

(a) Becs



(b) Volets

Figure 30 – Les dispositifs hypersustentateurs sur un avion de ligne



(a) Aérofreins sur planeur



(b) Volets spoilers sur avion de ligne

Figure 31 – Les dispositifs hyposustentateurs

5. Structures et matériaux

5.1. Généralités

L'étude de la structure et des matériaux qui composent un aéronef est directement liée aux **forces** qui s'y exercent. Sans entrer dans une définition complexe, une force modélise, en physique, une action mécanique exercée sur un objet ou une partie d'un objet par un autre objet ou partie d'objet. L'ensemble des forces appliquées à un objet a pour effet de lui communiquer une accélération ou de le déformer.

On « dessine » généralement les forces par des flèches (ce sera le cas dans les illustrations de cette partie). Pour une force donnée, la flèche a :

- une **direction** : l'orientation de la force ;
- un **sens** : vers quelle direction la force agit ;
- une **longueur** (ou norme) : l'intensité de la force ;
- un **départ** : le point d'application c'est-à-dire l'endroit où la force s'applique.

L'intérêt de cette représentation est de pouvoir ajouter facilement les forces : on dessine les flèches les unes derrières les autres et on a la force totale qui s'exerce sur l'objet considéré :

Remarque : On parle en réalité de vecteur qui est représenté par une flèche. Cette notion sera vue au lycée et est inhérente à la représentation de force. Dans l'enseignement supérieur scientifique, les espaces de vecteurs (ou espaces

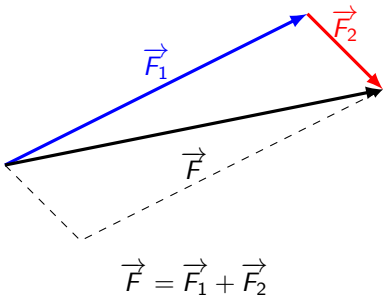


Figure 32 – Parallélogramme des forces

vectoriels) jouent un rôle très important dans la compréhension de phénomènes physiques.

Les principales forces qui s'exercent sur un aéronefs sont :

- le **poids** de l'aéronef (qui est la somme des poids des différents éléments de celui-ci) ;
- la **portance** de la voilure ;
- la**trainée** provenant du frottement de l'air sur l'ensemble de l'aéronef ;
- la **traction ou poussée** exercée par le groupe motopropulseur.

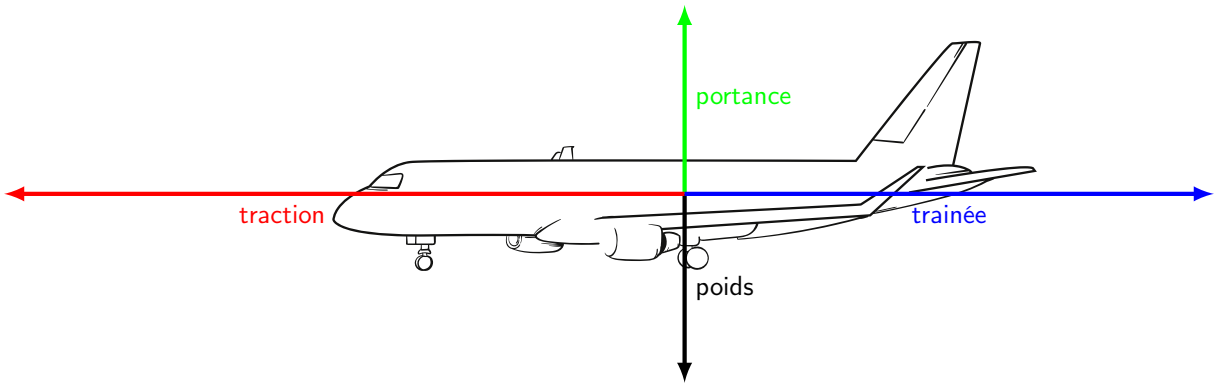


Figure 33 – Forces s'exerçant sur un avion

Ces différentes forces nécessitent des choix quant aux matériaux qui constituent les aéronefs : compromis entre poids et résistance, prise en compte des **contraintes** qui s'exercent sur toute la structure, possibilité de lier les différentes pièces entre elles notamment.

