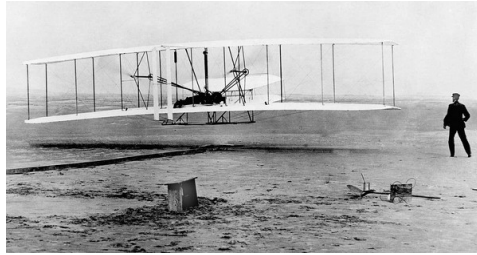
L'Éole « flottant » au dessus du sol grâce à l'effet de sol, 1890

Tourbillon qui essaye de rejoindre l'extrados mais qui voit le sol s'opposer à son passage ; cet air s'engouffre sous l'aile et soutient l'avion en l'air.

Tourbillon du bout d'aile qui va de l'intrados à l'extrados sans contrainte sur son chemin.

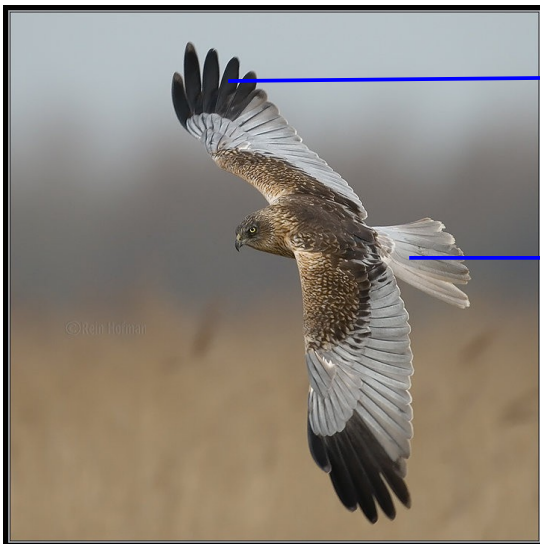


Orville & Wilbur Wright, 1903



The Flyer II, 1903

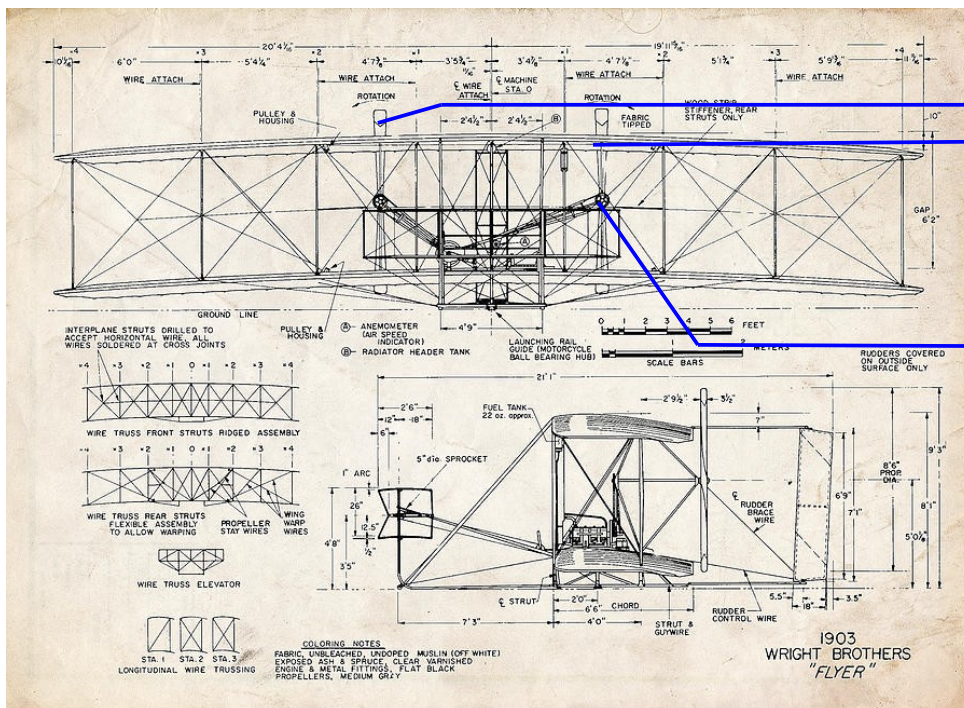
Les frères Wright, parfois considérés comme les inventeurs du premier avion en 1903 avec leur biplan de 15 chevaux : le Flyer II, se sont également inspirés de la nature pour accomplir leur vol. Leur exploit était en fait le premier vol motorisé et contrôlé en avion le 17 Décembre 1903. Ils avaient, en effet, mis au point un système de contrôle de l'avion en roulis ⁽³⁾ s'inspirant du vol des oiseaux : le pilote est couché sur la première aile dans une sorte de «berceau». À l'aide de fines cordes et de poulies reliées aux ailes de l'avion il peut modifier la courbure de la surface portante permettant une mise en virage symétrique (non dérapé). Wilbur Wright, un des deux frères, avait observé que lorsque les busards étaient déstabilisés par une rafale de vent, ils effectuaient une légère torsion du bout de leur aile pour rétablir leur équilibre latéral (revenir à plat).



Busard en virage

Plume incurvée en bout d'aile pour assurer la mise en virage

Stabilité horizontale assurée par la queue de l'oiseau, comparable à l'empennage sur l'avion

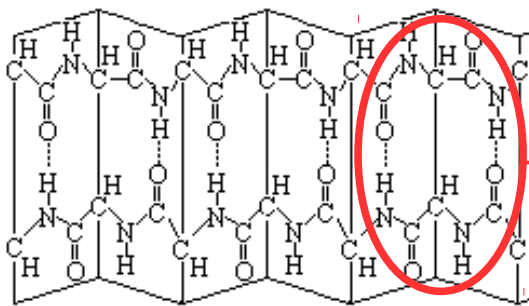


Endroit où l'action du pilote sur la poulie sera répercutée : l'aile se courbe plus ou moins

Poulie qui sera entraînée après l'action mécanique du pilote sur la corde

2) Le développement du biomimétisme de nos jours

Aujourd'hui le biomimétisme est répandu et nous utilisons des objets inspirés ou améliorés grâce à la nature sans même le savoir. Par exemple, le velcro ou encore appelé « scratch » que l'on utilise sur les chaussures ou les manteaux, est bel et bien inspiré de la nature : en 1941, l'ingénieur suisse Georges de Mestral observe des propriétés de fixation inconnues chez une plante appelée la « bardane ». Les fruits de cette plante présentent des petits crochets servant à faciliter la dispersion des graines en s'accrochant à ce qui passe près d'elle et plus particulièrement aux poils d'animaux constitués de kératine. La kératine est molécule organique qui est constituée de sortes d'écailles dans lesquelles les crochets s'enfoncent très facilement.



Une « écaille » dans une molécule de kératine β

molécule de kératine β , structure en « feuillets plissés »



Fruit de bardane



Velcro

Le velcro est un exemple parfait de biomimétisme utilisé tous les jours, mais concentrons nous maintenant sur le biomimétisme dans l'aéronautique.

Comme nous l'avons exposé précédemment, l'homme s'inspire de la nature depuis l'apparition des premiers avions. C'est toujours le cas aujourd'hui : de nombreux dispositifs permettent de réaliser des économies, d'améliorer la sécurité, de rendre le vol plus agréable pour les passagers mais également les riverains avec des diminutions de nuisances sonores.








★ Les dispositifs hypersustentateurs

Lors des phases d'atterrissage et de décollage (donc à faibles vitesses), les avions ont besoin d'avoir une portance maximale afin de se maintenir en l'air, sinon l'avion peut «décrocher», il n'est alors plus soutenu en l'air car sa portance est trop faible.

L'expression de la portance est : $Portance(Rz) = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \times S \times Cz$ (voir détails page 27).

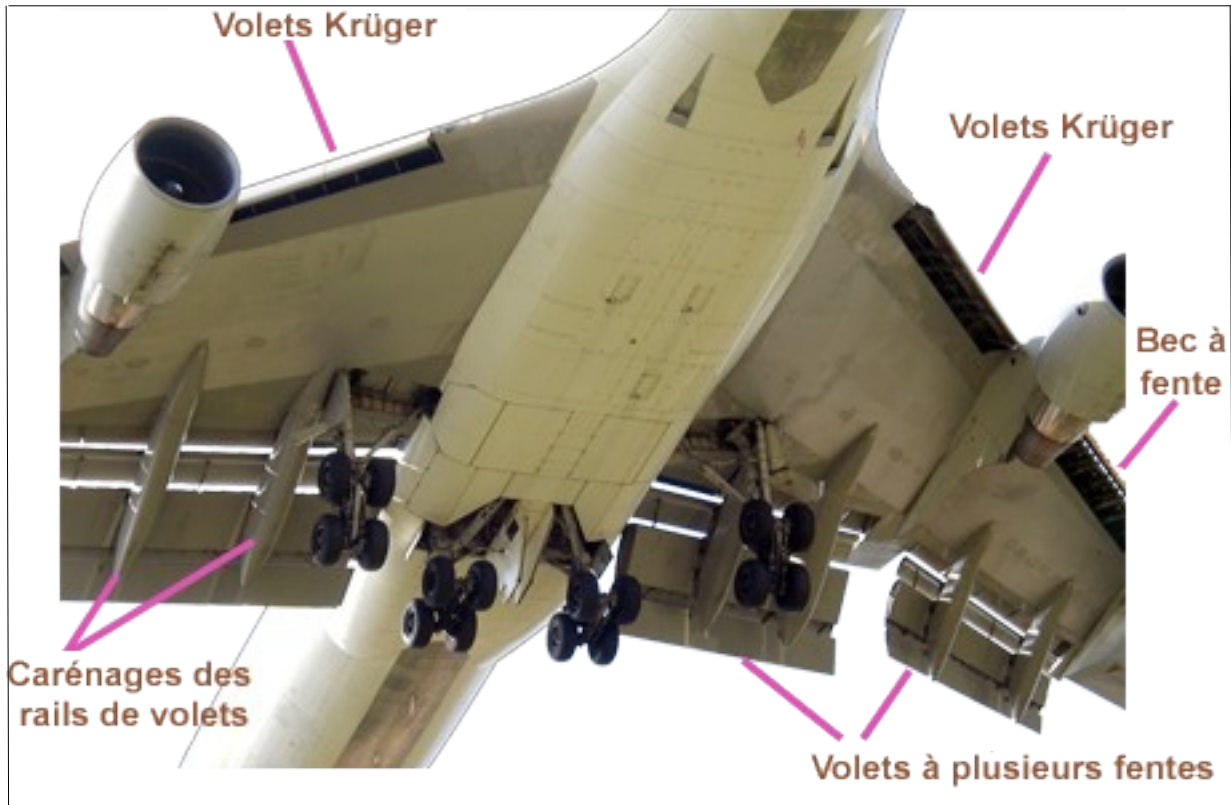
Dans cette formule, les paramètres vitesse (v), masse volumique de l'air (ρ) et coefficient de portance (Cz) sont constants.

L'Homme a observé chez les oiseaux que lorsqu'ils sont en phase d'atterrissage, ils déploient totalement leurs ailes et adoptent une forte incidence (angle entre le flux d'air et l'aile) afin de bénéficier d'une surface la plus grande possible. Nous ne pouvons pas modifier la surface (S) d'une aile me direz-vous ! Et bien si, et telle est la fonction des dispositifs hypersustentateurs. Il en existe plusieurs types que nous décrirons par la suite. La surface alaire est augmentée car les volets sont «escamotés» de l'intérieur de l'aile et augmentent la surface de l'aile ainsi que sa courbure générant alors une portance plus grande.

Désignation	Forme d'Aile	Angle de braquage	Augmentation portance
Profil de base			
Volet de courbure		45°	51%
Volets intrados sans recul		50°	67%
Volet à fente		45°	53%
Volet Fowler surface augmentée de 30%		40°	88%
Bec automatique			26%
Bec et Volet Fowler		Bec - 40° Volet + 40°	93%

Nous notons des fortes augmentations de portance (jusqu'à 93%) grâce à ces dispositifs hypersustentateurs utilisés sur quasiment tous les avions de nos jours, tant dans l'aviation générale que commerciale ou militaire.

Exemples de volets ou becs sur des avions et comparaison avec les oiseaux :



Le Boeing 747, un avion équipé de plusieurs dispositifs hypersustentateurs

Note : Le volet Krüger est un petit volet accroché au bord d'attaque et rabattu sur l'intrados (le dessous de l'aile). En pivotant, tout en restant attaché, il augmente la courbure.



Piper PA28 en phase d'atterrissage (arrondi)



Faucon épaulé rouge en phase d'atterrissage

Nous remarquons que l'oiseau et l'avion présentent des similitudes, c'est une mise en évidence de l'aspect biomimétique des dispositifs hypersustentateurs tels que les volets. L'incidence de l'avion et de l'oiseau est forte, afin de permettre un freinage aérodynamique nécessaire à l'atterrissage.

★ Les aérofreins

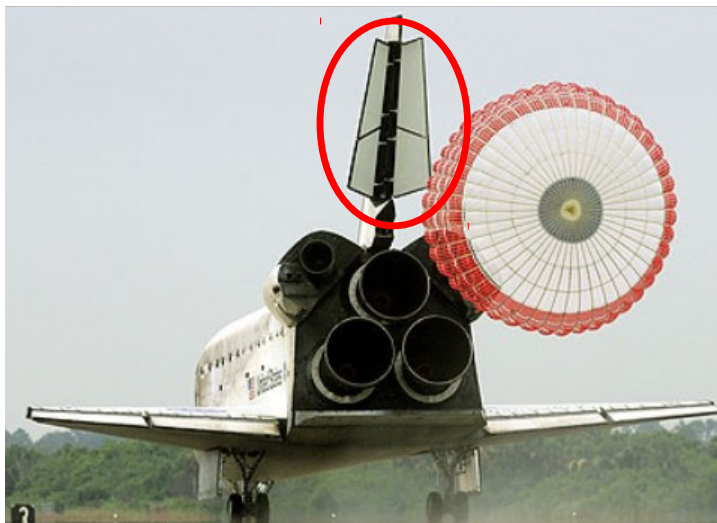
Les aérofreins (appelés aussi spoilers), sont des surfaces mobiles situées la plupart du temps sur les ailes. Quand ils sont déployés, ils modifient l'écoulement de l'air au dessus des ailes, ce qui a pour effet de ralentir cet air « détruisant » alors la portance et créant une forte traînée. Cela plaque l'avion au sol. Ils équipent tous les avions de ligne, de chasse, certains avions plus légers et même la navette spatiale !



Aérofreins sur l'extrados d'un Boeing 737-800



Aérofreins sur le cône de queue d'un BAe 146-300



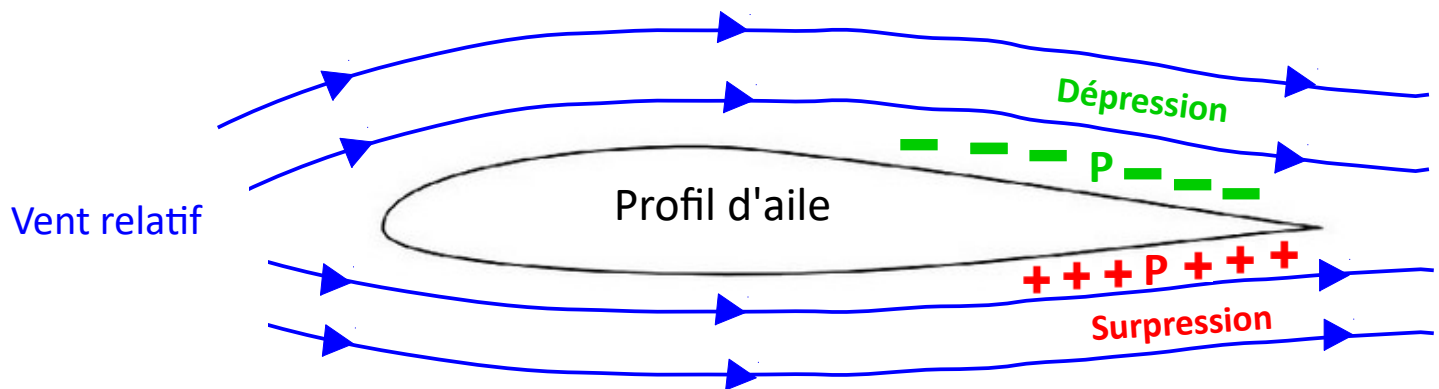
Aérofreins sur le stabilisateur vertical de la navette spatiale



Aérofrein de fuselage sur un Rafale, avion de chasse français

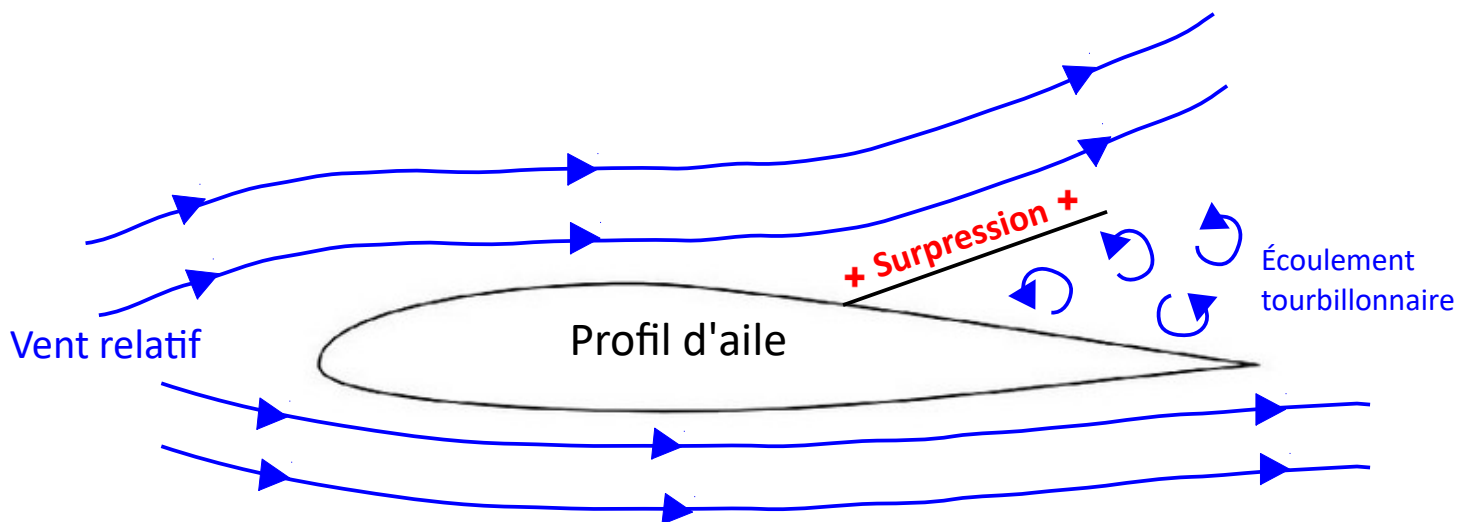
Comme nous le voyons sur ces photos, les aérofreins sont de type différent mais ont tous la même fonction : permettre le freinage d'un aéronef en l'air ou au sol en créant une force qui s'oppose à l'avancement de l'avion (la traînée). En planeur, ils permettent de contrôler le taux de descente et la vitesse en les sortant plus ou moins comme n'y a pas de moteur. Nous montrerons leur principe de fonctionnement sous forme de schéma ainsi que leur aspect biomimétique en page suivante.

