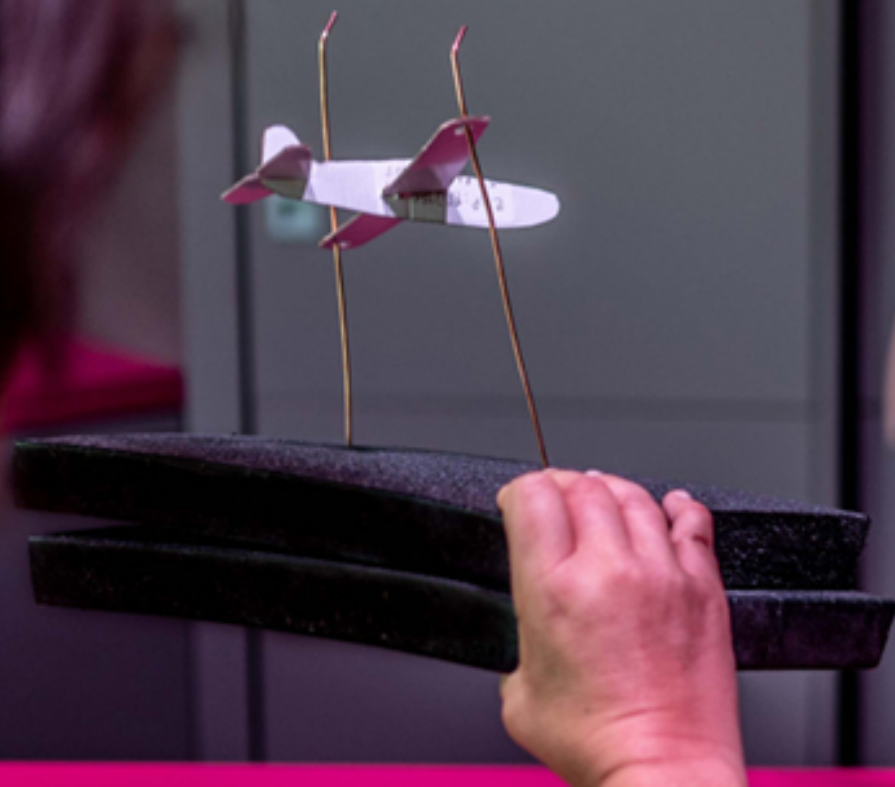




Animation **Envole-toi**



> **CAHIER PEDAGOGIQUE**



1 Le vol

Dans la nature, le vol est souvent associé aux oiseaux. Seulement, cette faculté de s'élever dans les airs et de s'y déplacer, ils ne sont pas les seuls à la posséder !

Au cours de l'évolution, le vol est apparu plusieurs fois dans l'arbre du vivant. Certaines contraintes écologiques ont conduit diverses espèces, en parallèle, à adopter plusieurs traits physiologiques, morphologiques et comportementaux semblables. C'est ce que l'on appelle la **convergence évolutive**.

Il existe de grands types de vols :

- 1- **Le vol plané** (ou passif) : Action de s'élancer dans les airs pour retomber sur un point en contrebas tout en parcourant une certaine distance. On parle de vol passif lorsque l'animal est incapable d'accomplir un vol battu.
- 2- **Le vol battu** (ou actif) : Action de voler par le biais d'un battement répété de ses ailes. Le vol battu déroule une succession de mouvements des ailes dont le principal et plus puissant est l'abaissement simultané des ailes. C'est cet abaissement rapide qui donne l'impression que l'animal « frappe » l'air sous ses ailes, qu'il le « bat ».

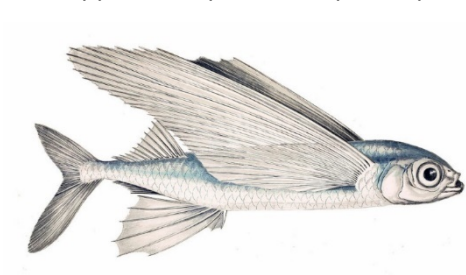
Voici plusieurs exemples d'êtres vivants qui se servent du vol comme moyen de locomotion :

1.1 Vol plané



Les écureuils volants, ou pteromyinés, sont des petits mammifères arboricoles dotés d'une membrane entre leurs membres, appelée patagium, qui leur permet de planer d'arbre en arbre sur de courtes distances. Ils se trouvent principalement en Amérique du Nord, Asie et Europe. Savoir planer leur permet de trouver de la nourriture et d'échapper aux prédateurs.

Les poissons volants : Il en existe environ 70 espèces. Une fois hors de l'eau ils sont capables de planer sur des distances de 30 à 50m, à la vitesse de 60km/h. Ce comportement est une stratégie permettant d'échapper à un prédateur plus rapidement et en dépensant moins d'énergie. Il est plus facile de se



déplacer dans l'air que dans l'eau, les frottements sont moins importants. De plus, franchir la surface permet de quitter le champ de vision des prédateurs marins, comme les thons ou les espadons par exemple, qui peuvent faire des pointes à 120km/h !

Leur chance de leur échapper sous l'eau est assez faible s'ils y restent.

1.2 Vol battu

- **La chauve-souris** appartient à l'ordre des Chiroptères (« chiro » main et « ptère » aile). L'aile de



la chauve-souris est en réalité une « main modifiée ». À l'exception du pouce, les autres doigts sont particulièrement allongés et sous-tendent un patagium (comme les écureuils volants).

Cette main ailée peut aussi servir de protection quand l'animal est au repos. Il s'en enveloppe alors telle une grande cape isolante. Les ailes agissent aussi comme un régulateur thermique. Brassant l'air nocturne, elles contribuent à abaisser la température de l'animal en vol.

- **Les insectes** : Ce sont les seuls parmi les invertébrés à pouvoir réellement voler. Les araignées

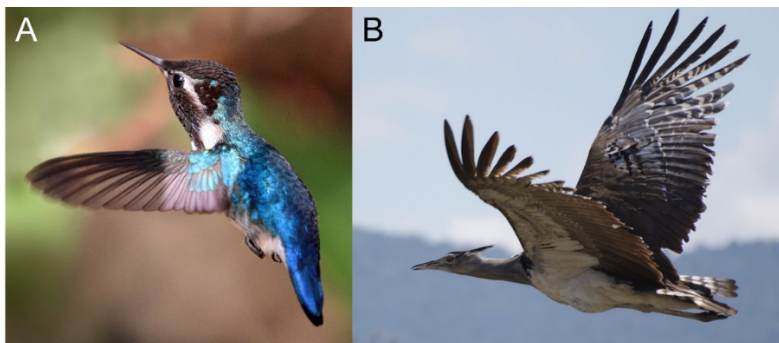


et de nombreux autres petits organismes peuvent être emportés par le vent, mais ils ne sont pas dotés d'ailes et ne peuvent pas contrôler leur déplacement. La capacité de voler a joué un rôle crucial dans la dispersion des insectes. Cette aptitude leur permet d'échapper à leurs prédateurs, de se reproduire plus efficacement, d'explorer de nouveaux habitats et sources de nourriture pour leurs descendants.

Seuls les insectes à leur stade adulte complet (ou éventuellement à leur stade subimago¹ chez les éphémères) sont capables de voler. Aucune larve d'insecte ne possède cette compétence. De plus, tous les insectes, même ceux munis d'ailes, ne sont pas nécessairement aptes au vol (certains cafards par exemple).

- **Les oiseaux** :

Il existe une grande diversité de tailles et de masses chez les oiseaux volants, qui s'échelonnent de moins de 2 g pour le colibri-abeille (*Mellisuga helenae*) (Figure A), le plus petit oiseau du monde, à près de 20 kg chez le plus grand oiseau volant actuel, l'outarde kori (*Ardeotis kori*) avec ses 1.3m d'envergure (figure B).



La forme des ailes et leur position varient en fonction des modes de vol spécifiques adoptés par chaque espèce. La diversité des espèces d'oiseaux fait qu'il existe beaucoup de façons de voler différentes, et étonnantes parfois ! (selon les espèces, ils peuvent effectuer du vol battu et du vol plané).

¹ Période durant laquelle l'insecte acquiert toutes ses caractéristiques adultes (elle dure de quelques minutes à 24h environ selon les espèces)

Le faible poids des oiseaux joue un rôle très important dans leur capacité de voler. Plusieurs aspects de leur anatomie contribuent à cette légèreté.

Ainsi, les oiseaux ont un bec léger plutôt qu'une mâchoire osseuse, un corps couvert de plumes et des membres inférieurs fins et légers. À l'intérieur de leur corps, d'autres « astuces » permettent de les alléger davantage.

D'abord, les oiseaux n'ont pas de vessie (c'est pourquoi leurs fientes sont semi-liquides).

