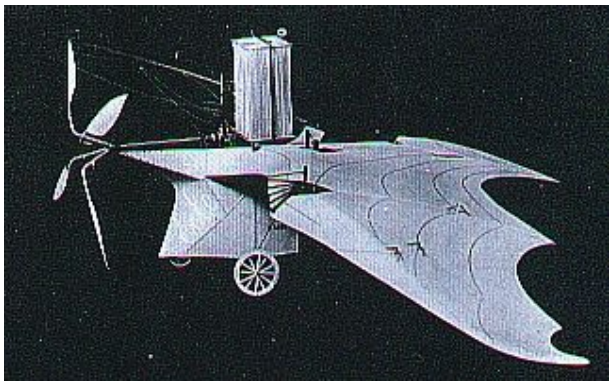
1.Evolution des moteurs en aéronautique

1.1. Historique des moteurs

Les hommes, par centaines, par milliers, ont depuis deux mille ans, ont étudié le vol des oiseaux, accumulé les calculs et les expériences, dessiné des projets, construit des machines les plus étranges les unes des autres, pour s'envoler. Beaucoup d'entre eux n'ont pas réalisé leur rêve. Mais échec ou réussite, chacun à sa manière, a fait progresser la science de l'aéronautique.

1.1.1. Les premiers moteurs

Si chaque étape de l'évolution de l'aviation a été marquée par des progrès techniques aussi divers que remarquables, le rôle essentiel joué par les propulseurs ne fait aucun doute. A l'époque où les pionniers de l'aviation tentaient de découvrir quelle forme d'engin leur permettrait de voler, d'autres s'acharnaient à résoudre le problème de la propulsion.
Différentes formes de moteurs furent essayées: certains utilisaient de l'acide carbonique, d'autres de la poudre à canon, et d'autres encore de simples élastiques. Très tôt, le moteur à vapeur s'imposa.


L'Eole

Le 9 octobre 1890, pour la première fois au monde un plus lourd que l'air, avec une grande hélice actionnée par une machine à vapeur de 18/20 ch s'arracha du sol pour un bref envol avec un homme à bord. Clément Ader, créateur et pilote de cette étrange machine, n'avait eu d'autre possibilité que la vapeur pour donner vie à son Eole. Il fallait assurément beaucoup de talent pour développer, à partir d'une telle machine, lente, lourde et encombrante, deux fois centenaire à l'époque de l'Eole, un moteur qui devait être extraordinairement léger, compact et rapide.

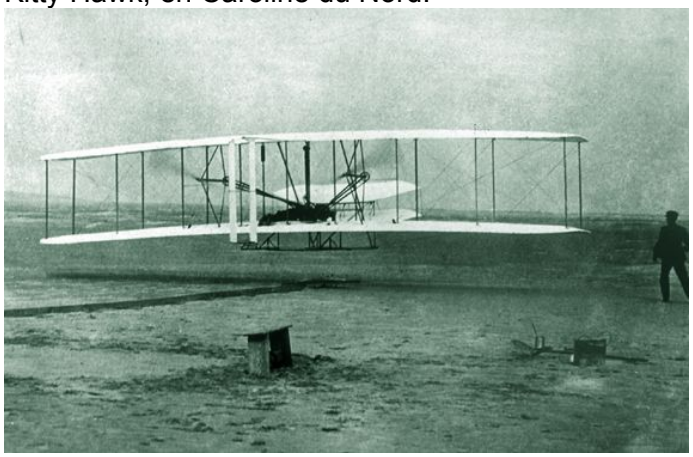
Fin 1893, prenant conscience de l'effet de dérive induit par le couple de renversement de l'hélice, il modifia l'avant de son Avion 2 pour le rendre capable de supporter deux moteurs de 20 ch. C'était la naissance de l'Avion 3.
La chaudière déjà construite, permettait cet accroissement de puissance. En effet, lorsque Clément Ader entreprend l'étude de la motorisation à vapeur, la chaudière est alors l'élément le plus pénalisant par son poids et plus encore par son volume. C'est sans doute ce dernier point qui le pousse à concevoir un générateur d'allure verticale, contrairement à ceux utilisés à son époque pour le matériel mobile. La solution d'Ader était donc de construire une machine d'un fonctionnement économique et autonome en eau pour la croisière, mais toutefois capable de fortes surpuissances pour le décollage, assez rapide pour entraîner directement les hélices, souple et simple à conduire. A cette époque, le meilleur compromis pour rassembler toutes ces qualités, est constitué par:

- Une chaudière multitubullaire pour sa souplesse de production de vapeur.
- Un moteur à détente établie pour la croisière à pression modérée mais dimensionnée pour tenir de plus forte pression au décollage.
- Un condensateur pour limiter la dépense en eau.
- Un réchauffeur d'eau pour améliorer le rendement thermique.
- Un système de commande de puissance simplifié agissant uniquement sur la chauffe.

L'Avion 3

1.1.2. Les moteurs à pistons

Un véritable vol propulsé nécessitait un moteur de puissance suffisante et d'un poids relativement faible. Un autre type de moteur, plus léger et plus 'musclé' s'imposait.
Le jeudi 17 décembre 1903, c'est avec un moteur d'automobile fortement modifié que les frères Wright permirent à leur Flyer d'effectuer son saut de puce historique au-dessus des dunes de Kitty Hawk, en Caroline du Nord.



Le Flyer

Leur mécanicien Charlie Taylor, leur avait préparé un moteur à essence de quatre cylindres refroidi à l'eau qui, avec son volant ne pesait que 82 kilos, mais pouvait produire une puissance de 13 ch. Celui-ci allait procurer au Flyer, d'un poids de 274 kilos, la portance juste nécessaire pour lui permettre de voler. Les frères Wright conçurent et fabriquèrent également leurs propres hélices nécessaires pour convertir la puissance du moteur en poussée propulsive.

Ils avaient besoin d'une hélice tournant à la vitesse de 350 tours à la minute, une vitesse qui exigeait non plus une hélice en "roue à aube", comme les premières machines volantes, mais une véritable surface sustentrice, c'est à dire une aile tournant dans l'air pour assurer une portance horizontale, comme font les ailes d'un avion. Saisissant l'importance de ces forces, Orville et Wilbur Wright dessinèrent et sculptèrent deux élégantes hélices en lamellé d'épicéa de 2,59 m de diamètre. Celles-ci furent alors couplées à leur moteur par un

système de chaînes, l'une d'elles étant croisée pour produire une contre-rotation afin d'équilibrer les couples. Au cours des cinq années suivantes, les Wright augmentèrent la puissance de leur moteur jusqu'à 30 ch. Mais l'Europe avait pris de l'avance.

Le 28 août 1902, le Français Léon Levasseur dépose un brevet concernant un moteur de huit cylindres en V d'une puissance de 50 ch pour un poids seulement de 50 kilos. Produit en série en 1907, ce sera le premier moteur au monde conçu pour équiper des machines volantes. Vingt ans plus tard, ce rapport remarquable entre puissance et poids sera dépassé. Cependant le moteur de Levasseur n'était pas sans défaut et n'obtient jamais le succès commercial d'une autre invention française: le légendaire moteur rotatif Gnome des frères Laurent et Louis Seguin. Son premier modèle date de 1907. Cinq cylindres, fournissant 10 chevaux chacun, étaient placés autour d'un vilebrequin fixe.

Le moteur Gnome

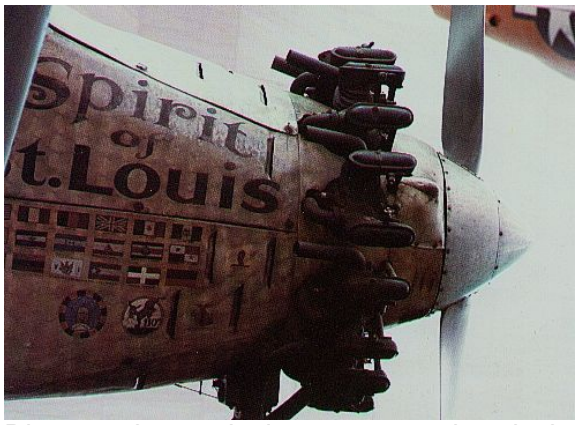
En marche, la machine toute entière se mettait à tourner, transmettant ce mouvement de rotation à une hélice qui lui était directement reliée. Grâce à ce mouvement rotatif, le moteur n'avait pas besoin de refroidissement. De fines ailettes fixées sur le cylindre permettaient à la chaleur de combustion de se dissiper directement dans l'air ambiant. Ce moteur constituait, par principe, son propre volant, ce qui entraînait de significatives économies de poids. Mais le Gnome consommait énormément de carburant.

Il avait toutefois l'avantage d'être léger, dynamique, constant et sûr. Il constitua une famille de moteurs de 50, 70, 100, et 140 chevaux. En 1916, 80% des avions étaient dotés de ce type de moteur ou inspirés du même principe. Parallèlement aux moteurs rotatifs, des constructeurs comme Renault développèrent des moteurs en ligne avec des puissances de 50 à 100 chevaux.

Au cours de la première guerre mondiale, les avions vont se transformer pour la première fois en instrument de combat. Les constructeurs de l'époque rivalisent d'ingéniosité pour produire des moteurs d'avions d'une puissance toujours plus grande. Le Gnome cède la place à des modèles dans lesquels les cylindres sont fixes et seul le vilebrequin tourne. Il en résulte des économies fort appréciables d'huile et de carburant, ainsi que de meilleures performances sur les long-courriers. En 1918, des moteurs de douze cylindres avec circuit de refroidissement par eau, développent déjà une puissance de 300 à 400 chevaux. Le nombre d'innovations apportées aux moteurs d'avion ne cesse de croître, même après la signature de l'Armistice.

C'est en effet dans le années 20 qu'apparaissent des améliorations telles que les carburateurs réglables en fonction de l'altitude et de la puissance, les démarreurs qui supprimeront les délicates mise en route à la manivelle, ainsi que les hélices à pas variables. D'ailleurs, le 9 décembre 1921, Charles Franklin Kettering invente un dispositif pour l'allumage et la mise en route des moteurs. Avec Thomas Midgley et Thomas Boyd, il met également au point l'essence à haut indice d'octane. Ce carburant permet au moteur d'avion de développer de grandes puissances sans rencontrer les problèmes liés à la détonation.

Le vol de Charles Lindbergh, aviateur américain, devenu célèbre après avoir effectué la première traversée de l'Atlantique sans escale (New-York-Paris, 6200 km en 33 h et 30 min) en 1927, à bord de Spirit of Saint Louis, équipé d'un Whirlwind, fait des Etats-Unis le premier constructeur de moteurs d'avion.



Les moteurs Whirlwind, des frères Wright, avec son système de refroidissement et un poids de 225 kilos pour une puissance de 220 chevaux, impose de nouvelles normes de puissances, d'économie et de fiabilité. Le Whirlwind était un moteur en étoile équipé d'un système de refroidissement par air et composé de cylindres fixes déposés en anneau autour d'un vilebrequin rotatif. Son plus grand défaut était la résistance à l'air qu'offraient ses cylindres, problème qui fût résolu en couvrant le moteur d'un capot aérodynamique.