➤ Schéma 2.1 : Profil d'aile avec aérofrein d'extrados rétracté



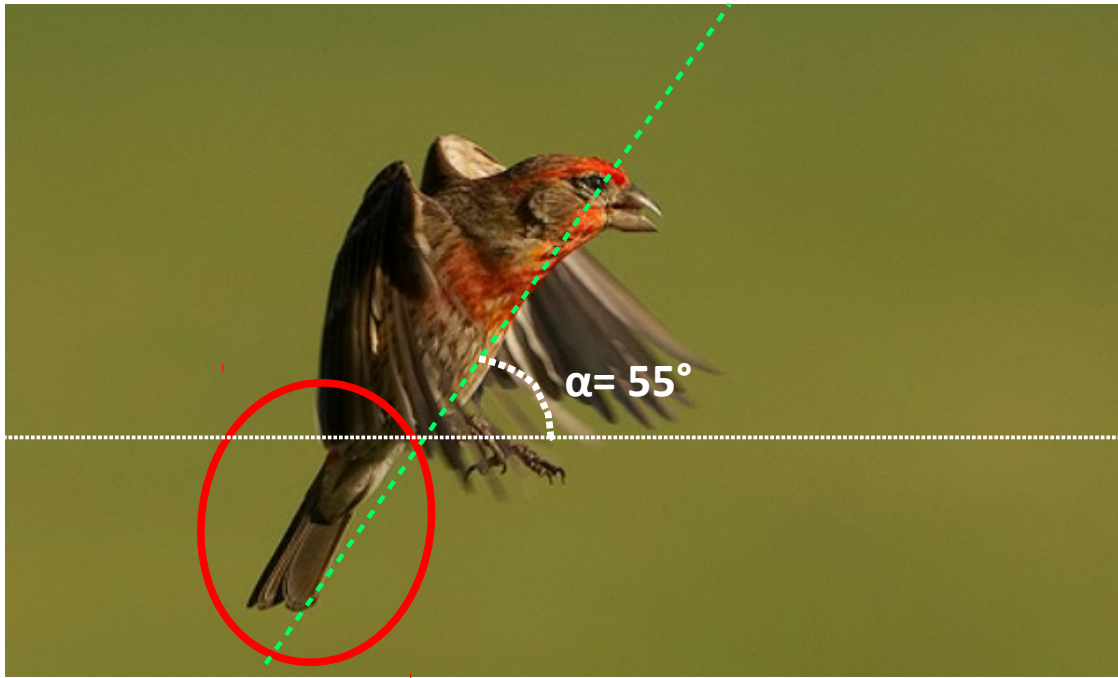
L'air s'écoule sur l'aile de manière laminaire et la forme de son profil engendre une dépression au dessus et une surpression en dessous ; phénomène que nous détaillerons plus dans la partie III-4) de ce TPE.

➤ Schéma 2.2 : Profil d'aile avec aérofrein d'extrados sorti



Le flux d'air du dessus de l'aile est dévié par l'aérofrein. Une surpression s'y crée alors et cela cause une diminution de la portance ainsi qu'une augmentation de traînée. L'écoulement laminaire devient turbulent au niveau du bord de fuite. La modification de ces paramètres par les aérofreins permet de ralentir l'avion ou encore d'ajuster le taux de descente.

Mais en quoi l'aérofrein est-il une innovation inspirée de la nature ?



Roselin familier en phase d'atterrissage ©Charles G Summers Jr

Nous avons vu dans la partie sur les dispositifs hypersustentateurs que les oiseaux déployaient leurs ailes au maximum lors de l'atterrissage afin de disposer d'une surface portante la plus grande possible.

Mais ce n'est pas tout, ils cabrent également de manière assez forte afin d'opposer une résistance à l'air plus grande notamment avec leur corps et les plumes de leur queue : ici l'angle formé entre le corps de l'oiseau de l'air vaut $\alpha = 55^\circ$.

Ceci est leur aérofrein, ils diminuent leur vitesse de cette manière : en augmentant leur traînée. C'est donc de cela que s'est inspiré l'Homme et c'est ainsi que les aérofreins sont apparus sur les avions.

★ Le train d'atterrissage

Sur les avions le train d'atterrissage est étudié pour soutenir une charge très élevée tout en étant le plus léger et le plus aérodynamique possible.

Le train d'atterrissage peut être fixe (comme sur de nombreux avions légers) ou bien rétractable (comme sur la plupart des avions plus lourds). La rétraction du train d'atterrissage permet une diminution considérable de la traînée due aux frottements de l'air et permet donc des économies de carburant importantes. Lorsque le train est fixe, il est souvent caréné⁽⁴⁾ pour augmenter son aérodynamisme.



Train d'atterrissage fixe-caréné sur un Piper PA28



Train d'atterrissage rétractable sur un Boeing 737-800

Le Boeing 737-800 vole plus de 4 fois plus vite que le Piper PA28, à cette vitesse les frottements de l'air seraient si importants ($4^2 = 16$ fois plus) que le train céderait s'il était sorti.

La consommation de carburant en serait fortement affectée, tout comme la vitesse de l'avion qui diminuerait à cause de cette force de traînée.

Sur les avions légers, les vitesses sont plus basses et il n'est pas forcément nécessaire d'installer un système de rétraction du train lourd et coûteux.

Cette idée de rétraction du train d'atterrissage est, encore une fois, inspirée de la nature. En effet, la plupart des oiseaux collent leurs pattes le long de leur corps une fois en vol afin de limiter les frottements puis ils les déploient à nouveau au moment d'atterrir.



Canard en vol, les pattes rétractées le long du corps



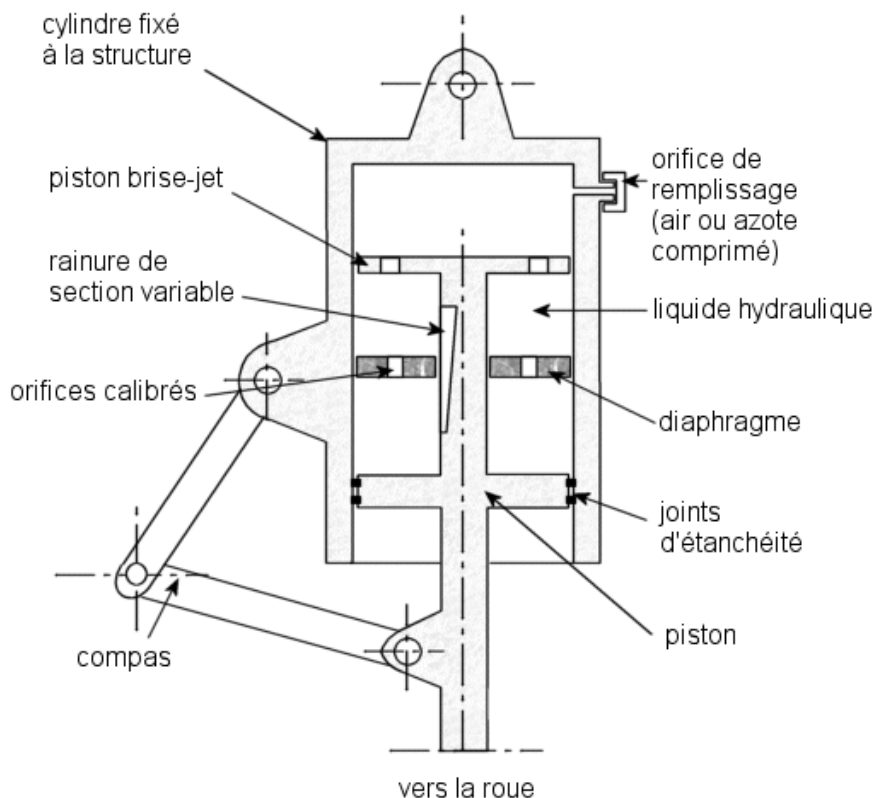
Canard à l'atterrissage, les pattes déployées

★ Le système d'amortissement hydropneumatique

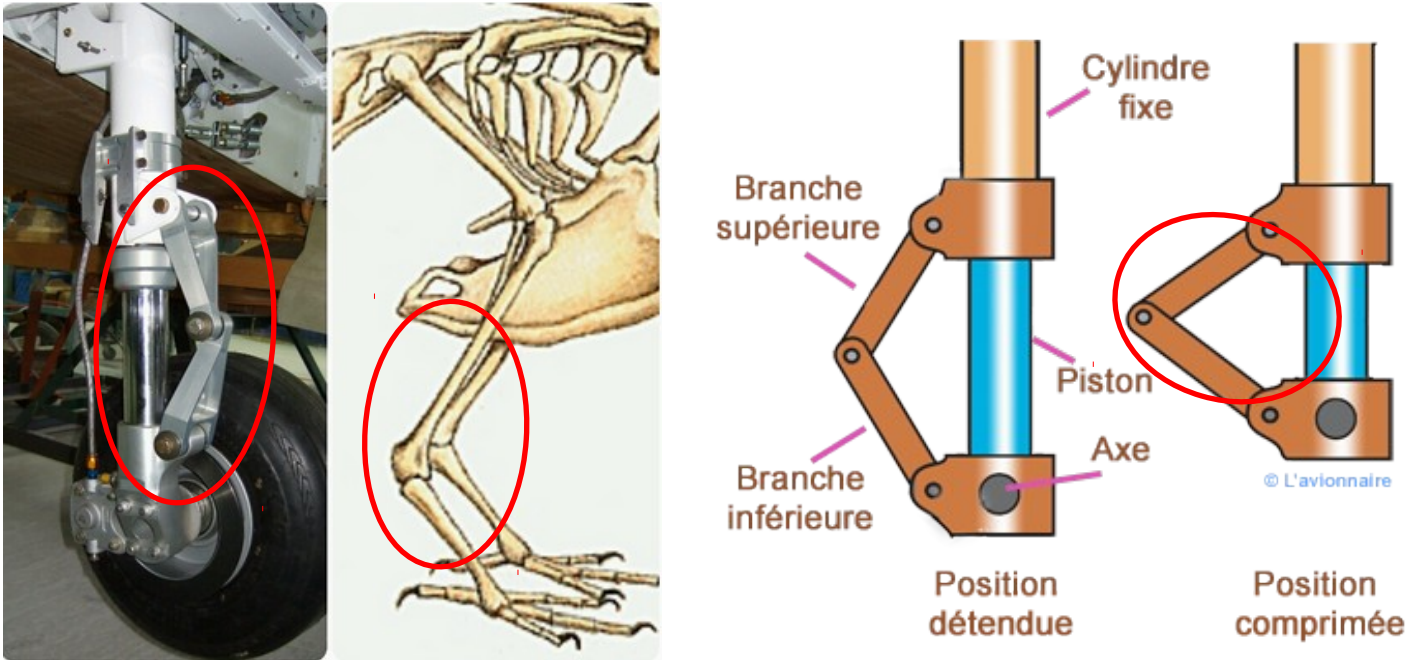
Tous les avions de ligne sont équipés d'amortisseurs de ce type. Ils portent ce nom car ils contiennent un liquide hydraulique (*hydro*) ainsi que du gaz (*pneumatique*), souvent du diazote qui sera plus ou moins comprimé ajustant la position de l'amortisseur. Cela assure un maximum de confort pour les pilotes et les passagers en amortissant les chocs et oscillations lors des évolutions au sol ainsi qu'un minimum d'efforts sur la structure de l'avion.

Le principe de l'amortisseur est simple et sera illustré dans un schéma.

Il s'apparente à un cylindre de moteur à piston ; un piston va comprimer de l'air remontant alors lentement vers le haut lors d'un choc avec le sol. Cela a pour effet de minimiser le choc.



Voici une analogie simple permettant de comprendre le principe de l'amortisseur : si le train d'atterrissage était une jambe, l'amortisseur en serait le genou ; il permettrait d'éviter de la casse lors de chocs. Cette analogie illustre bien cela. Cependant l'Homme ne s'est pas inspiré de lui même mais encore des oiseaux. Ils présentent un système d'amortissement comparable au nôtre et qui inspira une fois de plus les ingénieurs en aéronautique.



Nous observons effectivement des similitudes entre la forme de l'amortisseur et en particulier son « compas » (entouré en rouge) qui permet d'empêcher la rotation du piston autour de l'axe vertical, ne permettant alors qu'une translation et maintenant la roue dans l'axe.

L'amortisseur va, en fait, absorber une énergie dite cinétique engendrée par la vitesse verticale de l'avion lorsqu'il touche le sol (notamment à l'atterrissage) ainsi que sa masse.

L'expression de cette énergie est : $E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$

Pour avoir un ordre d'idée de l'énergie qu'absorbe un amortisseur, calculons celle d'un Boeing 737 (avion moyen courrier) à l'atterrissage.

La masse d'atterrissage dépend de plusieurs facteurs (nombre de passagers, masse de kérosène restante...) mais nous considérerons ici un avion de masse $m=40\ 000$ kg. L'avion touche la piste à environ à 1,5 m/s si l'atterrissage est doux.

$$E_c = \frac{1}{2} \times 40\ 000 \times 1,5^2$$

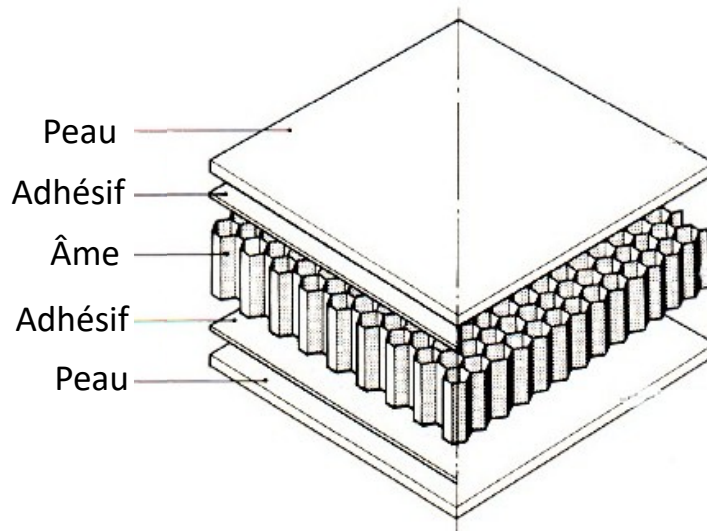
$$E_c = 45\ 000 \text{ Joules}$$

Cela correspond à 45 000 fois l'énergie qu'il faut pour augmenter la température d'un gramme d'air de 1°C.

Cette énergie sera dissipée par le mouvement du piston vers le haut et, grâce aux amortisseurs inspirés des oiseaux, elle ne se propagera pas sur la structure de l'avion. Tant que l'atterrissage n'est pas trop violent, l'avion ne risquera pas d'être endommagé lors du contact avec la piste.