Ensuite, leurs poumons communiquent avec plusieurs « sacs aériens ». Ceux-ci rendent les oiseaux plus légers et les aident à « flotter » dans l'air.

En effet, contrairement aux os des humains qui sont lourds, denses et remplis de moëlle, ceux des oiseaux sont plus minces et la plupart sont creux, occupés par le prolongement des sacs aériens. On nomme ces os creux « os pneumatisés » ou « aérifères ». En d'autres mots, ils sont remplis d'air.

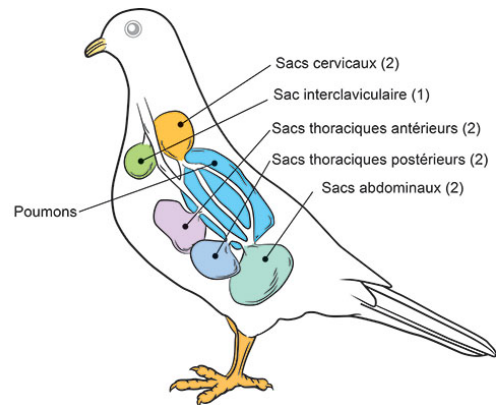
Toutefois, malgré leur faible masse, les os des oiseaux possèdent une grande robustesse, car l'intérieur de leur cavité centrale est composée de minuscules étais, comme de petites poutres transversales, que l'on pourrait comparer aux rayons d'une roue de bicyclette et qui renforcent sa structure.

Le crâne de l'oiseau est également allégé. Celui-ci est constitué d'os minces, troués, ainsi que de cavités.

En plus de posséder une ossature légère, l'oiseau possède moins d'articulations mobiles que les humains afin d'alléger davantage sa masse.

Quelques records...

On peut penser que les oiseaux qui migrent ou se nourrissent en vol passent du temps à se reposer sur le sol ou sur l'eau pour se remettre de ces activités exigeantes en énergie. Cependant, depuis plusieurs décennies, les ornithologues affirment que certains martinets peuvent rester en l'air presque toute leur vie. C'est ce que révèle une étude² de 2013, réalisée par des chercheurs de la Station ornithologique suisse et publiée dans la revue *Nature Communications*. En équipant les martinets alpins (*Tachymarptis melba*) de capteurs miniatures, ils se sont aperçus que les oiseaux étaient restés en vol 200 jours et nuits d'affilée, soit plus de six mois, sans jamais se poser. Les martinets sont donc capables de dormir en planant !



² <https://www.nature.com/articles/ncomms3554>

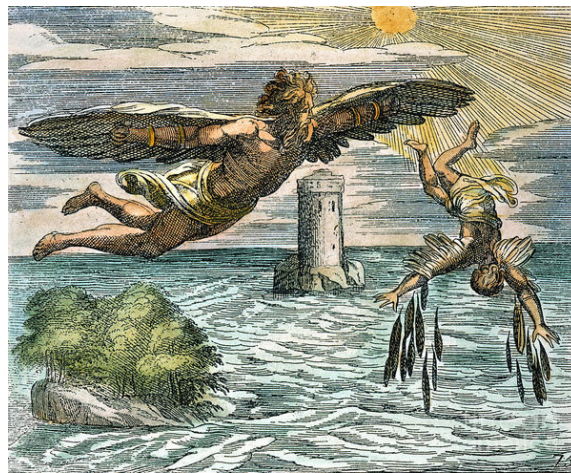
D'autres espèces ont plutôt évolué pour fondre sur leurs proies. C'est le cas du faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) par exemple, qui possède des ailes très compactes, sa tête a une forme qui favorise la vitesse, ses plumes sont très rigides et il possède un os appelé « tubercule » dans les narines. Cet os lui permet, contrairement à beaucoup d'oiseaux, de ne pas suffoquer lorsque la pression de l'air dépasse un certain niveau en ralentissant l'arrivée d'air dans le bec. Grâce à ses nombreuses adaptations, l'oiseau est capable de faire des pointes à 390 km/h !



Le vol a donc évolué de manière indépendante chez plusieurs groupes, et chacun a développé des adaptations différentes pour répondre aux exigences spécifiques de leur environnement et de leur mode de vie. L'apparition du vol chez différentes lignées d'organismes témoigne de l'incroyable diversité des formes de vie sur Terre et de la manière dont les pressions environnementales ont façonné l'évolution des espèces au fil du temps.

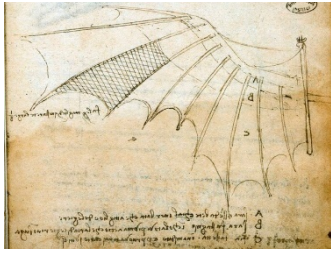
2 Le vol humain est-il possible ?

Depuis très longtemps, les êtres humains ont nourri le souhait de prendre leur envol à l'instar des oiseaux. Cette volonté est perceptible dans la mythologie antique, notamment à travers le mythe d'Icare (l'histoire d'un homme, Icare, et de son père Dédale, emprisonnés dans un labyrinthe crétois. Dédale fabrique des ailes en cire pour s'échapper. Malgré les avertissements de son père, Icare s'élève trop haut dans le ciel, et la cire fond près du soleil, le faisant chuter dans la mer Égée et perdre la vie). Ce mythe symbolise la tentation d'aller toujours plus loin, au risque d'en subir les conséquences.



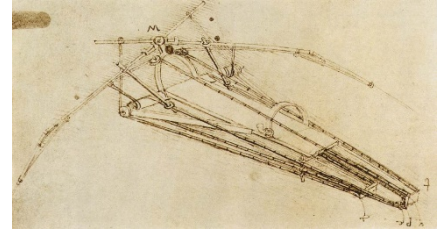
Certains voulaient franchir le cap de passer du mythe à la réalité, à l'instar de Léonard de Vinci (1452-1519). Cet artiste visionnaire de la Renaissance est reconnu pour ses œuvres emblématiques comme "La Joconde" et "La Cène", qui démontrent sa maîtrise inégalée de la peinture, avec une attention minutieuse aux détails et une utilisation novatrice de la perspective.

Léonard De Vinci s'est aussi beaucoup intéressé au vol des oiseaux et des chauves-souris. Nous avons encore des traces de ses croquis qui nous montrent qu'il souhaitait conquérir le ciel en imitant leurs ailes notamment.



Des idées d'engins intégrant ces modèles d'ailes ont aussi été inscrits dans ses carnets, dont un ornithoptère à propulsion humaine, nom dérivé du mot grec pour oiseau.

L'homme était censé être allongé sur la partie centrale et faisait mouvoir cet engin par des gestes des pieds et des mains.



Les premiers êtres humains ne possédaient qu'une compréhension rudimentaire de la physique. Leur appréhension du fonctionnement du monde reposait essentiellement sur l'observation et l'expérimentation par essais et erreurs. Par la suite, certains d'entre eux pensaient qu'en agitant leurs bras rapidement, à la manière des oiseaux, ils pourraient prendre leur envol. D'autres allèrent même jusqu'à fixer des "ailes" artisanales sur leurs épaules dans l'espoir de voler tel un oiseau.

Les premières traces d'un vol humain remonteraient au XVIIe siècle

Un homme aurait réussi à voler dans le ciel en 1678. Cette histoire intrigue et suscite l'intérêt, d'autant plus que l'engin utilisé pour ce vol n'est pas simplement un concept théorique, mais est précisément décrit dans une lettre à une revue scientifique.



La machine consiste en deux bâtons munis de châssis de taffetas aux extrémités, qui se plient de haut en bas, actionnés par les mouvements des bras et des jambes.

Ce personnage mystérieux, le serrurier Besnier de Sablé, est rapidement devenu un sujet d'étude dans le domaine de l'aéronautique. Il est mentionné dans de nombreux ouvrages depuis le XVIIIe siècle, bien qu'il ne subsiste que très peu de preuves de son existence. Seuls deux documents attestent de l'existence du "sieur Besnier" : un article datant de 1678 dans le *Journal des sçavans* et une enseigne d'auberge nommée "À l'homme volant", le représentant en plein vol.

Bien des intrépides, avec des ailes fixées dans le dos, se sont élancés dans le vide. Mais, après quelques battements d'ailes, cela se terminait à peu près toujours de la même façon : par une chute violente.

3 Qu'est ce qui nous empêche de voler ?

3.1 Notre masse

La masse d'un objet est une mesure de la quantité de matière qu'il contient. Elle est fondamentale en physique et s'exprime généralement en kilogrammes (kg) dans le système international.

Tous les objets ou êtres vivants possèdent donc une masse, que l'on peut mesurer grâce à une balance par exemple.

3.2 Notre planète nous attire : la gravité

Pour voler il faut tout d'abord compenser notre poids. Ce dernier est dû à la gravité qui nous attire vers le centre de la Terre et de notre masse (que nous pesons sur la balance).