Dix ans plus tard, deux compagnies rivales, la Wright et la Pratt & Witney, produisaient des moteurs en étoile dont la puissance atteignait presque 2000 chevaux.
A la fin de la Seconde Guerre Mondiale, de monstrueux moteurs à piston de 28 cylindres fournissent une puissance de 3500 chevaux. Mais on dessine déjà les plans de moteurs encore plus puissants. Les compagnies aériennes entrevoient en effet, l'essor de l'aviation commerciale. Les avions les plus célèbre de l'époque sont le Douglas DC-3 (21 passagers ou 2 tonnes de fret) et son équivalent européen, le Junker 52/3m (15 passagers). Les jours des moteurs à piston et à hélices sont comptés. A la fin de la Guerre, des avions d'une conception nouvelle arrivent: les avions à réaction.

1.1.3. Les avions à réaction

D'un camp comme de l'autre, on travaillait déjà au perfectionnement de ces engins. Depuis en effet des dizaines d'années, une poignée d'ingénieurs visionnaires voyaient se dessiner l'idée de propulser un avion en se servant de la poussée que produit un courant de gaz chaud sortant d'une turbine à gaz. On doit néanmoins la formulation de la propulsion par réaction à René Lorin dès 1908. [vitesse / debit]

Cependant, ce n'est qu'au printemps 1944 que le premier avion à réaction réellement opérationnel, le Messerschmidt 262 de fabrication allemande, se lance dans la guerre à 870 kilomètre à l'heure. Son apparition fût heureusement trop tardive pour changer le cours de la guerre mais il inaugura l'ère moderne de la propulsion à réaction. Le principe du moteur à réaction ne pourrait être plus simple. L'air aspiré par l'avant est comprimé par la rotation de la turbine du compresseur, mélangé à un carburant, puis allumé. Les gaz de combustion se dilatent en produisant une poussée et s'échappent par la tuyère postérieure à une vitesse de 520 mètres par seconde. La poussée obtenue propulse alors en avant l'avion. Les moteurs à réaction ont donné l'essor que l'on sait à l'aviation moderne. Leur apparition va ainsi remplacer la violence des pistons et les explosions saccadées des moteurs traditionnels par la rotation régulière des turbines et une combustion constante. De ce fait, la puissance massique des moteurs augmente fortement. Là où les anciens moteurs à piston fournissaient en moyenne un demi-kilo de poussée pour chaque kilo de moteur, les propulseurs à réaction moderne fournissent quatre kilos pour un kilo de moteur. Ces premiers engins avaient cependant le

défaut de consommer des quantités énormes de carburant, surtout à vitesse réduite, et furent au départ utilisé presque exclusivement par l'aviation militaire.

En effet , les compagnies aériennes plus soucieuses de rentabilité, parviennent à un compromis en utilisant des turbopropulseurs, dans lesquels la puissance d'un turboréacteur entraîne une hélice traditionnelle. Economie en carburant et plus grande maîtrise de l'appareil, le système présente néanmoins quelques inconvénients dont le principal concerne l'hélice. Lors de puissantes accélérations, les hélices tournent en effet si vite que leurs extrémités atteignent presque la vitesse du son. Le risque de turbulence s'en trouve dangereusement augmenté. Les concepteurs s'engagèrent donc dans une autre voie. Divers essais et calculs ont en effet démontré l'inefficacité de l'expulsion à très grande vitesse des gaz d'échappement des premiers moteurs à turbopropulsion. Au début des années 60, les ingénieurs commencent à chercher des moyens de ralentir le flux d'éjection tout en augmentant simultanément son volume. Une turbine de grand diamètre équipe dès lors l'entrée du moteur et alimente d'une part la chambre de combustion et d'autre part la tuyère d'éjection, le mélange d'air chaud et froid assurant une poussée accrue.

Ainsi naît le turbofan ou turboréacteur à double flux, pièce maîtresse de l'aviation moderne. D'une efficacité de 25% supérieure à celle des premiers moteurs à turboréacteurs, le moteur turbofan possède une autonomie plus grande. Il a également l'avantage d'être plus silencieux et plus régulier, et de fournir une excellente poussée à grande vitesse ou à vitesse réduite.

1.2. L'influence de l'avion sur l'automobile

De nouveaux besoins sont apparut au début de la première guerre mondiale. Il faut que tout de suite les avions emportent du poids, volent haut et vite. Les moteurs d'automobile seuls sont assez puissants et parvenus déjà à une qualité suffisante pour correspondre à ce premier programme.

Bientôt les exigences de ce même programme croissent. Il faut des cylindrées plus élevées, des vitesses plus grandes, un allégement plus poussé. Les constructeurs de moteurs s'acharnent autant que les producteurs de matières premières: les aciers à haute résistance, et particulièrement les aciers de limite élastique élevée, se généralisent. Mais l'accroissement des cylindrées, l'amélioration du remplissage des cylindres et l'augmentation de la compression entraînent des échauffements considérables pour les soupapes, les pistons, les bougies. Il faut chercher une meilleure matière pour les soupapes, un meilleur dessin pour les bougies, faire une meilleure étude des propriétés thermiques des métaux. D'autre part l'accroissement de la vitesse de rotation soulève de nouveaux problèmes. Il faut lutter contre les fatigues crées par l'inertie des pièces en mouvement alternatif; lutter aussi contre les vibrations qui, très fréquemment, sont causes de ruptures.

La technique du moteur s'est ainsi développée considérablement; chaque usine a dû monter des services spéciaux. De 100 chevaux en 1914, la machine aérienne passait à 500 en 1918, et nous voici aujourd'hui à plus de 1000.

C'est ainsi qu'à la reprise de la construction automobile qui a suivi la fin de la guerre, les usines se trouvaient, grâce l'avion, en possession de matériaux et d'outillage bien supérieurs à ceux qu'elles détenaient en 1914, et l'industrie automobile en a tout de suite bénéficié.

Mais après la guerre, la construction automobile se présentait avec un nouveau programme: tout le monde, et même à des prix très modestes, voulait des voitures rapide, donc aussi légères que jadis, mais beaucoup plus puissantes et plus solides, et tout aussi économiques dans leur consommation.

Il a par conséquent fallu améliorer le rendement, donc travailler les formes de la culasse, la turbulence; augmenter encore la vitesse de rotation du moteur, donc, par exemple, diminuer le poids des bielles et des pistons; en conséquence trouver des alliages nouveaux, de magnésium notamment, découvrir les possibilités d'emploi du titane. Toutes ces découvertes ont réciproquement bénéficié à l'aviation. Notons seulement, que toutes ces recherches, toutes ces étapes régulières vers un maximum de puissance qui recule toujours, ont dû

s'accompagner de véritables recherches sur le graissage. Le moteur d'avion, qui travaille pendant de longues heures à pleine puissance, a naturellement, même pour la lubrification, des exigences qu'on ne peut comparer aux besoins du moteur d'automobile, qui ne travaille que par à-coups et le plus souvent au quart de sa puissance. Nos voitures tirent quand même leur santé d'aujourd'hui des régimes qu'il a fallu instituer pour les machines aériennes.

2. Technologie des moteurs à pistons actuels

2.1. Rôle d'un propulseur, Généralités

Pour qu'un avion puisse décoller il faut lui donner, pendant la phase de décollage, une vitesse suffisante pour que la composante verticale de la résultante aérodynamique (portance) soit supérieure au poids de l'appareil. Tout appareil dispose d'un moteur lui permettant d'accélérer convenablement en phase de décollage, c'est a dire sur une distance la plus réduite possible (décollage rapide des chasseurs de combat), et de le maintenir à vitesse constante en vol stabilisé, c'est a dire de lui fournir une force directement opposée à la traînée.

Les propulseurs sont divisés en 2 groupes.

2.1.1. Moteurs a propulsion directe

Ils fournissent directement une force, la poussée, par combustion d'un carburant elle est exprimée en Newtons ou en Kilogrammes. On distingue les Groupes Turbo Réacteurs (GTR) et les Statoréacteur ou fusées.

Dans les 2 cas la poussée provient directement de la détente d'un mélange à base d'air (sauf pour les) réchauffé par la combustion du carburant. Cette combustion est simple et directe dans le cas des Statoréacteur et des fusée. Dans un turboréacteur, on comprime l'air aspiré avant de le détendre afin de gagner en efficacité. Un turboréacteur est bien plus complexe à concevoir mais la consommation et le rendement des statoréacteurs ne permettent que très rarement leur utilisation sur des appareils. Mais basés sur le principe de la fusée, ils permettent de repousser le plafond et sont à l'étude dans des projets d'avions de ligne Stratosphériques dépassant les Mach 20 qui seront équipés deux types de moteur : turboréacteur dans les altitudes conventionnelles et statoréacteur au-delà.

2.1.2. Moteur à propulsion indirecte

Ce sont les moteurs ne fournissant pas directement une poussée mais utilisant une hélice qui transforme une puissance sur un arbre en puissance propulsive donnant une force de traction : Th.

On distingue :

- Groupes Moteurs à Pistons. La puissance provient de moteurs thermiques alternatifs classiques à pistons. Ils constituent le sujet de cette étude
- Groupes Turbo Propulseur : l'arbre est entraîné par une turbine à gaz c'est le principe utilisé actuellement dans 80% des avions à hélice. Nous verrons ultèrieurement pourquoi les Turbopropulseurs ont peu à peu remplacés les moteurs à pistons.

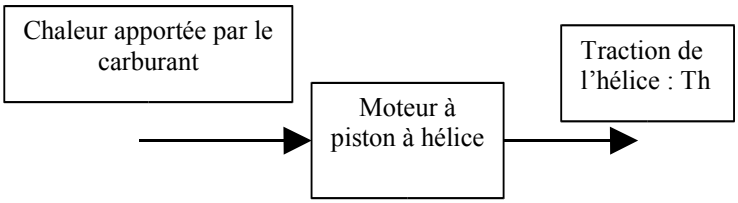
Remarque :

Dans tous les cas, il existe une combustion nécessitant de l'oxygène qui, sauf dans le cas des fusées, est procuré par l'air. Les caractéristiques de l'air (T°, pression donc masse

volumique) varient énormement avec l'altitude. Les moteurs, quel que soit son type ou modèle, aura un comportement différent aux différentes altitudes de vol, et si l'appareillage embarqué ne compense pas automatiquement ces variations de comportement, c'est au pilote de s'adapter via des commandes de réglages. Nous reviendrons sur ce point par la suite.

2.2. Les Moteurs à pistons : notion de puissance et rendement

Expression du rendement global.



On distingue 2 sous-systèmes de transformation d'énergie dans tel moteur : le moteur thermique à proprement parlé et l'hélice qui transforme le mouvement de rotation d'un arbre moteur en force de traction.

2.2.1. Rendement du moteur

L'étude d'un tel rendement n'est pas spécifique à cette étude. Rappelons juste qu'il est le produit de plusieurs rendements interne au système : rendements mécanique, de diagramme, thermodynamique, et de combustion. De nombreux paramètres influent sur ces rendements (souvent de manière opposée) si bien que le rendement global passe par un maximum pour une vitesse de rotation spécifique qui ne correspond pas forcément au maximum de puissance.