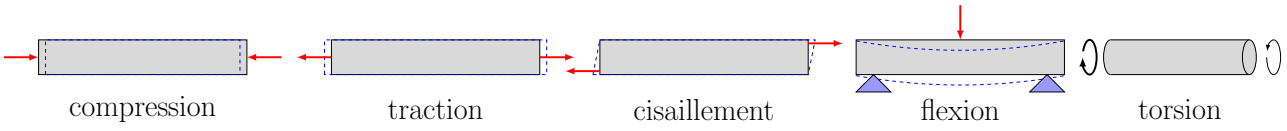


Figure 34 – Contraintes sur un matériau

Les contraintes dépendent de la surface sur laquelle s'exerce une force d'intensité F donnée : plus la surface S est grande, moins la contrainte σ est importante. De façon précise, la formule qui lie ces données est la suivante : $\sigma = F/S$. Ces contraintes peuvent s'ajouter les unes aux autres.

5.2. Matériaux de construction

Les principaux matériaux sont le bois et la toile, les métaux, les résines, les tissus de fibres et les composites. On peut résumer leurs avantages et inconvénients dans le tableau suivant :

Nom	**Précisions**	**Pièces**	**Avantages**	Inconvénients
Bois				
Toile				
Résines				
Métaux				
Fibres				
Composites				

La présentation du tableau est assez chronologique par rapport à l'histoire de l'aviation : plus la ligne est basse, plus le matériau est récent.

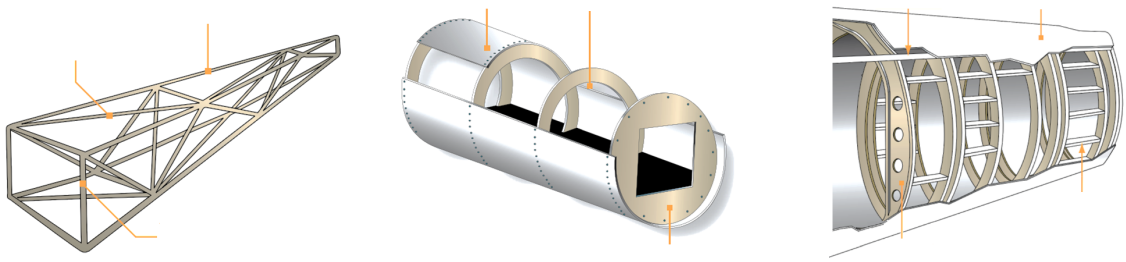
5.3. Principes de construction

De façon générale, le rapport entre la masse et la résistance des matériaux qui composent un aéronef est au cœur des préoccupations lors de la conception d'un tel objet. Élever un aéronef léger sera plus simple mais pourra-t-il être suffisamment résistant pour l'ensemble des mouvements ?

5.3.1. Fuselage

Les fuselages sont conçus selon trois types de structures générales :

- les structures en **treillis** constituées de traverses et de longerons voire de câbles sur lesquelles est attaché un revêtement souple ne participant pas à la résistance du fuselage (on dit que le revêtement est non travaillant) ;
- les structures **monocoques** pour lesquelles le revêtement est attaché (par des vis ou des rivets) à des cadres participants à l'absorption des efforts et à la résistance du fuselage (on dit que le revêtement est travaillant) ;
- les structures **semi-monocoques** mixte entre les deux structures.



(a) Treillis **(b)** Monocoque **(c)** Semi-monocoque

Figure 35 – Types de fuselages

5.3.2. Voilure et empennage

On retrouve le même type de structure adapté à la forme des voilures et des empennages comme sur l'aile suivante :

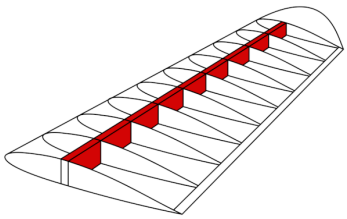


Figure 36 – Vue interne d'une aile

Les contraintes sur une aile sont nombreuses : la **portance** a tendance à créer une flexion du longeron vers le haut imposant une compression à l'extrados et une traction à l'intrados.