Ce phénomène est créé par l'interaction entre deux objets (la Terre et notre corps dans ce cas). Plus les deux objets sont éloignés, plus l'attraction qu'ils exercent l'un sur l'autre est faible. Plus leur masse est importante, plus l'attraction est forte.



Notre planète attire vers son centre les objets et êtres vivants qui se trouvent à sa surface. C'est cette attraction qui nous maintient au sol, peu importe l'endroit où nous nous trouvons à la surface de la Terre.

C'est pour cette raison que lorsqu'un objet est lâché, il tombe toujours vers le bas, c'est-à-dire vers le centre de la Terre.



Pour pouvoir voler et s'extraire du sol, l'enjeu va donc être de compenser notre poids par d'autres forces, dirigées vers le haut.

4 Comment compenser notre poids pour s'envoler ?

4.1 Les bases de l'aérodynamique

Léonard de Vinci avait déjà compris que l'air nous entourait de toutes parts et que ce « bain » de fluide avait un fort impact sur nos mouvements et que cela pouvait représenter un frein au vol battu.

Il a d'ailleurs décrit dans ses livres de notes des machines qui permettraient de déterminer la force humaine nécessaire pour battre de grandes ailes suffisamment rapidement pour s'envoler. Il en conclut qu'il n'était pas possible pour nous de s'envoler de cette manière car nos muscles n'étaient pas assez puissants pour procurer une telle force.

Celui qui a été le premier pris en photographie dans les airs a été Otto Lilienthal, un ingénieur allemand qui étudia lui aussi longuement le vol des oiseaux mais se consacra plutôt sur l'étude du vol plané. En 1889, il publie *Le Vol des oiseaux* considéré comme base de l'art du vol, dans lequel il décrit les planeurs qu'il réalisera par la suite.



Le premier est un monoplane en bambou dont les ailes sont recouvertes de toile de coton. L'appareil fait environ 7 mètres d'envergure et pèse une 20aine de kilos. Pour faire ses sauts dans le vide, Lilienthal se fait élever un remblai de 15 mètres de hauteur.

À partir de 1891, il va ainsi se lancer dans le vide et planer en se suspendant au planeur par les avant-bras. Ainsi accroché, il balance son corps pour incliner son planeur comme le font les pilotes de deltaplanes aujourd'hui. Il parvient ainsi à voler sur plusieurs centaines de mètres et même à effectuer des virages.

En 1894, il s'envole sur une distance de 300m pendant 40s. Ces résultats seront diffusés dans le monde entier et les modèles de ses planeurs vont inspirer de nombreux autres pionniers.

Pour comprendre comment cet ingénieur a pu lutter efficacement contre la gravité, nous pouvons observer la chute de deux feuilles de papier de même taille, l'une pliée en boule et l'autre à plat.

La boule tombe beaucoup plus rapidement que l'autre !

Ces deux feuilles ont la même masse, sont soumises à la même gravité, mais ne déplacent pas la même quantité d'air en chutant. Plus la surface est grande, plus le déplacement d'air qu'elles vont générer sera grand aussi.

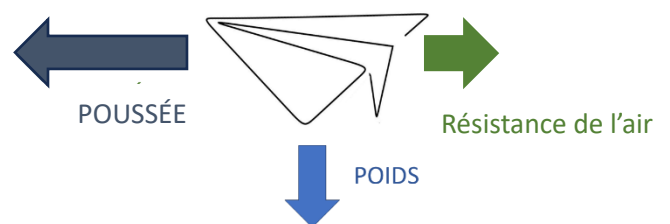


Sans s'en rendre compte, chaque déplacement que nous effectuons, nous aussi, impose à l'air de se déplacer autour de nous.

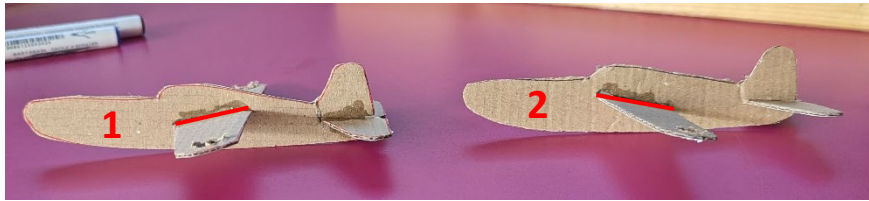
⇒ **Otto Lilienthal l'avait bien compris : pour voler, nous avons besoin d'une aile de grande surface.**

Pour tester l'impact de la taille de l'aile, nous pouvons faire voler des avions en papier de différentes formes. Pour un même modèle, celui dont les ailes sont plus grandes ira plus loin que les autres.

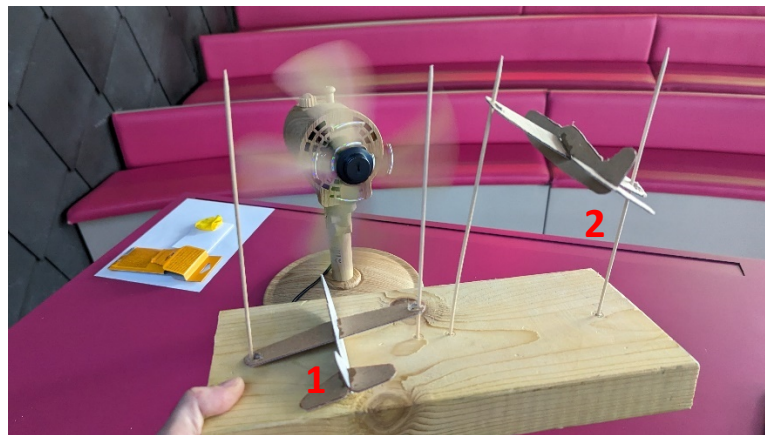
Pour le faire voler, nous ne le faisons pas juste chuter en le lâchant, mais nous le lançons devant nous. Nous appliquons une nouvelle force vers l'avant, qui se nomme la poussée. Comme le mouvement de la feuille n'est plus verticale mais horizontale, le flux d'air qui arrive sur elle est aussi horizontal (de la gauche vers la droite sur le schéma ci-contre)



Sur le schéma précédent, aucune flèche n'est orientée vers le haut. Il nous manque donc encore un dernier élément pour comprendre les bases du vol. Pour l'observer, nous pouvons fabriquer plusieurs avions en orientant les ailes plus ou moins vers le haut :



Les ailes de l'avion 1 sont inclinées vers le bas à l'avant, tandis que sur l'avion 2 elles sont inclinées vers le haut. En plaçant ces deux avions faces à un ventilateur, nous pouvons remarquer que seul l'avion 2 s'élève.



Les patrons des avions sont disponibles en annexe de ce cahier pédagogique.

Comment l'expliquer ?

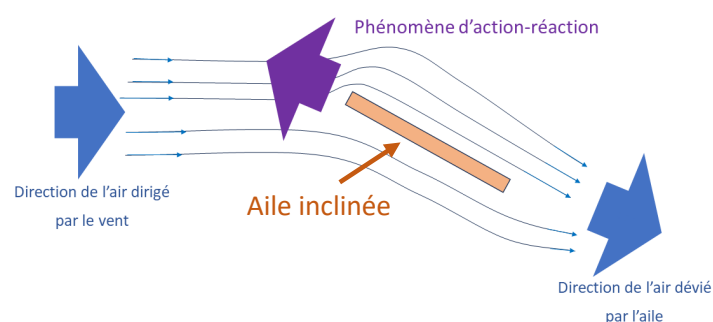
Depuis les premières études en soufflerie il y a plus d'un siècle, nous savons que lorsque l'air rencontre un obstacle, il va être dévié d'une certaine manière. Dans le cas d'une aile inclinée, le flux d'air qui arrive dessus va passer au-dessus et au-dessous et va être dévié. En effet, ce flux d'air va épouser la forme de l'aile et passer d'une direction horizontale à une autre direction, celle-ci orientée vers le bas.

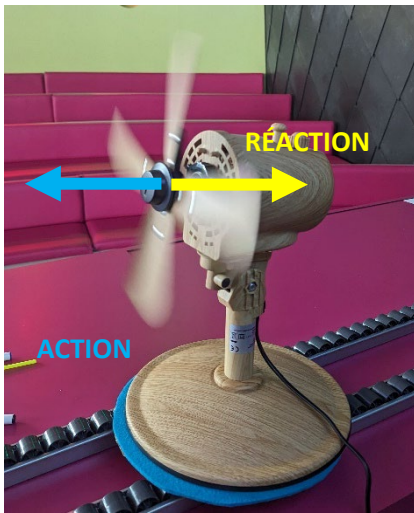
⇒ L'aile applique donc une force sur l'air pour le projeter dans une autre direction.

La troisième loi de Newton nous dit que « Si un corps A exerce une force sur un corps B, alors B exerce sur A une force d'égale intensité, de même direction et de sens opposé ».