On le note évidemment ainsi :

$$\eta_{moteur} = Pu.\ arbre / Q\ carburant$$

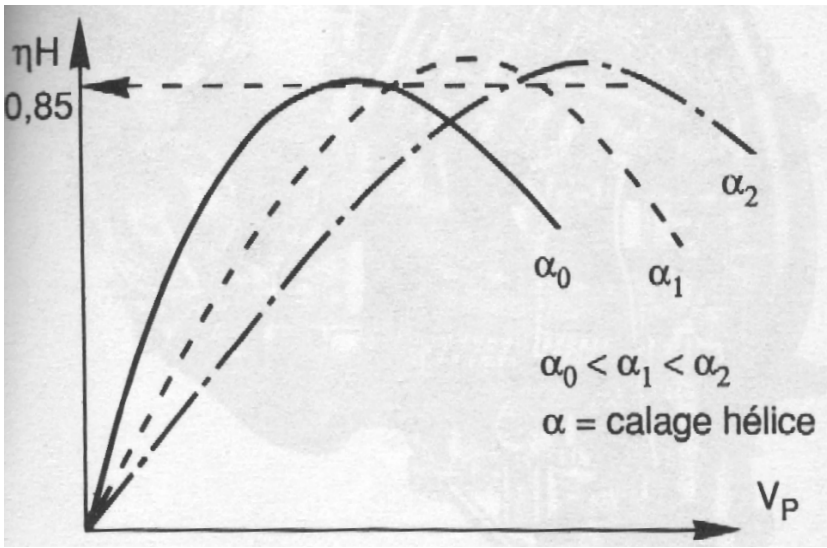
2.2.2. Rendement d'hélice

L'hélice est un système de transformation de l'énergie puisqu'elle transforme un mouvement rotatif en force de traction Th. On définit le rendement tel que :

$$\eta_{hélice} = Th.Vp / Pu.\ arbre$$

Avec Th.Vp : Puissance de propulsion
Vp : Vitesse propre.

Ce rendement dépend du calage de l'hélice, c'est à dire de son inclinaison par rapport à son axe de rotation, et de la vitesse de l'avion . On peut ainsi tracer pour une hélice à calage variable le réseau de courbes ayant la forme suivante :



Le rendement d 'hélice passe donc par un maximum, suivant la vitesse de l'avion, il faut maintenir le calage de l'hélice le plus proche du maxi. C'est pourquoi les avions équipés d 'hélice à pas variable on beaucoup plus de puissance au démarrage et en montée.

Les avions modernes sont équipé d'un calage variable suivant la vitesse de rotation afin de rester au maximum de rendement.

Allure du rendement d'hélice en fonction de la vitesse propre.

A l'arrêt (Vp=0, avion arreté) le rendement de l'hélice est nul. Néanmoins il est constant, voisin de 0.85, pour une large plage de vitesse, et de nombreux appareils ont une hélice à calage.

Les hélices à pas variable complexes à réaliser ne sont apparues que lors de la 2ième Guerre mondiale (2 calages sur le Spitfire MK1 en 1939) mais les performances gagnées étaient sensibles notamment en phase de décollage et de Dogfight (combat aérien) où les variations de vitesses sont nombreuses.

On peut dire que le calage variable correspond à une boite de vitesse aérodynamique.

2.2.3. Rendement global

C'est le produit des 2 précedents rendements :

$$\eta \text{ global} = \eta \text{ hélice} . \eta \text{ moteur}$$

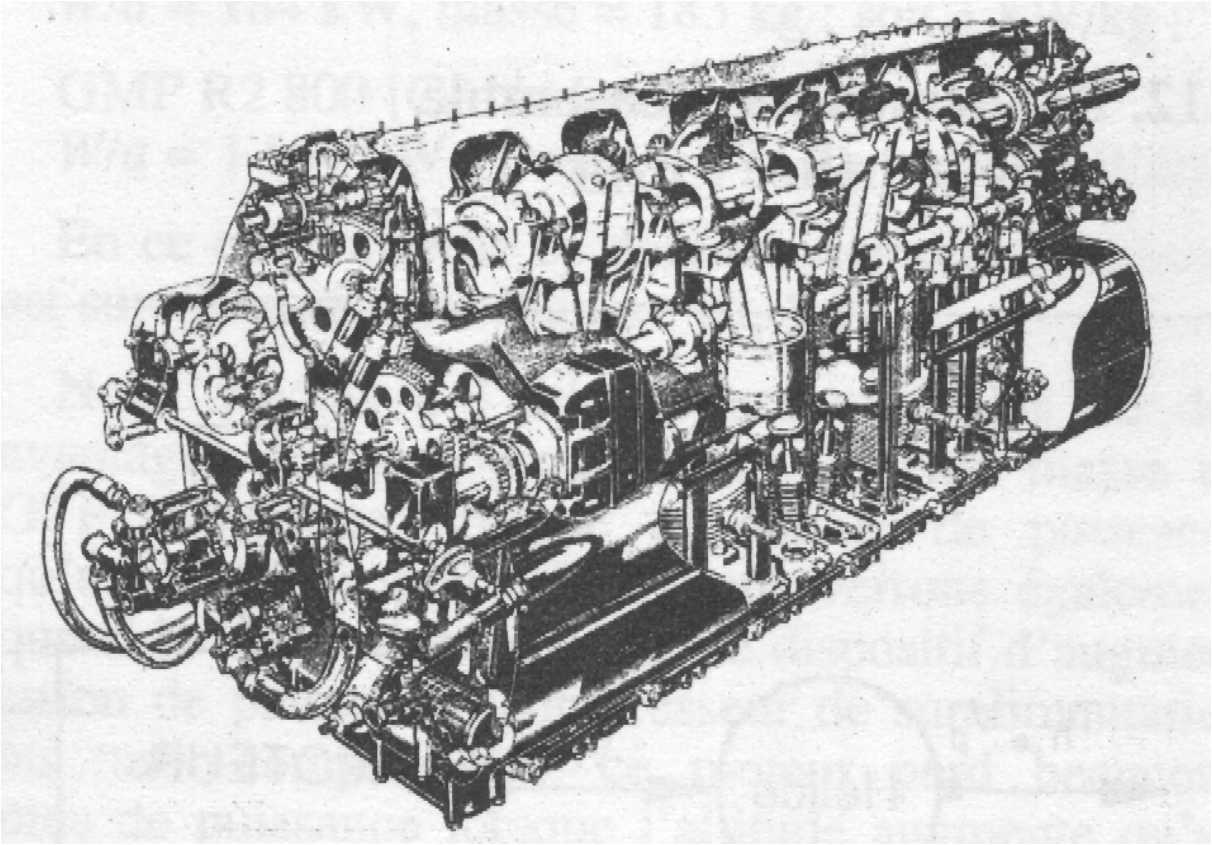
Afin d'obtenir le meilleur rendement il faut donc se positionner au meilleur rendement hélice (calage variable) et au meilleur rendement moteur (avance variable et d'injection, T°..)

2.3. Les différents types de moteurs à pistons

Les moteurs à pistons d'aviation sont classé en familles suivant la répartition des cylindres. On distingue 4 grandes familles : Les moteurs en ligne, en étoile, à plat et en V.

Afin d'accroître la puissance, de régulariser le couple et d'augmenter la fiabilité générale (aspect « psychologique ») ces moteurs sont équipés de nombreux cylindres : 4, 6,8…jusqu'à 18 pour les moteurs en étoile. De plus des notions d'équilibrage entrent en jeu. Il n'a jamais été construit de monocylindre en aviation ou peut être lors du temps des pionniers mais ces « avions » restaient (heureusement) expérimentaux et utilisés par leur seul concepteur.

2.3.1. Les moteurs en ligne



Moteur en ligne 4 cylindres de 240 Ch à 2530 tr/min non suralimenté destiné à un petit monomoteur de tourisme.

Les cylindres sont alignés sur l'axe du vilebrequin. Ce sont les moteurs les plus simples de l'aviation mais ils nécessitent un système de refroidissement performant : en effet les cylindre en arrière sont moins bien refroidis que ceux devant ce qui engendre des irrégularités de fonctionnement. Ces moteurs sont limités en puissance (encombrement et problèmes de frottements des palliers et de tenue du vilebrequin lors d'une augmentation des cylindres), ils sont donc réservés aux petits avions de tourisme. On peut remarquer que, souvent, les cylindres sont tête en bas : on peut l'expliquer pour des raison de disposition du moteur.

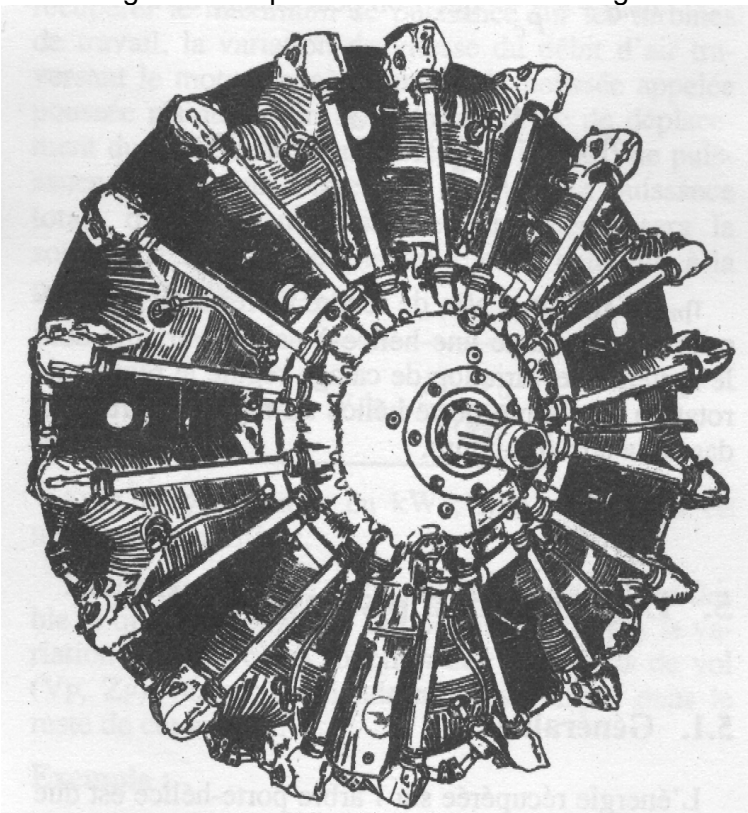
Sur ces moteur disposés à l'avant des avions devant le pilote, l'hélice est directement fixée sur l'arbre , pour des raisons aérodynamiques évidentes il faut laisser de la place au flux d'air propulsé par l'hélice. L'encombrement des culasses 4 temps est trop important et empêcherait les flux d'air de circuler. Dans ce cas, le circuit de refroidissement doit être entièrement repenser par rapport aux moteurs en ligne de voiture, mais les moteurs d'avions ne sont pas étudier pour rester à l'horizontal et nous verrons par la suite que les forces de facteur de charge sont bien plus contraignantes.

2.3.2. Les moteurs en étoile

Ce sont les moteurs utilisés par beaucoup de constructeurs pendant la Grande Guerre (Spowith, Curtis, Vickers..) leurs embiellages complexes sont compensés par une compacité et un refroidissement (toujours par air) remarquables.