Les **nervures** peuvent être des tôles percées, ou des structures en treillis permettant notamment le passage des réservoirs de carburant.

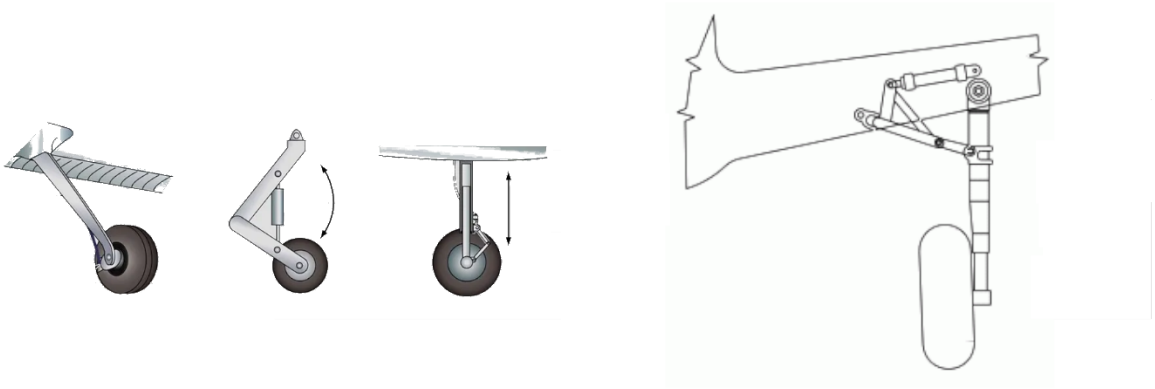
Remarque : *Les parties mobiles (ailerons, gouvernes, compensateurs) sont de nature analogue aux structures de cette partie.*

5.3.3. Atterrisseurs

Les atterrisseurs, quel que soit leur type, doivent supporter le poids de l'avion dans les différentes phases du vol (le roulage notamment) mais également absorber la majeure partie du choc lors de l'atterrissage : ils **amortissent** celui-ci. L'amortissement peut provenir directement du matériau utilisé ou être un élément à part entière. Les systèmes de freinage, intégrés à ceux-ci sont primordiaux pour arrêter la course de l'aéronef une fois les roues au sol. Les aéronefs performants possèdent des trains rentrants pour diminuer la trainée.

L'amortisseur le plus courant est **oléopneumatique** : composé d'une cavité contenant généralement de l'huile, l'écoulement plus lent de celle-ci permet d'amortir le choc.

Nous présentons ici certains systèmes des atterrisseurs à roues :



(a) Types de trains **(b)** Train rentrant

Figure 37 – Conception des trains d'atterrissage

Les freins sont généralement à friction : un disque métallique solidaire des roues est pincé entre deux pièces pour freiner. Le freinage peut être une phase délicate car il suppose que les roues adhérent au sol. S'il reste de la portance à l'atterrissage, qui peut être liée à une vitesse trop importante, l'avion n'a pas un contact suffisamment important avec la piste pour freiner. L'annulation de la portance est fondamentale pour que les systèmes de freinage demeurent efficaces.

6. Groupe motopropulseur

Le groupe motopropulseur comprend l'ensemble des éléments permettant la mise en mouvement d'un aérodyne selon différents circuits comme :

- le circuit **carburant** assurant la circulation de la source d'énergie vers le moteur ;
- le circuit **électrique** qui permet le fonctionnement de certains éléments de motorisation ;
- le circuit **de motorisation** qui transforme le carburant en un travail prêt à être transmis au système de propulsion ;
- le circuit **de lubrification** qui permet le mouvement de pièces (notamment tournantes) en minimisant les frottements ;
- le circuit **de refroidissement** qui assure une température optimale du moteur en évitant notamment une usure prématurée ;
- le circuit **de transmission** qui transmet le mouvement assuré par le moteur vers les systèmes propulsifs ;
- le circuit **de propulsion** qui peut être constitué d'une simple hélice ou de l'éjection de gaz voire de rotors.

Dans la suite, on abordera seulement certains éléments des circuits précédents.