⇒ Dans notre cas, le corps A correspond à notre aile d'avion et le corps B à l'air.

L'air qui se retrouve dévié vers le bas va alors exercer lui-même une force sur l'aile dans la direction opposée. C'est ce qu'on appelle le phénomène d'action-réaction :





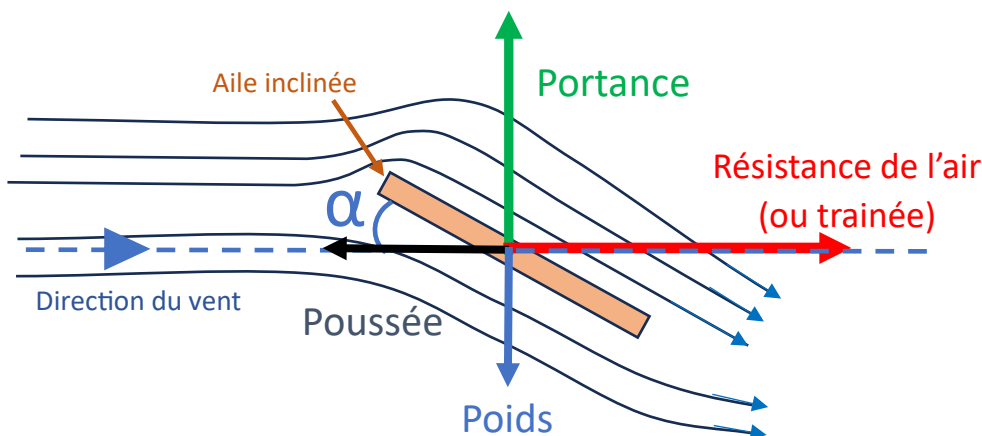
Pour mettre en évidence ce phénomène d'action-réaction, nous pouvons placer un ventilateur sur des rails composés de roues libres.

Le ventilateur dévie l'air dans une direction et l'accélère (flèche bleue). En exerçant une force sur l'air pour l'envoyer dans une direction, le ventilateur subit lui aussi la même force mais dans le sens opposé (flèche jaune).

Le ventilateur va alors se déplacer dans le sens opposé du flux d'air qu'il nous envoie.

Heureusement pour nous, nos ventilateurs sont conçus pour résister à cette force grâce à son socle qui adhère à la table ou au sol. Il ne se déplace donc pas « tout seul ».

Dans le cas de notre aile (envoi d'air non pas horizontal mais incliné avec un angle d'incidence α), ce phénomène va générer une force primordiale pour voler : la portance.



Lorsque la portance est supérieure ou égale au poids de l'avion, ce dernier reste en l'air. Plus la vitesse est élevée, plus la portance est grande. Voilà pourquoi les avions décollent toujours face au vent car même au sol, le vent va produire de la portance et « alléger » l'avion avant le décollage.

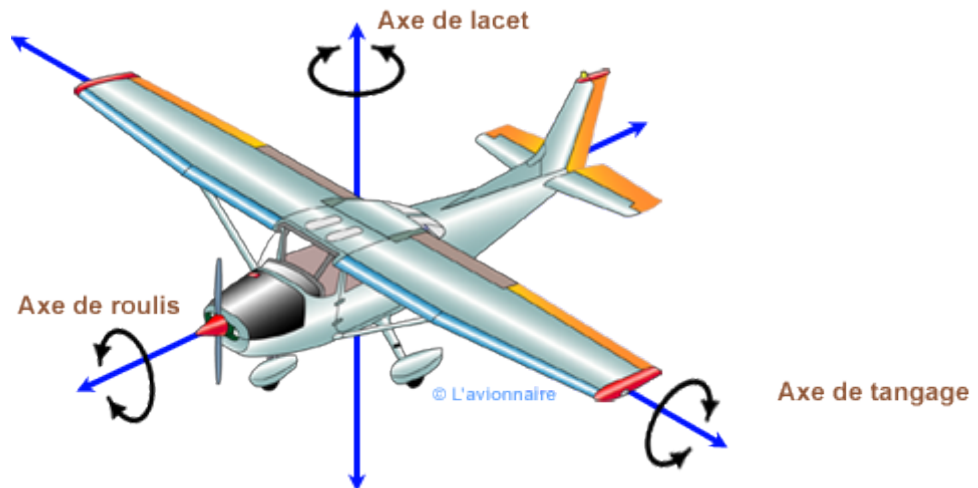
La portance dépend aussi de la surface des ailes, plus elle est importante, plus la portance sera conséquente. Les premiers planeurs, n'étant lancés que par la force humaine, ne pouvaient pas décoller avec une grande vitesse, il fallait alors compenser avec de grandes ailes.

Nous le savons donc depuis la moitié du XIXe siècle : pour voler il ne faut pas que les ailes de planeurs soient horizontales mais inclinées légèrement par rapport au flux d'air qui arrive dessus.

Malgré cette avancée, le vol n'était pas encore maîtrisé. Pour se rendre à un endroit précis, il faut aussi pouvoir diriger correctement l'engin.

5 Comment maîtriser la trajectoire d'un avion ?

En aviation moderne, il existe 3 axes principaux sur lesquels peuvent agir les pilotes pour contrôler et maintenir la stabilité de leur avion : les axes de tangage, de roulis et de lacet.

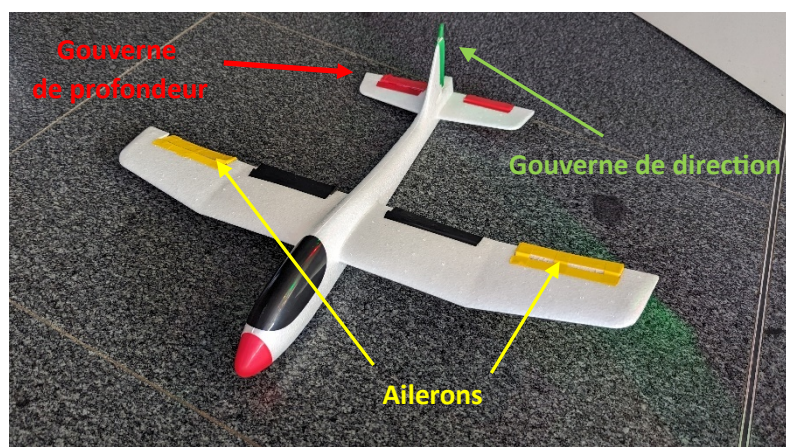


- ⇒ **Axe de tangage (Longitudinal)** : fait pivoter l'avion vers le haut (pique) ou vers le bas (cabré).
- ⇒ **Axe de roulis (Latéral)** : fait pivoter l'avion d'un côté à l'autre.
- ⇒ **Axe de lacet (Vertical)** : pour faire tourner l'avion autour de sa trajectoire de vol (virage).

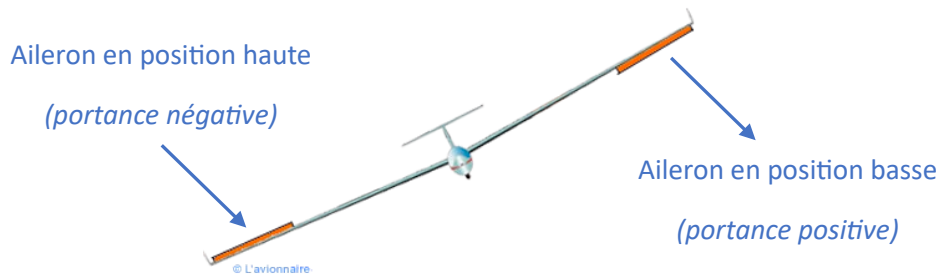
La combinaison habile de ces mouvements permet aux pilotes de manier l'avion en toute sécurité et de manière efficace.

Tous ces mouvements sont aussi possible grâce à la déviation des flux d'air dans une direction, ce qui génère une force dans la direction opposée.

Pour cela, les avions possèdent des ailerons ou gouvernes sur les ailes et la queue. Ces pièces motrices sont orientées par le pilote en fonction des directions qu'il veut prendre.



Pour jouer sur le roulis, il suffit de créer une différence de portance entre les deux ailes de l'aéronef, le pilote doit lever l'aileron droit et baisser celui de gauche (comme sur l'illustration ci-dessous sur lequel l'avion se dirige vers nous).



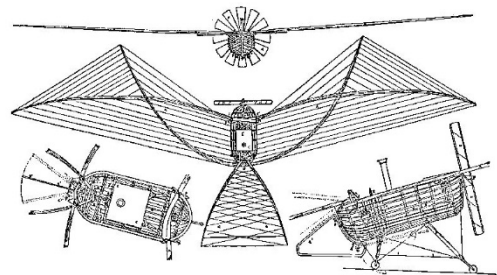
Pour cela il suffit d'appliquer une force de torsion sur toute la longueur de l'aile (appelé gauchissement) afin d'obtenir deux angles d'attaque différents, et ainsi deux portances différentes.