Les cylindres sont répartis radialement autour du vilebrequin. Une rangée de cylindres correspond à une étoile, il existe des moteurs à 2 étoiles : les cylindres de la seconde étoiles sont alors décalés par rapport aux premiers pour obtenir un meilleur refroidissement.

Ce sont les moteurs à pistons les plus puissants : les frottements du vilebrequin sont minimes (3 pallier pour 18 cylindres ! !) mais on peut se demander si de part la conception de l'embiellage toute la puissance de détente des gaz est récupérée ?



Moteur en étoile simple 9 cylindres développant 220 Ch à 2075 tr/min équipant un Sopwith Camel de la 1ère Guerre.

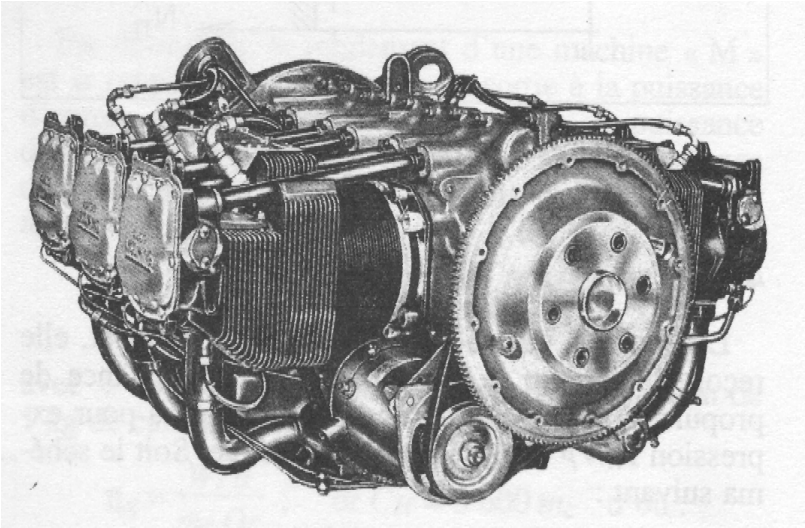
Si en Europe les moteur en V ont vite remplacé les moteur en étoile (limitant de part leur surface la vitesse de l'avion) le constructeur américain Curtis a continué de développer ces moteurs. En fait il semblerait que tous les constructeur ayant adopté un type de moteur le conserve.

Les avions équipés de moteur en étoile sont reconnaissable par l'ouverture (favorisant le refroidissement) du carénage derrière l'hélice.

Curtis Hawk 75A-3 équipé d'un moteur en étoile.

L'absence d'un circuit de refroidissement fiabilisait ces moteurs : ce circuit est une partie très fragile aux éclats mais réellement indispensable au bon fonctionnement de tout moteur. Le plus puissant des moteur en étoile développait 2100 Ch à 2800 tr/min et ce type de moteur équipait encore récemment les Canadairs avant d'être remplacé (comme souvent) par des turbo-propulseurs.

2.3.3. Les moteurs a plats



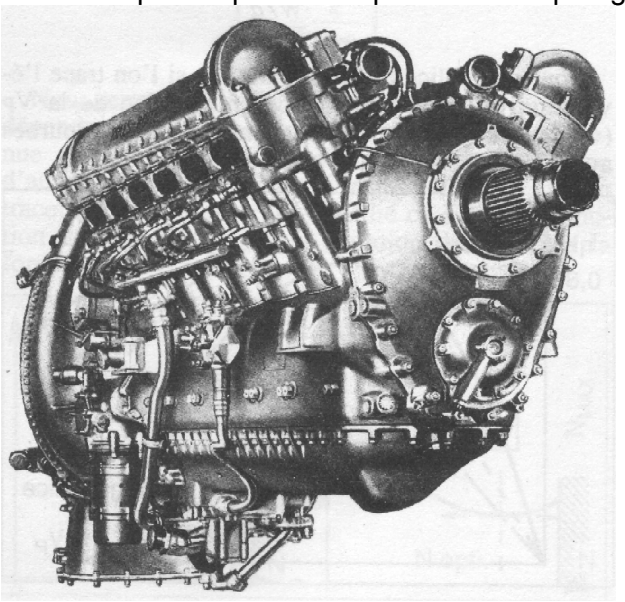
Moteur Lycoming à plat 6 cylindres à injection de 260 Ch à 2600 tr/min.

Ce sont les moteurs les plus utilisé actuellement. Ils ont de 2 à 6 cylindres suivant la puissance désirée.
Le moteur développé par Renault Sport est de ce type.

Montage du moteur 4 Flat Morane Renault MR de 250 Ch.

2.3.4. Les moteurs en V

Ce sont les moteurs adoptés par la plupart des constructeurs entre la 1ère et la 2ième guerre. Constitués de 2 moteurs en ligne montés en V, ils permettent de régulariser le couple et de multiplier la puissance par 2 sans trop augmenter l'encombrement.



Moteur Rolls-Royce en V
Merlin 620 d'une puissance de 1800 Ch à 3000 tr/min, c'est un moteur à injection équipé de 2 compresseurs de suralimentation.
Il équipa les dernières version des SPITFIRE.

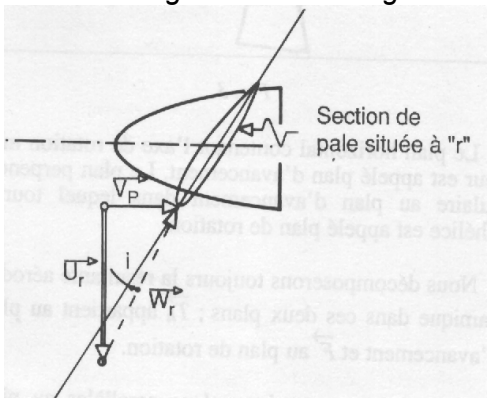
2.4. Notions sur l'hélice

Tous les moteurs a pistons utilisent une hélice qui transforme une puissance rotative en puissance propulsive. Afin d'étudier un moteur d'aviation, il est nécessaire de comprendre le comportement d'une hélice aéronautique et surtout d'évaluer ses limites.

2.4.1. Caractéristiques géométriques d'une hélice

Toute hélice est caractérisée par son diamètre, le nombre de pales, son régime de rotation nominal, et son calage. Procédons à une étude sommaire de son comportement.

Triangle des Forces agissant sur une section d'hélice à rayon fixé.



On note :

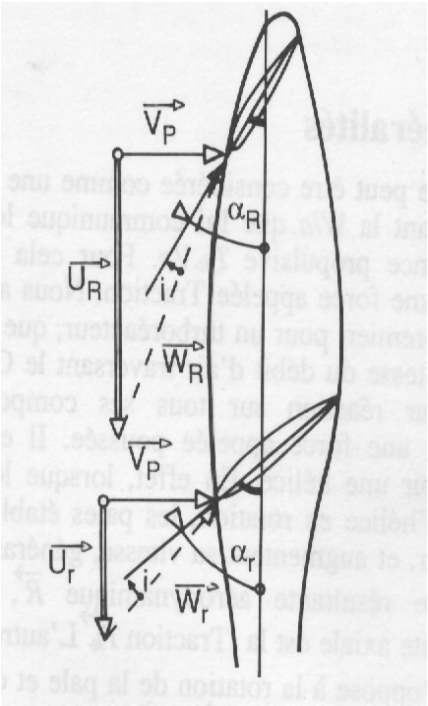
Vp : vitesse propre (ou absolue) de l'air, c'est elle qui donne la force de traction.

Wr : vitesse relative air/pâle

Ur : vitesse tangentielle à R

I : incidence de l'air sur la pâle.

Bien sur : Vp = Ur + Wr



Ur variant avec le rayon de section, une variation d'inclinaison est nécessaire afin de rendre la résultante propulsive Vp constante sur tout le rayon : on procède à un vrillage des pâles.

Le vrillage correspond à une variation de calage suivant le rayon et est indispensable afin de maintenir Vp contant sur tout le diamètre afin d'éviter turbulences et vortex.

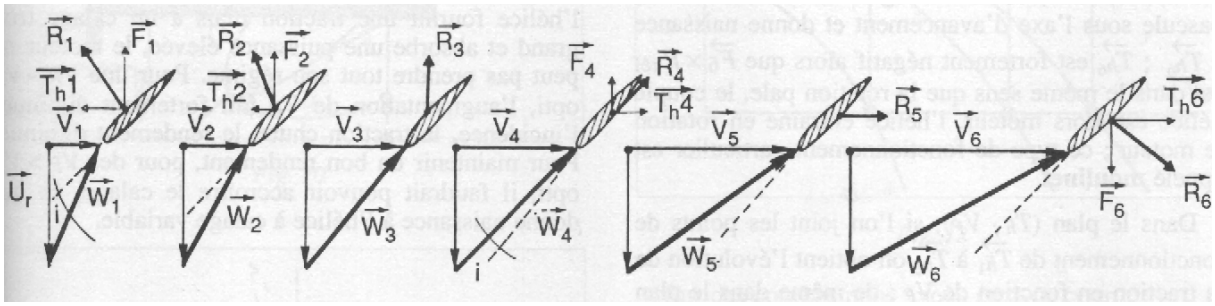
Pour caractériser une hélice, les héliciers choisissent une section de référence à 50 ou 70% du rayon maximum.

Exemple : Hélice Hamilton, α réf = 12° à 50%. La variation d'inclinaison est déduite de proche en proche.

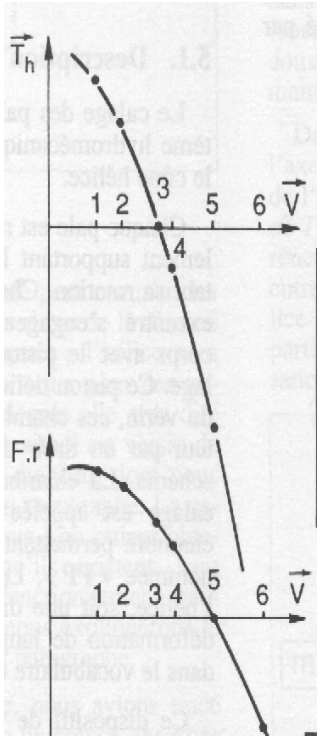
Plus le nombre de pâles est important plus l'hélice absorbe de couple et les démarrages sont lent mais la vitesse finale élevée : un nombre élevé de pâle (4) correspond pour un moteurs classique à une grande vitesse, un nombre réfuit de pale (2) à une petite mais cette notion est liée au calage de l'hélice.

2.4.2. Limites d'une hélice

Suivant la vitesse de l'avion, le comportement d'une hélice varie et passe par plusieurs points remarquables, c'est points sont essentiels et doivent être connus par tous les pilotes :



Vi (i variant de 1 à 6) est la vitesse de l'air propulsé et dépend de la vitesse de l'avion. On remarque que la force de traction et les efforts résistants s'annulent en 2 points spécifiques et deviennent même négatifs : l'hélice crée une force qui tend à freiner l'avion et le l'hélice devient un générateur entraînant le moteur.