★ La structure en nids d'abeilles

C'est un type de structure dite « sandwich » car elle est composée de deux « peaux » fines, denses et résistantes placées de manière parallèle de chaque côté d'un matériau plié en alvéoles hexagonales. Il y a aussi de l'adhésif pour que la peau adhère aux alvéoles (appelées « âme »). Elle se présente sous cette forme :

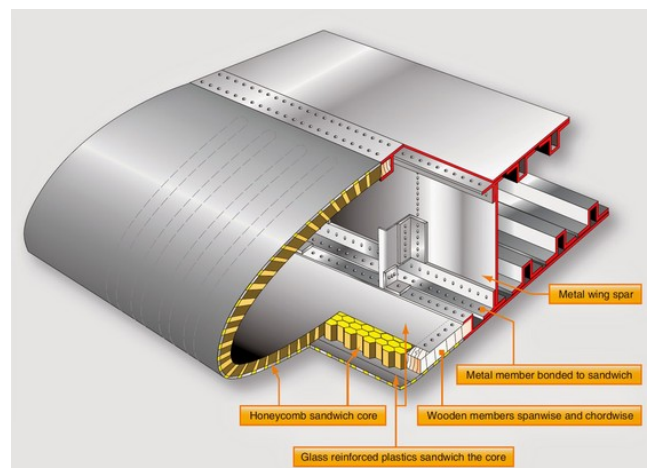
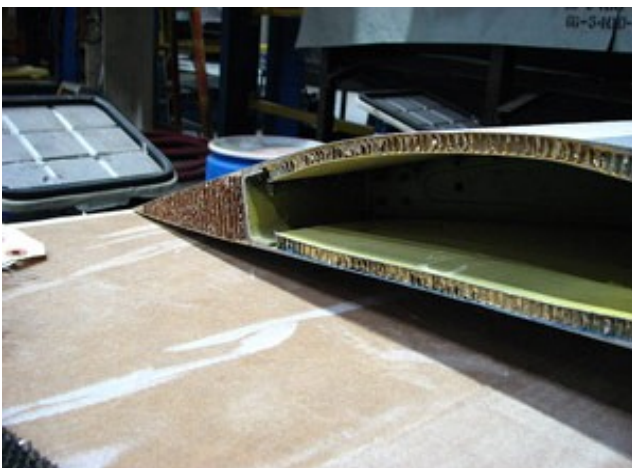


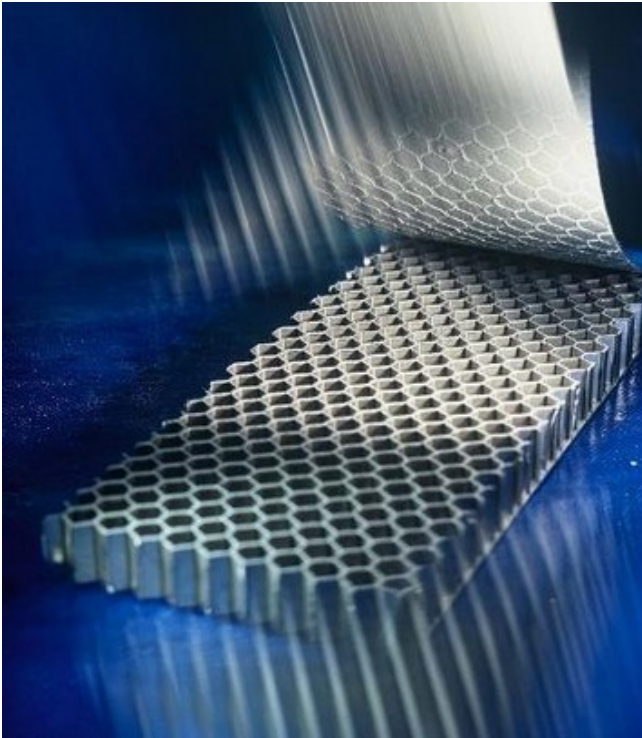
Structure en nids d'abeilles

Cette structure très résistante et présente de nombreux avantages :

- Sa grande légèreté
- Sa grande rigidité en flexion
- Sa grande tolérance aux dommages
- Des propriétés thermiques excellentes

Ce type de structure est utilisé dans les parties soumises à des contraintes pas trop importantes : les aérofreins, les portes du train d'atterrissage, les surfaces de contrôle (ailerons etc.), le radôme, le sol en cabine ou encore des carénages.





Structure en nids d'abeilles



Nid d'abeilles

Comme son nom l'indique, cette structure en nids d'abeilles est inspirée des nids d'abeilles que l'homme a observés et reproduits pour leurs propriétés et notamment leur grande résistance.

C'est bien un exemple de biomimétisme appliqué aux structures des avions.

★ Le turboréacteur

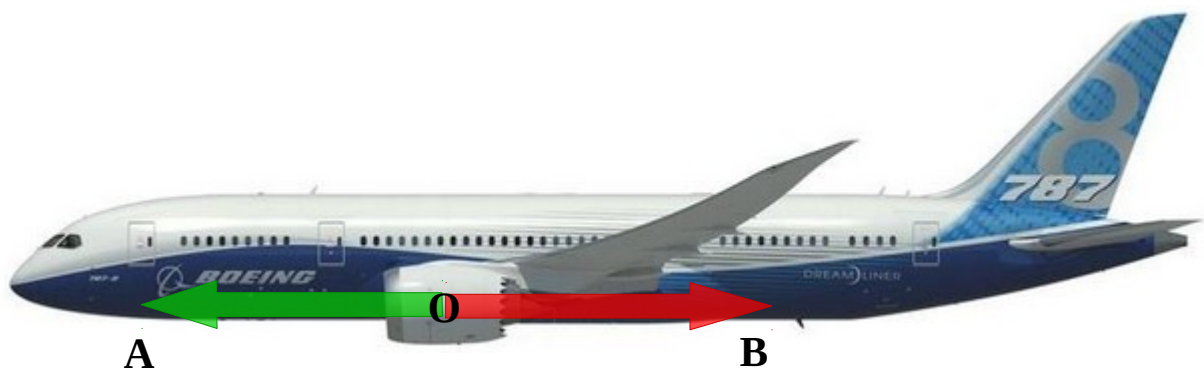
Le turboréacteur est le moyen de propulsion le plus répandu dans l'aviation commerciale ; la plupart des avions de lignes en possèdent au moins deux. Seuls les avions court et moyen courrier sont parfois plutôt munis de turbopropulseurs qui entraînent une hélice pour faire avancer l'avion.

Le turboréacteur utilise l'éjection à haute vitesse de gaz sous haute pression.

Il se base alors sur la troisième loi de Newton des « actions réciproques » plus communément connue sous le nom d'action-réaction : *"Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B."*

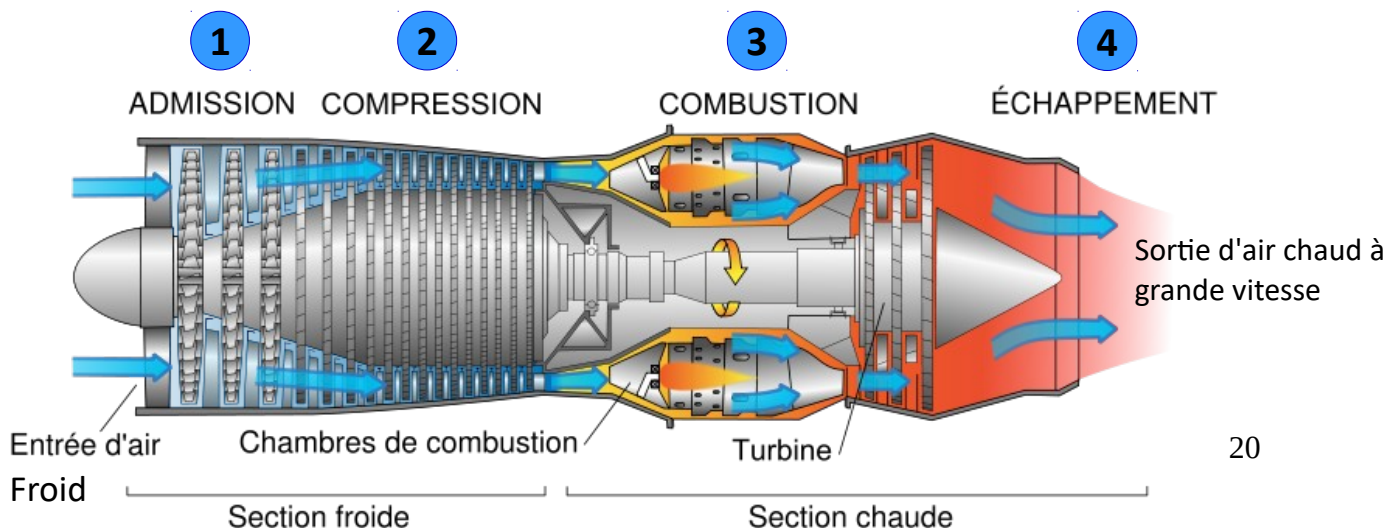
En d'autres mots, l'air éjecté vers l'arrière de l'avion va engendrer une force qui entraînera ce dernier vers l'avant (c'est d'ailleurs pour cela qu'on parle d'avion à réaction). Cette loi peut être illustrée par un schéma clair puis le fonctionnement interne du turboréacteur aussi.

➤ Schéma 3.1 : La loi des actions réciproques



$$\vec{OA} = -\vec{OB} \text{ et } \|\vec{OA}\| = \|\vec{OB}\| \leftarrow \text{(Norme du vecteur=longueur du vecteur)}$$

➤ Schéma 3.2 : Le fonctionnement du turboréacteur



Le turboréacteur est une invention datant de 1910 et c'est bien un exemple de biomimétisme dans l'aéronautique car son fonctionnement a été inspiré des nautilus. Les nautilus sont des céphalopodes marins apparus il y a des centaines de millions d'années, très souvent connus à travers des images de fossiles. Ce sont pourtant des espèces bien vivantes de nos jours et qui nous ont inspiré dans de nombreux domaines, non seulement pour l'aéronautique mais aussi pour les sous-marins !



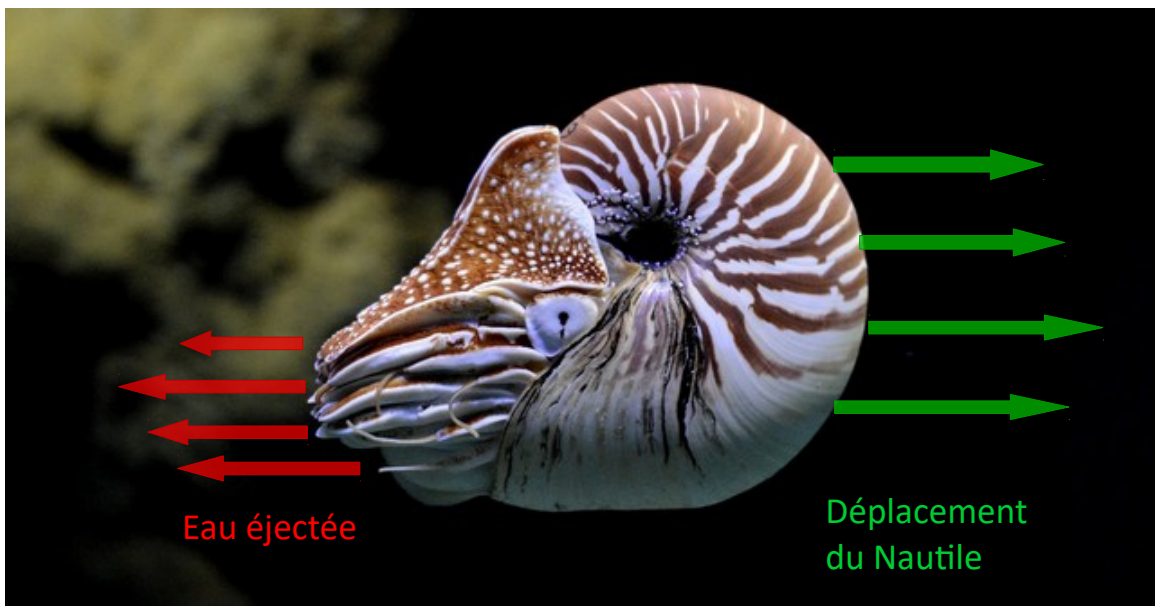
Fossile de nautilus



Turboréacteur Rolls Royce Trent XWB-97

L'Homme a observé chez le nautilus un mode de déplacement inédit, il se déplace en « marche arrière » par réaction, en projetant de l'eau par un entonnoir. Il se base tout autant sur le principe d'action-réaction qu'un turboréacteur, c'est un autre exemple de biomimétisme.

➤ **Schéma 3.3 : Le déplacement du nautilus**



★ Le contrôle actif local de l'écoulement de l'air sur l'A350 XWB

L'Airbus A350 XWB est un des derniers nés du constructeur européen. C'est un avion long courrier à la pointe de la technologie. Il est en effet doté d'un système révolutionnaire inspiré des oiseaux : le contrôle actif local de l'écoulement de l'air sur l'aile. Les oiseaux ont la capacité de modifier l'écoulement de l'air sur leurs ailes. Ce même principe est appliqué sur la voilure de l'A350 XWB à travers l'extension de spoilers (aérofreins) qui assurent le contrôle de la portance lors de la rencontre de rafales de vents. Le déploiement et la rétraction des dispositifs hypersustentateurs (volets, becs) en basse vitesse permettent de contrôler simultanément le freinage (traînée aérodynamique) et l'élévation (portance).

Mais ce n'est pas tout car la technologie de cet avion est encore plus avancée et efficace : chez certains oiseaux de mer, ce dispositif est couplé à une fonction de détection des rafales de vent par le bec de l'animal. De la même façon, des senseurs localisés sur la pointe avant de l'A350 XWB permettent d'anticiper l'activation des surfaces de contrôle.



Système de contrôle actif de l'écoulement de l'air en action sur l'A350 XWB



Système de contrôle actif de l'écoulement de l'air chez un oiseau



C'est ici que se trouvent le radar de détection des rafales et le radar météo, dans le radôme de l'A350 XWB.



Chez les oiseaux de mer comme la mouette ou le goéland, ces dispositifs se trouvent au même niveau : dans leur bec. Ils adaptent leurs ailes aux conditions de vol, c'est de cela que se sont inspirés les ingénieurs d'Airbus pour améliorer leurs avions. Il reste maintenant un exemple de biomimétisme, sûrement le plus répandu et le plus efficace : les winglets ! Nous consacrerons les parties III et IV à ce dispositif.

III) Étude approfondie des winglets

1) Leur histoire, un dispositif inspiré de la nature

Les winglets sont des ailettes orientées vers le haut au bout des ailes de certains avions. Vous avez sûrement déjà pris l'avion, vous êtes assis à côté du hublot et demandé : « mais à quoi peut bien servir ce morceau d'aile recourbé ? ».

C'est ce que vous allez découvrir de manière claire dans cette partie de notre TPE.



Voici à quoi ressemblent des winglet. Avant d'entamer toute étude technique physique ou mathématique du winglet, nous commencerons par expliquer son histoire et montrer en quoi c'est un exemple de biomimétisme.

Avant les années 1970, l'Homme ne souciait que peu d'économiser le carburant qui était à l'époque une matière peu chère et abondante. Néanmoins, lors de la crise pétrolière de 1973 liée à la guerre du Kippour au Moyen-Orient, le prix du baril du pétrole fut multiplié par 12. Il devint alors important d'économiser cette ressource devenue beaucoup plus chère. L'ingénieur Américain Richard Whitcomb, sous contrat avec la NASA, avait remarqué que les grands oiseaux comme les aigles, les cigognes et les buses recourbaient le bout de leurs ailes en vol. Cela devait avoir une utilité bénéfique au vol de l'oiseau et à partir de cette théorie, il exploita le sujet et développa avec son équipe une paire de winglet de 3 mètres de haut pour la version militaire du Boeing 707 : le KC-135.

Le dispositif fut testé en vol en Californie en 1977 : le succès fut fulgurant, le winglet était une révolution dans l'aviation ! Les tests ont démontré une augmentation de 7 % de la finesse augmentant le rayon d'action de l'avion de 200km, une diminution de 20 % de la traînée induite (expliquée en page 27-28) permettant une économie de 3,5% de carburant entraînant une diminution des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) de 6 % ainsi qu'une diminution du bruit de l'avion lors des phases de décollage et d'atterrissage de 6,5 %.



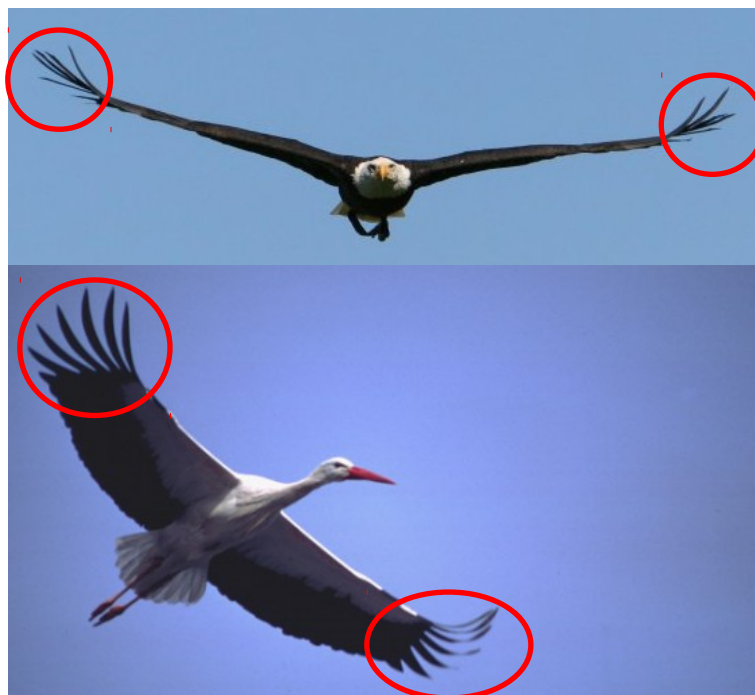
KC-135-winglet de l'armée de l'air Américaine opérant des tests pour la NASA

Avec son nez pointu (qui sert à abriter un radar militaire), ce quadriréacteur KC-135 est le premier avion à être muni de winglets mais il ne sert qu'aux tests en vol. Les premiers avions à en être munis étaient des avions d'affaires comme les Gulfstream puis le premier avion de ligne à avoir des winglets était le gros porteur Boeing 747-400. De nos jours tous les avions de lignes récents en sont équipés.



Gulfstream (au dessus) et Boeing 747-400 (en dessous) tous deux munis de winglets

Le winglet est une innovation incroyablement efficace et nous la devons aux oiseaux, comme nous l'avons indiqué précédemment. Observez ces photos d'oiseaux en vol, ils recourbent également le bout de leurs ailes pour diminuer la traînée induite !



Le winglet est sûrement l'application du biomimétisme la plus importante. Nous allons maintenant étudier le rôle qu'il joue à un niveau aérodynamique.