6.1. Motorisation à pistons

La plupart des moteurs à pistons sont généralement de moteurs à quatre temps. Pour pouvoir fonctionner, les moteurs quatre temps comportent un certain nombre d'éléments différents, notamment :

- les **soupapes** d'admission et d'échappement, des obturateurs mobiles ;
- les **bougies** d'allumage, qui initient la combustion en enflammant le mélange d'air et de carburant ;
- les **pistons**, qui compriment les gaz avant la combustion puis qui transforment la force de celle-ci en un mouvement ;
- les **bielles**, qui sont rattachées aux pistons à une extrémité et au vilebrequin de l'autre, transformant le mouvement linéaire du piston en un mouvement rotatif ;
- le **vilebrequin**, qui permet de distribuer entre les différents cylindres chacun des temps du moteur et de transmettre le mouvement au système de propulsion (par exemple une hélice) ;
- la **chambre de combustion**, l'espace hermétique où le mélange d'air et de carburant est comprimé avant de s'enflammer.

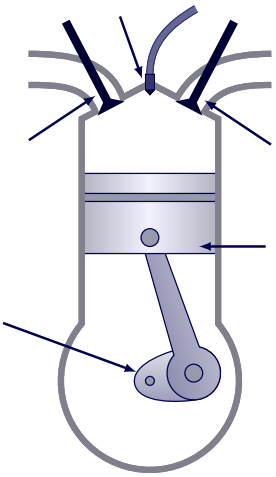


Figure 38 – Moteur à piston

Les phases successives du cycle d'un tel moteur sont les suivantes :

1. **l'admission** d'un mélange d'air et de carburant pulvérisé ;
2. **la compression** du mélange : fermeture de la soupape d'admission, puis remontée du piston qui comprime le mélange ;
3. **la combustion** et détente ce qui repousse le piston, initiant le mouvement ;
4. **l'échappement** : ouverture de la soupape d'échappement et remontée du piston qui chasse les gaz brûlés.

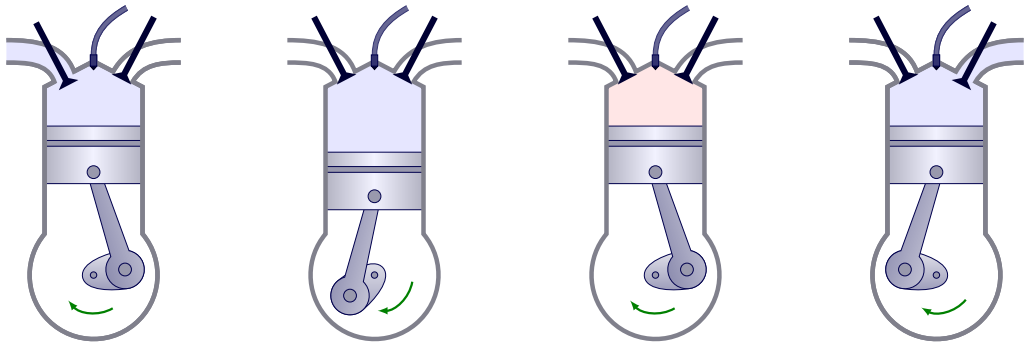


Figure 39 – Cycle d'un moteur à quatre temps

Les pistons peuvent être placés de façons diverses selon l'aéronef considéré :