Voici pour les 6 points de fonctionnement le comportement dynamique de l'hélice au fur et à mesure que la vitesse grandie:

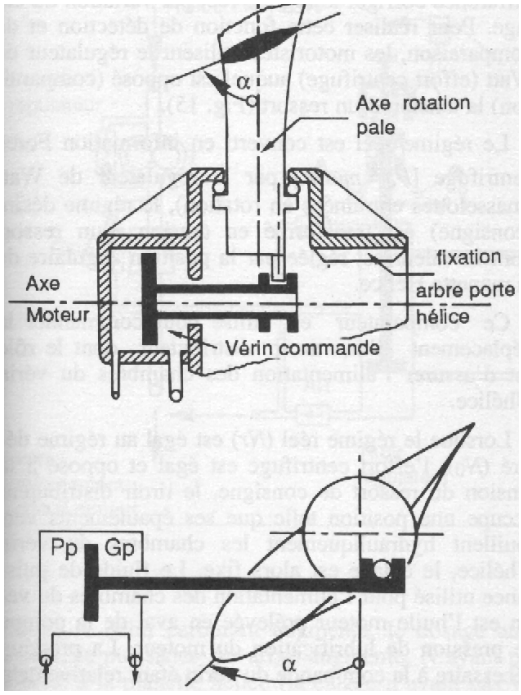
- *Points 1 et 2 : **Mode Tractif**, Th>0 et Puissance absorbée > 0 (F.r.>0)*
- *Point 3 : **Mode Transparence** Th=0 et P. abs > 0 : l'hélice ne crée aucune traction mais absorbe de l'énergie. (frottement radiaux)*
- *Point 4 : **Mode frein** Th<0 et P.abs>0. L'hélice freine l'avancement de l'avion*
- *Point 5 : **Mode Puissance nulle** Th<0, P. abs = 0. L'hélice freine l'avion sans absorber n'énergie.*
- *Point 6 : **Mode moulinet** Th<0, P. abs <0. L'hélice fournit de la puissance au moteur puisse qu'elle lui fournit un couple : F6.r.*

Ces différents modes de fonctionnement expliquent la chute du rendement à partir d'une certaine vitesse (cf paragraphe rendement d'un moteur à hélice). Avant cette vitesse le calage de l'hélice est trop grand, l'hélice absorbe une puissance élevée et le moteur ne parvient pas a monter en régime. D'ou la forte utilité d'un calage variable : on retrouve la notion de boite de vitesse aérodynamique.

Ce comportement, propre à toutes les hélices, limite ses performance en vitesse pure. Les avions à hélice les plus rapides possèdent un calage variable (pour les montées en régime) et un nombre important de pales (au moins 5) pour les hautes vitesses. Néanmoins la vitesse maximum atteinte par les plus puissants avions à hélice, indépendamment du type et de la puissance du moteur, est de l'ordre de 800 km/h. C'est pour cela que, cherchant performances et vitesse (notamment dans la course au mur du son), les ingénieurs de l'après guerre abandonnèrent rapidement la propulsion à hélice au profit du réacteur sauf dans certain cas spécifiques (reconnaissance, tourisme).

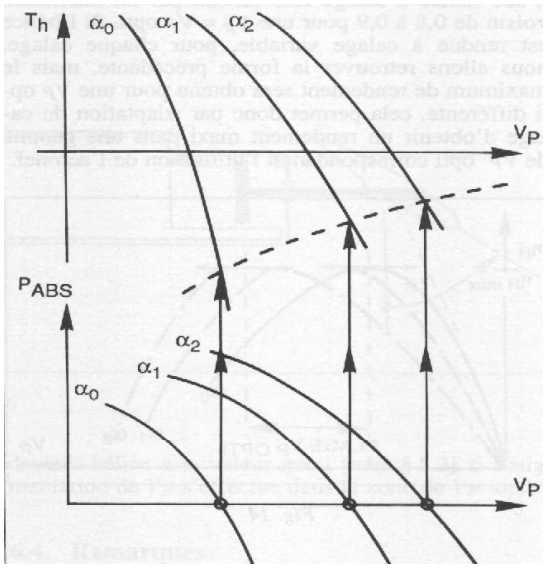
2.4.3. L'hélice à calage variable

Nous avons déjà démontré l'intérêt d'un calage variable, voyons brièvement son fonctionnement d'une telle hélice.



La variation est effectuée par un système hydromécanique installé dans le cône d'hélice (moyeu). La variation du calage se fait en continu par le système de pivot présenté ci-contre. On obtient ainsi une véritable boite de vitesse permettant d'améliorer considérable la plage de fonctionnement optimale de l'hélice donc les performance de l'avion.

Ces hélices peuvent aussi être utilisées en fonction reverses c'est à dire en fonctionnement freins lors de l'atterrissage.



Un calage variable donne un réseau de courbe caractéristiques suivant :
Avec $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2$

On voit l'avantage de ce type de fonctionnement : a bas régime la traction avec α_0 est meilleure alors que la puissance absorbée est plus faible.
Une variation en continu est idéale pour le fonctionnement du moteur : on passe par une infinité de vitesses réduisant les efforts sur le moteur et la montée en puissance très souple : c'est surtout au décollage où le besoin d'accélération est élevé que l'utilisation d'un calage variable est avantageux.

La courbe en pointillé correspond a la limite du mode Moulinet.

Mais la technologie associée est coûteuse et complexe, l'utilisation doit donc rentabiliser ce coût : les premières hélice a calage variable n'avait que 2 positions (intercepteurs de la 2ième Guerre mondiale nécessitant un décollage rapide) et les petits avions actuels de tourisme ont une hélice fixe. Contrairement aux avions écoles présentant beaucoup de similitudes mais destinés à la formation des futurs pilotes de chasse, donc nécessitant de meilleures performances.

Les moteurs de ces avions à calage variable en continu sont dis à vitesse constante : le régime moteur est maintenu constant par des régulateurs pour la phase de vol (montée, descente, décollage, croisière..) et la puissance propulsive est donnée par l'angle de calage qui fait varier le couple puis la puissance vu que la vitesse est constante. Nous verrons plus en

détail ce système permettant l'utilisation d'un régime moteur constant plus en détail dans le paragraphe suivant.

2.5. Variations de la puissance sur un moteur à piston d'aviation

La puissance est commandée par la manette des gaz bien sur mais aussi comme nous venons de le voir par calage de l'hélice, il faut donc distinguer les moteur à hélice variable ou fixe :

La commande de puissance d'un :

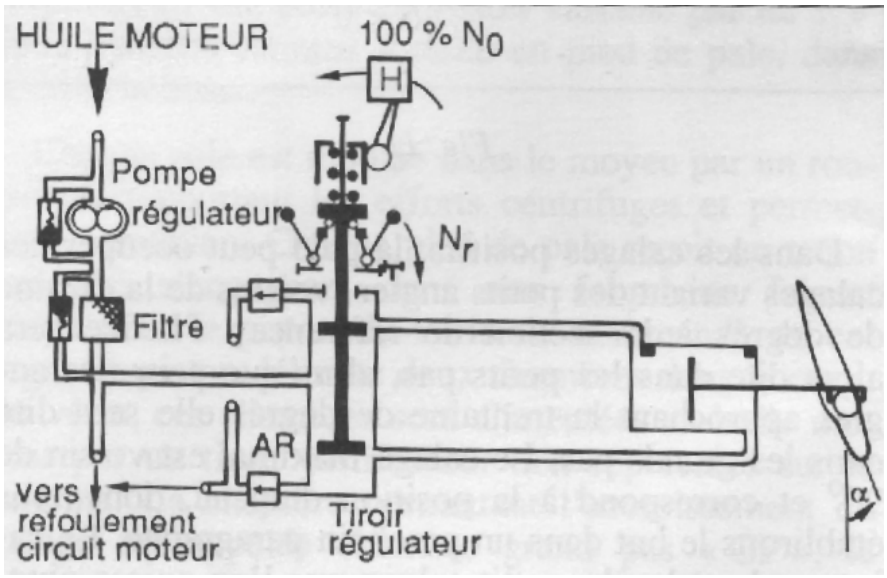
- Moteur à hélice fixe comprend :
  - Une manette des gaz réglant la pression d'admission identique à l'accélérateur d'un véhicule.
  - Une manette richesse faisant varier la richesse du mélange air/carburant afin de trouver le meilleur réglage. Fixée sur un moteur de voiture (sauf au démarrage par utilisation du starter) elle doit être variable sur un moteur d'avion. En effet les caractéristique de l'air variant avec l'altitude une correction de richesse est nécessaire. Si elle n'est pas effectuée automatiquement par un correcteur altimétrique, elle doit être faite par le pilote lui-même.

- Moteur à calage variable comprend :
  - Une manette des gaz
  - Une manette de richesse
  - La commande de régime hélice qui combinée à la manette des gaz régule la puissance propulsive ceci à vitesse de rotation constante.

La vitesse constante de rotation du moteur présente de nombreux avantages :
- Pas montées brusques en régime, c'est à dire pas d'accélération brutales (sources de fatigue ou même de casse) sur les différents éléments du moteur.
- Pas de risque de surrégime
- Stabilité de fonctionnement (T° moteur constante…)
- Consommation réduite (effort d'inertie réduits voir nuls).

Remarques : La vitesse n'est constante que pour différentes phases de fonctionnement, la puissance nécessaire au décollage n'étant pas la même qu'en plein vol.
Le pilote fixe donc une vitesse de rotation moteur et joue sur l'inclinaison des pâles en même temps que sur la manette des gaz pour maintenir une vitesse constante. En effet lorsque le couple résistant augmente il faut évidemment augmenter la puissance moteur ($P=C.\omega$). Ce système est, heureusement, auto-régulé par un système appelé circuit de calage de l'hélice.

2.6. Fonctionnement du circuit de calage de l'hélice



Fonctionnement :

Un régulateur de watt compare le régime réel à celui souhaité et influe sur le calage de la pâle pour obtenir le régime désiré à une puissance donnée.

Ce système permet de rendre constant le régime de rotation moteur quelle que soit la puissance : lorsque le pilote met les gaz, la puissance augmente, le moteur prend donc des tours.

régulateur d'hélice

Le régulateur de watt est couplé au régime réel de rotation, il augmente donc aussi et fait bouger le tiroir régulateur qui cale l'hélice différemment augmentant ainsi le couple résistant et stabilisant la vitesse à la vitesse de rotation fixée. Ce système a pour avantage d'être effectué en continu : les variations de vitesse de rotation sont minimes et immédiatement compensée par ce système.

De plus un calculateur influe sur ce régulateur (tension du ressort) suivant les conditions de vol (ρ de l'air et pression).

Remarques : ce système de régulation n'est pas utilisé sur la plage entière de fonctionnement mais que autour du fonctionnement nominal (charge à 90% , + ou – 10%)

Le régime de fonctionnement d'un moteur d'aviation est donc stable pour une phase de vol donnée contrairement aux véhicules terrestre soumis à de nombreuses variations de régime plutôt néfaste pour le moteur et pour l'environnement.