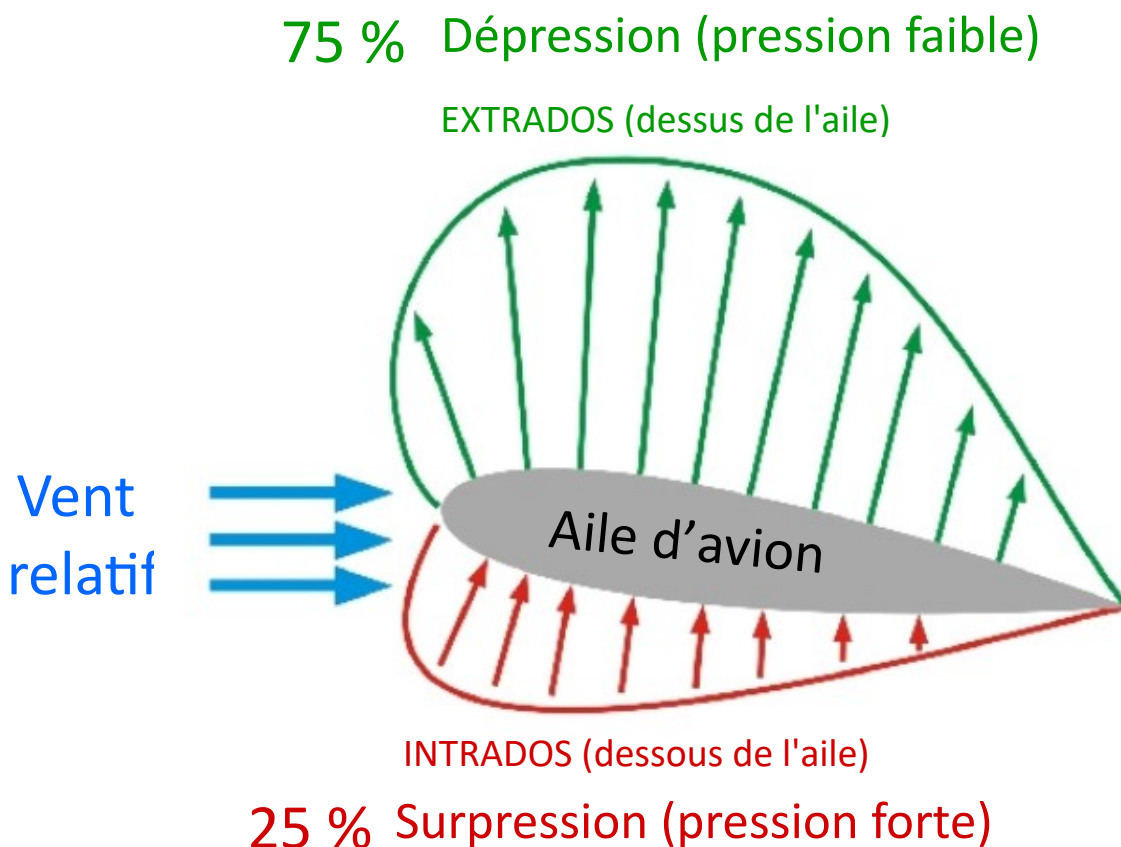
2) Leur principe de fonctionnement

Pour comprendre le principe de fonctionnement du winglet, il est important de comprendre la notion de traînée induite et ses conséquences néfastes que le winglet va réduire.

La traînée induite est une conséquence directe de la répartition de la portance sur l'aile. Elle est due à des tourbillons en bout d'aile qui perturbent la portance.

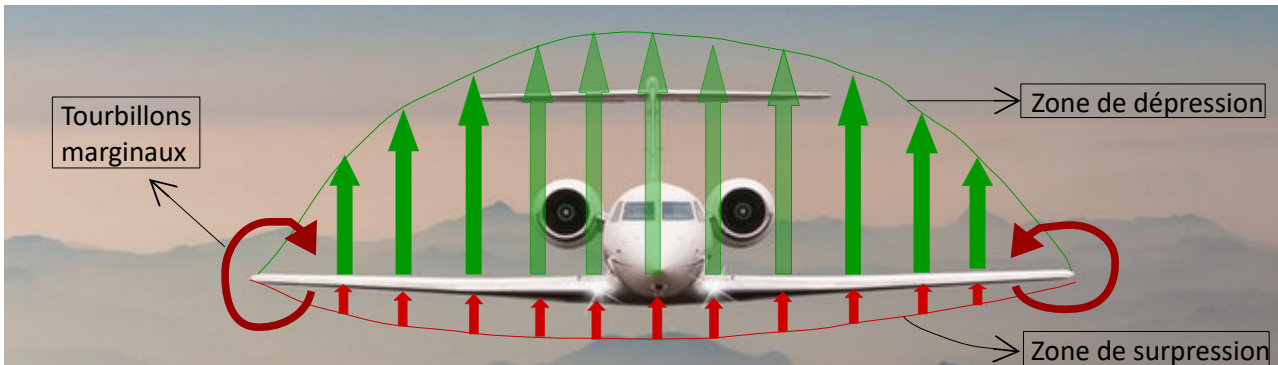
Ces tourbillons apparaissent lorsque l'air sous haute pression se trouvant sous l'aile tend à s'écouler vers le haut de l'aile pour aller rejoindre l'air sous basse pression qui s'y trouve et donc la surpression sous l'aile est moindre à cet endroit et la portance détruite. En effet, la portance est la conséquence de cette surpression à l'intrados et de cette dépression à l'extrados. Illustrons cela par des schémas:

➤ Schéma 4 : LA PORTANCE



L'air qui s'écoule au dessus de l'aile a une plus grande distance à parcourir et arrive au bord de fuite de l'aile en même temps que l'air qui s'écoule en dessous. Cet air a, par conséquent, une vitesse plus grande ; cela cause une dépression au dessus de l'aile et une surpression sous l'aile et crée alors la force de sustentation : la portance.

➤ Schéma 5 : La traînée induite



L'air sous haute pression fuit vers le haut de l'aile, causant un tourbillon appelé tourbillon marginal ou vortex de bout d'aile. Ce phénomène cause une traînée parasite appelée traînée induite et notée R_{xi} .

Cette traînée induite se calcule par la relation :

$$R_{xi} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2 \times \left[\frac{C_z^2}{\pi \times \left(\frac{B^2}{S} \right)} \right]$$

où :

ρ = masse volumique de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

S = Surface alaire (m^2)

v = vitesse par rapport à l'air ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_z = Coefficient de portance de l'aile

B = envergure de l'avion (m)

Les termes entre crochets représentent le Coefficient de traînée induite noté C_{xi} .

$\frac{B^2}{S}$ Représente l'allongement de l'aile noté λ ; sa valeur n'est pas infinie et est comprise entre 6 et 10 pour les avions de ligne, c'est aussi pour cela que R_{xi} existe. On remarque donc que, plus l'allongement de l'aile est grand, plus la traînée induite est faible.

Mathématiquement on a :

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} (R_{xi}) = 0^+$$

➤ Visualisation de la traînée induite

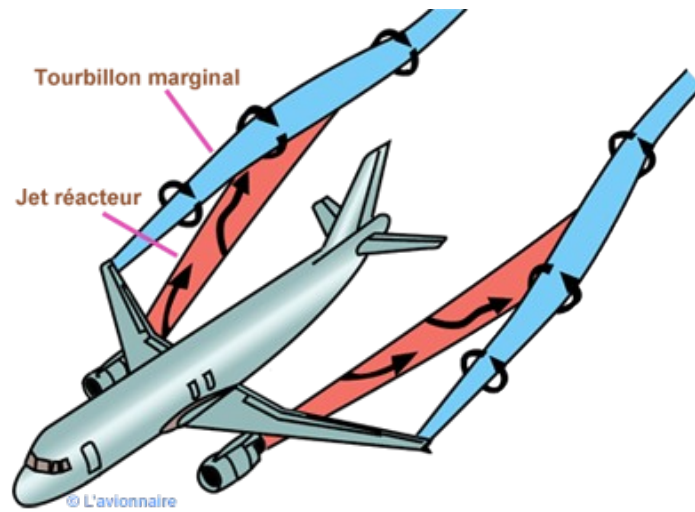


Les tourbillons marginaux sont un des facteurs à l'origine des turbulences de sillage qui peuvent être dangereuses pour les autres avions. Lorsqu'un avion lourd décolle ou atterrit, il doit être espacé d'une certaine distance avec les autres avions.

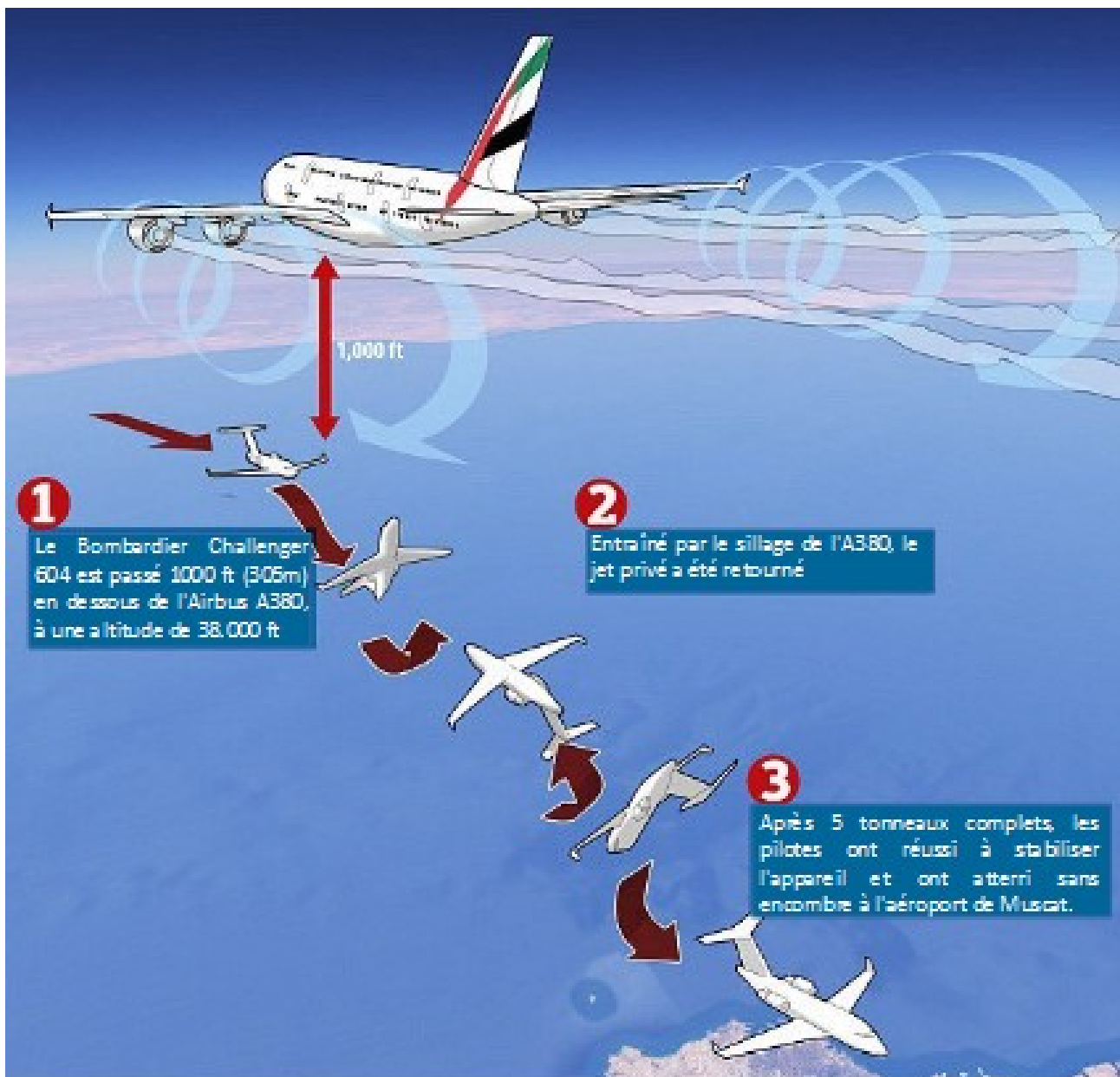
1 Nm = 1,852 km

Générateur	Récepteur			
	Avions légers	Moyens tonnages	Gros porteurs	Super A380
Avions légers	3 Nm	3 Nm	3 Nm	3 Nm
Moyens tonnages	5 Nm	3 Nm	3 Nm	3 Nm
Gros porteurs	6 Nm	5 Nm	4 Nm	4 Nm
Super	/	8 Nm	6 Nm	4 Nm

Tableau des distances de séparations entre les avions selon leur « tonnage »



La génération des turbulences de sillage



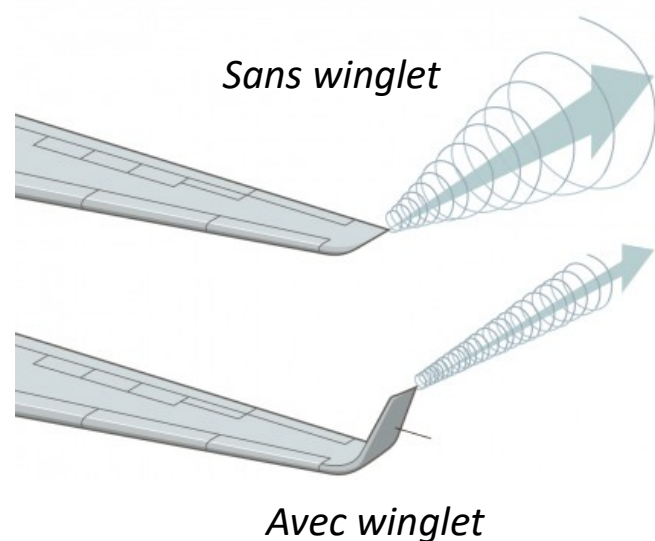
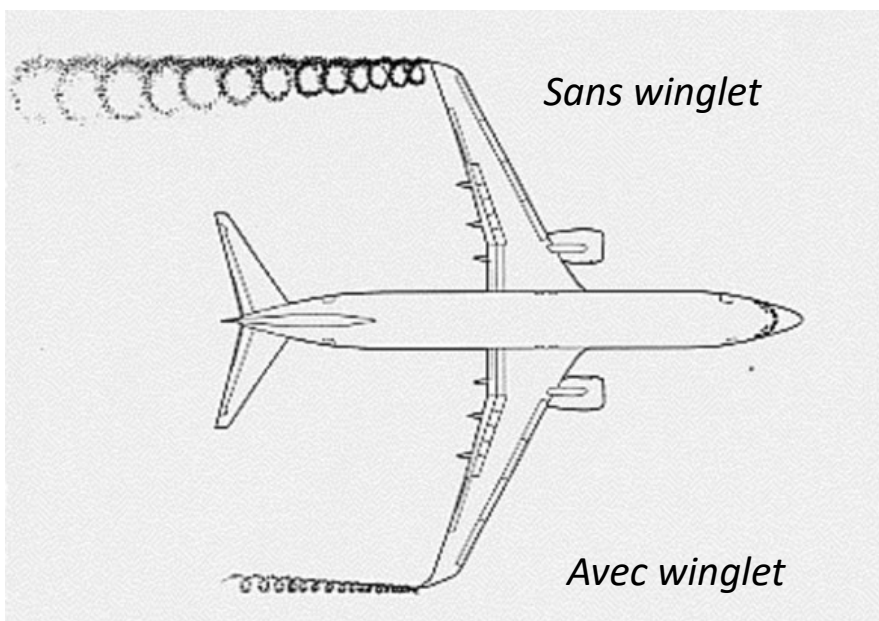
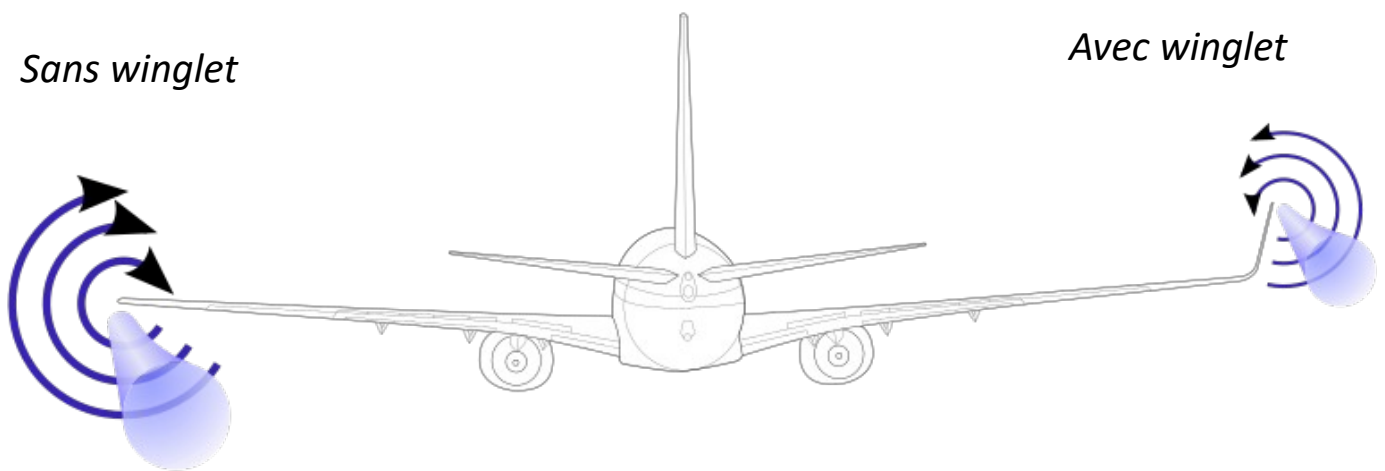
Comme le montre cet incident survenu le 07 Janvier 2017 au Sud de Oman, les turbulences de sillages peuvent être un phénomène dangereux car les tourbillons ont une vitesse tangentielle très élevée (18 m/s en moyenne).