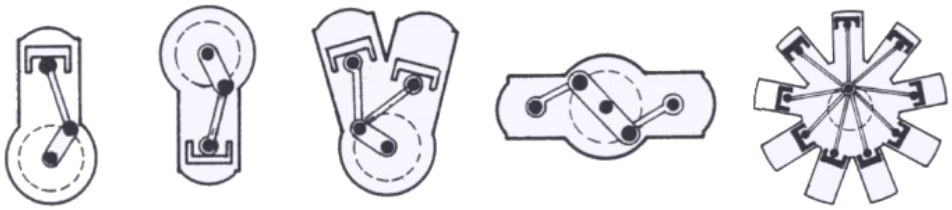


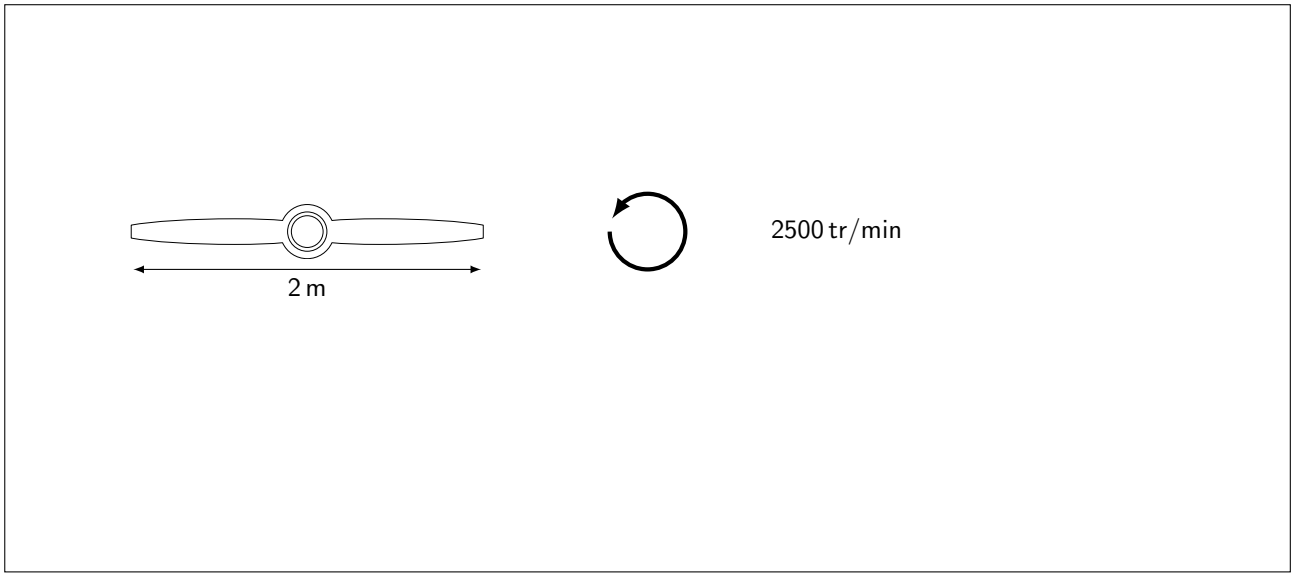
Figure 40 – Disposition des cylindres dans un moteur à pistons

L'alimentation en carburant est effectuée par une **pompe mécanique** qui est doublée par un pompe électrique de secours. Le mélange entre l'air et l'essence est assurée par un **carburateur** ou un système d'**injection**. La proportion entre l'air et l'essence variant avec l'altitude, une commande de **mélange** permet au pilote de régler cette proportion en vol. Le système d'allumage constitué des **magnétos** est toujours doublé en cas de panne.

6.2. Hélice

Une **hélice** tourne grâce au mouvement rotatif imprimé par un moteur et qui, en accélérant vers l'arrière l'air situé devant elle, créé la traction ou la poussée de l'avion. Elle comporte au moins deux pales (mais parfois bien plus). Elle est généralement fabriquée en **bois**, en **alliage d'aluminium** ou en **composite**. Elle est généralement placée à l'avant de l'aéronef créant une traction mais peu aussi être placée à l'arrière pour créer une poussée.

La capacité à mettre en mouvement l'aéronef dépend de la puissance du moteur appliquée et de la vitesse de rotation de l'hélice qui sont en partie liés. Deux hélices tournant à la même vitesse mais avec des moteurs délivrant une puissance différente ne propulseront pas l'aéronef avec la même efficacité. La plupart du temps, les vitesses de rotation en croisière des hélices se situent entre 2000 tr/min pour les plus lourdes et 5000 tr/min pour les plus légères. Calculons la vitesse en km/h d'un point situé situé à l'extrémité d'une hélice de 2 m tournant à 2500 tr/min :



On peut définir le pas à l'aide du schéma suivant :