2.7. Particularités d'un moteur d'aviation par rapport à l'automobile

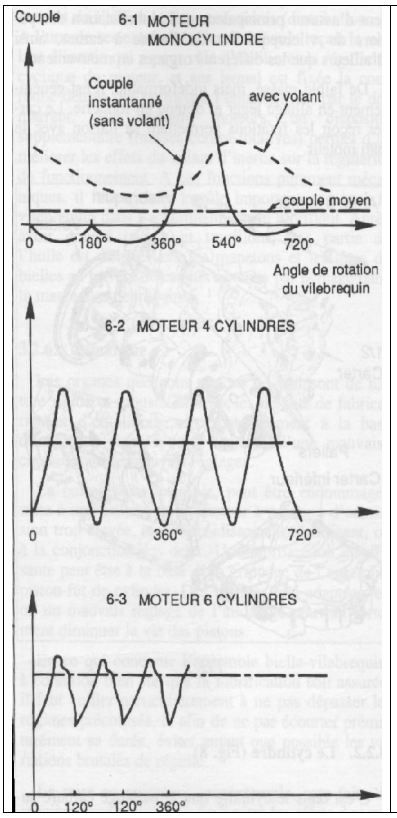
Réalisés à base de multicylindres 4T basés sur le cycle Beau de Rochas ou diesel, nous ne reviendrons pas sur le fonctionnement de tels moteurs mais nous nous intéresserons seulement aux particularités que doit présenter un moteur d'avion par rapport à un moteur classique en vue d'améliorer deux éléments essentiel à l'aviation : la fiabilité et la légèreté

Les moteurs d'aviation sont toujours multicylindres pour les raisons suivantes :

-L'hélice étant souvent fixée directement sur l'arbre moteur, le régime de rotation se situe aux alentours des 3000 tr/min pour des raisons aérodynamiques.

-A un tel régime seuls les multicylindres fournissent assez de puissance.

-Un couple constant est nécessaire, plus y a de cylindres plus le couple moyen est stable.



← *Les courbes ci-contre montrent le couple instantané et moyen pour un mono et 2 multicylindre*

-Fiabilité du moteur : sur un multicylindre, la panne d'un cylindre lui permet encore de fonctionner même si les performances sont réduit, d'autant plus que le nombre de cylindre est élevé.

-Aspect psychologique : la panne d'un moteur en l'air est souvent synonyme de crash donc de mort, plus il y a de cylindres plus les utilisateurs se sentiront en sécurité, aspect identique pour le nombre de moteur. C'est pourquoi la maintenance et l'entretien des moteurs sont très rigoureux et consigné dans un carnet d'entretien toujours à bord de l'appareil : voir la notion de TBO

2.7.1. Les particularité des composants

-Cylindres nitrurés (traitement thermique à base de NH3 par diffusion des atomes N dans le métal) augmentant sa dureté, refroidissement par ailettes (air forcé extérieur suffisamment frigorigène) . Les cylindres de Lycoming sont des fûts : la culasse et le cylindre forment une même pièce de fonderie. Evitant un joint de culasse mais aussi divers éléments d'assemblage, gain de poids. On peut s'interroger sur l'efficacité de refroidissement par d'une culasse en acier mais la circulation d'air suffit à éviter les surchauffes.

-Embiellage : forme et conception différentes suivant le type de moteur, équilibré masses d'équilibrage, le volant d'inertie permet d'améliorer la régularité de fonctionnement.

-Culasse : distribution par soupapes en tête commandées par culbuteur. Les jeux de fonctionnement d'un moteur culbuté sont important et à froid, il n'est pas rare de voir des retour de flamme dans les conduite d'admission !

Dans la mesure du possible la mise en puissance du moteur devra être progressive afin d'améliorer sa durée de vie. La carburation dépendant de l'air extérieur est un des points les plus divergent de celui de l'automobile.

2.7.2. Etude de la carburation

C'est un point primordial pour le bon fonctionnement d'un moteur à explosion interne. Les conditions extérieures influent beaucoup sur les performances : pour une automobile, suivant les conditions climatiques, le rendement peut varier de 20%. Le facteur de charge influe aussi sur le comportement de la carburation ainsi le Spitfire à carburateur, ne pouvait suivre son concurrent le BF109 Messerschmitt à injection lorsque ce dernier piquait. Ce piquet engendrait de des G négatifs ne permettant plus le fonctionnement d'un carburateur, les G négatif vidant la cuve. Pour compenser ce défaut les pilotes allier avait appris à vriller pendant la descente pour créer une contre force. Les avions équipés de moteurs à carburateur ont une

enveloppe de vol plus limitée et les carburateurs n'équipent que les petits appareils de tourisme.

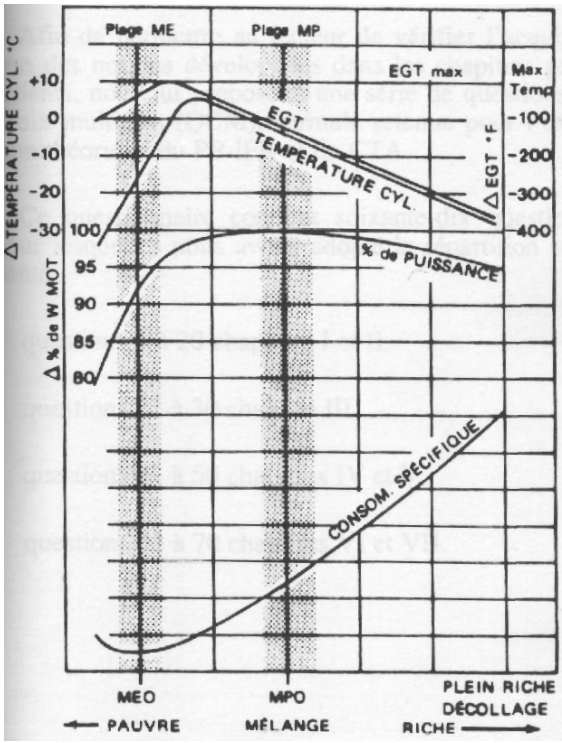
Détaillons les particularités de la carburation aéronautique.

Le Carburant.

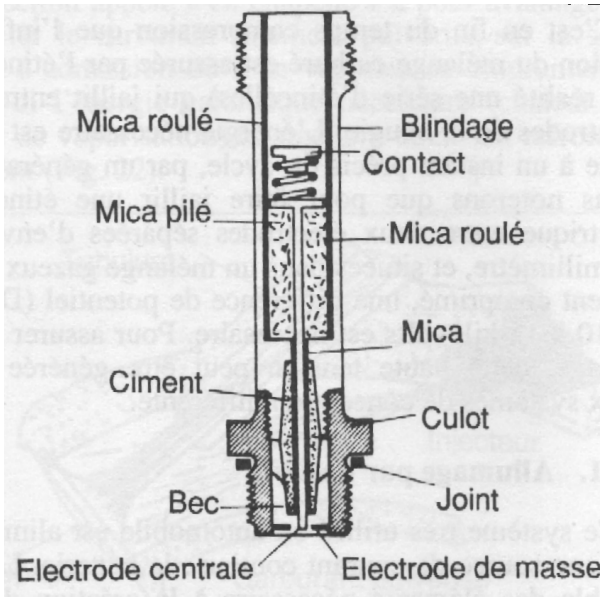
Le carburant essence aviation résistant à la détonation (indice d'octane élevé) afin d'éviter les cliquetis qui usent fortement le moteur. Nous reviendrons dans un paragraphe ultérieur sur les carburants.

La Richesse.

Suivant les conditions extérieure et même indépendament de l'altitude le pilote a la possiblitité de faire varier la richesse : mélange pauvre ou riche suivant la météo.
En vol, les conditions d'air variant avec l'altitude : T°, masse volumique et pression sont les paramètres influant sur la carburation. La correction peut être automatique par le carburateur ou le calculateur d'injection via un correcteur altimétrique mais souvent c'est le pilote qui affinage la richesse manuellement. Cela lui permet un meilleur contrôle de la puissance moteur, de décoller et d'atterir à pleine richesse (mini-starter) et de couper le moteur en l'étouffant (richesse trop faible). Le graphique page suivante montre les différents réglages de richesse.
Enfin il faut préciser que la température de la culasse dépend directement de la richesse : un mélange trop pauvre provoquera une surchauffe de culasse néfaste pour le bon fonctionnement du cylindre. Un mélange trop riche provoquera lui, un encrassement des électrode de bougie et des organes de culasse. Ceci peut aussi provoquer de graves dysfonctionnements : un encrassement des bougies est synonyme d'impossibilité de créer l'étincelle.



Réglage de richesse suivant les conditions de fonctionnement moteur.



Bougie aviation : l'électrode fine, le blindage, et le ressort de contact les différencient des bougies automobile.

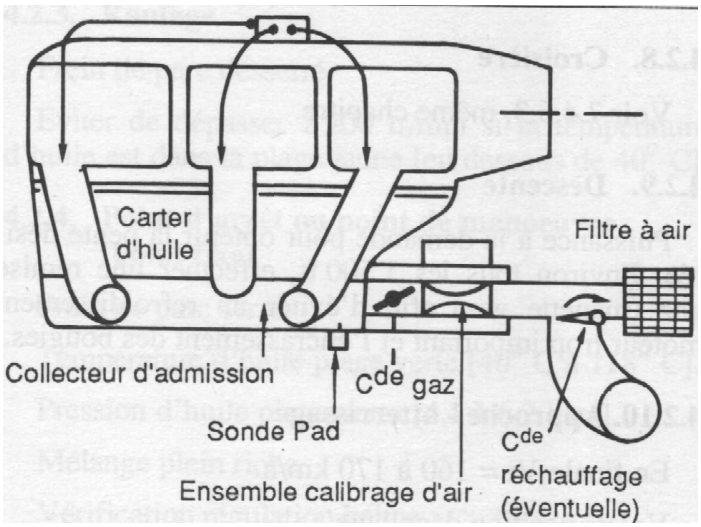
Allumage.

Les moteurs actuel sont systématiquement équipés de 2 bougies afin de garantir l'allumage du mélange, les bougies aviation sont spécifiques à l'aviation. La haute tension est fournie par un allumage par magnéto (rupteur-condensateur, delco..).
La bougie aviation ressemble aux bougies de compétition automobile (électrode fine) elles sont blindées (pour éviter les parasitage des instruments de vol) et le bon contact haute tension est assuré par un ressort

Le risque de givrage.

Dans certaine conditions extérieurs, la vaporisation de l'essence fait chuter la température des conduites d'admission de quelques degrés , de même que le convergent du carburateur. Si le dergré d'hygrométrie est au moins de 50% et la température de l'air négative, il y a risque de givrage de la vapeur d'eau qui peut avoir la grave conséquence d'arrêter le moteur par obstruction du gicleur principal. Pour pallier a ce problème les constructeur préchauffent l'air dans le calibreur d'air qui passe sous le carter d'huile et un système de dégivrage utilise une admission d'air auxiliaire ne passant plus par le filtre a air, premier élément givré donc refroidissant l'air admis. Voir le schéma page suivante.

De plus certains appareils sont, par définition constructeur, interdits de vol dans les nuages ou par temps de pluie.