Le winglet augmente ce qu'on appelle « l'allongement effectif » (valeur utilisée pour le calcul de traînée induite) mais n'augmente pas l'envergure de l'appareil, cela permet de réduire la traînée induite de manière efficace.

Il atténue en fait la fuite de l'air sous pression de l'intrados vers l'extrados, atténuant alors les tourbillons de bout d'aile à l'origine de la traînée induite.

L'énergie du tourbillon est récupérée par le winglet et atténuée. Il peut aussi redresser le flux d'air qu'il reçoit du bas de l'aile pour en faire une force de portance légèrement dirigée vers l'avant. Son fonctionnement peut être illustré par des schémas pour être clarifié et mieux visualisé.

➤ **Schéma 6 : Le fonctionnement du winglet**



Lorsqu'il y a un winglet, les tourbillons marginaux sont nettement réduits. La traînée induite de l'aile le sera aussi, tout comme la consommation de carburant.

3) Leur efficacité permet des économies de carburant

Les winglets les plus efficaces actuellement en services sont ceux de l'Airbus A350 XWB dont nous avons parlé dans la partie II-2).

Pour rendre compte des économies réalisées, nous allons comparer la consommation de carburant d'un Airbus A350 XWB et celle d'un Boeing 777 (avion de taille comparable qui n'a pas de winglet) sur le trajet Paris – São-Paulo.



Commençons par le Boeing 777 (qui n'a pas de winglet) :

Sa vitesse de croisière est de 900 km/h.

La distance à parcourir est de 9471 km.

Le temps de vol sera donc de $\frac{9471}{900} \approx 10,5 \text{ h}$

La consommation horaire des deux moteurs est de 15 400 L, la consommation totale pour le trajet est donc de $10,5 \times 15\,400 = 161\,700 \text{ L}$.

Comme l'avion peut contenir 440 passagers, la consommation par passager est de :

$$\frac{161700}{440} = 367,5 \text{ L/passager}$$

Comme le prix d'un litre de kérosène est de 1€ environ, le coût en kérosène par passager lors de ce vol est de 367,5 €/passager.

Ensuite pour l'Airbus A350 (qui a des winglets) :

Sa vitesse de croisière est de 950 km/h

La distance à parcourir est de 9471 km.

Le temps de vol sera donc de $\frac{9471}{950} \approx 10 \text{ h}$

La consommation horaire des deux moteurs est de 7500 L, la consommation totale pour le trajet est donc de $10 \times 7500 = 75\,000 \text{ L}$.

Comme l'avion peut contenir 400 passagers, la consommation par passager est de :

$$\frac{75000}{400} = 187,5 \text{ L/passager}$$

Comme le prix d'un litre de kérosène est de 1€ environ, le coût en kérosène par passager lors de ce vol est de 187,5 €/passager.

Comparons alors ces résultats :

L'écart relatif entre les consommations par passager ou encore le prix en euros par passager est :

$$E_r = \frac{\text{conso 777} - \text{conso 350}}{\text{conso 777}}$$
$$= \frac{367,5 - 187,5}{367,5}$$
$$E_r \approx 0,49 = 49\%$$

Donc, le coût par passager pour ce vol sur un A350 XWB est plus faible de 49 % que sur un B777. Cela permet aux compagnies de proposer des billets moins chers, de consommer moins de kérosène et donc de moins polluer. Cette différence n'est pas exclusivement due aux winglets, bien qu'ils y contribuent, mais en majeure partie aux réacteurs de l'A350 qui sont sûrement les plus efficaces construits pour l'instant.



Winglet tridimensionnel de l'A350



Réacteur de l'A350 «le plus avancé des réacteurs civils»

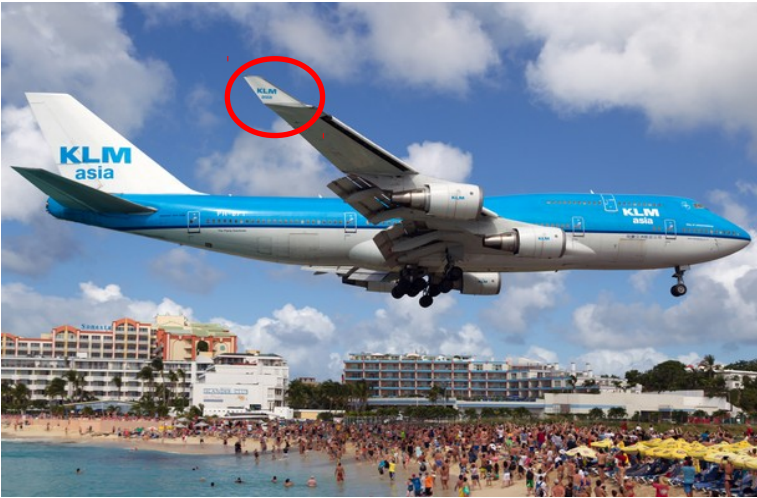
Le winglet de l'A350 a une contribution de l'ordre de 6 % sur la baisse de la consommation de carburant, cela en fait le plus efficace jamais construit.

D'après des recherches de la NASA datant de l'été 2017, le concept du winglet qu'ils ont développé a permis d'économiser 15 milliards de litres de carburant depuis leur première apparition en 1977, soit 375 millions de litres par an ou encore une économie totale de plus de 15 milliards d'euros et de 43 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂).

Le winglet de l'A350 XWB est le plus efficace. Cela signifie qu'il existe d'autres types de winglets. Nous allons les décrire dans la partie suivante.

4) Les différents types de winglets

★ Les winglets classiques



Ces winglets sont les premiers à avoir été conçus et développés par Boeing et appliqués à ses Boeing 747 notamment.

Ils ont la forme d'un trapèze et sont dirigés vers le haut, ils permettent des économies de 3,5 % de carburant : moins que d'autres types de winglet mais, apparus en 1977, ils étaient encore améliorables.

★ Les winglets courbes (blended)



Ces winglets sont ceux qui équipent la plupart des avions de lignes de nos jours, ils sont courbés vers le haut et leur taille est d'environ 3m.

Ils permettent une réduction de la consommation de carburant de 4 % environ.

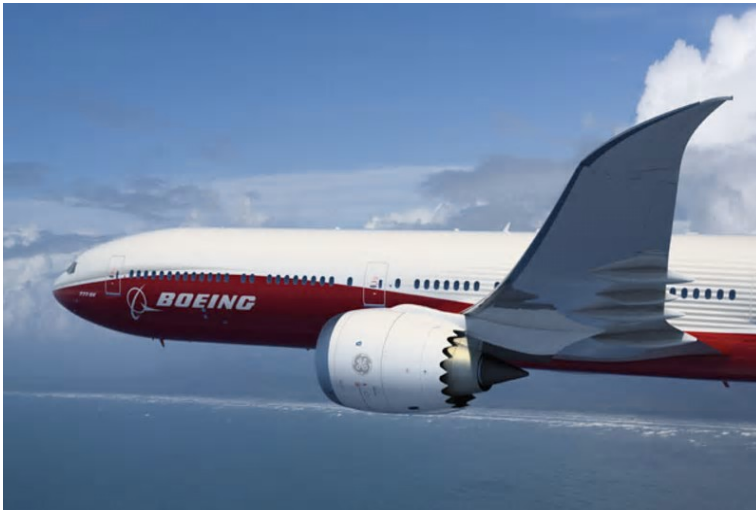
L'avion sur la photo est un Boeing 767 de la compagnie « Austrian »

★ Les winglets « wing fence »



Cet type de winglet est beaucoup utilisé par Airbus et notamment sur le célèbre A380 (qui a d'ailleurs une envergure qui répond aux normes internationales aéroportuaires grâce aux winglets). C'est une ailette assez petite qui permet de réduire les tourbillons au dessus et au dessous du bout de l'aile.

★ Les « raked » winglets



Ces winglets sont inédits car, pas vraiment recourbés vers le haut, mais plutôt vers l'arrière. Ils fonctionnent tout aussi bien et permettent des économies de l'ordre de 5%. Boeing fut le premier à les utiliser, sur le Boeing 767-400 notamment ou encore plus récemment sur le Boeing 777X (voir photo). Sur cet avion les winglets peuvent être mis à l'horizontale pour réduire l'envergure pour les déplacements au sol.

★ Les sharklets



Les sharklets sont un type de winglets courbes installés sur certains Airbus, notamment certains modèles de la famille A320.

Ils ont la même fonction que tous les autres winglets et réduisent eux aussi d'environ 4% la consommation de carburant.

Leur nom signifie « aileron de requin » car ils sont inspirés du requin.

★ Les winglets « Split-Tip »



Ces winglets allient les bénéfices des winglets de type « raked » et « fence ». Les économies sont pour l'instant estimées de 10 à 12% pour le Boeing 737 MAX un tout nouvel avion qui est équipé de ce type de winglets.

★ Les winglets en grille



Ce type de winglets est beaucoup moins utilisé que les autres, notamment à cause de sa résistance trop faible pour les hautes vitesses.

Ici installés sur un motoplaneur ⁽⁵⁾ ils permettent une augmentation de la finesse et donc de la capacité à planer de cet aéronef. Ce sont, par contre, ceux qui ressemblent le plus aux plumes des oiseaux tout comme les winglets plumés (voir p. 35)

★ Les winglets Hoerner ou Lippisch



Ces winglets ont été conçus par l'ingénieur allemand Alexandre Lippisch. Ils ont initialement été installés sur l'avion de combat à réaction allemand : le Heinkel He 162 (ci-contre), afin de contrer un effet appelé le roulis hollandais ⁽⁶⁾ . Ils sont orientés vers le bas et permettent eux-aussi une notable diminution des tourbillons de bout d'aile ; phénomène étudié par Dr. Sighard F. Hoerner qui donna alors son nom à ce type de winglets.

★ Les winglets spiroïdes



Les winglets spiroïdes ont une forme inédite et ont été installés sur un jet privé Dassault Falcon 50 dans les années 1990 pour effectuer des tests sur ce type de winglet. Les tests ont démontré une réduction de 11 % de la traînée induite par ce dispositif mais sa complexité de manufacture et son arrivée tardive dans l'aviation ont fait qu'ils ne s'est pas plus répandu.

★ Les winglets « plumés »



Ces winglets sont une évidence de l'inspiration de l'homme par la nature, ils s'apparentent totalement au bout de l'aile d'un oiseau en vol. Ils sont peu, voire pas du tout utilisés car beaucoup moins efficaces et résistants que les autres types de winglets. Ils sont tout-de-même ceux qui se rapprochent le plus de la nature.

★ Les winglets à turbine

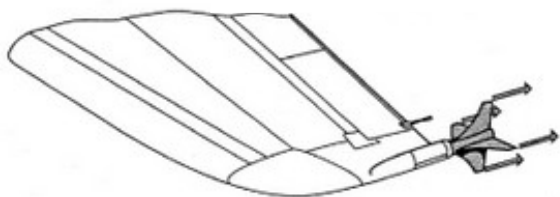


Ce type de winglet a été étudié et testé par la NASA. Ils réduisent effectivement la traînée induite en réutilisant l'énergie du tourbillon (turbine rotative) ou bien en agissant seulement comme une ailette (turbine fixe).

La rotation de la turbine peut éventuellement produire de l'énergie pour les systèmes électriques ou hydrauliques de l'avion.

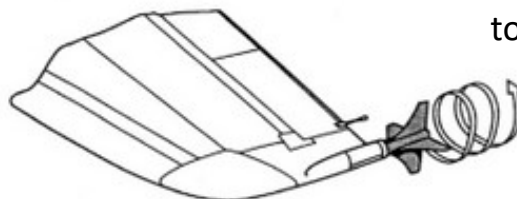
Turbine fixe

Réduction de la traînée induite



Turbine rotative

Réutilisation de l'énergie du tourbillon



5) Calculs de traînée induite

A) Calculs pour le Boeing 737-100 (avion sans winglet)



Le Boeing 737-100, première version du Boeing 737 construite en 1967.

Cet avion n'a pas de winglet et nous allons comparer ses performances en termes de traînée induite avec un avion plus récent le Boeing 737-900 qui a un winglet.

Nous devons d'abord trouver quelques résultats préalables : la masse volumique de l'air en altitude ainsi que le coefficient de portance de l'aile.

■ Calcul de la masse volumique de l'air à 10 000 mètres d'altitude

Considérons l'air comme un gaz parfait, calculons sa masse volumique en fonction de l'altitude : $\rho(z)$

La loi des gaz parfaits indique que la pression P , le volume V , la température T et la quantité de matière n sont liés par la relation :

$$\boxed{P \times V = n \times R \times T} \quad \text{Où } R \text{ désigne la « constante des gaz parfaits »}$$

$$R \approx 8,315 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{D'où } V = \frac{n \times R \times T}{P}$$

De plus, la masse volumique de l'air notée ρ s'exprime par le quotient de la masse et du volume d'air. On a donc :

$$\rho = \frac{m}{V} \Leftrightarrow \rho = \frac{m}{\left(\frac{n \times R \times T}{P} \right)}$$

$$\Leftrightarrow \rho = \frac{m \times P}{n \times R \times T}$$

$$\Leftrightarrow \rho = \frac{M}{R} \frac{P}{T} \quad \text{où } M \text{ désigne la masse molaire de l'air}$$

Exprimons alors la masse volumique en fonction de l'altitude : $\rho(z)$ en exprimant la pression et la température en fonction de l'altitude : $T(z)$ et $P(z)$.

On considérera comme admises les formules du nivellement de la pression et de la température qui ne sont pas démontrables en classe de première.

On a donc, pour la pression :

$$P(z) = P_0 \times \left(1 - \frac{a}{T_0} \times z \right)^{\frac{M \times g}{R \times a}}$$

Avec : $P_0 = 101325 \text{ Pa}$ la pression standard au niveau de la mer

$T_0 = 288,15 \text{ K}$ la température standard au niveau de la mer (15°C)

$a = 6,5 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ le gradient de température vertical

$R \approx 8,315 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la constante des gaz parfaits

$g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ l'accélération de la pesanteur standard

z l'altitude (variable)

$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ la masse molaire de l'air



L'air est constitué de 78 % de diazote N_2 , de 21 % de dioxygène O_2 et de moins d'1 % de gaz rares que nous négligerons pour le calcul de la masse molaire.

$$M(\text{air}) = 0,78 \cdot 2 \cdot M(\text{N}) + 0,21 \cdot 2 \cdot M(\text{O})$$

$$M(\text{air}) = 0,78 \cdot 2 \cdot 14 + 0,21 \cdot 2 \cdot 16$$

$$M(\text{air}) \approx 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Puis, de même pour la température :

$$T(z) = T_0 - a \times z$$

Nous pouvons donc maintenant exprimer $\rho(z)$:

$$\rho(z) = \frac{M}{R} \frac{P(z)}{T(z)}$$

$$\rho(z) = \frac{M}{R} \cdot \frac{P_0}{T_0 - a \times z} \cdot \left(1 - \frac{a}{T_0} \cdot z \right)^{\frac{M \cdot g}{R \cdot a}}$$

Injection des valeurs connues dans l'équation précédente :

$$\rho(z) = \frac{29}{8,315} \times \frac{101325}{288,15 - 6,5 \cdot 10^{-3} \times z} \times \left(1 - \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{288,15} \cdot z \right)^{\frac{29 \times 9,807}{8,315 \times 6,5 \cdot 10^{-3}}}$$

$$\Leftrightarrow \rho(z) \approx 353 \times \frac{(1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \times z)^{5,255}}{288,15 - 6,5 \cdot 10^{-3} \times z}$$

Nous possédons donc l'expression de la masse volumique en fonction de l'altitude. Remplaçons z par la valeur que nous recherchons : 10 000m.

Application numérique :

$$\rho(10000) = 353 \times \frac{(1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \times 10000)^{5,255}}{288,15 - 6,5 \cdot 10^{-3} \times 10000}$$

$$\Leftrightarrow \rho(10000) \approx 0,412 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

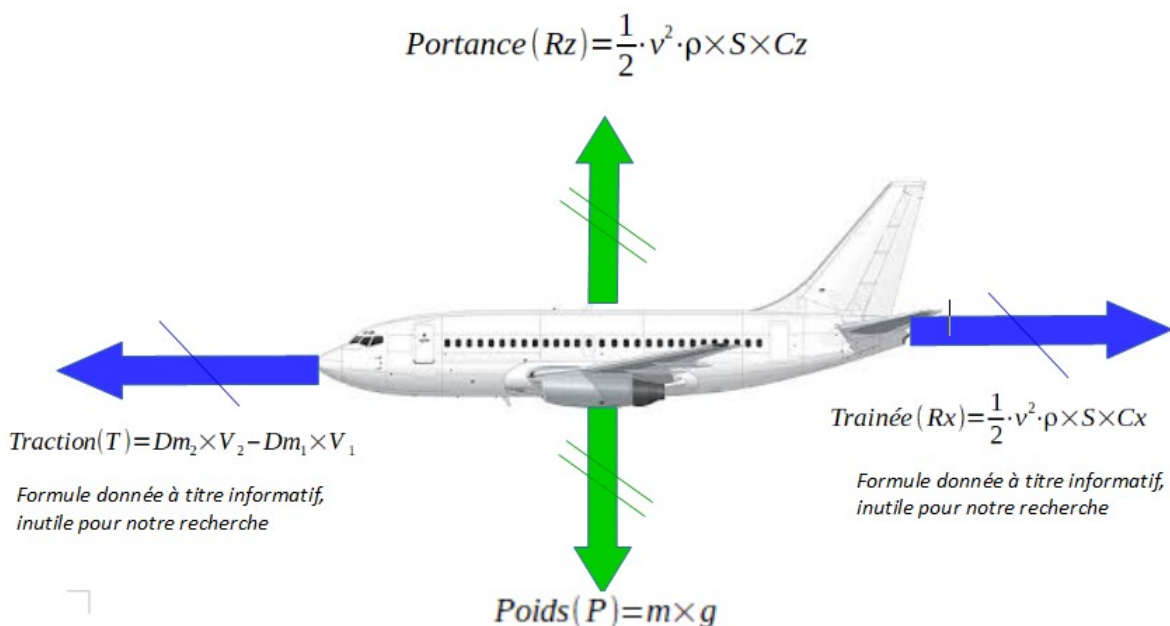
Donc la masse volumique de l'air à 10 000m est d'environ $0,412 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Ce résultat sera valable pour toute la suite de la recherche.

