

Approche simplifiée du principe de fonctionnement des hélices

Partie 1

L'objectif est de décrire le plus simplement possible un élément fondamental de l'aviation sans recours abusif aux formules et en essayant d'en expliquer les principes de fonctionnements.

Un peu d'histoire comme ça en passant.....	2
Comment ça marche ? (En très simplifié).....	2
Bon on a une formule.Et alors ?.....	3
Pourquoi parles t on de puissance pour une propulsion helice et de poussée pour un turboréacteur ?.....	6
Le pas d'helice ça sert à quoi et comment ça marche ?.....	6
Et il n'y a qu'un seul type d'hélices ?.....	6
On a tout vu ?.....	8

Ce document n'a pas la prétention de tout expliquer en 8 pages, et les spécialistes n'y apprendront rien. Il n'a pas vocation d'approfondir un point ou un autre, il fera sûrement hurler les puristes par certains raccourcis dans certaines explications.

Mais ils ne vous visent pas vous mais ceux qui s'intéressent à l'aviation et qui veulent juste se renseigner, apprendre un peu plus et surtout démystifier un aspect de l'aéronautique. Qui, il faut bien l'avouer peu paraître obscur quand on y connaît rien, s'éclaircit quand on commence à s'y intéresser et redevient franchement obscur quand on progresse dans le domaine.

L'Hélice est le premier système mécanique qui a assuré l'autopropulsion des engins volants, sa première application date de l'avènement de la marine à vapeur à partir de la première moitié du 19ème siècle. Les avènements des théories de la mécanique des fluides ont permis d'extrapoler les lois physiques gouvernant le comportement de ces hélices archaïques marine en hélices aériennes modernes. Nous verrons que la conception d'une hélice impose une démarche rigoureuse et qu'elle est le point de rencontre de multiples disciplines qui cohabitent avec bonheur (chimie, polymère, fluidiques, thermiques, résistance des matériaux, électromagnétisme...). Egalement nous constaterons que bien qu'ayant failli être supplanté par les turbomachines, elle revient désormais en force et qu'une sorte de cohabitation s'impose pour la plus grande diversité du monde aérien.

Un peu d'histoire comme ça en passant.

Si nous faisons abstraction des moulins à vents l'ancêtre de l'hélice aérienne (par ce termes nous entendons également les voilure tournantes des hélicoptères) est l'hélice marine.

Les premières hélices n'étaient ni plus ni moins qu'une vis d'Archimède à deux filets dont la longueur était égale au pas géométrique (comme un cylindre entouré par la double hélice de l'ADN), ce qui est d'ailleurs la vraie représentation géométrique du terme « hélice », ce qu'on appelle aujourd'hui ainsi n'est pas en toute rigueur une hélice mais un « rotor aubé », cela trahit cependant l'origine du concept.

Le commandant d'un navire qui avait vu son hélice réduite accidentellement à la moitié de sa longueur constata, non sans surprise, que la vitesse de son navire en était augmentée. Cette constatation amena à faire de plus amples recherches dans le domaine pour des raisons purement commerciales. On arriva assez rapidement à un design proche de ce que l'on appelle « hélice » aujourd'hui. L'air étant un fluide au même titre que l'eau, lors des balbutiements de l'aviation autopropulsée c'est tout naturellement que les concepteurs orientèrent leurs choix vers l'hélice marine qui devint du fait aérienne. Bien sûr des adaptations étaient nécessaires mais le concept était là.

Comment ça marche ? (En très simplifié)

L'objectif d'une hélice est de faire varier la quantité de mouvement d'un fluide pour en récupérer une énergie propulsive transmise à l'avion (ou l'hélicoptère).

L'hélice en tournant et du fait de son profil vrillé communique une partie de son énergie de rotation au fluide (notamment par la composante tangentielle provenant de la vrille de la pale). Cette dernière augmente son énergie intrinsèque mécanique, Or l'énergie mécanique est la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique. Si on considère que l'avion suit une trajectoire horizontale, alors l'énergie potentielle ne varie pas et l'énergie cinétique varie. Ce qui revient à augmenter la vitesse du fluide après son passage dans l'hélice (*Cette hypothèse n'est pas des plus pertinentes car les conditions de variations de l'énergie potentielle du fluide ne sont pas aussi triviales mais cela explique bien que en majorité seul l'énergie cinétique est affecté*)

Ainsi on peut utiliser par l'intermédiaire de l'hélice le théorème de la quantité de mouvement à notre avantage (le même qui est l'origine de la poussée des jets).