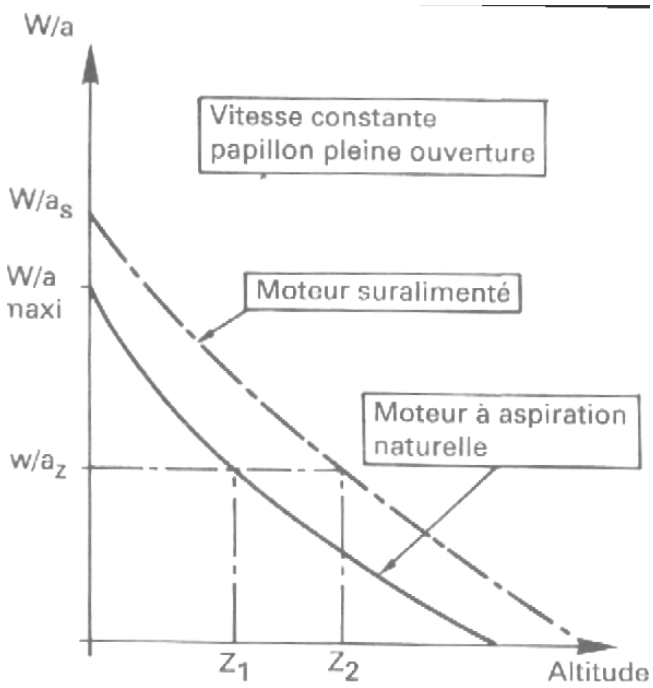


Système de dégivrage.

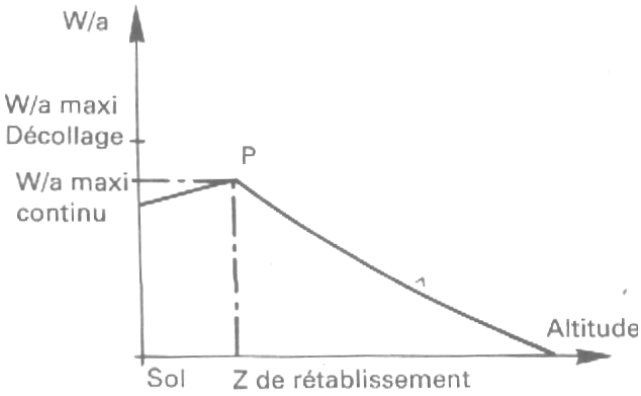
Comme nous l'avons déjà précisé, les conditions extérieures influent sur les performances moteur, ceci a rapidement poussé les constructeurs à suralimenter les moteur afin de repousser les performance en altitude et donc le palier.

2.7.3. La suralimentation en aéronautique

La pression, température et masse volumique de l'air varient avec l'altitude comme le montre le document en annexe. La suralimentation, permettant d'augmenter la pression à l'admission donc le taux de remplissage du cylindre, est réalisée comme sur un moteur automobile : les gaz d'échappement entraînent une turbine reliée à un compresseur, qui comprime les gaz d'admission. Le taux de compression est plus élevé que sur les turbo automobile : il faut passer d'une dépression de l'air à une surpression d'alimentation similaire à celle d'un turbo automobile. En toute logique le taux de compression du compresseur devrait varier avec l'altitude pour des difficulté technologiques évidentes cela n'est pas réalisé.



Comparaison des puissances d'un moteur suralimenté ou non par rapport à l'altitude



Allure réelle de la puissance d'un moteur en fonction de l'altitude.
La puissance augmente legerement jusqu'à l'altitude de rétablissement : la pression statique diminuant, le remplissage du moteur s'effectue mieux et l'échappement est favorisé.

L'altitude de rétablissement correspond à l'altitude pour laquelle le compresseur rétablit une pression d'admission définie.

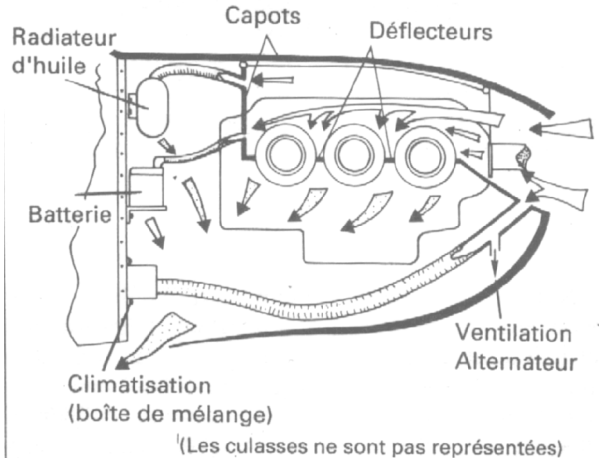
Pour des raison d'efficacité, l'aéronautique a donc grandement participé à l'amélioration du système turbo. Voyons comment s'effectue le refroidissement d'un moteur d'avion.

2.7.4. Le refroidissement

Les moteurs d'avion, tout comme n'importe quelle moteur machine thermique, ont besoin de voir leurs organes refroidis pour assurer le fonctionnement dans leurs plages d'utilisation. Pour réaliser le refroidissement des différents éléments qui constituent le moteur, les motoristes aéronautiques ont adoptée les solutions regroupées dans le tableau ci-dessous.

Organes à refroidir	Moyens utilisés
Cylindre et culasse	Refroidissement dynamique forcé par air
Carter	Convection et huile
Pistons, vilebrequin, arbre à cames	Refroidissement par l'huile
Haut de cylindre (bougies, soupapes)	Convection aidée par balayage (croisement des soupapes)
Soupapes d'échappement	Conduction améliorée par cavité remplie de sodium
Soupape d'admission	Vaporisation du carburant (injection en chapelle)
Distribution	Refroidissement par huile
Circuit de lubrification	Radiateur air/huile

Réalisation d'un refroidissement par air :
Les moteurs en aéronautique sont refroidis par air, des ailettes d'échange sont donc disposés sur les culasses et les cylindres. Afin d'accroître l'échange de chaleur, des capots et des déflecteurs judicieusement disposés canalisent les filet d'air. Ces installation engendre cependant une traînée aérodynamique supplémentaire.



3. Les remplaçants des moteurs à pistons en aéronautique

3.1. Les autres systèmes de propulsion

Les moteurs à pistons ont marqué l'histoire de l'aéronautique, cependant, le progrès technique aidant, ils ont été peu à peu remplacés par d'autres systèmes de propulsion.

3.1.1. Les turbopropulseurs

La poussée est obtenue à la fois par une hélice et par l'éjection des gaz (air + produits de combustion). Le turbomoteur, comme le turboréacteur, est traversé par l'air, ce qui induit un bon Cx. Le nombre d'éléments mobiles est limité par rapport aux moteurs à pistons, ce qui entraîne une plus grande simplicité de conception ainsi qu'une plus grande robustesse. On ne

retrouve pas l'aspect cyclique des moteurs à pistons, ceci permet aux turbomoteurs d'avoir une plus grande puissance apportée par un débit d'air important. De plus, les turbomoteurs et turboréacteurs ont un meilleur comportement en altitude.
La vitesse de l'avion se trouve limitée par l'hélice, on atteint une vitesse maximale de l'ordre de Mach 0,6 à Mach 0,8. On doit prévoir une boîte de vitesses lors de la conception pour adapter le comportement du moteur à toutes les phases du vol.

3.1.2. Les turboréacteurs

La poussée est fournie par l'énergie cinétique des gaz de combustion.
L'avantage de ce système de propulsion est la vitesse maximale qu'il confère à l'avion (jusqu'à Mach 3). Toutefois cette vitesse est limitée par compresseur qui ne peut pas fonctionner en supersonique.

3.1.3. Les stratoréacteurs

R. Lorin a énoncé le principe de fonctionnement du stratoréacteur en 1913, R. Leduc a équipé le 1er avion avec un stratoréacteur en 1930. Le fonctionnement se fait sans élément tournant, mais l'absence de compresseur ne permet pas au stratoréacteur de fonctionner à de faibles vitesses de vol. Les moteur de l'avion espion Lockeed SR-71 Blackbird se comportent comme des stratoréacteurs aux grandes vitesses, ce qui lui permet d'atteindre Mach 3,2 à 30000 m d'altitude.

3.1.4. Les moteurs fusée

Dans ce type de moteurs, le carburant et le comburant sont embarqués, la poussée est fournie par l'éjection des gaz brûlés. L'avantage de ce moteur est qu'il peut fonctionner en absence d'air, donc en dehors de l'atmosphère. Cependant cette particularité de fonctionnement n'est pas celle qui intéresse les concepteurs d'avion. En effet, ces types de moteurs sont utilisés en aéronautique comme moteurs d'appoint lors de phases de décollage, pour apporter une poussée additionnelle (ex : l'avion Junker 33 en 1929). L'inconvénient des moteurs fusée est leur masse importante du fait de l'emport du comburant. Ils on aussi été utilisée par l'intercepteur Allemand de la seconde Guerre Mondiale : le Messerschmitt Me163.

3.2. Le remplacement des moteurs à pistons : exemple du Canadair

Les progrès technique aidant, les moteurs à pistons ont, au fil du temps, quitté le devant de la scène aéronautique.

Aviation commerciale : transport de passagers et de fret.
Les turboréacteurs règnent en maître dans le domaine de l'aviation commerciale, du fait de la puissance nécessaire pour transporter de lourdes charges (nombre de plus en plus important de passagers). Toutefois les turbopropulseurs sont encore utilisés dans des avions vieillissant pour des courts trajets par rapport à la distance parcourue par les longs courriers. L'hélice utilisée avec le turbopropulseur permet d'atteindre la vitesse moyenne d'un avion de transport de passagers subsonique (Vitesse entre Mach 0,6 et Mach 0,8).

Aviation militaire.
La vitesse est un facteur très important pour les avions de combat, de ce fait les moteurs à pistons on complètement disparu à la fin de le seconde guerre mondiale au profit des turboréacteurs, la plupart équipés d'un dispositif de post-combustion. En effet, les turboréacteurs permettent l'emport de lourdes charges comme les missiles et les bombes actuels ; ainsi que des vitesses ascensionnelles ou maximale en pallier importantes (l'intercepteur MiG 25 atteint la vitesse de Mach 2,8 et met 2 min 30 s pour atteindre 11000 m).

Avions de transport et bombardiers: beaucoup des avions de transport sont équipés de turbopropulseurs, de vieux bombardiers russes encore en service (Tu 25) sont équipés de quatre turbopropulseurs avec 2 hélices contrarotatives par moteur. Les avions destinés à transporter de lourdes charge comme des véhicules blindés sont équipés de turboréacteurs (C5 Galaxy).
Les avions d'entraînement au pilotage, autrefois équipés de moteurs à pistons, sont aujourd'hui remplacés par des avions légers avec des turbopropulseurs, plus proches des turboréacteurs.

Aviation de tourisme.

Les avions de tourisme sont toujours équipés de moteurs à pistons du fait de leur utilisation. Dans leur exploitation courante ces avions n'ont pas besoin d'atteindre des hautes altitudes ou des vitesses importantes, ni même d'emporter de lourdes charges (une dizaine de passagers maximum). Les avions de conception récente sont équipés d'hélices à pas variable et de moteurs suralimentés.

Certains avions, initialement conçus avec une propulsion basée sur un ou plusieurs moteurs à pistons, se voient équipés avec des turbopropulseurs. Dans ce cas, le constructeur garde la structure de base de l'avion et fait seulement quelques modifications de fixation et d'entrée d'air.