■ *Calcul du coefficient de portance du Boeing 737-100*

En vol stabilisé (vitesse, trajectoire et altitude constantes) nous savons que le mouvement de l'avion dans le référentiel terrestre est rectiligne et uniforme. Par conséquent les 4 forces qu'il subit (Portance, Poids, Traînée, Traction) se compensent. Pour un avion, la situation a lieu lors du vol en croisière et peut se représenter de cette manière :

➤ **Schéma 7 : La compensation des forces en vol stabilisé**



On a : $(\vec{Rz} + \vec{P}) + (\vec{Rx} + \vec{T}) = \vec{0}$ puis $\|\vec{Rz}\| = \|\vec{P}\|$ et $\|\vec{T}\| = \|\vec{Rx}\|$

Grâce à cette propriété d'équilibre des forces, nous allons calculer le coefficient de portance du Boeing 737-100 dont nous connaissons la masse, la vitesse de croisière et la surface alaire.

Considérons un Boeing 737-100 volant à 10 000m à sa vitesse de croisière : 777km/h de surface alaire 102 m² et de masse 26 000 kg

Nous savons que la masse volumique de l'air à 10 000m est de 0,412kg·m⁻³

et que l'intensité de pesanteur standard vaut $g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Convertissons en premier lieu la vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$: $777 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = \frac{777}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 216 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Résolvons alors l'équation d'inconnue C_z :

$$R_z = P \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_z = m \cdot g$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot 216^2 \cdot 0,412 \cdot 102 \cdot C_z = 26000 \cdot 9,807$$

$$\Leftrightarrow 980336 \cdot C_z = 254982$$

$$\Leftrightarrow C_z = \frac{254982}{980336}$$

$$\Leftrightarrow C_z = 0,26$$

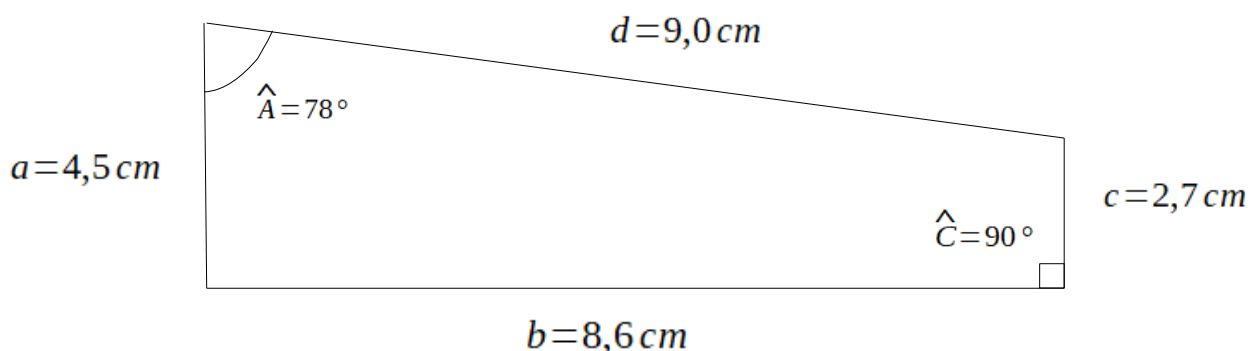
Donc le coefficient de portance du Boeing 737-100 est de 0,26.

Nous pouvons maintenant calculer la traînée induite de notre aile sans winglet qui se trouvera dans la soufflerie qui souffle de l'air à une vitesse de 20 m/s. Nous considérerons une masse volumique de l'air standard : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Nous avons mesuré une envergure de l'aile de 8,6 cm soit 0,086 m.

Calculons en premier lieu la surface alaire d'après les dimensions de notre aile que nous avons mesurées :

➤ **Schéma 8 : Dimensions du modèle de l'aile sans winglet imprimée en 3D**



Grâce à ces informations nous pouvons calculer l'aire de l'aile avec la relation que nous considérerons comme admise :

$$A = \frac{1}{2} \times a \times d \times \sin(\hat{A}) + \frac{1}{2} \times b \times c \times \sin(\hat{C})$$

$$A = \frac{1}{2} \times 4,5 \times 9,0 \times \sin(78^\circ) + \frac{1}{2} \times 8,6 \times 2,7 \times \sin(90^\circ)$$

$$A \approx 31,4 \text{ cm}^2$$

L'aire de l'aile est donc de $31,4 \text{ cm}^2 = 0,00314 \text{ m}^2$.

Nous pouvons donc maintenant calculer la traînée induite de cette aile sans winglet dans la soufflerie :

$$R_{x_i} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2 \times \left[\frac{C_z^2}{\pi \times \left(\frac{B^2}{S} \right)} \right]$$

Application numérique :

$$\Leftrightarrow R_{x_i} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,00314 \times 20^2 \times \left[\frac{0,26^2}{\pi \times \left(\frac{0,086^2}{0,00314} \right)} \right]$$

$$\Leftrightarrow R_{x_i} \approx 0,0070 \text{ N} = 7,0 \text{ mN}$$

Donc la traînée induite du modèle de l'aile sans winglet sera de 7,0 millinewtons lors de l'essai en soufflerie.

B) Calculs pour le Boeing 737-900 (avion avec winglet)



Le Boeing 737-900 qui a fait son premier vol en 2000, possède des winglets qui permettent de réduire la traînée induite.

Calculons alors son coefficient de portance pour ensuite calculer la traînée induite du modèle réduit de son aile que nous avons imprimé en 3D.

Boeing 737-900 de la compagnie Hollandaise KLM, 2009
© Tony Marlow

■ Calcul du coefficient de portance du Boeing 737-900

D'après la même propriété que nous avons utilisée précédemment, lorsqu'il est en croisière, les 4 forces qui s'appliquent au Boeing 737-900 sont compensées. Sa vitesse de croisière est de 990 km/h soit 275 m/s, sa surface alaire est de 125 m², sa masse de 40000 kg puis d'après nos recherches préalables, la masse volumique de l'air à 10 000m d'altitude (l'altitude de croisière du B737-900) vaut 0,412kg·m⁻³

On a donc l'équation d'inconnue Cz :

$$R_z = P \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_z = m \cdot g$$

Résolution numérique :

$$\Leftrightarrow C_z = \frac{1}{2} \times 275^2 \times 0,412 \times 125 \times C_z = 9,807 \times 40\,000$$

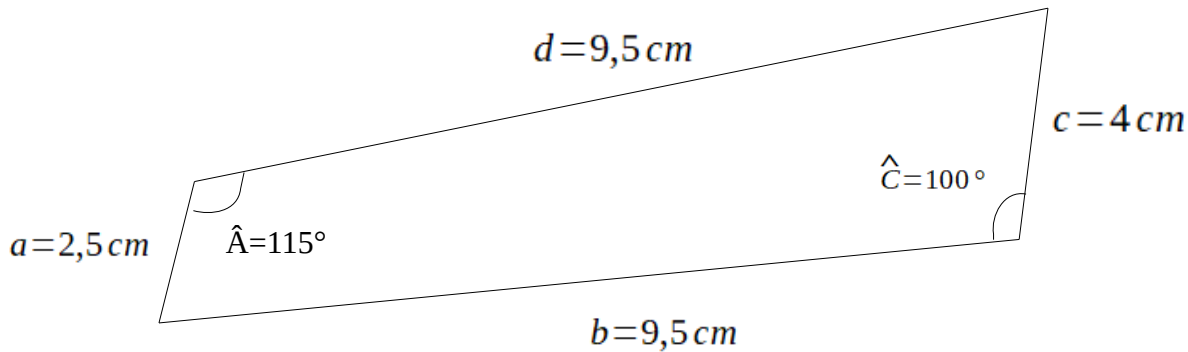
$$\Leftrightarrow 1\,947\,343 \times C_z = 392\,280$$

$$\Leftrightarrow C_z \approx 0,20$$

Donc le coefficient de portance du Boeing 737-900 est de 0,20.

Nous pouvons maintenant calculer la traînée induite de notre aile qui se trouvera dans la soufflerie qui envoie de l'air à une vitesse de 20 m/s de manière laminaire. Nous considérerons une masse volumique de l'air standard : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
Nous avons mesuré une envergure de l'aile de 10,5 m soit 0,105 m.
Calculons en premier lieu la surface alaire d'après les dimensions de notre aile, que nous avons mesurées

➤ Schéma 9 : Dimensions du modèle de l'aile avec winglet imprimée en 3D



Grâce à ces informations nous pouvons calculer l'aire de l'aile avec la relation :

$$A = \frac{1}{2} \times a \times d \times \sin(\hat{A}) + \frac{1}{2} \times b \times c \times \sin(\hat{C})$$

$$A = \frac{1}{2} \times 2.5 \times 9.5 \times \sin(115^\circ) + \frac{1}{2} \times 9.5 \times 4 \times \sin(100^\circ)$$

$$A \approx 29,5 \text{ cm}^2 = 0,00295 \text{ m}^2$$

L'aire de l'aile est donc de 0,00295 m².

Nous pouvons donc maintenant calculer la traînée induite de cette aile avec winglet dans la soufflerie :

$$R_{x_i} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^2 \times \left[\frac{C_z^2}{\pi \times \left(\frac{B^2}{S} \right)} \right]$$

Application numérique :

$$\Leftrightarrow R_{x_i} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,00295 \times 20^2 \times \left[\frac{0,20^2}{\pi \times \left(\frac{0,105^2}{0,00295} \right)} \right]$$

$$\Leftrightarrow R_{x_i} \approx 0,00246 \text{ N} = 2,46 \text{ mN}$$

Donc la traînée induite du modèle de l'aile sans winglet sera de 2,46 Millinewtons lors de l'essai en soufflerie.

6) Comparaison et analyse des résultats

➤ Relation de proportionnalité

Un coefficient k nous permet de savoir combien de fois la traînée induite de l'aile sans winglet est plus grande que celle de l'aile avec winglet :

$$k = \frac{Rx_{i \text{ sans winglet}}}{Rx_{i \text{ winglet}}} \Leftrightarrow k = \frac{7,0}{2,46}$$
$$\Leftrightarrow k \approx 2,86$$

L'aile sans winglet génère donc une traînée induite presque 3 fois plus importante que celle qui en possède un.

➤ Écart absolu

Cet écart correspond à la différence entre la plus grande et la plus petite valeur :

$$E_{\text{absolu}} = Rx_{i \text{ sans winglet}} - Rx_{i \text{ winglet}}$$
$$\Leftrightarrow E_{\text{absolu}} = 7,0 - 2,46$$
$$\Leftrightarrow E_{\text{absolu}} = 4,54 \text{ mN}$$

Nous observons donc une différence 4,54 millinewtons entre les deux traînées induites. La traînée induite de l'aile sans winglet est plus grande que celle de l'aile avec winglet de 4,54 mN.

➤ Écart relatif

Cet écart s'exprime ici par la relation :

$$E_{\text{relatif}} = \frac{|Rx_{i \text{ sans winglet}} - Rx_{i \text{ winglet}}|}{Rx_{i \text{ sans winglet}}}$$
$$\Leftrightarrow E_{\text{relatif}} = \frac{|7,0 - 2,46|}{7,0}$$
$$\Leftrightarrow E_{\text{relatif}} \approx 0,648 = 64,8\%$$

L'écart relatif entre les deux traînées induites est de 64,8 %. La traînée induite de l'aile sans winglet est donc 64,8 % plus grande que celle de l'aile avec winglet, ce qui est une différence non négligeable.

Ces écarts montrent que les deux ailes, qui sont totalement identiques à l'exception du winglet, ont une traînée induite bien différente et cela est forcément dû à la présence ou non de ce winglet.

Ces calculs confirment l'exactitude de ce que nous pouvons penser suite à nos recherches documentaires : l'écoulement au bout de l'aile sans winglet est bien plus turbulent que celui de l'aile avec winglet.

En effet, la perturbation de l'air en bout d'aile est la cause de la traînée induite et le winglet permet de réduire de manière efficace les tourbillons parasites en bout d'aile.

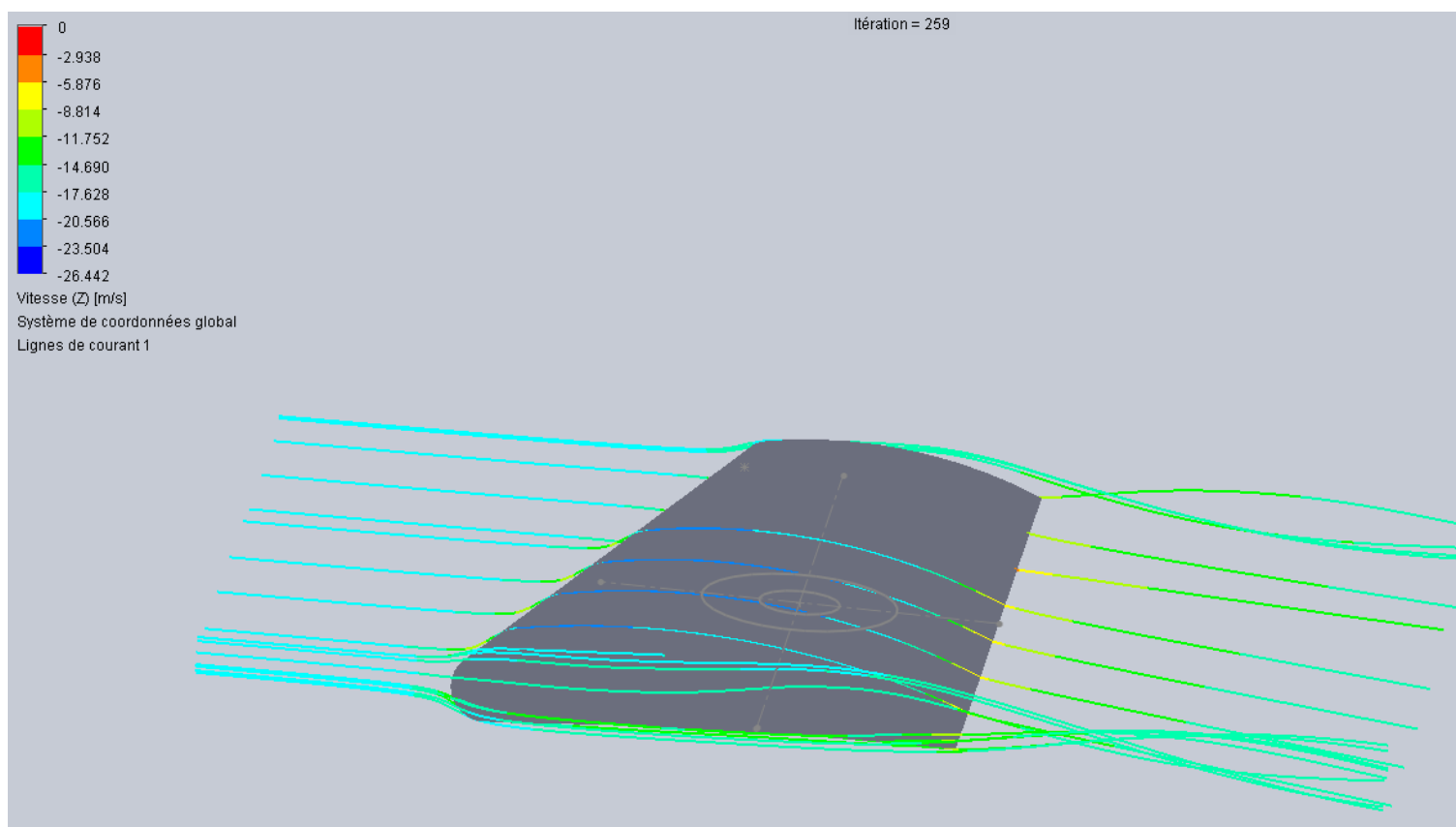
Nous démontrerons maintenant dans la partie suivante de ce TPE que les winglets sont des dispositifs efficaces. Ce grâce à des simulations informatiques en premier lieu puis des expériences en soufflerie.

IV) Démonstration de l'efficacité des winglets

1) Test en soufflerie virtuelle des ailes modélisées en 3D

À l'aide du logiciel Solidworks, nous allons mener une étude du comportement du flux d'air au bout de deux ailes, identiques en tous points à l'exception du winglet, afin de démontrer que le winglet permet de diminuer les tourbillons de bout d'aile. Le vent relatif à l'aile aura, pour nos calculs, une vitesse de 20 m/s et les conditions de température et de pression seront considérées comme standard (15°C ;1013,25 hPa.)