Ce dernier postule que $T = D(V_1 - V_2)$

Avec : -T force tractive de l'hélice

-D débit massique du fluide dans la section circulaire défini par l'hélice

-V1 vitesse du fluide à l'origine

-V2 vitesse du fluide accéléré par l'hélice.

Cette dernière force compensera la traînée de l'avion et participera au quatuor de forces permettant la sustentation d'un avion dans les airs.



Bon on a une formule. Et alors ?

Cette relation toute bête est intéressante car au-delà que d'exposer dans sa magnificence à la vue de tout son superbe symbolisme mathématique, elle permet de tout simplement appréhender le domaine d'efficacité maximale d'une hélice. Tout cela au prix d'une ou deux manipulations mathématiques basiques.

Si on admet que la Puissance est le produit d'une force par la vitesse ($P = T \times V$)

Alors on tire de l'expression précédente la puissance propulsive $P_p = V_2 \times D (V_1 - V_2)$

L'énergie transmise au fluide se déduit du théorème de l'énergie cinétique (rappelons que seule l'énergie cinétique du fluide varie du fait de l'action de l'hélice)

La variation de l'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces extérieures

(Avec m masse du fluide)

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2) = \sum W_{2 \rightarrow 1}$$

Et Puissance = travail / temps (d'exercice de ce travail)

Donc on tire la puissance transmise au fluide

$$P_f = \frac{1}{2} x \frac{m}{t} x (V_2^2 - V_1^2)$$

Or m/t correspond au débit massique D. Ce qui donne

$$P_f = \frac{1}{2} x D x (V_2^2 - V_1^2)$$

Ce qui donne le rendement propulsif

$$\eta = \frac{P_p}{P_f} = \frac{2V_1}{V_2 + V_1}$$

C'est cette dernière expression que nous voulions atteindre. Que pouvons nous conclure de tous cela ? Et bien pas mal de choses qui s'y cache innocemment mais qui ne demande qu'à se montrer.

Si nous avons V_2 très proche de V_1 alors le rendement propulsif est très proche de 1 ce qui est un superbe cas, mais cela signifie également que

-1) le fluide n'a acquis que peu de vitesse donc la force de traction de l'hélice est très faible (vitesse de rotation de l'hélice faible). Donc l'avion doit avoir une voilure adaptée et une structure très légère cependant la consommation sera des plus réduites et le rayon d'action extrêmement important au vu du carburant emporté. Ce sera d'autant plus marqué que la vitesse réduite de l'avion entraînera une traînée à compenser d'autant plus petite (la traînée est au carré de la vitesse de vol).

-2) la force tractive est également fonction du débit massique. Or ce dernier est la quantité d'air traversant la section circulaire défini par le diamètre de l'hélice. Donc si comme on l'a vu, les vitesses de rotations les plus faibles impliquent le meilleur rendement énergétique mais une faible force de traction, alors en augmentant considérablement le diamètre de l'hélice on augmente le débit massique et du coup la force tractive.

Les premiers et deuxièmes points sont mis superbement en œuvre dans la conception des avions solaires. On voit de grandes hélices battre lentement pour tirer des avions à la structure

hyper légère mais qui se contentent de l'énergie solaire pour s'alimenter du fait de leur très bon rendement.

Le deuxième point explique également le concept des multi moteurs de la seconde guerre.