6 L'apparition de l'avion à moteur

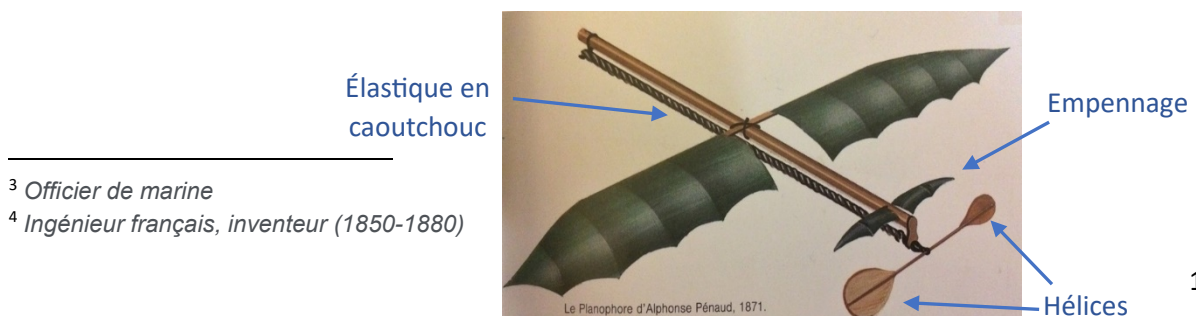
Les nombreux essais de planeurs ont démontré qu'il est possible de contrôler les différentes phases du vol et permettent de mieux comprendre les phénomènes aérodynamiques mis en jeu. Seulement, sauter d'une colline pour décoller ne contente pas ceux qui rêvent de décoller du sol à bord d'une machine et de revenir se poser de préférence en douceur. Pour cela, il faut intégrer aux aéronefs un système de propulsion plus puissant : il faut y ajouter un moteur. Ce moteur devait être assez puissant pour atteindre la vitesse nécessaire pour générer de la portance et suffisamment léger pour ne pas alourdir la machine.

Félix du Temple³, aussi passionné par le vol des oiseaux, est convaincu que seul la prise de vitesse peut permettre le décollage d'un aéroplane. Influencé par la construction navale, il place ses espoirs dans l'hélice.

En 1857, Louis et Félix du Temple font décoller le premier avion en modèle réduit motorisé appelé « *canot planeur* ». Pesant 700 grammes et équipé d'ailes fixes, il est propulsé par un mouvement d'horlogerie et une hélice grâce à un moteur à vapeur. Après un premier vol d'essai à Toulon, le prototype fait l'objet d'un brevet déposé le 2 mai 1857 sous le titre de « *locomotion aérienne par imitation du vol des oiseaux* ». Pour tester la stabilité des modèles de planeurs, d'autres modèles plus simples à réaliser ont été inventés.



Le Planophore de Charles-Alphonse Pénaud⁴ en est un bon exemple. Ce modèle était propulsé par un moteur « caoutchouc » : tournée sur elle-même et relâchée ensuite, une bande en caoutchouc entraîne une hélice. Le Planophore a été présenté au Jardin des Tuileries en 1871 devant des représentants de la Société aéronautique de France comme un "aéroplane automoteur".



³ Officier de marine

⁴ Ingénieur français, inventeur (1850-1880)

Ces modèles de Planophore ont permis de tester l'impact de l'empennage⁵ arrière sur la stabilité de l'engin miniature ont connu un succès commercial considérable en tant que jouets à la fin du XIXe siècle.

1890 : premier vol humain motorisé



Clément Ader⁶, de son côté, s'était inspiré des croquis de Léonard de Vinci pour tracer ses plans de construction et avait pris comme patron les ailes d'un squelette de chauve-souris (la roussette). Après avoir étudié, dessiné et disséqué une bonne centaine de chauves-souris, il conçoit son premier aéroplane, baptisé Éole.

Cet engin fait 6m de long, 14m d'envergure et 200kg. Ses ailes sont en bois creux, recouvertes d'une membrane de toile de lin fixée par plus de 6000 boutons. Les 4 pales de l'hélice sont construites en bambou et ressemblent à de grandes ailes d'oiseaux.

Concernant le moteur, il lui fallait le poids le plus faible possible sans compromettre la solidité de l'appareil, et avec les meilleures performances en consommation et en souplesse. N'ayant pas d'atelier, il s'adresse en 1882 à un artisan spécialisé pour le construire. Il faudra un peu plus de deux ans pour le finir. Ader va louer un local pour y construire son moteur ainsi que l'Éole.

L'Éole ressemblant fortement à une chauve-souris, elle ne possède pas d'empennage, qui aurait assuré plus de stabilité.

En 1890 Clément Ader dépose un brevet pour un « *appareil ailé pour la navigation aérienne, dit avion* » (à partir du mot « aviation » (du latin *avis*, oiseau, et *actio*, action).

Quelques mois plus tard, l'avion s'élance sur une piste de 200m construite pour cela dans le parc du château d'Armainville, et s'élève à 20cm du sol pendant une 50aine de mètres.

Pour la première fois de l'Histoire de l'humanité, un appareil piloté décolle de lui-même et se maintient dans les airs pendant un temps court mais significatif ! Cet exploit n'a jamais été homologué (peut être par un souci de secret industriel...).

De l'autre côté de l'Atlantique, les frères Wright continuaient de perfectionner leur planeur et en 1903, ils construisirent une machine dénommée Flyer I. Le 17 décembre 1903, Orville Wright décolle en public et vole 12 secondes sur 36 m. Wilbur Wright, au quatrième vol, parcourt 260 m en 59 secondes. Ils enregistrent leur premier vol en 1903. Pour la première fois, deux hommes effectuent plusieurs vols contrôlés à bord d'un aéroplane à moteur. C'est une grande page qui se tourne.



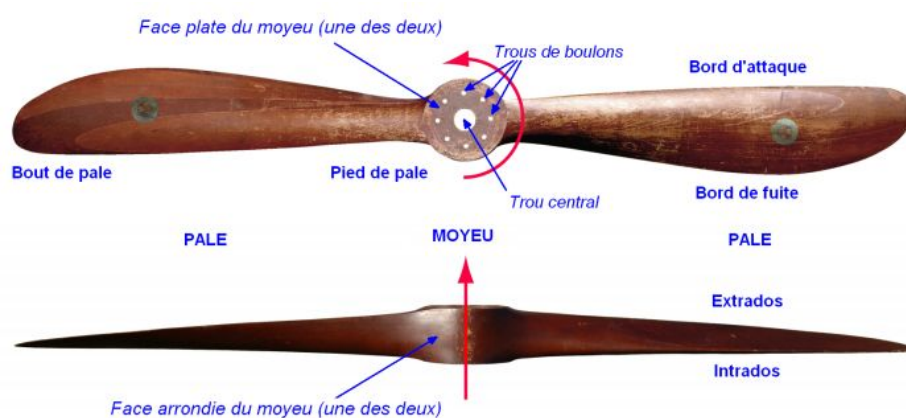
⁵ Plans fixes et mobiles, qui assurent la stabilité de l'aéronef autour de l'axe de lacet et de l'axe de tangage

⁶ Ingénieur aux Chemins de fer du Midi (1841-1925)

Les hélices fonctionnent sur le principe de la propulsion en utilisant la rotation de pales pour créer un flux d'air dirigé vers l'arrière, ce qui génère une force de poussée vers l'avant et propulse ainsi l'avion dans les airs.

Les hélices conçues par les frères Wright convertissaient le mouvement de rotation généré par le moteur en un mouvement vers l'avant. Autrement dit, l'hélice générait une poussée. Le moteur permettait à l'aéronef d'avancer à une plus grande vitesse, ce qui permettait à l'air de circuler plus rapidement par-dessus les ailes. Le flux rapide de l'air créait une portance vers le haut qui compensait le poids de l'aéronef et le maintenait au-dessus du sol. Les frères Wright ont conclu que le moteur faisait avancer l'avion, tandis que les ailes le faisait monter dans les airs.

Le principe de fonctionnement des hélices est aussi basé sur la troisième loi du mouvement de Newton : pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée. Lorsque les pales de l'hélice tournent, elles agissent comme des ailes inclinées, créant une différence de pression entre la face convexe (supérieure ou extradados) et la face concave (inférieure ou intrados) de chaque pale. Cette différence de pression engendre une force aérodynamique, appelée portance, qui pousse l'avion dans la direction opposée à laquelle les pales tournent.