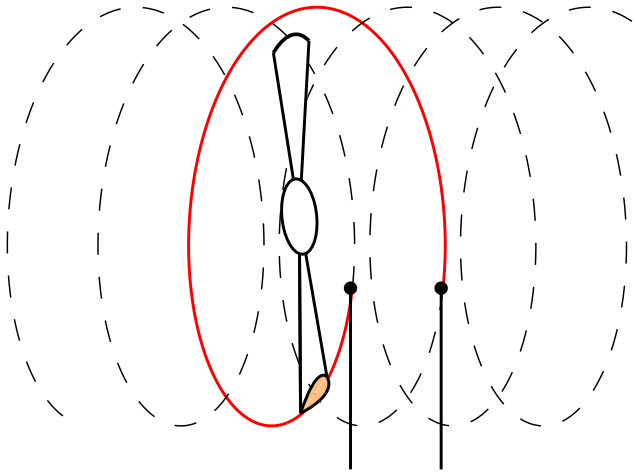


Figure 41 – Pas d'une hélice

Avec le calcul précédent, la vitesse de déplacement d'un point de l'hélice dans l'air est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de l'axe de rotation. Afin de répartir correctement la force de traction, l'hélice est vrillée.

D'une certaine façon, la coupe d'une hélice est semblable à la coupe d'une **aile** mais possède d'autres particularités : son plan de coupe n'est pas le même tout au long de l'hélice.

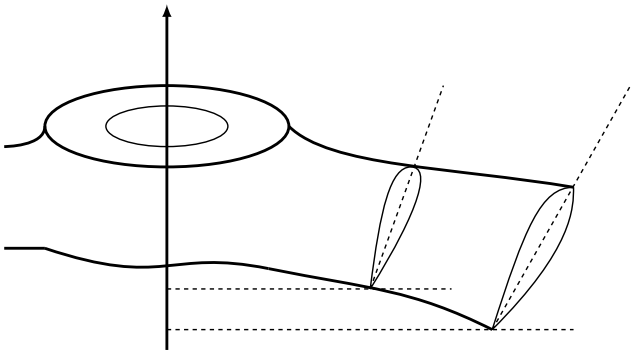


Figure 42 – Vrillage d'une hélice

En réalité, l'hélice n'est pas totalement efficace et elle glisse dans l'air ambiant. Ainsi, on peut aussi définir le pas réel lors du déplacement de l'hélice. On a ainsi une différence entre le pas « géométrique » de l'hélice et son pas réel. Le pas réel inclut donc le glissement de l'hélice dans l'air.

Les hélices à **petit pas** glissent moins dans l'air et sont donc adaptées au décollage mais donneront des vitesses plus faibles en croisière.

Les hélices à **grand pas** ont plus d'inertie lors de l'application de la traction au décollage mais donneront des vitesses plus élevées en croisière.

Ainsi, sur certaines avions, il est possible d'agir en vol sur le pas de l'hélice : on parle alors de **pas variable ou de calage variable variable**.

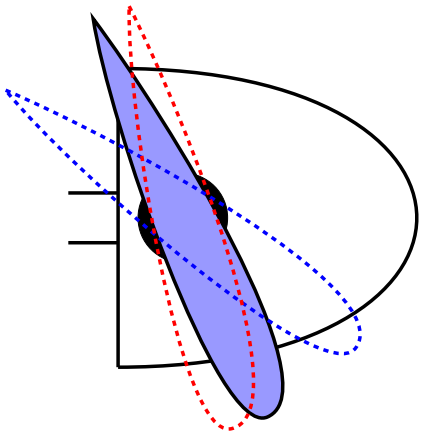


Figure 43 – Vue de profil d'une hélice à pas variable

Contrairement à une hélice à pas fixe, une telle hélice garde une vitesse relativement constante dans une large gamme de puissance délivrée par le moteur. Le ou la pilote dispose d'une manette permettant d'agir sur le pas :

- au décollage et à l'atterrissage, on se place **plein petit pas** pour avoir une meilleure efficacité à une vitesse faible ;
- en croisière, on se place **à un pas plus grand** pour avoir une meilleure efficacité à une vitesse importante.