La principale problématique des bombardiers de la seconde guerre est le rayon d'action. Pour avoir un meilleur rayon d'action il faut un meilleur rendement propulsif .Or technologiquement les moteurs de chasseurs et de bombardiers de l'époque sont très semblables. (Voire les même parfois)

il faut une vitesse de rotation plus faible que sur un chasseur (dans une certaines mesure) pour améliorer ce rendement mais la force tractive de l'hélice va diminuer . Or la force tractive doit permettre de soulever une masse d'autant plus importante que l'on souhaite emmener le plus de charge utile possible. Pour soulever cette charge tractive il faut une portance plus importante donc une voilure plus grande, d'où une structure encore plus imposante. Alors mettons quatre hélices !!! Si on met les 4 hélices, on augmente certes encore la masse structurelle mais on peut augmenter le diamètre de l'hélice et le multiplier par 4 ! On augmente la force tractive et la grande voilure autorise à voler à haute altitude ou l'air est rare et la traînée en conséquence ce qui augmente la vitesse sol tout en gardant la vitesse air là ou le rendement propulsif est le meilleur. On allonge le rayon d'action tout en en augmentant la charge utile, le tout finalement au prix d'une légère diminution de la vitesse de croisière (et encore)

Voilà pourquoi les bombardiers sont multi moteurs du point de vue de l'hélice (B17, B24 etc.. Certains chasseurs devinrent bimoteurs pour les mêmes raisons pour augmenter leurs rayons d'actions selon le même principe. Ou pour améliorer leurs vitesses à rayon d'actions identiques, cependant le surpoids rendait le gain marginal dans cette optique uniquement et un compromis des deux étaient le plus courant (P-38 , whirlwind , beaufighter ect ect)

Un exemple de cette application se trouve dans le F-4U américain, quelque part la théorie des hélices a défini son allure caractéristique. Nous nous retrouvons donc avec un chasseur équipé d'un moteur de 2200 Cv contrairement à ses contemporains qui titre en général au plus 1500 Cv. Or pour éviter que ce surcroît de puissance ne nuisent trop à ses performances tactiques il est important d'obtenir un bon rendement propulsif. Comme on l'a vu cela implique une vitesse de rotation de l'hélice faible, donc des performance en combat dégradé. Il faut donc arriver au meilleur compromis entre vitesse de rotation et diamètre de l'hélice pour l'emploi de l'avion tel que défini à l'origine du projet. Cela a conduit les ingénieurs à dimensionner une hélice de plus de 4m de diamètre. Cette dernière imposante dimension a imposé de relever le nez de l'avion en dessinant un dièdre en W caractéristique de cet avion.

Mais tout n'est qu'affaire de compromis et tout compromis a ses limites. Concrètement on peut tirer d'une manière générale le postulat suivant concernant les hélices :

Pour une traction requise, devant compenser la traînée de l'avion, on cherchera à peu accélérer un grand volume d'air si un avion évolue à faible vitesse (et inversement, on cherchera à beaucoup accélérer un petit volume pour un avion à grande vitesse, d'où l'essor des turboréacteurs). Du seul point de vue du rendement propulsif, l'hélice est donc meilleure aux basses vitesses.

Pourquoi parle t on de puissance pour une propulsion helice et de poussée pour un turboréacteur ?

On a vu que l'hélice tournait afin de transférer l'énergie du moteur au fluide. Qui en retour fait avancer l'avion. On a vu que les plus grandes forces propulsives impliquaient les plus grand diamètre d'hélice au plus grandes vitesses de rotation. Or les grandes pales sont lourdes et ont beaucoup de traînée intrinsèque. Donc il faut un plus grand couple moteur. Or la puissance s'exprime $P = C\omega$ avec P puissance en Watts, C couple en Nm et ω en rad/s.

Cette relation a l'avantage de relier les deux principales variables de fonctionnement d'une hélice.

Mais cela est honteusement simplifié, effectivement, et nous allons nous faire un plaisir de complexifier tout cela (raisonnablement bien sur, nous ne résoudrons pas Naviers-Stokes dans un écoulement instationnaires sur le profil de pales en transsonique, pas de crainte a avoir)

Le pas d'hélice ça sert à quoi et comment ça marche ?

La plupart d'entre nous avons conduit une voiture ou une moto munie d'une boîte de vitesse. Le système de pas d'hélice est semblable (grossièrement). Il s'agit d'optimiser la puissance transmise en jouant sur le calage de la pale afin d'agir sur le couple de rotation de l'hélice. Ceci dans le but avoué d'adapter la puissance délivrée par le moteur au plus juste des besoins du vol. si l'avion est en phase de décollage il a besoin d'une grande force tractive pour accélérer suffisamment, c'est le « petit pas ». (Comme passer la première pour démarrer en voiture). L'avion possède donc la plus grande puissance mais le rendement le plus mauvais. Une fois en vol établi, on diminue le pas d'hélice pour diminuer la consommation et améliorer le rendement : « le grand pas ».