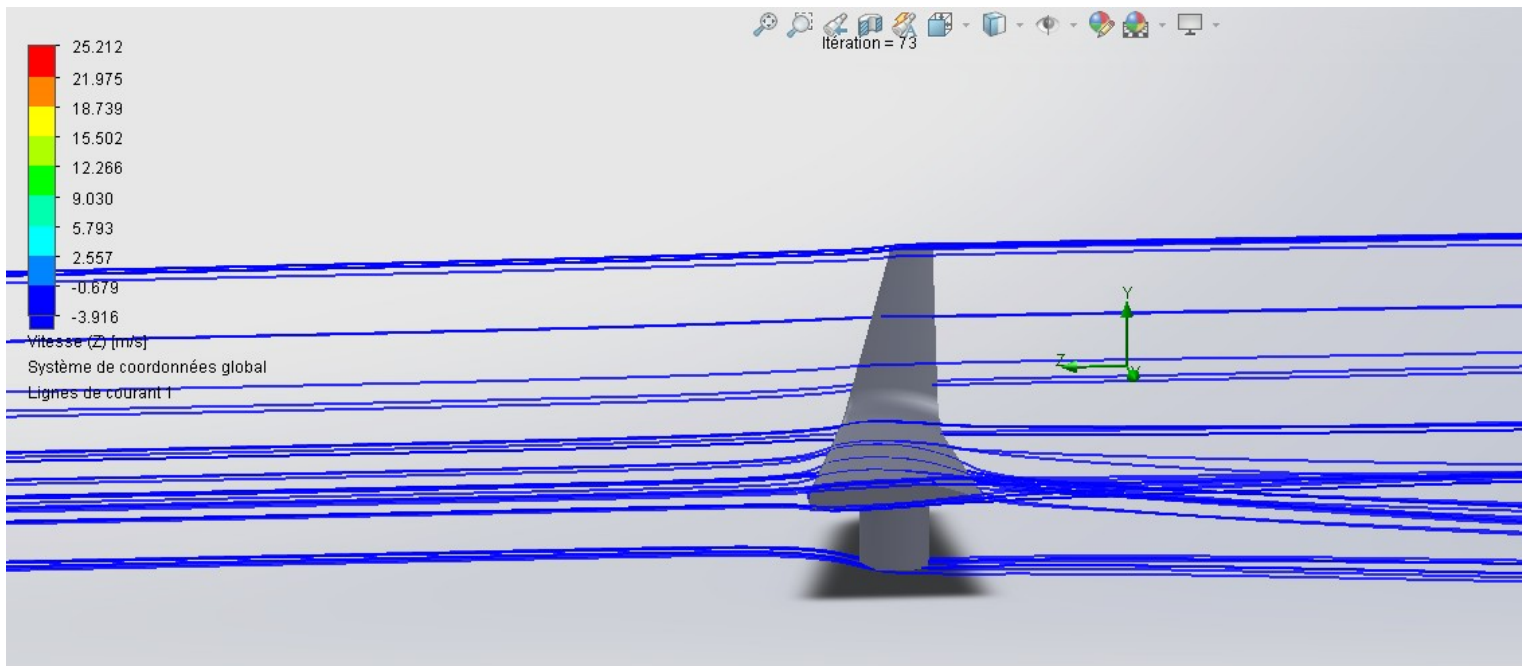
A) Test de l'aile sans winglet



Nous observons que l'air est dévié et crée un tourbillon aux extrémités de l'aile sans winglet. Comme nous pouvons le voir sur les photos lors de l'étude de la traînée induite (page 29).

Vérifions alors que, tous paramètres égaux par ailleurs, le winglet permet de réduire voire d'éliminer ces tourbillons.

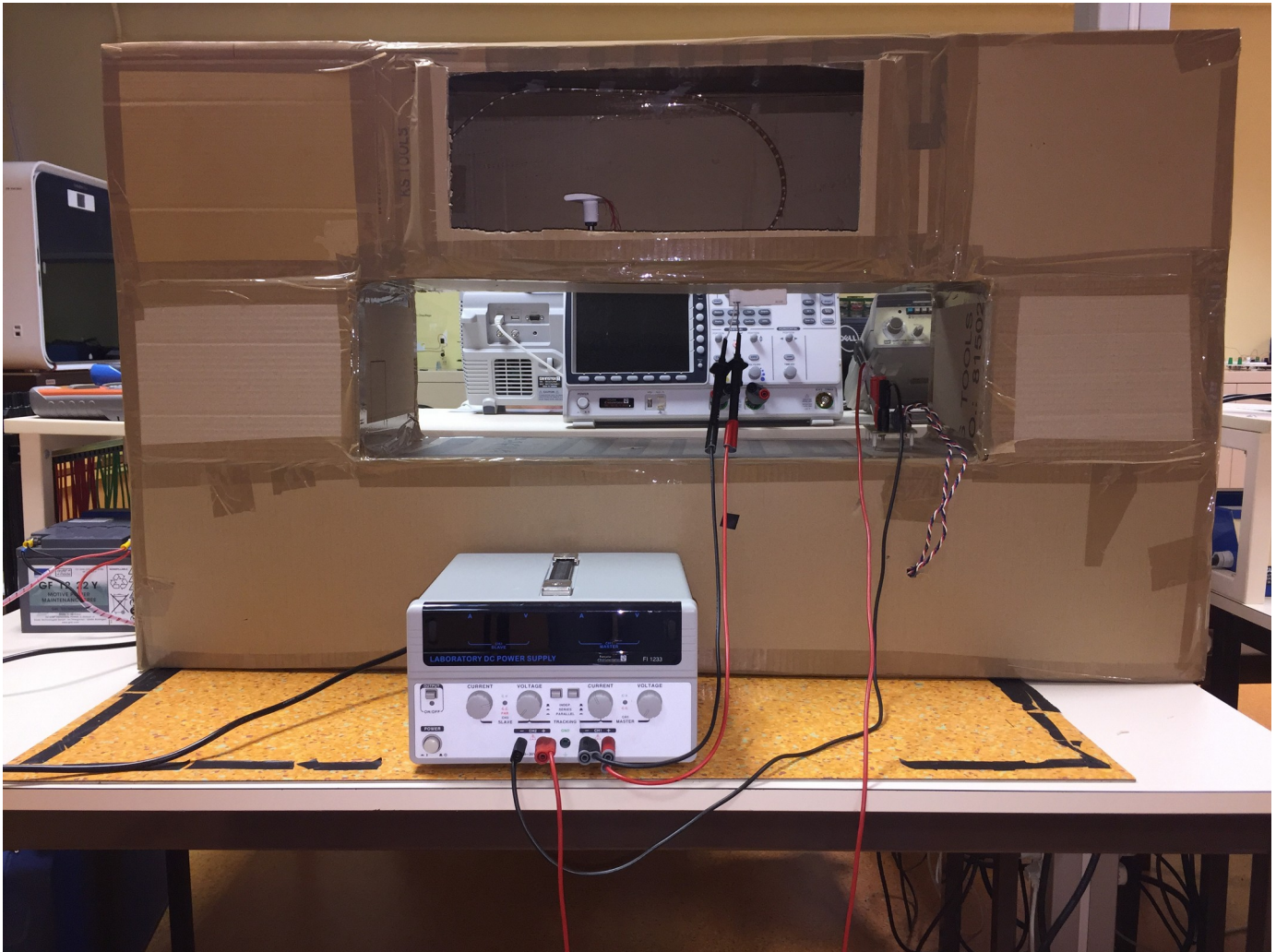
B) Test de l'aile avec winglet



Ici, alors que l'aile est la même à l'exception du winglet, le flux d'air n'est plus perturbé à l'extrémité qui comporte un winglet. D'après la simulation informatique, le winglet est bien un dispositif efficace qui permet une réduction notable des tourbillons marginaux. Observons alors si ce résultat se reproduit également dans la réalité lors de tests en soufflerie réelle.

2) Test en soufflerie réelle des ailes imprimées en 3D

Nous avons donc mis en place une soufflerie qui projette de l'air de manière laminaire à une vitesse de 20 m/s. Elle sera réglée à 20 m/s grâce à un appareil d'alimentation de laboratoire qui l'alimentera avec une tension continue de 10V. Nous avons aussi relié une guirlande LED à cet appareil afin d'éclairer l'aile testée.

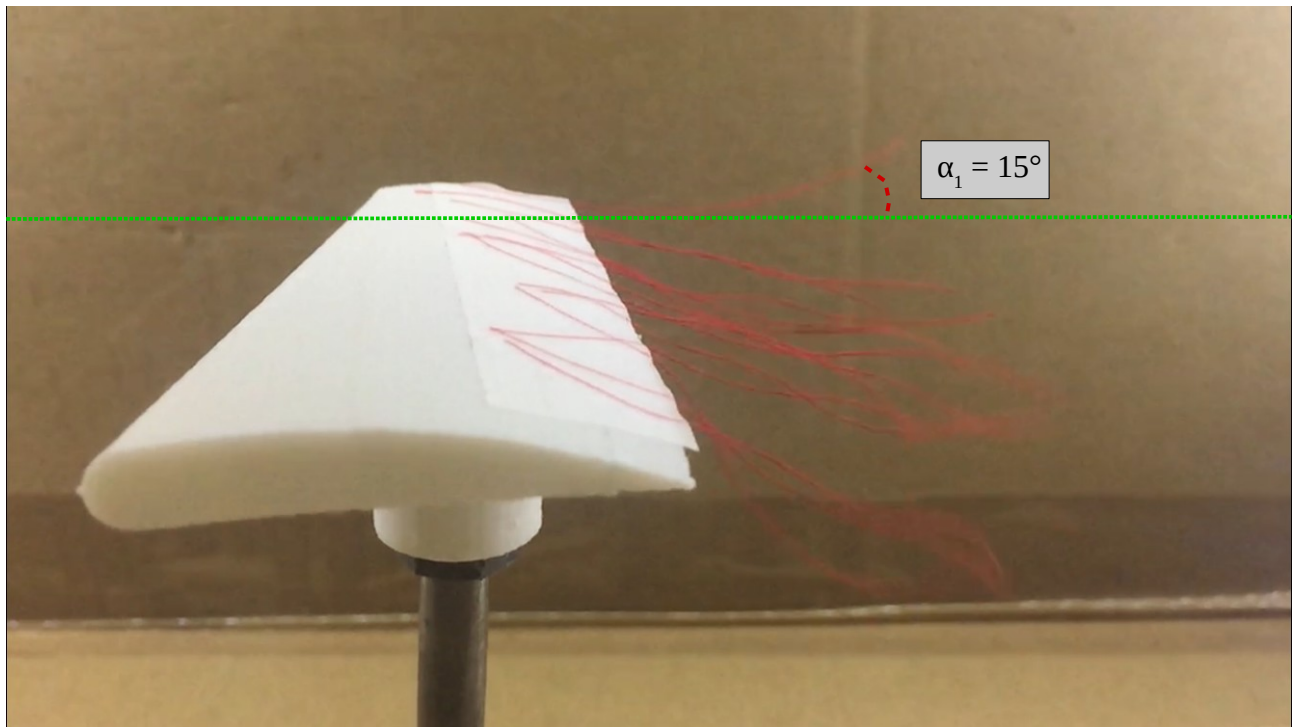


Soufflerie utilisée pour l'étude du flux d'air aux extrémités des ailes

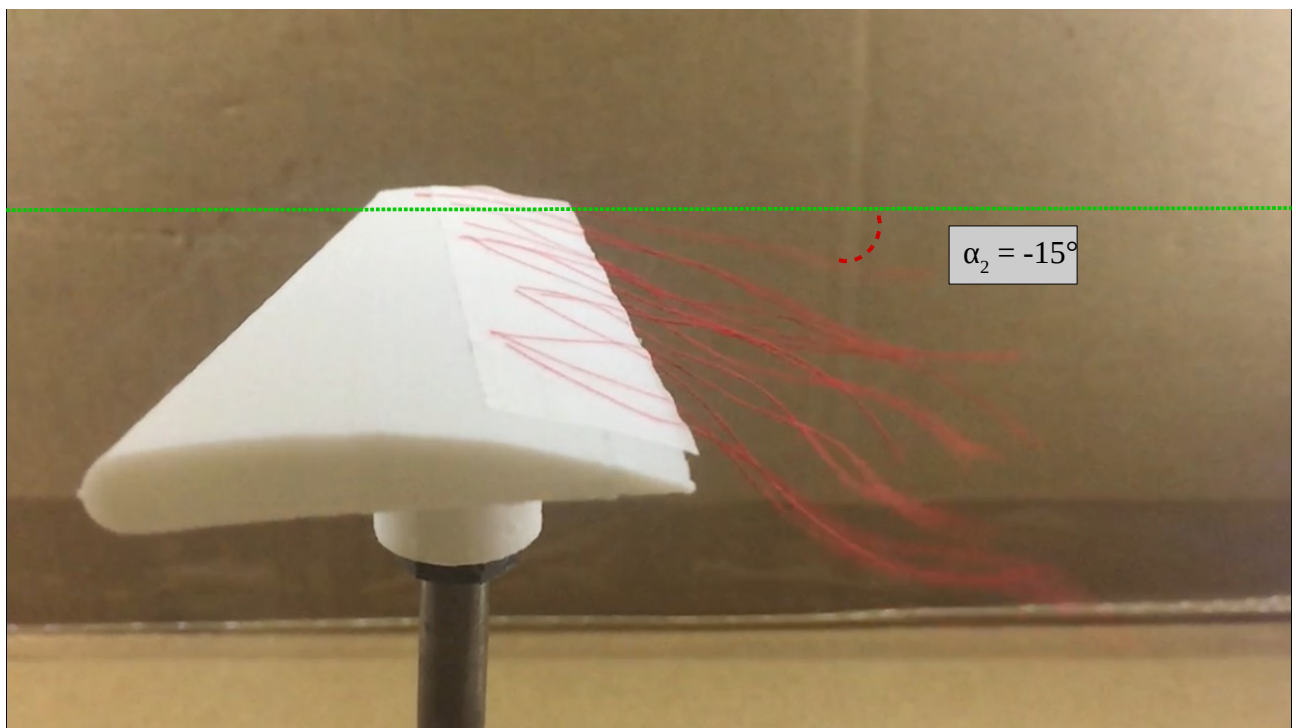
Nous avons utilisé des fils de couture rouges pour visualiser les mouvements de l'air au bord de fuite de l'aile. Étudions alors les vidéos que nous avons faites lors des tests. Nous les arrêterons à deux endroits : lorsque le fil est en position extrême haute et lorsqu'il est en position extrême basse. Cela est dû aux tourbillons. Les fils vont en réalité suivre la trajectoire (circulaire) des tourbillons mais la visualisation que nous aurons sera une oscillation haut-bas du fil.

Les angles orientés vers le haut de l'horizontale seront considérés comme positifs et ceux orientés vers le bas comme négatifs.