7 Premiers records

7.1 Traversée de la Manche

Grâce aux connaissances acquises jusqu'alors et aux progrès techniques qui ont permis de construire des moteurs de plus en plus puissants et légers, les pilotes ont pu commencer à sortir des aérodromes. C'est le cas de Louis Blériot⁷. Il a conçu et fabriqué plusieurs prototypes d'avions, cherchant à améliorer la stabilité, la puissance et la maniabilité de ses créations.

Le 25 juillet 1909, c'est à bord de son avion Blériot XI qu'il a réussi son vol historique en traversant la Manche, une étendue d'eau de 35 kilomètres séparant la France de l'Angleterre. Il a décollé de Sangatte, près de Calais, et s'est posé avec succès à Douvres, en Angleterre, environ 37 minutes plus tard. Cette



⁷ Ingénieur électrique (1872-1936)

réalisation audacieuse a fait de Blériot une célébrité internationale et a démontré le potentiel de l'aviation pour les voyages transcontinentaux.

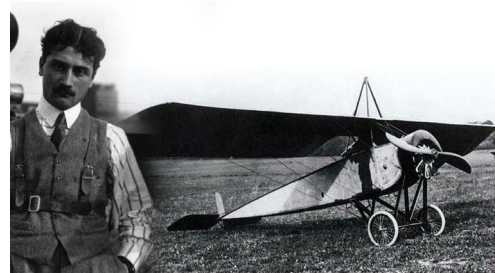
7.2 Les records d'altitude

En 1911, Roland Garros⁸ fait construire par Louis Blériot un appareil où tout a été allégé au maximum. Il décolle de la plage de Cancale le 4 Septembre, pour atteindre 3 950 m, battant de 500 m le précédent record détenu par le capitaine Félix.

1 an après son premier record, il retente l'expérience à Houlgate avec un Blériot du même type mais un peu plus puissant, il gagne 1 000 m sur son précédent record en atteignant les 4.960 m avec une bouteille d'oxygène.

Quelques mois plus tard, Roland Garros embarque avec son avion et ses mécaniciens sur l'avion nommé Tafna, à destination de Tunis.

- Première tentative : le 8 décembre : vaincu par le froid, il atteint péniblement 4 500 m.
- Seconde tentative : le 9 décembre, Garros doit abandonner au bord de l'évanouissement.
- Troisième tentative : le 11 décembre 1912, le record tombe : Garros a atteint 5 610 m



Dix ans après son décès, en 1928, le stade de tennis est baptisé à son nom, à la demande d'Emile Lesueur, président du Stade Français, ancien camarade de promo HEC de Roland Garros (qui n'était pas particulièrement passionné de tennis).

Les passionnés d'aviation ne se sont donc pas arrêtés à la maîtrise du vol. Leur volonté était de repousser de plus en plus les limites de performances, qu'elles soient en termes de hauteur, distance, durée de vol,...

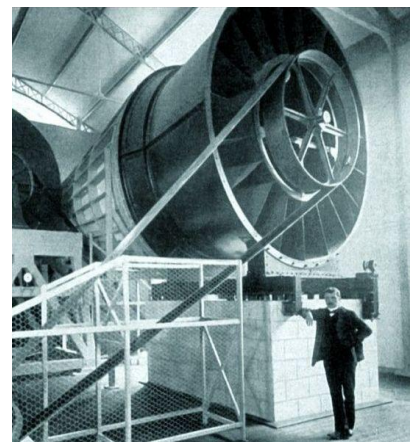
Pour assouvir cette soif d'aller toujours plus vite et toujours plus haut, ces pionniers avaient besoin d'améliorations supplémentaires (aérodynamique, solidité des matériaux, légèreté, etc.)

8 Pour aller plus loin...

8.1 À la recherche de l'angle d'attaque idéal

Grâce aux différentes découvertes des pionniers de l'aviation, nous savons que l'angle d'incidence d'une aile par rapport au vent relatif peut créer une portance suffisante pour soulever des centaines de kilogrammes.

Les inventions et découvertes ne se sont pas arrêtées pendant le 20ème siècle, et notamment grâce aux études menées dans des souffleries. Après avoir fait des expériences sur la résistance de l'air en faisant chuter des objets du second étage de la Tour Eiffel, Gustave Eiffel fit construire une soufflerie en 1905 au Champ de Mars, puis une autre plus puissante à Auteuil (ci-contre), toujours visible aujourd'hui au « Laboratoire Aérodynamique Eiffel ».

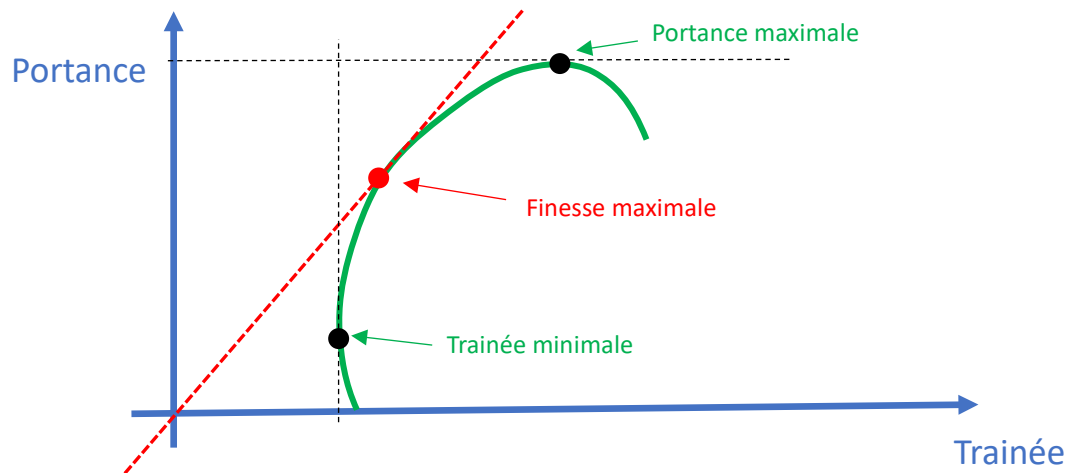


⁸ Aviateur français (1888-1918) – C'est en 1928 que le fameux stade portera son nom, en tant que héros de Guerre.

Le but à ce moment-là pour Gustave Eiffel est de trouver un modèle d'aile d'avion qui permet de générer le plus de portance possible, en limitant au maximum la traînée.

Dans son ouvrage « *La résistance de l'air et l'aviation* » de 1910, il décrit une courbe tracée point par point qui fait correspondre les coefficients de traînée et de portance déterminés expérimentalement pour différents angles d'incidence. Il nomme cette courbe la polaire d'une aile.

Elle permet de déterminer les caractéristiques d'un profil d'aile en particulier (chaque profil aura sa propre courbe).



Il décrit le rapport entre la portance et la traînée par le terme de finesse. Celle-ci se calcule de la manière suivante :

$$F = \text{portance} / \text{traînée}$$

Grâce à cette courbe verte, Eiffel va en déduire qu'il y a un point précis qui indique le rapport portance/trainée le plus efficace (portance maximale avec une traînée minimale). Ce point est donné par une droite (rouge) qui représente la tangente de la courbe qui passe par 0. Il nommera ce point « la finesse maximale ».

Ce point précis est atteint lorsque l'angle d'attaque des ailes est de 6° par rapport au vent.

Si un avion perd l'usage de ses moteurs, le pilote va alors incliner l'engin de manière à ce que cet angle de 6° puisse être respecté, pour avoir un vol le plus efficace et ainsi aller le plus loin possible si besoin.

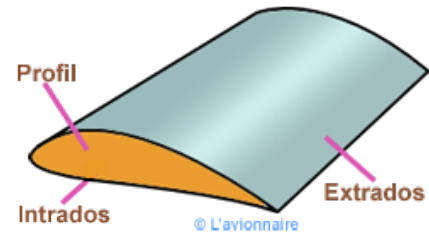
Cette courbe ne représente que les caractéristiques d'une aile, mais comme celle-ci est fixée à l'avion, de nouvelles traînées liées au fuselage, aux moteurs, etc. vont s'ajouter. Des calculs permettent aujourd'hui d'intégrer ces différents paramètres à ce modèle pour plus de précision.

8.2 Évolution de la forme des ailes

Les travaux de Gustave Eiffel (entre autres) ont aussi permis de tester différents profils d'ailes et calculer le coefficient de portance pour chacune d'entre elles.