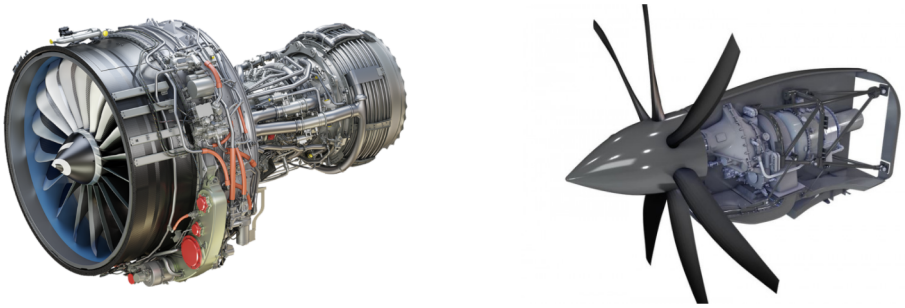
6.3. Turbomachines

Lorsque l'on gonfle un ballon, la pression de l'air à l'intérieur du ballon est supérieure à la pression de l'air à l'extérieur. Si on libère l'embouchure du ballon, alors l'air à l'intérieur du ballon va être éjecté et, par réaction, créer une force de même direction mais de sens opposé à la vitesse d'éjection.

C'est sur ce même principe que fonctionnent les turbomachine : on crée une augmentation de la pression de l'air et on l'éjecte pour :

- propulser directement l'avion avec un **turboréacteur** ;
- faire tourner une hélice ou un ensemble de rotor avec un **turbopropulseur**.

Remarque : *Pour un hélicoptère, on parle plutôt de turbomoteur. Une autre turbomachine, le statoréacteur, n'est pas étudié dans le cadre du BIA.*



(a) Turboréacteur **(b)** Turbopropulseur et hélice

Figure 44 – Exemples de turbomachines

Un **turboréacteur double flux**, comme en sont équipés la plupart des avions de ligne, fonctionne sur le principe suivant :

1. la **soufflante** en entrée joue le rôle d'une hélice en propulsant l'air en deux parties ;
2. une partie de l'air passe dans un **compresseur** constitué de roues avec des ailettes ;
3. dans la **chambre de combustion**, l'air comprimé est mélangé au carburant ;
4. l'air de la chambre de combustion est ensuite éjecté vers une **turbine** qui permet d'entrainer la soufflante en étant mélangé à l'autre flux d'air créant ainsi la propulsion.

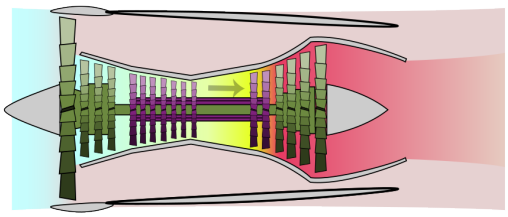


Figure 45 – Turboréacteur à double flux

Remarque : *D'autres réacteurs sont à simple flux. La soufflante entraine tout l'air entrant uniquement dans le compresseur sans séparation : il n'y a qu'un seul flux d'air.*

Un turbopropulseur est tout à fait identique à un truboréacteur simple flux à l'exception du fait que la turbine n'entraine pas uniquement la soufflante mais également l'hélice via un système d'engrenages.

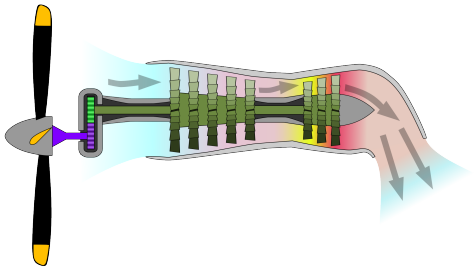


Figure 46 – Turbopropulseur

6.4. Autres motorisations

L'aviation électrique et à hydrogène notamment se développent actuellement. Néanmoins, si les considérations écologiques peuvent justifier le développement de ces nouvelles motorisations, le stockage de la source d'énergie (batterie ou réservoir à hydrogène) est encore lourd et la puissances des moteurs reste en deçà des motorisations utilisant les carburants fossiles.

Les drones peuvent fonctionner avec un moteur électrique lorsqu'ils sont de petite taille même en comportant des calculateurs capables de stabiliser celui- ci en l'air.



(a) Motoplaneur



(b) Drone

Figure 47 – Aéronefs électriques