A) Mise en soufflerie de l'aile sans winglet

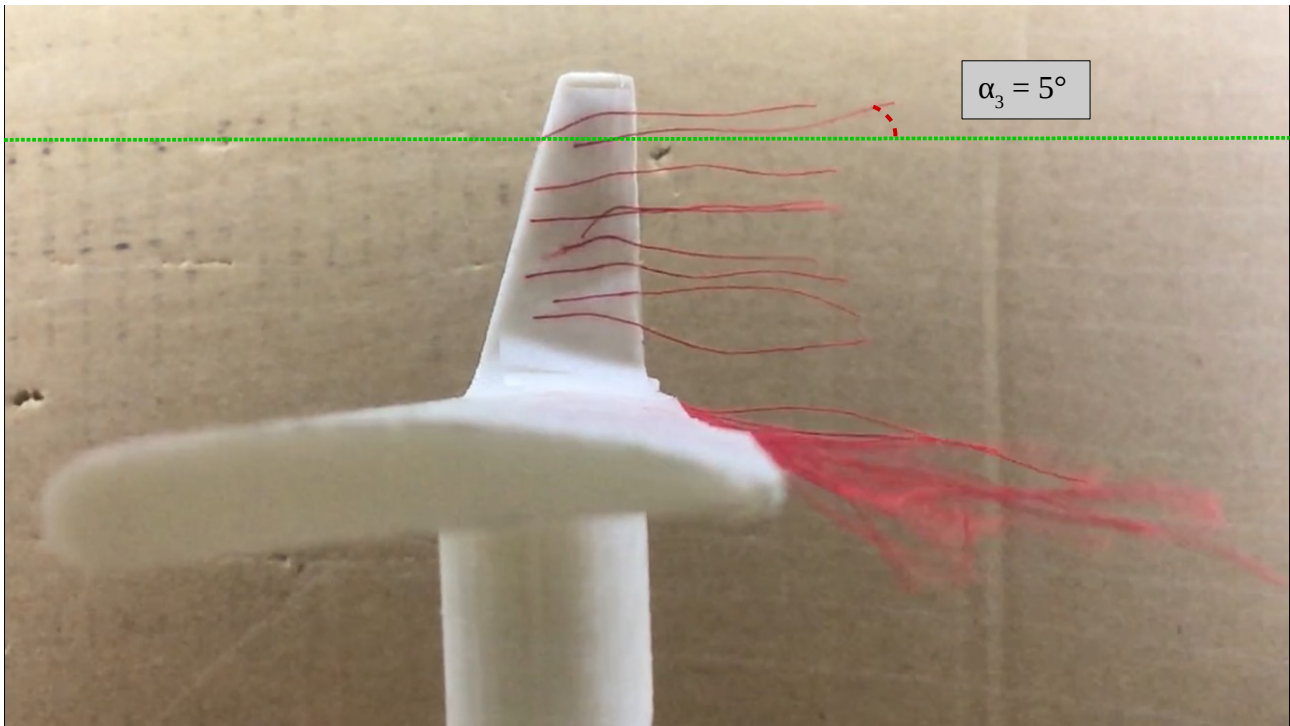


fil en position haute

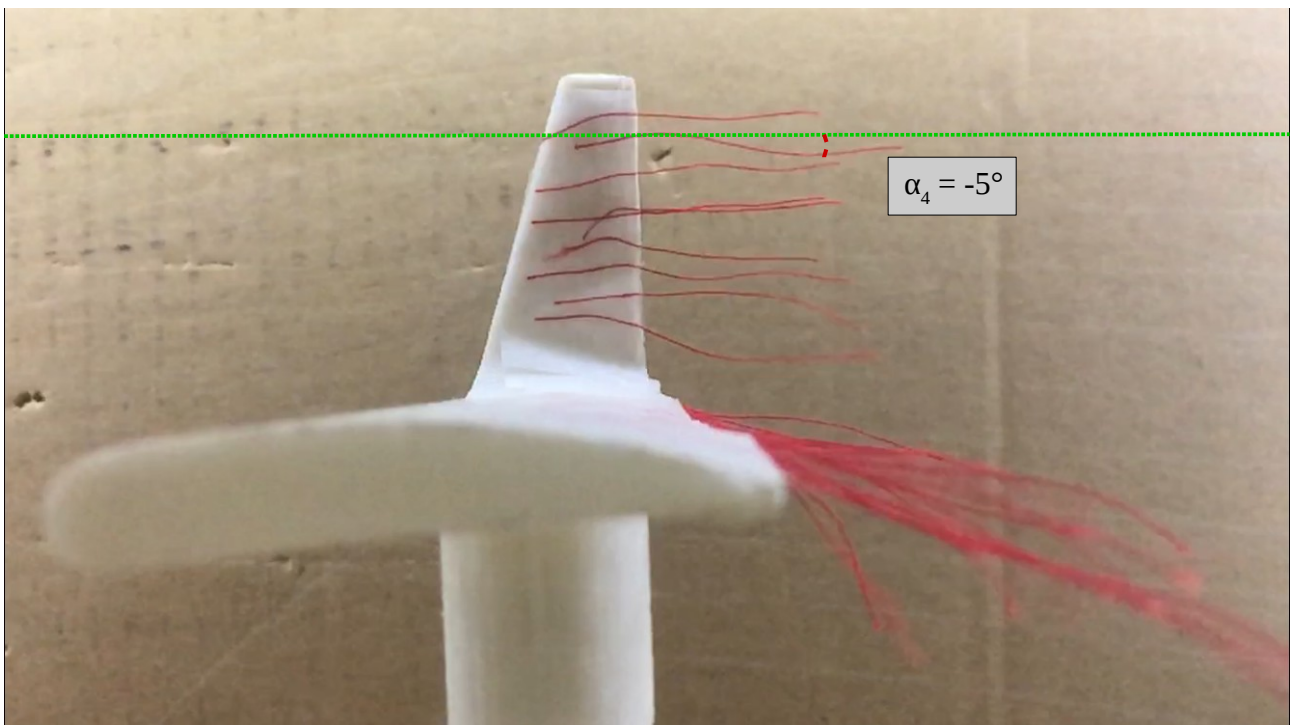


fil en position basse

B) Mise en soufflerie de l'aile avec winglet



fil en position haute



fil en position basse

3) Comparaison et analyse des résultats

➤ Course du fil de laine de l'aile sans winglet

La course est la valeur maximale de l'angle parcouru par le fil de laine. Elle est calculée en faisant la différence entre les valeurs de deux angles extrêmes atteints (en haut et en bas).

On a donc :

$$C_{\text{sanswinglet}} = \alpha_1 - \alpha_2$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{sanswinglet}} = 15 - (-15)$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{sanswinglet}} = 30^\circ$$

➤ Course du fil de laine de l'aile avec winglet

De même, on a donc :

$$C_{\text{winglet}} = \alpha_3 - \alpha_4$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{winglet}} = 5 - (-5)$$

$$\Leftrightarrow C_{\text{winglet}} = 10^\circ$$

▶ On note directement une différence de 20° ou encore un rapport de 3 entre les deux valeurs des courses.

Comme la course est due aux tourbillons marginaux et est représentative de leur rayon, nous pouvons affirmer que le rayon des tourbillons marginaux est 3 fois plus grand pour l'aile sans winglet que pour l'aile qui en possède un. Cela cause donc plus de traînée induite et dégrade les performances de l'aile.

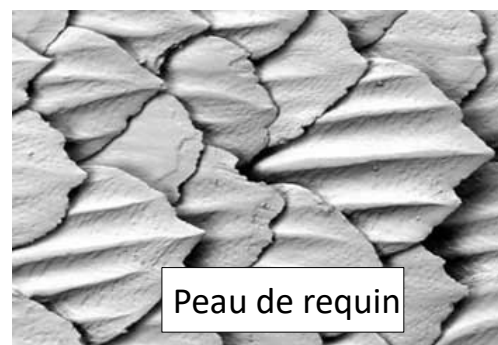
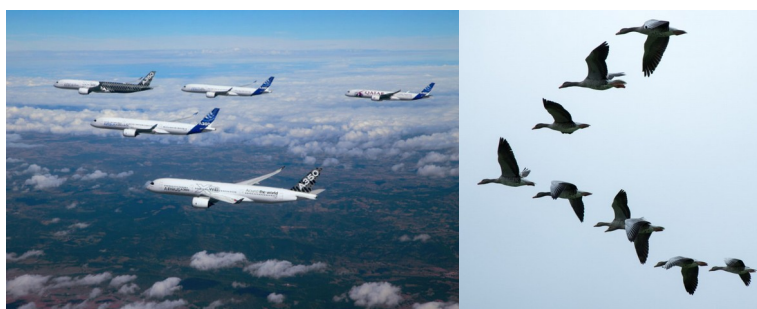
Nous avons donc bien démontré que le winglet est un dispositif efficace, bénéfique au vol de l'avion et, avant tout, inspiré de la nature. Même si il n'est pas le seul biomimétisme aéronautique, nous avons estimé que le winglet était l'un des plus révolutionnaires et qu'il était donc intéressant d'approfondir son étude.

V) Conclusion

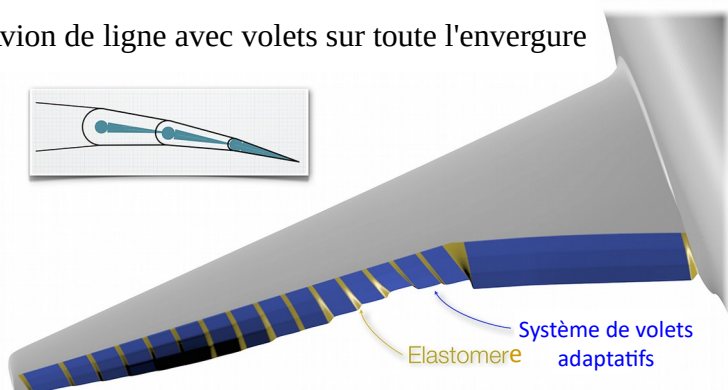
Notre problématique était : « *En quoi l'Homme s'est-il inspiré de la nature pour améliorer les performances de ses avions et ces améliorations sont-elles vraiment efficaces ?* ».

Nous avons, tout au long du développement, retracé l'histoire du biomimétisme dans l'aéronautique puis donné les exemples des biomimétismes actuellement utilisés. Il était donc évident que l'Homme s'est inspiré de la nature, non seulement des oiseaux mais de la nature en général. Comme le démontrent les exemples divers mais surtout l'étude approfondie du winglet, ces améliorations sont vraiment efficaces. Elles permettent des économies de carburant et donc une réduction de la pollution et surtout des avions toujours plus performants pour répondre aux besoins des passagers dans le monde entier.

Bien que très évolués, les avions de nos jours restent perfectibles et ce, toujours en s'inspirant de la nature. Des chercheurs développent actuellement une cellule d'avion inspirée de la peau de requin qui serait plus légère et plus aérodynamique que les cellules actuelles en composite. Des ingénieurs et des chercheurs étudient également les plumes d'oiseaux nocturnes comme la chouette ou le hibou afin de réduire les nuisances sonores mais aussi les avantages et les risques à pratiquer le vol en formation comme certains oiseaux ou encore la possibilité de modifier la forme de l'aile en fonction des conditions extérieures comme le font les oiseaux. (Voir les images ci-dessous)



Avion de ligne avec volets sur toute l'envergure



VI) Bibliographie

Certains documents étaient, à la base en anglais. Comme les sites français étaient souvent peu riches nous avons traduit certaines informations tout en veillant à conserver leur intégrité.

Pour I) L'introduction :

- https://www.iletaitunehistoire.com/genres/contes-legendes/lire/icare-biblidcon_066
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27aviation

Pour II) Les différentes inspirations de la nature dans l'aviation :

- <https://www.futura-sciences.com/sciences/photos/inventions-remarquables-inventions-leonard-vinci-1458/inventions-machines-volantes-leonard-vinci-10680/-20170203ARTFIG00276-il-y-a-105-ans-un-fou-volant-se-tuait-en-sautant-de-la-tour-eiffel-avec-un-vetement-parachute.php>
- <http://aerostories.free.fr/precursseurs/lilien/>
- <https://bionique.artbite.fr/Ailes-volantes-et-planeurs.html>
- <http://accrodavion.be/Accrodavions/leffetdesol.html>
- <http://www.especes-menacees.fr/le-saviez-vous/velcro-biomimetisme-plante/>
- <https://www.lavionnaire.fr/>
- <https://www.usinenouvelle.com/article/chez-airbus-la-nature-reste-une-source-d-inspiration.N138156>
- Livre ENAC ATPL 021 : *Airframe* pages 16 et 76 (traduit)

Pour III) L'étude approfondie des winglets :

- <https://www.google.com/patents/US5150859> (traduit)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Wing_tip (traduit)
- <http://www.entrevoisins.org/aerien/avions/winglets-invention-retrouvee.aspx>
- <https://www.nasa.gov/centers/dryden/about/Organizations/Technology/Facts/TF-2004-15-DFRC.html> (traduit)
- <https://www.nasa.gov/aero/nasa-contribution-winglets.html> (traduit)
- <https://www.lavionnaire.fr/AerodynPortance.php>
- <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Tra%C3%AEn%C3%A9e%20induite/fr-fr/>
- <http://www.b737.org.uk/winglets.htm> (traduit)
- http://www.b737.org.uk/techspecs_detailed.htm (traduit)
- <http://aviationweek.com/blog/winglets-all-shapes-sizes> (traduit)

Pour V) La conclusion :

- <http://www.leparisien.fr/magazine/grand-angle/futur-y-a-du-silence-dans-l-air-03-09-2014-4107341.php>
- <http://www.lapresse.ca/voyage/nouvelles/201302/18/01-4622746-peau-de-requin-quand-les-avions-imitent-le-monde-vivant.php>

VII) Lexique

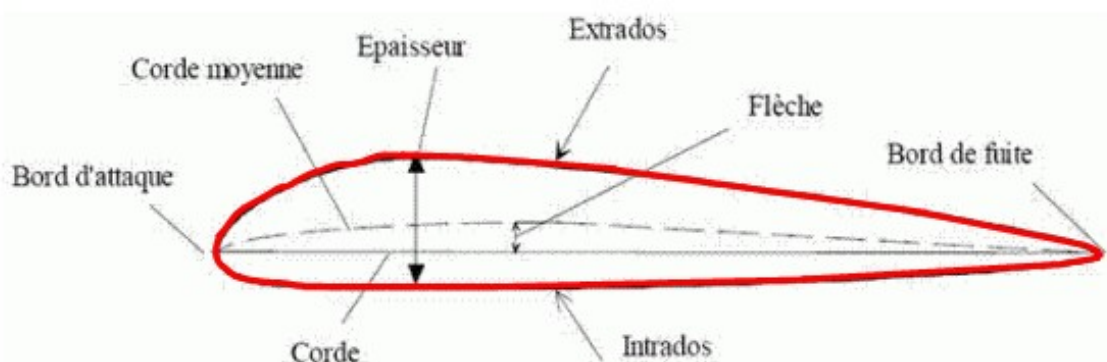
Tous les mots définis et expliqués dans le lexique sont renseignés d'un nombre entre parenthèses exposant.

1) **Voilure** (page 4)

La voilure est la surface totale qui assure la sustentation de l'avion en l'air. Une voilure mobile est donc une surface portante en mouvement. Les hélicoptères possèdent une voilure mobile : leurs rotors. Ce terme peut être mis en opposition avec celui de « voilure fixe » ; les ailes d'avion sont une voilure fixe.

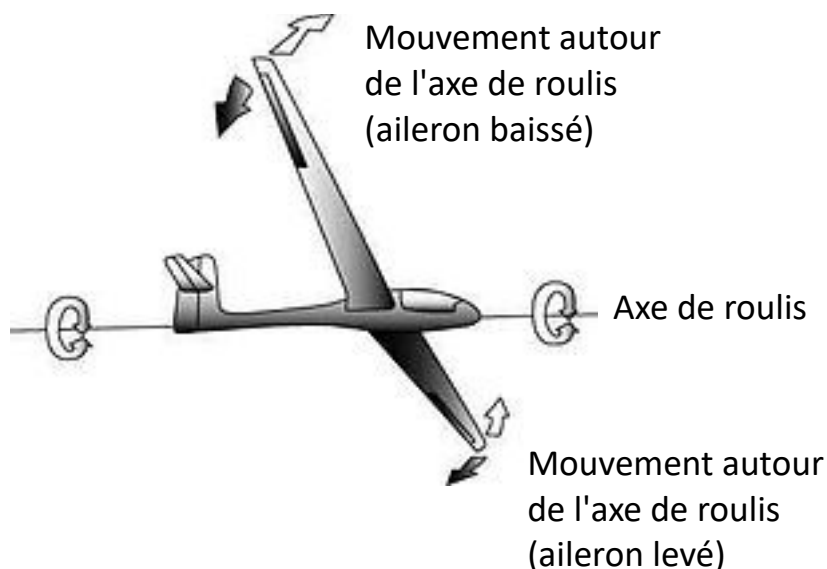
2) **Profil** (page 4)

Le **profil** d'une aile est le contour de la coupe transversale d'une aile. C'est grâce à la forme du profil que l'avion peut générer de la portance et donc voler (voir portance page 27). Il est ici repassé en **rouge** sur la photo :



3) **Roulis** (page 8)

Le roulis est l'un des 3 axes autour duquel un avion peut se déplacer (notamment pendant un virage). Cet axe est longitudinal (entre l'arrière et l'avant de l'aéronef). Ce mouvement est commandé par une action latérale sur le manche. Il cause un déplacement de surfaces mobiles de l'aile : les ailerons.



4) Caréné (page 15)

Un train d'atterrissage dit « caréné » est muni d'un carénage. Un carénage est un revêtement extérieur améliorant l'aérodynamique d'un élément.



Carénage de train d'atterrissage sur un avion de type Robin DR400-120

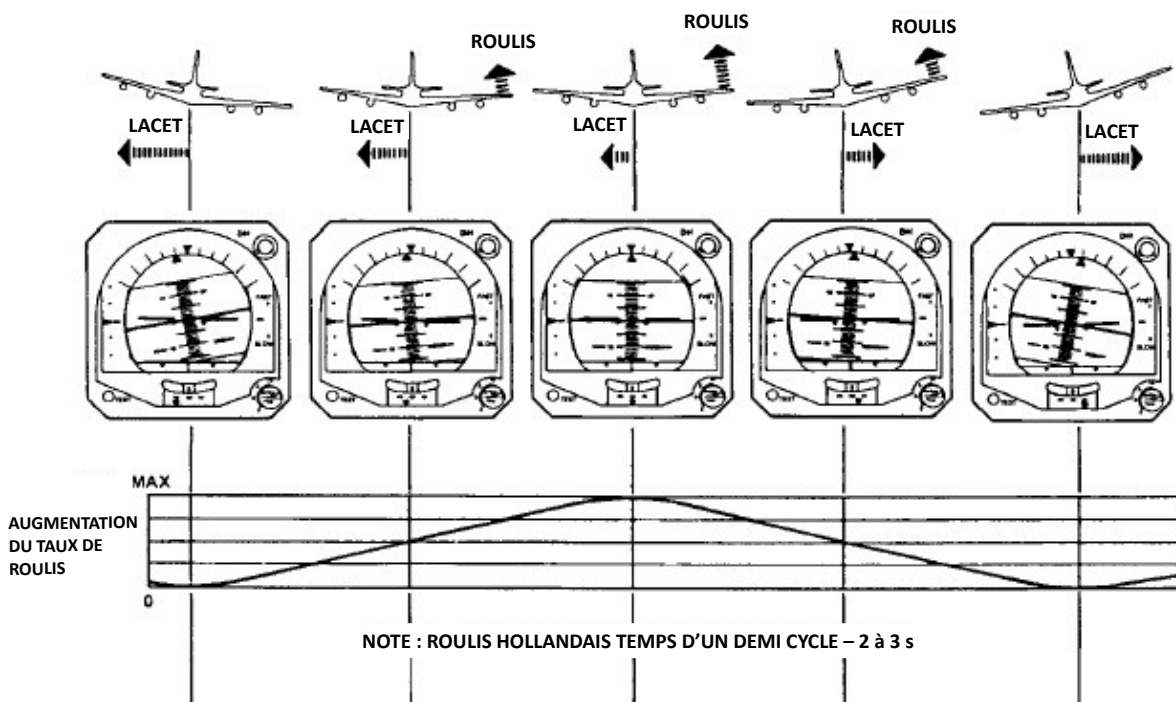
5) Motoplaneur (page 36)

Un motoplaneur est un planeur doté d'un moteur qui peut lui servir à décoller, s'il est assez puissant, ou bien se maintenir en l'air plus longtemps. Le moteur permet d'éviter des situations dangereuses que peuvent rencontrer les planeurs comme les atterrissages forcés en campagne.

6) Roulis Hollandais (page 36)

Le roulis Hollandais est un mouvement oscillatoire aéronautique, c'est un mouvement du nez de l'avion entre la droite et la gauche. Si il n'est pas corrigé ce mouvement peut s'amplifier et devenir dangereux.

Mouvements de l'avion et indications des instruments



VII) Remerciements

Nous tenions à remercier nos deux professeurs : M. Saint-Paul et M. Pradels, qui nous ont encadré et aidé pour la réalisation de notre projet.

Merci pour l'attention que vous avez porté à notre travail.

Tessa, Anthony, Rémi