Historiquement les hélices étaient à pas constant, ce procédé n'arriva que tardivement car il implique une mécanique complexe dans le rotor. Cependant il fut adopté pour des raisons de distances franchissables maximales. Au début le calage ne pouvait varier qu'entre deux positions et uniquement en vol, aujourd'hui des régulateurs permette une variation continue de la valeur de calage en fonction des conditions de vol.

Cependant l'hélice à pas constant présente encore des avantages notamment au niveau vibratoire et du rendement qui est théoriquement le meilleur dans le cas d'un pas constant.

Et il n'y a qu'un seul type d'hélices ?

Non, il y a plusieurs types d'hélices : les contrarotatives, les carénées et les rapides qui confinent avec les turbo réacteurs dans leur plages d'utilisation.

Les contrarotatives présentent l'avantage de récupérer les pertes rotationnelles , d'annuler le roulis induit par le couple de rotation du moteur (en partie). L'hélice arrière annule le mouvement de rotation du fluide créé par l'hélice avant et annule ainsi les pertes d'énergie rotationnelle. Les gains de rendement peuvent atteindre 6 à 10 % voire plus. Un avantage est que les hélices de ce type ont tendances à être 20% plus petites pour répondre au même cahier des charges. Cependant la mécanique est complexe pour les mettre en œuvre. Malgré tout cela reste très intéressant pour les voilures tournantes, car au prix d'une complexité mécanique du rotor central accrue on se débarrasse d'un rotor de queue encombrant au niveau mécanique également.

Les carénées permettent d'éviter la formation de tourbillons marginaux en bout de pales, quand l'intrados rejoint l'extrados, qui nuit aux caractéristiques aérodynamiques des pales. En carénant l'hélice l'intrados et l'extrados se trouvent prolonge de façons artificielles sur la « voilure de la carène » ce qui revient à une pale d'allongement infini. De plus une carène bien étudiée peut éventuellement accélérer la vitesse de l'air (Et pas le débit !) en amont de l'hélice ce qui augmentera ses performances. Cependant à très hautes vitesses la carène provoque une traînée trop importante qui annule ses bienfaits.

Les hélices rapides sont impliquées quand on arrive aux alentours de mach 0.8. A ces vitesses l'écoulement devient supersonique sur un point du profil de la pales ce qui augmentent drastiquement la traînée. Il faut donc augmenter le nombre de pales pour diminuer les efforts de tractions, adopter un profil en flèche pour localement descendre le nombre de mach, et rendre la pale la plus fine possible pour diminuer la traînée. Bref un joli coupe oignons, on confine dans l'approche avec les aubes de turboréacteurs, cependant ces hélices encore en développement, bien qu'ayant démontré un très fort potentiel ont quelques soucis à résoudre :

- bruit acoustiques extrêmement élevées.
- Problème vibratoire conséquent.



On a tout vu ?

Mais certainement pas, il reste à aborder les problèmes acoustiques et vibratoires, les méthodes de calcul d'une hélice, les procédés de fabrication et le procédé de choix et d'intégration d'une hélice en fonction d'un projet aéronautiques.

Ca sera pour la prochaine fois si vous le souhaitez.

J'ai volontairement mis peu d'illustrations pour deux raisons principales :

- 1) ça n'est pas libre de droit en général
- 2) malgré le fait que « un croquis vaut mieux qu'un long discours » parfois on a tendance a se réfugier abusivement dans la présentation d'un dessin. donc j'ai essaye d'expliquer en faisant appel a des notions simples et sans schéma

Je tiens a remercier pour leur lumineux cours et publications :

- Mr Aucher Ingénieur général de l'armement
- Mr Bousquet de l'école supérieur des techniques aérospatiales
- Mr Philippe Chef de projet Hélices à Ratier Figeac

Je ne fais que vous paraphraser au final, tout a déjà été dit.

Patryn