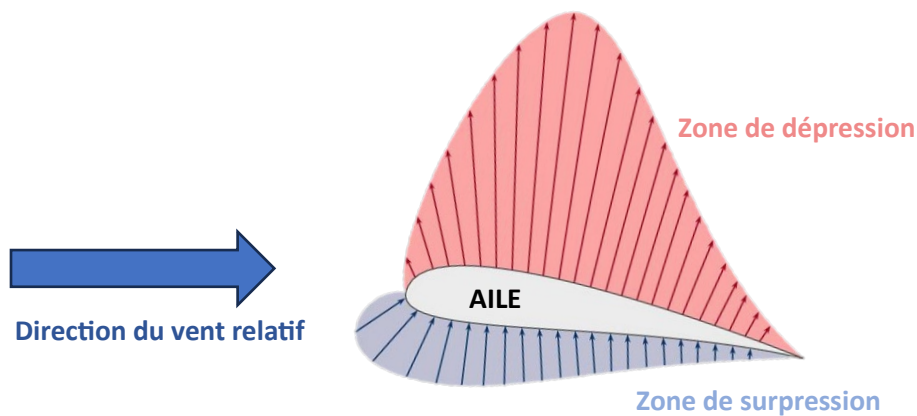
Il s'est avéré que lorsque le dessus de l'aile (l'extrados) est plus arrondi que le dessous (l'intrados), la portance s'améliore encore.

D'ailleurs si nous découpons une aile d'avion moderne dans sa largeur, nous nous apercevons qu'elle n'est pas symétrique mais que l'extrados est plus bombé que l'intrados.



Pourquoi cette forme de profil d'aile génère-t-il plus de portance ?

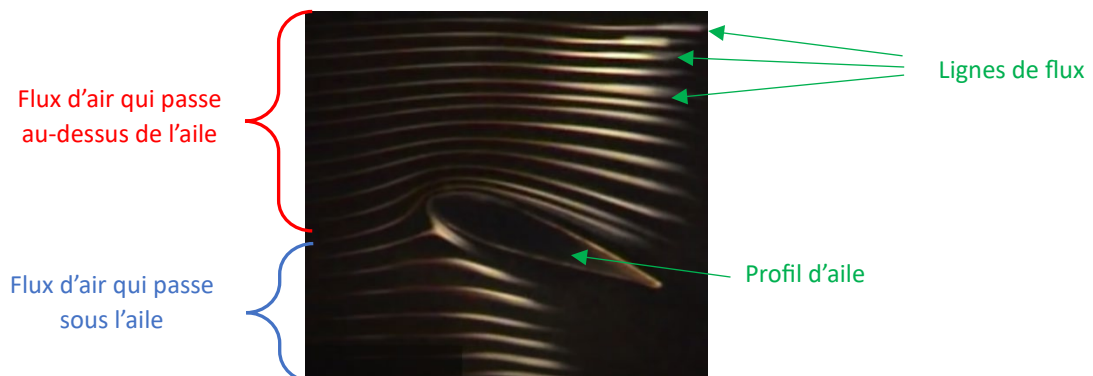
L'air qui circule autour des ailes d'avant en arrière va plus vite à l'extrados qu'à l'intrados. Cette augmentation de la vitesse crée une zone de basse pression au-dessus de l'aile alors que les molécules d'air qui frappent l'intrados créent une surpression.



Cette différence de pression participe, (avec le phénomène d'action-réaction vu précédemment) à la portance.

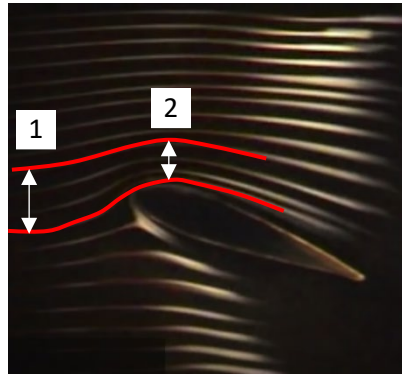
D'où vient cette dépression au-dessus de l'extrados ?

Sur la photographie ci-dessous, issue d'expériences réalisées en soufflerie, nous pouvons observer plusieurs phénomènes :



- 1- L'air qui contourne l'aile est bien dévié vers le bas.
- 2- Les courtes impulsions de fumée lâchée dans les flux d'air montrent bien que l'air qui passe sur l'extrados se déplace bien plus vite que celui qui tape l'intrados.

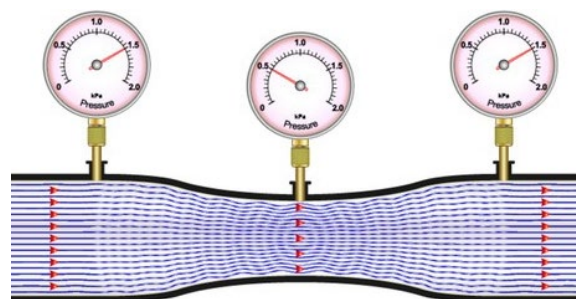
- 3- Les lignes de flux se rapprochent les unes des autres au-dessus du bord d'attaque de l'aile. Elles sont comme « compressées » par les flux d'air qui passent au-dessus d'elles et qui ne sont pas déviées par l'aile. Sur le schéma ci-dessous nous pouvons observer que les lignes de flux d'air qui passent par la section 1 avant de rencontrer le profil d'aile, se retrouvent à devoir passer par la section 2, plus réduite.



Ce 3^{ème} point pourrait expliquer pourquoi les molécules d'air sont accélérées à cet endroit-là.

- ⇒ Cette explication serait liée à l'effet Venturi selon lequel un écoulement de fluide qui passe dans une section d'écoulement plus étroite subit une accélération et donc une dépression. Nous pouvons observer ce phénomène lorsque l'on pince l'extrémité d'un tuyau d'arrosage : l'eau passe d'une section de tuyau normale à une section réduite par la pression de nos doigts. La conséquence est que le flux d'eau est accéléré et l'eau qui en sort est projetée plus loin que si on ne pince pas le bout de ce tuyau.

L'une des représentations les plus connues de cet effet est illustrée de la façon suivante : un conduit qui se rétrécit, puis qui retrouve sa forme initiale (voir ci-dessous). Les 3 baromètres montrent que la pression est réduite lorsque le flux d'eau accélère au centre (1.5 hPa dans la section « normale » et 0.5hPa au centre, dans la section rétrécie)



Grâce à ces connaissances, nous découvrons que l'avion n'est donc pas « porté » par l'air mais plutôt aspiré vers le haut. La portance pourrait donc plutôt s'appeler « l'aspiration ». Une aile d'avion est 3 fois plus « aspirée » vers le haut par l'air qui passe au-dessus que poussée par l'air qui passe au-dessous ! C'est donc principalement cet air du dessus qui permet aux avions de voler !

Finalement, le vol des oiseaux était bien la clé pour comprendre comment nous pourrions nous élever dans les airs. Seulement, ce n'est pas le vol battu qu'il fallait prendre en exemple mais le vol plané.

L'Histoire de l'aviation nous montre que l'avion moderne ne nous vient pas d'un seul homme, mais de beaucoup de personnes passionnées. Grâce à toutes ces personnes désireuses de partager leurs découvertes, nous pouvons aujourd'hui réaliser le rêve d'hier : s'envoler, planer et atterrir de manière sécurisée.

9 Évolutions modernes de l'aviation

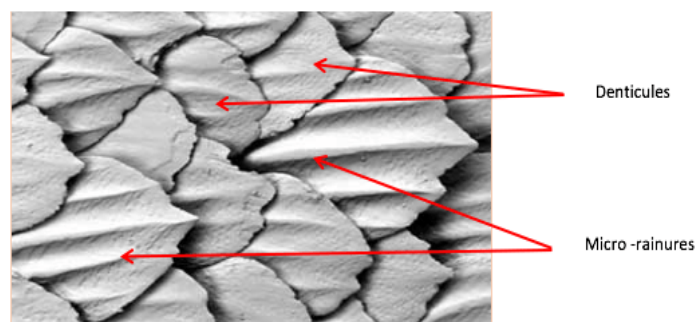
Les défis humains et technologiques en aviation sont toujours d'actualité. Des ingénieurs du monde entier continuent de développer de nouvelles formes d'ailes, de fuselages, d'équipements... permettant d'augmenter l'efficacité du vol. Les recherches récentes se sont notamment portées sur l'allègement des avions, l'augmentation de la portance, la suppression éventuelle du carburant, etc.

Voilà ci-dessous quelques-unes de ces améliorations apportées récemment :

9.1 Aeroshark

La peau de requin est connue depuis plus d'un demi-siècle pour sa structure particulière : la présence de denticules (des excroissances cutanées en dentine, présentes chez les chondrichthyens (raie, requin..), parfois imbriquées comme des écailles).

La présence en nombre de ces denticules permet de maintenir très près du corps du requin une pellicule d'eau extrêmement fine. L'eau est alors contrainte de passer par des petits sillons ou micro rainures creusés dans les denticules.



L'eau s'écoule alors de manière laminaire, c'est-à-dire dans le même sens, la même direction, ce qui a pour conséquence de supprimer la plupart des frottements et les turbulences qui font partie des facteurs limitant le plus la vitesse des requins. Ainsi la résistance exercée par l'eau est diminuée (jusqu'à 8% par rapport à une surface lisse ! ⁹).