Exemple : le Canadair

Le projet a été lancé en 1965 par la société Canadair, alors filiale de General Dynamics. Le bombardier d'eau CL-215 est un appareil à la fois simple et robuste, capable d'opérer sous tous les climats, à partir d'aérodromes conventionnels ou de plans d'eau raisonnablement calmes. La cellule du CL-215 est de construction entièrement métallique afin de subir une utilisation intensive. Canadair décida d'équiper son amphibie de moteurs en étoile, principalement parce que celui-ci était destiné à évoluer presque toujours à très basse altitude, dans des conditions où les turbopropulseurs n'étaient alors guère économiques. Le constructeur canadien a équipé l'avion avec deux moteurs Pratt & Whitney R-2800 Double Wasp dotés d'une hélice tripale Hamilton Standard, qui avait été largement utilisée pendant 40 années sur des avions aussi bien civils que militaires. La cylindrée de ce propulseur, caractérisé par deux étoiles de neuf cylindres, était de 45,9 L et sa puissance au décollage atteignait les 2100 ch. Les 5910 L de carburant contenus des les réservoirs conféraient à l'avion une autonomie de 10 h et une distance franchissable en convoyage de 2500 km. Le choix des moteurs à pistons allait de concert avec la ligne générale simple de l'appareil, à savoir que ce dernier n'avaient pas besoin d'atteindre des vitesses élevées (290 km/h en vitesse de croisière) mais devait garder une bonne manœuvrabilité aux faibles vitesses (vitesse de décrochage en charge de 125 km/h). La charge utile de l'appareil était de 5445 kg.

La société décida de moderniser ses bombardier d'eau en remplaçant les moteurs à pistons par des turbopropulseurs. Le choix a été guidé par les difficultés croissantes de trouver du carburant à indice d'octane élevé et le manque de pièces de rechange pour les moteurs R-2800. Le programme du CL-215T (des CL-215 remotorisés) fut lancé en 1986. L'avionneur canadien porta son choix sur le turbopropulseur Pratt & Whitney PW123AF de 2830 ch actionnant une hélice quadripale Hamilton Standard. Le nouveau moteur utilise des carburants de type JP-1, JP-4 et JP-5 aisément disponible. La plus grande légèreté des groupes motopropulseurs a permis d'augmenter la charge utile à 6125 kg, l'autonomie passant alors à 7 h 30 min. En France, ces appareils, désignés CL-415, furent commandés en 1991.

3.2. Les moteurs diesels : exemple du moteur Morane Renault

Un avion a besoin d'une plus grande puissance moteur que les autres véhicules, pour une masse de véhicule donnée. On estime qu'il y a un rapport de 10 entre la puissance moteur nécessaire à une voiture et celle nécessaire à un avion. Cela veut dire que le système de propulsion (c'est-à-dire le moteur, son système de démarrage, le réservoir et la masse de carburant) doit le plus léger possible pour assurer le transport de la plus grande charge utile possible. En fait, la masse maximale au décollage requise pour une charge utile donnée et principalement déterminée par la masse du moteur et son efficacité.

Vers la fin de l'année 1920, plusieurs constructeurs ont développé des moteurs d'avion utilisant des cycles Diesel, par exemple Maybach, Daimler-Benz, Packard et Guiberson. Le Junkers JUMO 205 était le plus fameux de ces moteurs. C'était le seul moteurs diesel équipant des avions de lignes régulières pour les premiers vols transatlantiques. Sa masse de 550 kg et sa grande puissance de 880 ch a fixé les standards dans le domaine.

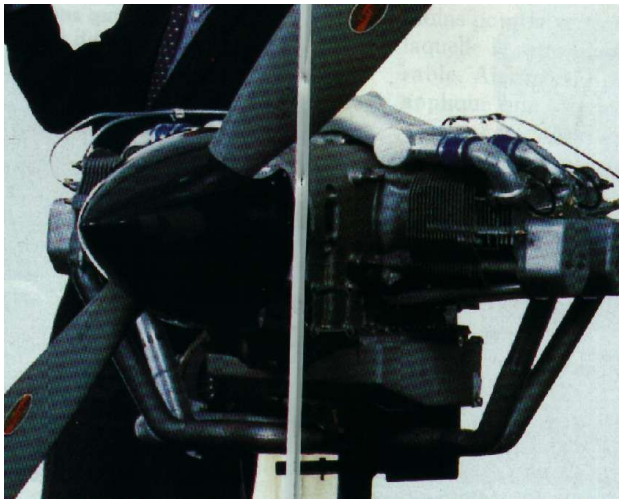
La conception robuste des moteurs diesel et la propriété d'auto-inflammation du principe, font que ces moteurs sont très fiables. Cet avantage est particulièrement intéressant pour l'aviation du fait des contraintes de sécurité. Le diesel aviation est beaucoup plus disponible que l'essence aviation dans le monde, ils sont aussi moins chers.

Le cahier des charges de développement d'un moteur diesel d'aviation serait :

- Le rapport entre la masse et la puissance doit être considérablement plus faible que les moteurs actuels.
- Les dimension de ce nouveau moteur doivent être compatibles avec les contraintes aérodynamique des fuselages actuels. La surface frontale doit être aussi faible que possible.
- La consommation de carburant doit être la plus faible possible. Il doit pouvoir utiliser du diesel d'aviation ou du kérosène.
- Les niveaux de vibrations doivent être faibles.
- Les plus grandes fiabilités doivent être atteintes pour tout ses composants.
- Le moteur doit être utilisable jusqu'à une altitude élevée.

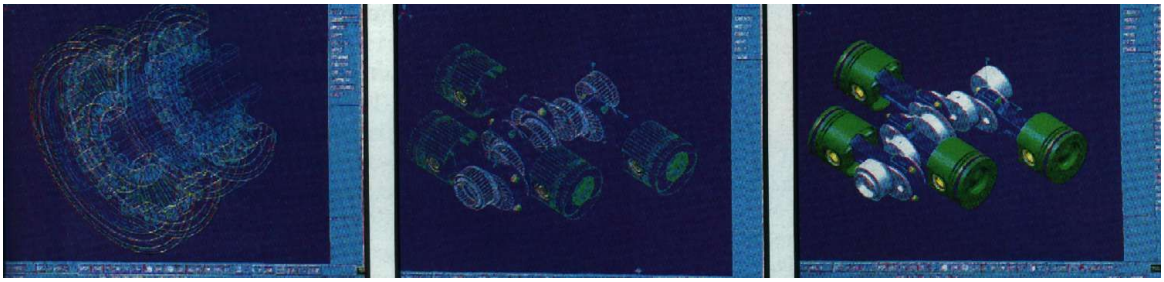
Le moteur Morane Renault.

Le moteur MR 250 a été développé depuis 1995 dans l'usine de Renault Sport à Vitry-Châtillon. Renault renoue ainsi avec un passé de motoriste pour avions qu'il équipait après-guerre. Le moteur, destiné à l'aviation légère, devait non seulement être capable de rivaliser avec les 'poids lourds' du marché, c'est-à-dire les motoristes américains Textron Lycoming et Teledyne Continental, mais aussi et surtout d'offrir des performances inégalées en terme de puissance et de consommation. L'équipe qui développa le moteur était en grande partie composée par des ingénieur qui avaient participé à la conception des moteurs de Formule 1. Les moteurs d'avion sont beaucoup moins sollicités que les moteurs de Formule 1, ne serait-ce que par les variations brutale de régime encaissées et par l'absence d'élément mécaniques complexes et pénalisants comme la boîte de vitesse. La géométrie du moteur a été dictée par des contraintes liées au marketing ; Renault sait faire des moteurs en V mais l'architecture choisie est celle d'un moteur à plat, à cycle Diesel, refroidi par huile et air. Pour des raisons d'encombrement, le moteur comporte quatre cylindres. En effet, les six cylindres prévus au départ menaient à un encombrement trop important pour pouvoir remplacer les moteurs concurrents déjà montés sur des avions. Le moteur est une petite révolution dans le monde des moteurs d'avions légers dont la technologie n'a pratiquement pas évoluée depuis les 60 dernières années. Tout d'abord parce que les moteurs américains Lycoming et Continental représentent plus de 90% du parc mondial et aussi parce que les coûts du développement d'un tel produit est disproportionné par rapport au potentiel du marché.



Le moteur peut cependant s'imposer. En premier lieu, le choix d'un cycle Diesel, qui d'habitude mène à une masse importante et des niveaux de vibration élevées, a ici profité de l'expérience des ingénieurs de Renault Sport. Le moteur MR affiche en effet une masse quasiment identique à celles des moteurs classiques dans les version de 250 et 300 ch, le ratio masse/puissance étant toutefois moins favorable dans la version de 180 ch.

Les niveaux de vibrations sont de même équivalent à celui des moteurs Lycoming et Continental. Le moteur affiche un intervalle entre les révisions (TBO) de 3000 h. La société Socata a proposé une version de l'avion d'entraînement Epsilon Mk2 équipé du moteur Morane Renault MR 300 à l'Armée de l'Air, afin de moderniser son parc de la base de Cognac.



Conclusion

L'aéronautique est, depuis sa naissance, porteuse de nouvelles technologie et innovations. Les améliorations vont des moteurs à pistons du début du siècle au développement des piles à combustibles pour les missions spatiales.
L'aéronautique a catalysé de nombreuses améliorations pour le moteur à combustion interne : de l'amélioration du rapport poids/puissance à l'injection essence en passant par la diminution de la consommation spécifique.

Mais les besoins grandissants de performance de la 2ième Guerre Mondiale sonnent le glas du monopoles des moteurs à pistons dans l'aviation qui ne peuvent pas rivaliser avec les turbopropulseurs puis avec les turboréacteurs.

Néanmoins, l'aviation légère de tourisme reste un marché stable pour les moteurs à pistons qui sont développés dans une optique de légèreté, performances (Cs et Puissance/Encombrement réduit) mais surtout fiabilité.

Bibliographie

Aéronautique, Astronautique, Aérodynamique – B. Demazet
Collection Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 1976

Toute l'Aviation n°1 et 3
Editions Atlas

Science et Vie spécial Aviation 1991 et 1998

Propulseurs aéronautiques –P.Lepourry et R. Ciryci
Collection Formation Pilote

Le grand livre des Chasseurs. – W.Green et G.Swanborough.

The pictoral History of fighther aircraft – B.Yenne et T.Bebolsky.

Sites internet officiels:

Teledyne Continental Motors
http://www.tcmlink.com/
JPX
http://www.leroyent.com/jpxpage.htm
Textron Lycoming
http://www.lycoming.textron.com/
HCI Aviation
http://www.usmo.com/~hci/

Sites internet personnels :

10 lies about pistons engines
http://www.avweb.com/articles/englies.html
Bases théoriques de l'aviation
http://www.users.skynet.be/zenair/bases_aviations.htm
Reciprocating-engine operation principles
http://www.allstar.fiu.edu/aero/flight62.htm
Wright Brothers History: The Tale of the Airplane
http://www.wam.umd.edu/~stwright/WrBr/taleplane.html
See how it flies
http://www.monmouth.com/~jsd/how/
Major Contributors to the Evolution of Aircraft Design
http://www.mae.ncsu.edu/courses/mae371/
Propellers lecture notes
http://www.letu.edu/undergraduate/academics/class-resources/avtc/3662/robinson/props1.htm

Annexes