⇒ C'est ce qu'on appelle « **l'effet Riblet** »

Cette propriété fascine depuis 25 ans les industries militaires, aérospatiales et aéronautiques, mais aussi la construction navale, la filière éolienne et les équipementiers sportifs.

La technologie AeroSHARK est une innovation inspirée par la structure de la peau de requin. Elle vise à améliorer l'efficacité énergétique des avions en réduisant la traînée aérodynamique, ce qui permet d'économiser du carburant et de réduire les émissions de CO₂.

⁹ [https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/s1296-2139\(01\)01125-3](https://sci-hub.hkvisa.net/10.1016/s1296-2139(01)01125-3)

L'AeroSHARK consiste en un film de surface appliqué sur le plus de surface possibles de l'avion. Ce film imite les denticules de la peau des requins. En appliquant cette même structure à la surface des avions, l'AeroSHARK permet de réduire la traînée aérodynamique et d'améliorer l'efficacité globale de l'aéronef.

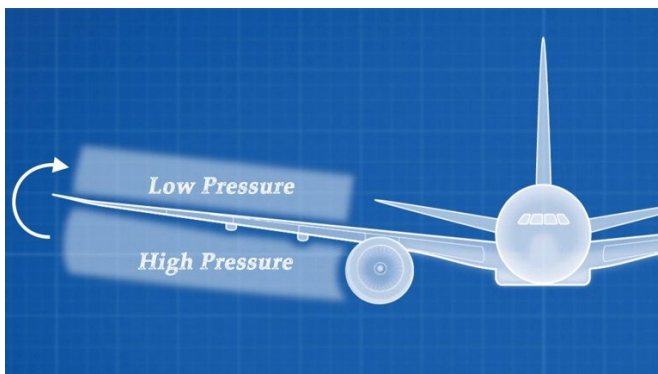


Lufthansa Technik estime que cette technologie permet d'économiser environ 1% de carburant sur les avions de la flotte de Lufthansa Cargo. Ce qui peut représenter une économie annuelle de plus de 4000 tonnes de kérozène et près de 13 000 tonnes d'émissions de CO₂ / an.

9.2 Les winglet

Dans les années 1970, les ingénieurs et techniciens se heurtèrent à une difficulté toute particulière dans le vol de leurs avions : le courant aérien se rompt à la fin des ailes, créant des tourbillons qui augmentent la traînée. Le flux de l'intrados, en surpression, passe sur le flux de l'extrados, en dépression, du fait des écarts de pression, et entraîne la formation d'un tourbillon dit « marginal ». Ce dernier peut être rendu visible grâce à de la fumée colorée par exemple (image ci-dessous à droite).

Ce dernier augmente non seulement la traînée de l'avion mais cause de la turbulence derrière l'appareil qui persiste sur de longues distances. Il est particulièrement dangereux d'entrer dans ce tourbillon derrière un avion gros porteur, ce qui conduit à des temps et des distances de séparation minimales dans la gestion des mouvements d'avions.



Des règles imposent donc aux petits avions de ne pas passer à moins de 3 à 5 minutes derrière un gros avion !

L'ingénieur Américain Richard Whitcomb, sous contrat avec la NASA, avait remarqué que chez les grands oiseaux planeurs, comme les aigles, les cigognes et les buses les grandes plumes aux extrémités des ailes se recourbent vers le haut en vol.

La mise en condition de vol de la cigogne dans un tunnel aérodynamique révéla le rôle de ces rémiges : plus le courant est fort, plus l'extrémité des ailes s'écarte, et se courbe. Cela fait diminuer la résistance aérodynamique.

Cet ingénieur et son équipe commencèrent alors à tester cette forme sur les extrémités des ailes de la version militaire du Boeing 707 : le KC-135.

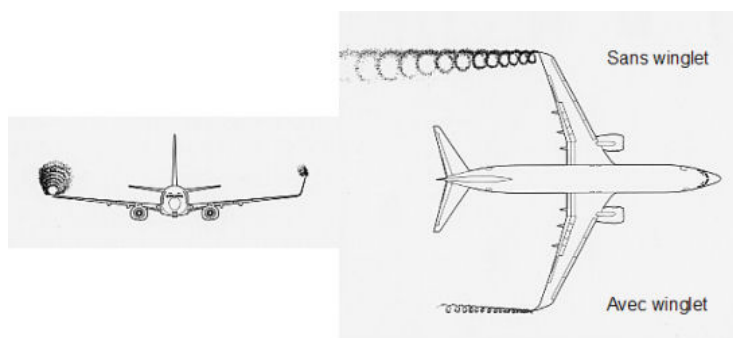


Le dispositif fut testé en vol en Californie en 1977. Les tests ont démontré une augmentation de 7% de la finesse augmentant le rayon d'action de l'avion de 200km, et 2 à 3% d'économie de carburant.

Cette forme particulière porte le nom anglais de « winglet » (le terme français est « ailerette », mais étant arrivé vingt ans plus tard que « winglet », il n'est pratiquement jamais utilisé).



Aujourd'hui, les grands fabricants d'avions (Airbus, Dassault, Boeing...) ont équipé la plupart de leurs modèles de ces winglets.



9.3 Voler grâce au soleil

L'un des projets d'avion solaire le plus connu est le Solar Impulse, un avion solaire développé par Bertrand Piccard et André Borschberg. En 2015, l'avion Solar Impulse 2 a entrepris un voyage autour du monde en utilisant uniquement l'énergie solaire pour alimenter ses moteurs électriques. L'avion a réalisé plusieurs étapes et a finalement complété le tour du monde en 2016. Ce tour du monde ne s'est pas fait en continu, mais plutôt en effectuant plusieurs étapes, avec des arrêts pour permettre à l'équipage de se reposer et d'effectuer des réparations si nécessaire.

La réalisation d'un tour du monde en avion solaire complet représente un défi technique majeur en raison des limitations actuelles en termes d'énergie solaire disponible, de capacité des batteries et de performances aéronautiques. Cependant, avec les avancées continues dans le domaine des technologies solaires et des batteries, il est possible qu'un tel exploit soit réalisé à l'avenir.

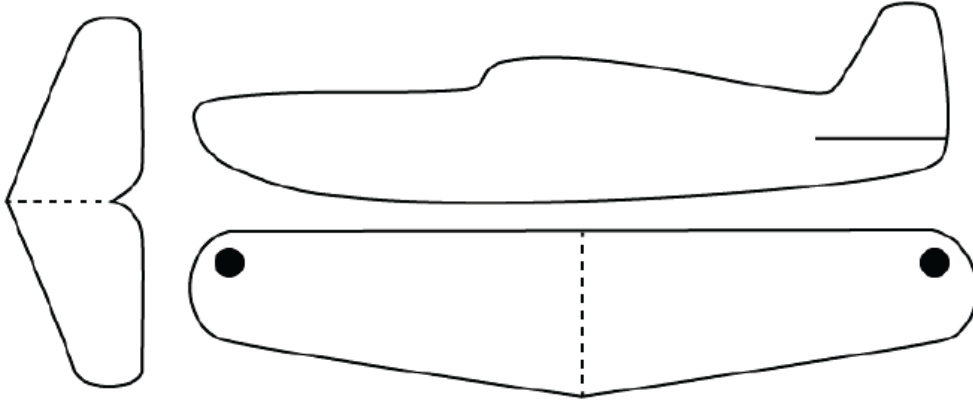
Depuis 2014, Raphael Domjan a lancé un projet nommé « SolarStratos ». Il s'agit d'un avion solaire construit par son équipe dans le but de réaliser un record d'altitude. La mission SolarStratos devrait permettre à Raphaël Domjan d'atteindre la stratosphère, altitude jamais réalisée avec un avion à propulsion classique.

À terme, Raphaël Domjan et l'équipe de SolarStratos espèrent que les technologies mises au point lors de la mission stratosphérique seront utiles, notamment pour le développement de drones solaires stratosphériques.





Modèle d'Avion





L'Espace des sciences de Rennes vous transporte dans les sciences à travers nos expositions, ateliers, visites, conférences et événements. Créé en 1984, l'Espace des sciences est un terrain d'expériences et d'innovations dans le domaine de la diffusion de la culture scientifique. Depuis, l'Espace des sciences a poursuivi son développement. Ses équipes se sont diversifiées et professionnalisées, sa programmation a séduit un public de plus en plus large.

En 2006, il a rejoint l'établissement des Champs Libres.

Accueillant plus de 200 000 visiteurs par an, c'est l'un des centres de sciences les plus visités en région.

Le contenu de ce document est protégé par le droit d'auteur. Toute utilisation non strictement personnelle ne peut être faite sans l'accord de l'Espace des sciences.

Les copies ou reproductions sont strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective.

Les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration sont autorisées avec référence à la source du document.